

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO
ABNT 1045 UTILIZANDO PROJETO DE PARÂMETRO
ROBUSTO

Autor: Tarcísio Gonçalves de Brito

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Co-Orientador: Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

Itajubá, Dezembro de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO
ABNT 1045 UTILIZANDO PROJETO DE PARÂMETRO
ROBUSTO

Autor: Tarcísio Gonçalves de Brito

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

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

Itajubá, Dezembro de 2012

M.G. – Brasil

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

B862o

Brito, Tarcísio Gonçalves de
Otimização do Fresamento de Topo do Aço ABNT 1045 Utilizando Projeto de Parâmetro Robusto / Tarcísio Gonçalves de Brito. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2012.
125 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira.
Coorientador: Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Fresamento de Topo. 2. Projeto de Parâmetro Robusto (PPR). 3. Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). 4. Erro Quadrático Médio (EQM). I. Ferreira, João Roberto, orient. II. Paiva, Anderson Paulo de, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO
ABNT 1045 UTILIZANDO PROJETO DE PARÂMETRO
ROBUSTO

Autor: Tarcísio Gonçalves de Brito

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro - UNESP

Prof. Dra. Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva - IEPG/UNIFEI

Prof. Dr. João Roberto Ferreira, Presidente - IEPG/UNIFEI

Dedicatória

À minha esposa, amiga e companheira Maria de Fátima da Costa Brito e ao meu filho, Hércules da Costa Brito, pela tolerância e compreensão.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por fazer parte da minha vida, abençoando-me com a força, a sabedoria e a persistência necessárias para o alcance dos meus objetivos e ideais.

À minha família, pela educação e pelo exemplo de vida e de seres humanos.

Aos professores e amigos, João Roberto Ferreira e Anderson Paulo de Paiva, pela orientação, pela paciência e importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa amiga e companheira Maria de Fátima da Costa Brito e ao meu filho, Hércules da Costa Brito, pela tolerância e compreensão.

Aos funcionários do laboratório de mecânica da UNIFEI, Luiz Fernando Rodrigues Alves e José Veríssimo, pela ajuda nas atividades de laboratório.

Ao professor Marcos Aurélio, pelo apoio no laboratório e aos amigos de Doutorado e Mestrado, José Henrique de Freitas Gomes, Rogério Peruchi, Paulo Henrique da Silva Campos, Michele, pela colaboração em momentos importantes do trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, em especial José Henrique de Freitas Gomes, Rogério Peruchi, Paulo Henrique da Silva Campos, pela convivência, amizade e apoio.

A todos os professores do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

A todos os meus amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável, mas não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo e do que é moralmente correto.”

Albert Einstein

Resumo

BRITO, T. G. *Otimização do Fresamento de Topo do aço ABNT 1045, utilizando Projeto de Parâmetro Robusto.* 2012. 125 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

O fresamento do aço ABNT 1045 vem ganhando destaque, no meio industrial, nos últimos anos, por permitir que as peças usinadas sejam obtidas com ferramentas de baixo custo. No entanto, visando garantir a qualidade final dos produtos, é importante que o procedimento de usinagem por fresamento seja bem planejado, para que as fresas tenham desgastes amenizados no decorrer do processo, apresentando ao mesmo tempo bons índices de produtividade e ocorrência nula de retrabalho em peças. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a otimização do fresamento de topo do aço ABNT 1045, utilizando insertos de metal duro revestido de nitreto de titânio (TiN). Buscou-se identificar a combinação ótima dos parâmetros de entrada que foram velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), penetração de trabalho (a_e) e profundidade de usinagem (a_p). As respostas analisadas incluíram os parâmetros de rugosidades R_a e R_t , sob a influência do fluido de corte, como ruído. Para a obtenção dos resultados ótimos, utilizou-se: Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para modelagem das respostas, Erro Quadrático Médio (EQM) para otimização das respostas. Os resultados mostram que os parâmetros analisados foram significativos, sendo que o grau de importância entre eles varia de acordo com as respostas de interesse. A estratégia de ponderação proposta para o Erro Quadrático Médio permitiu alcançar resultados ótimos, apesar da existência de outras inúmeras variáveis de ruído no processo de fresamento de topo. Somente as condições do desgaste da ferramenta, concentração e vazão de fluido foram selecionadas e são responsáveis por gerar parte da variação nas diversas condições de ensaio.

Palavras-chave

Fresamento de Topo, Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), Erro Quadrático Médio (EQM), Otimização.

Abstract

BRITO, T. G. (2012), *Optimization of AISI 1045 Steel end Milling using Robust Parameter Design*. 2012. 125 p. MSc. (Dissertation), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá

The AISI 1045 steel milling of has come to prominence in the industrial environment in recent years, allowing machined parts are obtained with low-cost tools. However, in order to ensure the quality of the end product, it is important that the procedure for milling process is well planned so that the mill have eased wear during the process, while providing good levels of productivity and rework occurrence null parts. In this context, this work aims at the optimization of AISI 1045 steel end milling, using carbide inserts coated with titanium nitride (TiN). It was carried to identify the optimal combination of input parameters that were cutting speed (v_c), feed per tooth (f_z), penetration of work: (a_e) machining depth (a_p). The responses analyzed included surface roughness (R_a and R_t), under cutting fluid influence, such as noise. To obtain the optimal results, The response Surface Methodology (RSM) to model the responses end Mean Square Error (MSE) for optimization of responses were used. The results show that the analyzed parameters were significant, with the degree of importance between them varies with the responses of interest. The weighting strategy proposed for the Mean Square Error (MSE) allowed to achieve optimal results, despite the existence of numerous other variables noise in end milling process. Only the conditions of tool wear, fluid flow and concentration were selected and are responsible for generating the changes in the various testing conditions.

Keywords

End Milling, Robust Parameter Design (RPD), Response Surface Methodology (RSM), Mean Square Error (MSE), Optimization.

Sumário

| | |
|--|-------------|
| SUMÁRIO | I |
| LISTA DE FIGURAS | IV |
| LISTA DE QUADROS | VI |
| LISTA DE TABELAS | VII |
| SIMBOLOGIA | VIII |
| LETRAS LATINAS | VIII |
| LETRAS GREGAS | IX |
| ABREVIATURAS E SIGLAS | X |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Considerações Iniciais | 1 |
| 1.2 Objetivo | 3 |
| 1.3 Objetivos Especificos | 3 |
| 1.4 Importância do Tema | 3 |
| 1.5 Limitações | 4 |
| 1.6 Conteúdo | 4 |
| CAPÍTULO 2 | 6 |
| REVISÃO DA LITERATURA | 6 |
| 2.1 Princípio da Operação de fresamento | 6 |
| 2.2. Escolha da Fresa para Operações de Superfície Plana | 7 |
| 2.2.1 Diâmetro da fresa | 7 |
| 2.2.2 Número de dentes | 11 |
| 2.3 Material da Pastilha | 13 |
| 2.3.1 Materiais para fresa | 14 |
| 2.3.2 Metal duro revestido (HC) | 15 |
| 2.4 Desgaste da Ferramenta | 16 |
| 2.4.1 Avarias das ferramentas | 17 |
| 2.4.2 Mecanismos de desgastes das ferramentas | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.3 Medição do desgaste da ferramenta de corte----- | 19 |
| 2.5 Integridade Superficial ----- | 20 |
| 2.5.1 Sistemas de medição da rugosidade ----- | 22 |
| 2.5.2 Parâmetros de rugosidade (R_a)----- | 22 |
| 2.5.3 Parâmetro de rugosidade (R_t) ----- | 23 |
| 2.5.4 Mecanismo de formação do cavaco ----- | 24 |
| 2.6 Fluido de Corte ----- | 25 |
| 2.6.1 Fluido de corte nos processos de usinagem ----- | 26 |
| 2.6.2 Funções dos fluidos de corte ----- | 26 |
| 2.6.3 Os fluidos de corte como refrigerante----- | 27 |
| 2.6.4 Os fluidos de corte como lubrificante ----- | 27 |
| 2.6.5 Classificação dos fluidos de corte ----- | 28 |
| 2.6.6 Óleos integrais----- | 29 |
| 2.6.7 Fluidos miscíveis em água----- | 29 |
| 2.6.8 Emulsões ----- | 30 |
| 2.7 Projeto e Análise de Experimentos (DOE)----- | 31 |
| 2.8 Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) ----- | 34 |
| 2.9 Arranjo Composto Central (CCD)----- | 37 |
| 2.10 Projeto de Parâmetro Robusto (PPR)----- | 39 |
| 2.11 Arranjo Combinado ----- | 43 |
| 2.12 Otimização Robusta das Características de Qualidade ----- | 43 |
| CAPÍTULO 3 _____ | 45 |
| PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL _____ | 45 |
| 3.1 Material----- | 45 |
| 3.2 Máquina e Ferramentas ----- | 45 |
| 3.3 Definição dos Parâmetros----- | 47 |
| 3.4 Instrumentos de Medição ----- | 50 |
| 3.5 Problema de Pesquisa ----- | 51 |
| 3.6 Método Experimental ----- | 52 |
| 3.7 Definição da Matriz Experimental ----- | 53 |
| 3.8 Execução dos Experimentos----- | 57 |
| CAPÍTULO 4 _____ | 60 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO _____ | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1 Resultados dos Ensaio Preliminares ----- | 60 |
| 4.2 Resultados dos ensaios definitivo ----- | 66 |
| 4.3 Modelagem Matemática das Respostas----- | 72 |
| 4.4 Adequação e Ajuste dos Modelos ----- | 75 |
| 4.5 Obtenção das Superfícies de Resposta----- | 78 |
| 4.6 Otimização do Erro Quadrático Médio (EQM)----- | 83 |
| 4.7 Análise entre as Respostas----- | 84 |
| 4.8 Validação dos Resultados----- | 90 |
| 4.9 Considerações Finais ----- | 93 |
| CAPÍTULO 5 _____ | 95 |
| CONCLUSÕES _____ | 95 |
| 5.1 Conclusões dos Ensaio Preliminares----- | 95 |
| 5.2 Conclusões dos Ensaio Definitivos ----- | 96 |
| 5.3 Sujestões para Trabalhos Futuros----- | 97 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____ | 98 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Exemplos de fresamento vertical com fresas de topo (Sandvik, 2011). ----- | 7 |
| Figura 2.2 – Esquema do fresamento frontal (Diniz et al. 2008). ----- | 8 |
| Figura 2.3 – Posicionamento da aresta de corte (Sandvik, 2011). ----- | 9 |
| Figura 2.4 – Forças e deslocamentos no fresamento concordante. (1) sentido da força de avanço; (2) sentidos do avanço da mesa; (3) pontos de contato entre porca e fuso (Diniz et al., 2008). ----- | 10 |
| Figura 2.5 - Metal duro. (A) grãos médios a grossos; (B) grãos finos. (Sandvik, 2011).----- | 15 |
| Figura 2.6 – Desgaste de flanco (Sandvik, 2011).----- | 16 |
| Figura 2.7 – Desgaste de cratera (Sandvik, 2011). ----- | 16 |
| Figura 2.8 – Desgaste de entalhe (Sandvik, 2011). ----- | 17 |
| Figura 2.9 – Desgaste uniforme de flanco conforme ISO 8688-1 (1989). ----- | 19 |
| Figura 2.10 – Irregularidades de Superfícies. (A) textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade; (B) ondulações; (C) erro de forma (Oliveira, 2004). ----- | 21 |
| Figura 2.11 – Regra para definição da linha média. ----- | 22 |
| Figura 2.12 – Desvio médio aritmético R_a (Agostinho et al.,2004). ----- | 23 |
| Figura 2.13 – Rugosidade R_t distância entre pico e vale (Agostinho et al., 2004). ----- | 23 |
| Figura 2.14 – Diagramas esquemáticos da formação do cavaco (Trent e Wright, 2000). ----- | 24 |
| Figura 2.15 – Arranjos CCD. (a) rotacionalidade do CCD; (b) CCD para 2 Fatores; (Adaptado de Paiva, 2006). ----- | 37 |
| Figura 2.16 – Tipos de CCD.----- | 38 |
| Figura 3.1 – Centro de usinagem Fadal (UNIFEI). ----- | 46 |
| Figura 3.2 – Cabeçote com insertos para o fresamento de topo. ----- | 47 |
| Figura 3.3 – Ferramentas utilizadas; (A) ferramenta nova. (B) ferramenta desgastada. ----- | 49 |
| Figura 3.4 – Montagem do microscópio Olympus. ----- | 50 |
| Figura 3.5 – Rugosímetro utilizado no experimento. ----- | 50 |
| Figura 3.6 – Processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045. ----- | 52 |
| Figura 4.1 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte. ----- | 60 |
| Figura 4.2 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte. ----- | 61 |
| Figura 4.3 – Desgaste de flanco máximo do inserto ($v_b = 0,19$ mm). ----- | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.4 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte. ----- | 62 |
| Figura 4.5 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte. ----- | 63 |
| Figura 4.6 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte. ----- | 64 |
| Figura 4.7 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte. ----- | 64 |
| Figura 4.8 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte. ----- | 65 |
| Figura 4.9 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte. ----- | 65 |
| Figura 4.10 – Efeito da interação entre profundidade de usinagem e avanço por dente sobre a rugosidade R_a μm . ----- | 81 |
| Figura 4.11 – Efeito da interação entre avanço por dente e velocidade de corte sobre a rugosidade R_a μm . ----- | 81 |
| Figura 4.12 – Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_a μm . ----- | 81 |
| Figura 4.13 – Efeito da interação entre avanço por dente e profundidade radial de corte sobre a rugosidade R_t μm . ----- | 82 |
| Figura 4.14 – Efeito da interação entre avanço por dente e velocidade de corte sobre a rugosidade R_t μm . ----- | 83 |
| Figura 4.15 – Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_t μm . ----- | 83 |
| Figura 4.16 – Fronteira de Pareto. (a) para o par R_a , R_t . (b) para o par EQM_1 , EQM_2 . ----- | 89 |

Lista de Quadros

| | |
|--|----|
| Quadro 2.1 – Aplicação das fresas de acordo com o tipo de passes. ----- | 13 |
| Quadro 2.2 – Características fundamentais das principais técnicas do projeto e análise de experimento. ----- | 33 |
| Quadro 3.1– Composição química (%) do aço ABNT1045.----- | 45 |
| Quadro 3.2– Ensaio preliminares. ----- | 48 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Variáveis de controle selecionadas. ----- | 49 |
| Tabela 3.2 – Variáveis de ruído selecionadas. ----- | 49 |
| Tabela 3.3 – Matriz experimental - arranjo combinado. ----- | 55 |
| Tabela 4.1 – Resultados experimentais do arranjo combinado. ----- | 67 |
| Tabela 4.2 – Coeficientes estimados. ----- | 74 |
| Tabela 4.3 – Análise de variância para rugosidade (R_a).----- | 76 |
| Tabela 4.4 – Análise de variância para a rugosidade (R_t).----- | 76 |
| Tabela 4.5 – Análise de variância ajustado (R_a).----- | 77 |
| Tabela 4.6 – Análise de variância ajustado R_t . ----- | 77 |
| Tabela 4.7 – Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos finais. ----- | 78 |
| Tabela 4.8 – Análise de regressão para o parâmetro de rugosidade R_a e R_t .----- | 79 |
| Tabela 4.9 – Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045. ---- | 86 |
| Tabela 4.10 – Parâmetro otimizado para R_a e R_t .----- | 88 |
| Tabela 4.11 – Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045. -- | 90 |
| Tabela 4.12 – Resultados dos experimentos de confirmação. ----- | 91 |
| Tabela 4.13 – Análise de variância para experimento de confirmação de R_a . ----- | 91 |
| Tabela 4.14 – Análise de variância para experimento de confirmação de R_t ----- | 92 |
| Tabela 4.15 – Experimentos de confirmação para parâmetro de rugosidades R_a e R_t . ----- | 92 |

Simbologia

Letras Latinas

| | | |
|-------|--|------------|
| v_c | Velocidade de corte | m/min |
| f_z | Avanço por dente | $mm/dente$ |
| a_e | Penetração de trabalho | mm |
| a_p | Profundidade de usinagem | mm |
| R_a | Rugosidade Média | |
| R_t | Rugosidade total | |
| T_y | Alvo da resposta y | |
| v_b | Desgaste de flanco da ferramenta | |
| w | Peso atribuído para a resposta | |
| x | Variáveis independentes | |
| y | Resposta de interesse | |
| Z_1 | Desgaste de flanco v_b Ruído | |
| Z_2 | Concentração do fluido (C) (%) Ruído | |
| Z_3 | Vazão do fluido (Q) (ml/min) Ruído | |

| | |
|-------------|---------------------------------------|
| m/min | Metro por minuto |
| mm | Milímetros |
| $P - value$ | Valor P ou probabilidade estimada |
| R_2 | Coefficiente de determinação |
| $R_2(adj)$ | Coefficiente de determinação ajustado |
| r | Ângulo de posição da ferramenta |

Letras Gregas

| | |
|---------------|--|
| α | Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais |
| β | Coefficiente do modelo matemático a ser estimado |
| ε | Erro experimental |
| μ | Média experimental da resposta |
| σ | Desvio-padrão experimental da resposta |
| σ^2 | Variância |
| Σ | Somatório |
| r | Espaço experimental |

Abreviaturas e Siglas

| | |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| 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 |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| DOE | Projetos de Experimentos ou <i>Design of Experiments</i> |
| EQM | Erro Quadrático Médio ou <i>Mean Square Error (MSE)</i> |
| MSR | Metodologia de Superfície de Resposta |
| NBR | Norma Brasileira |
| OLS | Mínimos Quadrados Ordinários ou <i>Ordinary Least Square</i> |
| S/N | Relação Sinal/Ruído |
| WLS | Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) ou <i>Weighted Least Square</i> |
| TiN | Nitreto de titânio |
| PPR | Projeto de Parametro Robusto |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A usinagem representa papel fundamental nos processos de fabricação dos mais variados ramos da indústria mecânica. Dentre os diversos processos de usinagem, o fresamento constitui um dos mais importantes pela sua produtividade e flexibilidade, devido ao fato da fresa poder se apresentar sob as mais variadas formas, confere a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas, podendo usinar variados formatos de peças (Diniz *et al.*, 2008). O lado negativo desta flexibilidade é que muitas variáveis são incorporadas ao processo, tornando-o um desafio quanto a sua otimização (Sandvik, 2011).

Desta maneira, a otimização do processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045 torna-se uma ação fundamental na redução dos tempos e custos de fabricação de peça. Durante o processo de fresamento, o comportamento dinâmico do conjunto máquina-ferramenta - peça - máquina é particularmente mais complexo devido à descontinuidade do corte e ao grande número de variáveis, dificultando estabelecer um modelo que relacione o comportamento do acabamento da superfície usinada e o desgaste das ferramentas de corte com a variação dos parâmetros de usinagem.

Nos últimos anos, grandes avanços tecnológicos foram obtidos, tanto nos materiais,

como nas máquinas-ferramentas. Isso fez com que a demanda dos fluidos de corte crescesse consideravelmente. A alta demanda causa competitividade que, por sua vez, exige o aumento da qualidade dos produtos. Outro fator que também influi no aumento da qualidade dos fluidos é a pressão exercida por Agências de Proteção Ambiental e Agências de Saúde, para que os produtos sejam comercializados com mais segurança e que sejam menos nocivos ao meio ambiente e ofereçam menos riscos ao operador (Machado *et al.*, 2009). Vários aspectos associados ao estudo dos fluidos de corte têm sido publicados na literatura, em muitos desses estudos referem-se aos processos de usinagem que utilizam fluidos de corte como meio de lubrificação e refrigeração da peça produzida Pereira *et al.*, (2005) e Sokovic *et al.* (2001).

A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e melhor acabamento de superfície, com baixo custo e sem poluição do meio ambiente. Dentro dos processos de usinagem, as ferramentas aquecem e sofrem desgastes que exigem trocas de suas arestas de corte. Além disso, há o aquecimento das peças usinadas, o que pode provocar efeitos indesejáveis como alterações nas dimensões pretendidas e geração de tensões internas que podem comprometer a utilização das mesmas (Machado *et al.*, 2009). Para minimizar os desgastes das ferramentas e o aquecimento das peças, vários recursos podem ser utilizados, dentre os quais o emprego de um fluido de corte (Trent *et al.*, 2000; Machado *et al.*, 2009; Diniz *et al.*, 2008). A rugosidade de uma superfície é definida pelas irregularidades finas ou erros micro-geométricas da ação inerente ao processo de corte. Sendo utilizada para controlar o processo de usinagem (Machado *et al.*, 2009). Na medida em que o desgaste das ferramentas se caracteriza como uma variável de difícil controle, a busca por condições de fresamento que propiciem melhor acabamento superficial e melhor integridade da superfície usinada tem sido o alvo dos trabalhos de vários pesquisadores (Kopac *et al.*, 2007; Reddy *et al.*, 2005; Ghani *et al.*, 2004).

A necessidade de processos cada vez mais eficientes e econômicos proporcionou que diversos métodos de otimização fossem desenvolvidos nas últimas décadas. Assim, métodos como o projeto de parâmetros robustos (PPR), segundo Montgomery (2005), é uma abordagem para a análise e melhoria de processos cujo foco é a determinação dos níveis das variáveis de controle visando aos seguintes objetivos: (1) garantir que a média das respostas do processo se estabeleça em um nível desejado e (2) garantir que a variabilidade em torno dos valores alvo seja a menor possível. Da mesma forma, a utilização de ferramentas estatísticas como o Projeto e Análise de Experimentos permite uma ampla compreensão a respeito de um dado fenômeno, o que tem contribuído substancialmente para a melhoria da

eficiência dos processos e aumento dos níveis de qualidades dos produtos.

A essência do projeto de parâmetro robusto é minimizar a variabilidade transmitida pelas variáveis de ruído ao sistema como um todo. Desta forma, algumas variáveis de ruído devem ser selecionadas adequadamente de modo a proporcionar variação nas variáveis de resposta do sistema. Apesar da existência de outras variáveis de ruído no processo de fresamento, somente as condições da ferramenta nova / desgastada e a concentração / vazão de fluido foram selecionadas por gerar parte da variação nas diversas condições de ensaio.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal otimizar o processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045 com ferramenta de metal duro, com arestas de corte novas e desgastadas usando diversas condições refrigeração, visando a otimização dos variáveis de respostas R_a e R_t

1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Demonstrar a aplicação do Projeto de Parâmetro Robusto (PPR) com arranjo combinado na otimização de múltiplas respostas. Visando a minimização da variância dos parâmetros das rugosidades R_a e R_t por meio da redução do Erro Quadrático Médio (EQM), auxiliadas pela Metodologia da Superfície de Resposta (MSR).

1.4 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O Projeto de Parâmetro Robusto (PPR) é uma metodologia introduzida por Taguchi (1986), esta metodologia busca desenvolver um projeto do ponto de vista da Engenharia de produto ou processo tal que os parâmetros especificados no mesmo o torne robusto aos efeitos dos ruídos que causam a variabilidade no desempenho (Box, 1988; Phadke, 1989). Com isso

esta pesquisa busca utilizar esta metodologia no processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045 que é realizado sob diversos fatores, as variáveis controláveis e as incontroláveis que provoca forte influência sobre a rugosidade da peça com dispersão aleatória. O Projeto de Parâmetro Robusto (PPR) permiti encontrar parâmetros de máquina-ferramenta adequados onde esta dispersão da rugosidade seja menor possível para a rugosidade R_a e R_t .

1.5 LIMITAÇÕES

O presente trabalho encontra-se limitado pelos seguintes elementos:

O processo de fresamento estudado foi do aço ABNT 1045 com fresa de topo com inserto de metal duro para análise de R_a e R_t . Variando-se velocidade de avanço (f_z), profundidade de usinagem (a_p), velocidade de corte (v_c), penetração de trabalho (a_e) com influencia na rugosidade R_a e R_t do corpo de prova. Portanto, os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros casos de usinagem com materiais diferentes.

1.6 CONTEÚDO

Esta dissertação está subdividida em cinco capítulos:

Capítulo 1: Apresenta a introdução, o objetivo, a importância do tema e suas limitações.

Capítulo 2: Apresenta a revisão da literatura desta pesquisa, onde são apresentados os principais conceitos relacionados ao processo de fresamento e uma análise das pesquisas anteriores desenvolvidas sobre esse tema. Quanto às técnicas de experimentação e otimização, discute-se o Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfícies de Resposta (MSR), Erro Quadrático Médio (EQM), Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), e os aspectos teóricos para a estratégia de ponderação para otimização.

Capítulo 3: Descreve o método experimental utilizado, detalhando os equipamentos empregados e as etapas seguidas em cada fase do estudo.

Capítulo 4: Apresenta primeiramente os resultados dos ensaios preliminares. Em seguida a modelagem das respostas, ajustes dos modelos, superfícies de respostas, otimização pelo Erro Quadrático Médio (EQM) possibilitando encontrar o melhor parâmetro de máquina-ferramenta e validação dos resultados utilizando.

Capítulo 5: Apresentando as conclusões, contribuições e sugestões para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PRINCÍPIO DA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO

Dentre os processos de usinagem, pode-se dizer que o fresamento, ainda que complexo, é um dos processos de usinagem com maior emprego na indústria, devido a aspectos como alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, entre outras (Marcelino *et al.*, 2004; Diniz *et al.*, 2008). A Figura 2.1 apresenta algumas operações de usinagem por fresamento de topo.

Segundo Diniz *et al.*, (2008), o processo de fresamento caracteriza-se principalmente pelos seguintes fatores:

- A ferramenta usada no processo, chamada de fresa, é multicortante, sendo provida de arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor de um eixo.
- O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo, fazendo com que cada uma das arestas cortantes retire uma porção de material.
- O movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, o que lhe dá a forma e a dimensão desejadas.

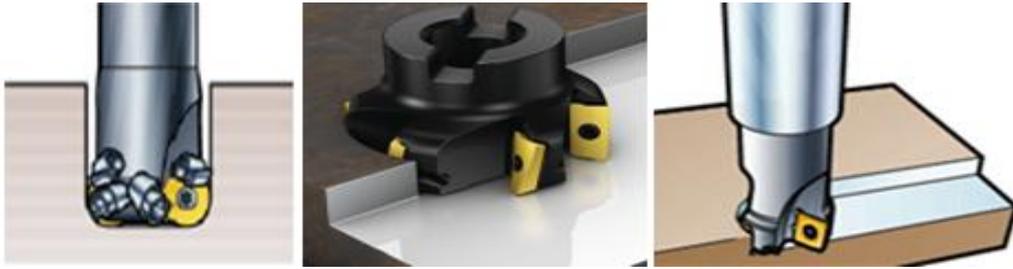


Figura 2.1 – Exemplos de fresamento vertical com fresas de topo (Sandvik, 2011).

2.2. ESCOLHA DA FRESA PARA OPERAÇÕES DE SUPERFÍCIE PLANA

Segundo Diniz *et al.* (2008), Sandvik (2011), Camuscu *et al.* (2005), para escolher uma fresa de topo, sugere-se a seguintes etapas:

- Diâmetro da fresa
- Número de dentes da fresa
- Material da pastilha

A seguir discorrer-se a sobre cada um destes tópicos, abordando os diversos fatores que influem nestas escolhas.

2.2.1 Diâmetro da fresa

Segundo Diniz *et al.* (2008), o principal fator de influência na escolha do diâmetro da fresa (D_c) é a largura da superfície fresada (a_e) conforme a Figura 2.2 (A). Se o diâmetro da fresa for igual ou pouco maior que a largura fresada, haverá valores de espessura de corte (h) muito pequenos na entrada e saída do dente no corte, o que vai gerar muita pressão de corte. Por outro lado, se o diâmetro da fresa for muito maior que a largura fresada, haverá uma fresa de custo elevado para aquela superfície, conforme a Figura 2.2 (B), também, o choque do dente da fresa com a peça e a saída do dente do corte pode acontecer de tal maneira que facilite o lascamento e quebra da pastilha. Assim, um valor adequado para o diâmetro da fresa é próximo daquele fornecido pela Equação 1 (Sandvik, 2011).

$$D_c = 1,3 \times a_e \quad (1)$$

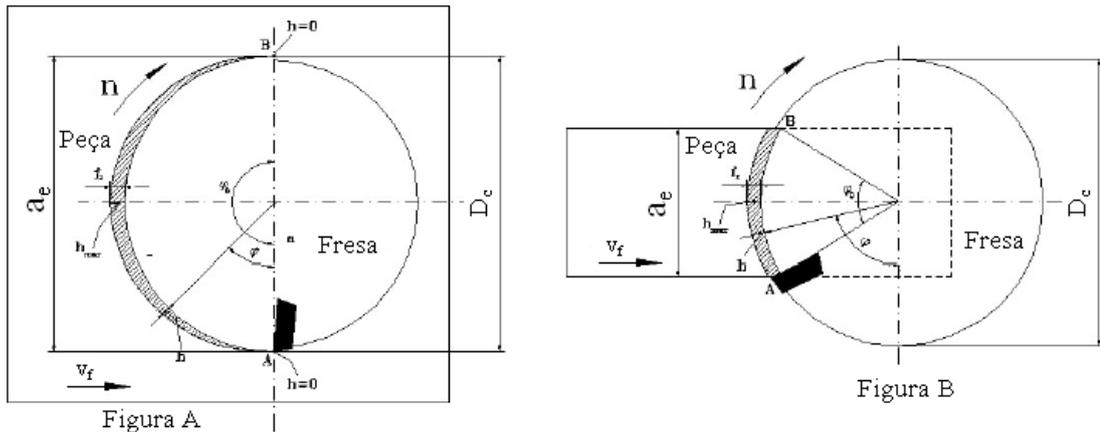


Figura 2.2 – Esquema do fresamento frontal (Diniz et al. 2008).

Quando se adota uma fresa com diâmetro menor que a largura fresada e, portanto, deseja-se fazer o corte em várias passadas laterais, é importante que o centro da fresa esteja dentro da largura cortada. A Figura 2.3 (A) ilustra esse caso em que o contato inicial é feito com a parte interior da pastilha, na qual a secção para resistir ao choque é maior (ângulo de entrada negativo). Quando a fresa de facear tem seu centro fora da largura da peça conforme Figura 2.3 (B), o corte começa com a parte extrema da pastilha tocando a peça (ângulo de entrada positivo), o que pode causar a quebra da aresta. Assim, deve-se continuar utilizando a equação 1 para se calcular a relação entre o diâmetro da fresa (D_c) e a penetração de trabalho (a_e) (Sandvik, 2011). No entanto, em muitos casos práticos escolhe-se o diâmetro da fresa com base na largura fresada de uma superfície, mas utiliza-se a mesma fresa para cortar outras superfícies de larguras diferentes. Nesses casos, pode-se ter que usar uma superfície com fresa maior que o dobro da largura fresada e, assim, tem-se o centro da fresa fora da superfície fresada. Nessas situações em geral, pode ser mais adequado que se utilize o sentido de avanço inverso aquele mostrado na Figura 2.3 (A). Assim, ao invés do dente entrar no corte com espessura de corte máxima e sair com espessura igual a zero, conforme a Figura 2.3 (B), denominado corte concordante, ocorre o inverso, que denominado de corte discordante, minimizando o choque na entrada do dente (Diniz *et al.* 2008).

O corte discordante também tem seus inconvenientes, a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. Inicialmente, quando a aresta toca a peça, ela é forçada para dentro da peça, criando um excessivo atrito, com conseqüente deformação plástica daquela região da peça. Além disso, frequentemente o contato é realizado com uma

superfície encruada pelo corte anterior com espessura tendendo a zero, causada pelo corte do dente anterior (Diniz *et al.* 2008; Sandvik, 2011). Quando a pressão da aresta cortante atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura do material da peça, a ferramenta penetra na peça e, com os movimentos de usinagem, retira uma porção de material (cavaco) em forma de vírgula. Assim, no início da operação de cada dente, a componente da força de usinagem perpendicular ao avanço tende a afastar a ferramenta da peça enquanto que, no fim da operação de um dente, a aresta cortante puxa a peça para o sentido inverso. Essa alternância da componente de força de usinagem produz vibrações indesejáveis, que prejudicam o acabamento superficial e a tolerância da peça fresada (Diniz *et al.*, 2008; Sandvik, 2011).

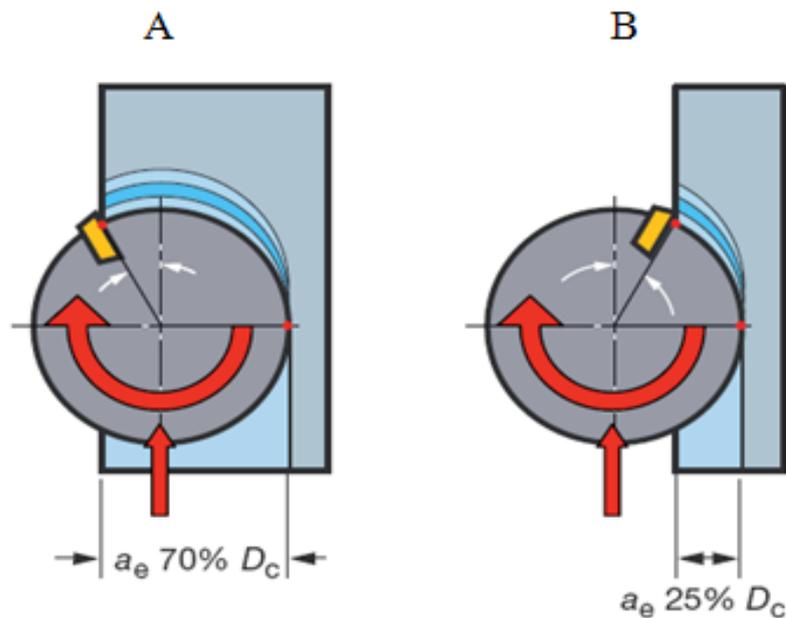


Figura 2.3 – Posicionamento da aresta de corte (Sandvik, 2011).

Segundo Diniz *et al.* (2008), no fresamento concordante tais defeitos são sanados, já que a componente da força de usinagem sendo perpendicular ao avanço, sempre tem o mesmo sentido, isto é, sempre empurra a peça contra a mesa. Porém, ainda existem inconvenientes como pode ser visto na Figura 2.3 (A), a aresta de corte ao penetrar na peça faz com que o valor máximo da espessura de corte prossiga até atingir um valor igual a zero (Sandvik, 2011). Por isso, nas peças que apresentem uma camada superficial endurecida (crosta de fundição ou de forjamento, por exemplo), o contato inicial da aresta cortante se dá em condições desfavoráveis, o que diminui a vida da ferramenta (Diniz *et al.* 2008). Também, como já citado, quando o centro da fresa está fora da peça no fresamento frontal ($D_c > 2 a_e$), o choque do dente da fresa com a peça se dá em condições desfavoráveis, conforme Figura 2.3 (B).

Outro inconveniente é que a componente da força de usinagem na direção de avanço

possui o mesmo sentido de avanço da mesa. A porca do sistema de avanço da máquina, sistema fuso-porca que está preso à mesa, para poder fazer a mesa percorrer em um sentido, tem que fazer força no fuso no sentido oposto, conforme Figura 2.4. Essa força, portanto, também está no sentido oposto da componente da força de usinagem, que tem módulo variável, devido à variação da espessura de corte. Então, a força resultante final sobre o fuso da máquina varia em módulo e em sentido, o que pode gerar vibração (Diniz *et al.* 2008). Esse inconveniente pode ser corrigido diminuindo-se as folgas entre fuso e porca, ou utilizando-se fusos de esferas recirculantes, nos quais não exista folga e todo contato entre fuso e porca seja feito através das esferas. Com isso, em geral, o fresamento concordante possibilita melhor acabamento da superfície da peça, sendo, portanto, preferido em muitos casos (Metals Handbook, 1989; Boothroyd *et al.*, 2006; Diniz *et al.*, 2008; Sandvik, 2011).

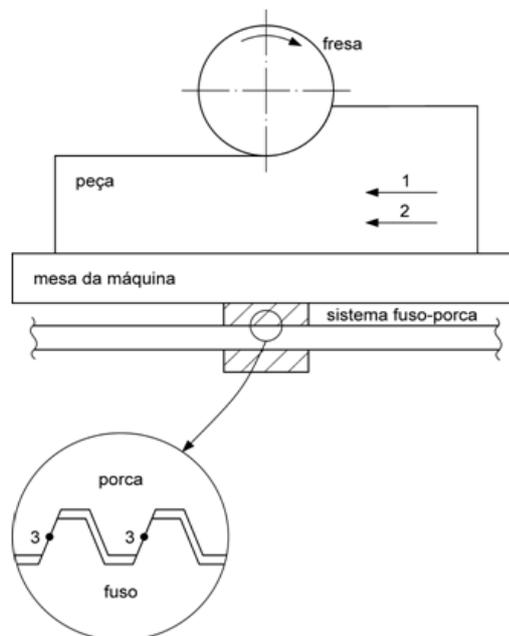


Figura 2.4 – Forças e deslocamentos no fresamento concordante. (1) sentido da força de avanço; (2) sentidos do avanço da mesa; (3) pontos de contato entre porca e fuso (Diniz *et al.*, 2008).

Assim, o corte concordante é, em geral, preferível ao corte discordante, quando se tem máquina com fuso de esferas recirculantes e não se tem camada endurecida na peça. Os casos em que a largura fresada é menor que a metade do diâmetro da fresa ($D_c > 2 a_e$) também podem se configurar em exceções, nas quais o corte discordante pode ser mais adequado. Porém, há que se ter em mente que esse tipo de corte tende a gerar mais desgaste na pastilha, enquanto o concordante tende a gerar mais trincas e lascamentos (Diniz *et al.* 2008).

Neste trabalho, o sentido de corte utilizado é o concordante para todos os ensaios no corpo de prova já pré-usinado sem crosta de fundição.

2.2.2 Número de dentes

Diferentemente de um torno onde o que usualmente se ajusta na máquina é o avanço, em uma fresadora o que se ajusta é a velocidade de avanço, velocidade da mesa da fresadora. Assim, uma alteração do número de dentes da fresa vai ocasionar uma alteração do avanço por dente (f_z), exceto no caso em que a velocidade de avanço da mesa (V_f) for alterada na mesma proporção, conforme equação (Diniz *et al.* 2008):

$$V_f = f_z \times z_n \times n \quad (2)$$

Onde:

z_n = número de dentes da fresa

n = rotação da fresa em (*rpm*)

Segundo Diniz *et al.* (2008), quando se reduz o número de dentes da fresa sem se alterarem as condições de corte, há um aumento do avanço por dente e conseqüente aumento da espessura de corte média (h_m). Com isso, há uma diminuição da força específica de corte (k_c) e da potência de corte (P_c), conforme as Equações 3 e 4. Portanto, uma fresa de passo largo (com poucos dentes) exige uma potência menor do que uma fresa de passo fino (com muitos dentes), para as mesmas condições de corte, (Richetti *et al.*, 2004).

$$k_c = k_{c_1} h_m^{-m_c} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{a_p a_e v_f k_c}{60 \times 10^6 \eta} \quad (4)$$

P_c = potência de corte (*kW*)

h_m = espessura de corte média (*mm*)

k_c = força específica de corte (*N/mm²*)

k_{c_1} = força específica de corte em 1 *mm²* (*N/mm²*)

$$a_p = (mm)$$

η = rendimento da máquina (%)

$-m_c$ = coeficiente angular

Outros fatores de escolha do número de dentes da fresa são: o material da peça (materiais de cavacos longos exigem um espaço maior entre insertos), a largura da superfície fresada é necessário sempre manter no mínimo, 2 dentes simultaneamente no corte, para dar estabilidade ao sistema máquina/fresa/dispositivo de fixação-peça, para minimizar a vibração (Sandvik, 2011). Por outro, não se podem ter muitos dentes, para que o avanço por dente não seja muito pequeno e, com isso, a pressão de corte não seja muito alta. Para o acabamento superficial desejado, quanto menor o avanço por dente e, conseqüentemente, quanto maior o número de dentes para um determinado avanço por volta, melhor o acabamento superficial da peça. Assim, pode-se resumir o problema da escolha do número de dentes nas seguintes recomendações (Richetti *et al.*, 2004; Diniz *et al.*, 2008; Sandvik, 2011).

- Fresa de passo largo tipo L: (poucos dentes): usada frequentemente para desbaste e semiacabamento de aços e onde a tendência à vibração seja uma ameaça para o resultado da operação.

- Fresa de passo fino tipo M: maior número de dentes, os espaços entre dentes é pequeno. Esta fresa permite alta taxa de remoção de cavaco. Pode-se aumentar a velocidade de avanço, mantendo-se o avanço por dente no mesmo nível da fresa de passo largo. Normalmente usada para ferro fundido, devido ao cavaco curto, que se aloja bem nos pequenos espaços entre dentes, e para operações em aços. Porém, nesses casos, o volume de cavaco removido fica limitado pelo espaço entre dentes e não se pode realizar desbaste muito pesado. Se o avanço por dente for mantido em níveis baixos, o acabamento da peça fica muito bom e não existe problema de entupimento dos bolsões de armazenamento do cavaco conforme Quadro 2.1 (Diniz *et al.*, 2008);

- Fresa de passo extrafino tipo H: muitos dentes e bolsões de armazenamento do cavaco muito pequenos, permite altas velocidades de avanço. Adequada para o corte interrompido de ferro fundido, onde a espessura do cavaco é pequena, o que faz com que o choque com a peça não seja muito forte, e para operações de aços com pequena e baixo avanço por dente, o que gera um ótimo acabamento superficial da peça. Também é adequada para o fresamento de materiais em que a velocidade de corte tenha que ser mantida em níveis baixos, como é o caso

de ligas de titânio. Relembrando, velocidade de corte baixa, significa rotação baixa. Como a velocidade de avanço é a velocidade da mesa da fresadora, o número de dentes (Z_n) compensa a baixa rotação (n) e o avanço por dente não precisa ser muito reduzido para se conseguir uma razoável velocidade de avanço e, com isso, um razoável volume de remoção de cavaco (Diniz *et al.*, 2008). O Quadro 2.1 apresenta um resumo das aplicações dessas fresas.

Quadro 2. 1– Aplicação das fresas de acordo com o tipo de passes (Sandvik, 2011).

| Tipo de Fresa | Aplicação |
|-----------------|---|
| Passo Largo | Desbaste e semi-acabamento de aço ou onde haja tendência à vibração |
| Passo Fino | Corte de ferro fundido e desbaste leve e acabamento de aço |
| Passo Extrafino | Corte interrompido de ferro fundido e liga de titânio, acabamento de aço. |

Diniz e Caldeirani Filho (1999) investigaram a influencia da posição relativa da ferramenta e da peça na vida da ferramenta de metal duro classe ISO P, no desbaste e no acabamento superficial da peça durante o fresamento frontal do aço ABNT 1045. Os pesquisadores perceberam que para um maior afastamento entre o eixo da fresa e a linha de simetria do material usinado, de modo que configurasse um fresamento frontal assimétrico discordante, o desgaste na ferramenta seria gradualmente diminuído para o mesmo critério de fim de vida quando maior fosse este afastamento. Esta simples mudança no posicionamento já seria substancial na conservação da integridade da ferramenta. Diniz *et al* (2008) ressalta que estes resultados poderiam não ser os mesmos em outras situações. Se houvesse uma mudança de ferramenta para uma classe mais tenaz e resistente ao choque. Assim o lascamento não seria mais tão determinante para o fim de vida da ferramenta, não havendo necessidade do deslocamento entre o centro da fresa e o eixo de simetria da fresa.

2.3 MATERIAL DA PASTILHA

Em linhas gerais, os materiais de ferramentas da classe ISO P devem ser utilizados para o corte de aços, da classe ISO K para usinagem de ferros fundidos, da classe ISO M para o corte de aços inoxidáveis, da classe ISO N em corte de ligas de alumínio e materiais não ferrosos, da classe S para usinagem de ligas resistentes ao calor e da classe ISO H para usinagem de materiais endurecidos (Diniz *et al.* 2008, Sandvik, 2011). No que diz respeito às subclasses, quanto maior o número que a representa, mais tenaz, ou seja, resistente ao choque,

e menos resistente ao desgaste é a pastilha. Assim, quando se está realizando um processo em acabamento, sem casca endurecida de fundição ou forjamento, e/ou sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça rígido em uma superfície sem interrupções, não se necessita de muita tenacidade da pastilha, mas sim, resistência ao desgaste. Assim, deve se utilizar uma classe de número baixo, menor ou igual a 15 (Diniz *et al.* 2008). Quando se está realizando um processo em desbaste pesado, peça bruta, com camada endurecida e sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça pouco rígido em uma superfície com interrupções, deve se utilizar uma classe de número alto, maior que 35. Em processos com condições intermediárias, devem ser utilizadas pastilhas com número também intermediário, (Diniz *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2009; Sandvik, 2011).

2.3.1 Materiais para fresa

A função das ferramentas de corte, tanto no fresamento como em outro processo de usinagem, é remover cavaco. Para satisfazer essas funções, a fresa precisa ser feita de material mais duro do que os materiais em usinagem (Ferraresi *et al.*, 1972). A seleção do material e da classe da ferramenta de corte é um fator importante a ser considerado ao planejar uma operação de usinagem bem sucedida (Diniz *et al.*, 2008). Conhecimento básico de cada material da ferramenta e seu desempenho são dados importantes para a seleção correta de cada aplicação. As considerações incluem o material e o formato da peça a ser usinada, as condições de usinagem e o nível de qualidade superficial para cada operação.

• Este tópico tem como objetivo fornecer informações adicionais sobre os principais materiais de ferramenta de corte, suas vantagens e recomendações para melhor uso. Os materiais de ferramenta possuem diferentes combinações de dureza, tenacidade e resistência ao desgaste e são divididos em várias classes com propriedades específicas. Geralmente, um material de ferramenta de corte bem sucedido em sua aplicação deve ser: (Sandvik, 2011; Machado *et al.*, 2009; Diniz *et al.*, 2008).

- Duro, para resistir à deformação e aos desgastes;
- Tenaz, para resistir às quebras;
- Quimicamente estável para resistir à oxidação e à difusão;
- Resistente às alterações térmicas repentinas;

2.3.2 Metal duro revestido (HC)

O metal duro é um produto sintetizado a partir da metalurgia do pó dos carbeto de tungstênio, titânio e tântalo, tendo o cobalto como aglomerante. Sua elevada dureza permite que a capacidade de corte se mantenha até a temperatura da ordem de 1000°C (Diniz *et al.*, 2008; Yan *et al.*, 2009; Machado *et al.*, 2009). Atualmente, o metal duro revestido apresenta-se em 80 – 90% de todas as pastilhas para ferramenta de corte. Seu sucesso como material da ferramenta deve-se à sua exclusiva combinação de resistência ao desgaste e tenacidade, além de sua habilidade para conformidade com geometrias complexas (Santos e Sales, 2007). A ferramenta de metal duro revestido combina geralmente o substrato de metal duro com uma cobertura com fase cerâmica. Juntos, eles formam uma classe personalizada para uma aplicação específica de usinagem. Os principais processos de deposição são:

- Cobertura CVD (Deposição por Vapor Químico). A cobertura é gerada por reações químicas em temperaturas na ordem de 1000°C (Diniz *et al.*, 2008).
- Cobertura PVD: Coberturas por Deposição Física de Vapor são formadas em temperaturas relativamente baixas ($450 - 500^{\circ}\text{C}$) (Diniz *et al.*, 2008).

Tamanhos de grãos de carbeto de tungstênio (WC) finos são usados para aresta de corte viva com uma cobertura PVD, para melhorar ainda mais a resistência da aresta de corte (Figura 2.5 - A e B). Eles também se beneficiam de uma resistência superior às cargas cíclicas térmicas e mecânicas. Aplicações típicas são brocas inteiriças de metal duro, fresas inteiriças de metal duro, pastilhas para corte e canais, fresamento e classes para acabamento, (Sandvik, 2011; Diniz *et al.*, 2008).



Figura 2.5 - Metal duro. (A) grãos médios a grossos; (B) grãos finos. (Sandvik, 2011).

2.4 DESGASTE DA FERRAMENTA

Na usinagem por fresamento, diversos são os tipos de desgastes e avaria que acontecem em uma ferramenta de usinagem, Segundo Teles (2007), Diniz *et al.* (2008), Davim (2008), Machado *et al.* (2009), Sandvik (2011), os desgastes são:

- Desgaste de flanco: O tipo mais comum de desgaste e o tipo preferido de desgaste, pois oferece uma vida útil da ferramenta previsível e estável, esse tipo de desgaste ocorre na superfície de folga da ferramenta de corte, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça (Figura 2.6). Esse tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. É originado principalmente pelo aumento da velocidade de corte (Diniz *et al.*, 2008).

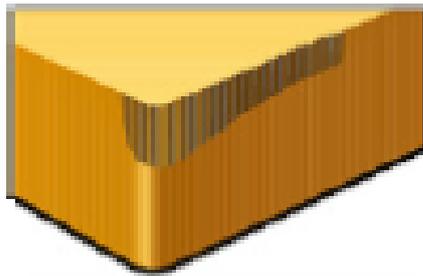


Figura 2.6 – Desgaste de flanco (Sandvik, 2011).

- Desgaste de cratera: é o tipo de desgaste que ocorre na superfície saída da ferramenta de corte, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco, principalmente através do fenômeno da difusão (Figura 2.7). O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste de flanco. Para evitar esse tipo de desgaste, recomenda-se utilizar ferramenta de metal duro revestido (Diniz *et al.*, 2008).

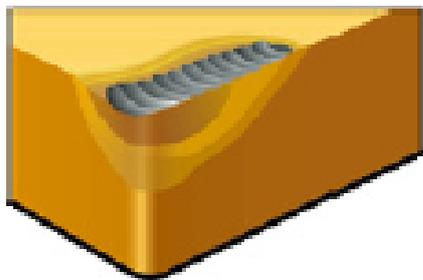


Figura 2.7 – Desgaste de cratera (Sandvik, 2011).

- Desgaste de entalhe: ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, conforme figura 2.8. Este tipo de desgaste ocasiona a deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, incentivado pelo aumento da velocidade de corte (Diniz *et al.*, 2008).

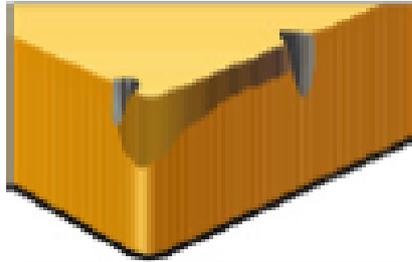


Figura 2.8 – Desgaste de entalhe (Sandvik, 2011).

2.4.1 Avarias das ferramentas

As principais formas de avarias das fresas são: (Diniz *et al.*, 2008; Sandvik, 2011).

- Deformação plástica da aresta de corte: muitas vezes a pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada a alta temperatura. Que provoca a deficiência do controle de cavacos e deterioração do acabamento da superfície da peça

- Lascamento: é o resultado de uma sobrecarga das tensões de tração mecânica. Essas tensões podem ocorrer por vários motivos, como martelamento de cavacos, profundidade de usinagem ou avanço muito altos, aresta postiça, vibrações ou desgaste excessivo na pastilha. Onde partículas maiores de material são retiradas de uma só vez, ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada pode haver prejuízo do acabamento superficial da peça e pode levar até à sua quebra. Para evitar o lascamento, pode-se trabalhar com uma ferramenta mais tenaz.

- Trinca: quando a temperatura na aresta de corte muda rapidamente de quente para frio, várias trincas podem surgir perpendiculares à aresta de corte, provocada pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. As trincas que ocorrem perpendicularmente à aresta de corte são de origem térmica e, quando ocorrem paralelas à aresta de corte, são de origem mecânica. O crescimento da trinca leva à quebra da ferramenta. Para se evitar a formação das trincas de origem mecânica, pode-se escolher uma ferramenta mais tenaz, reduzir o avanço, não usar fluido de corte. No processo de fresamento, o

crescimento das trincas leva à quebra da ferramenta de corte. Para evitar a formação das trincas, pode-se dentre outros procedimentos escolher uma ferramenta mais tenaz e diminuir o avanço por dente e posicionar a fresa corretamente em relação à peça.

- Quebra: é o resultado final da continuação das avarias e desgastes ou da soma dos dois. A quebra da ferramenta ocasiona não somente dano à ferramenta, mas também no porta-ferramenta e na própria peça, pode ocorrer inesperadamente, para cada tipo de processo.

2.4.2 Mecanismos de desgastes das ferramentas

Entre os principais mecanismos que causam os desgastes das fresas durante os processos de usinagem são: (Diniz *et al.*, 2008).

- Difusão: é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomo de um metal para outro. Depende também da duração contato e da afinidade físico-química dos materiais envolvidos na zona de fluxo.

- Oxidação: altas temperaturas e a presença de ar e água nos fluidos de corte geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto, durante o corte, formam filmes óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito causando o desgaste. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso de ar naquela região, sendo essa uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

- Abrasão mecânica: é uma das principais causas dos desgastes da ferramenta. Porém ela atua mais no desgaste de flanco, já que a superfície de saída atrita com um elemento flexível, que é o cavaco. O desgaste abrasivo é incentivado por partículas duras presentes no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Outra fonte de partículas é o mecanismo de aderência.

- Aresta postiça de corte: muitas vezes durante a usinagem, pode-se formar na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, uma camada de cavaco encruada, que permanece aderente à aresta de corte, modificando seu comportamento com relação à força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta.

2.4.3 Medição do desgaste da ferramenta de corte

Os principais tipos de deterioração que podem ocorrer numa ferramenta de corte podem ser classificados de várias maneiras. Entretanto a ISO (*International Organization for Standardization*) normatiza estes eventos em três classes: desgaste, avarias e deformação plástica. As ferramentas utilizadas em torneamento seguem a norma ISO 3685 (1993), as ferramentas com insertos, utilizadas em fresamento frontal (ou faceamento), seguem a norma ISO 8688-1 (1989) e as ferramentas utilizadas em fresamento de topo, com ferramentas inteiriças, são regidas pela norma ISO 8688-2 (1989).

Estas normas consideram vários critérios para quantificação de vida de ferramentas, como: desgaste de flanco (uniforme, não-uniforme, localizado), desgaste de superfície de saída (desgaste de cratera, desgaste em forma de degrau – *stair-formed*), lascamento (uniforme, não-uniforme, localizado, micro lascamentos, macro lascamentos), trincas (perpendiculares à aresta de corte, paralelas à aresta de corte, trincas irregulares), deformação plástica e falha catastrófica.

No fresamento frontal utilizando ferramentas com insertos de metal duro, como é o caso do presente trabalho, foram utilizados os parâmetros da ISO 8688-1 (1989) relativos à avaliação do desgaste uniforme de flanco, definido como a “superfície desgastada que possui uma espessura normalmente constante e se estende ao longo da aresta da ferramenta, considerando-se a medição sobre a aresta ativa”, tomando-se o plano ortogonal da ferramenta para a medição conforme Figura 2.9.

A escolha do desgaste uniforme de flanco, como parâmetro para os testes efetuados, se deu pela sua simplicidade de medição e por se tratar de um parâmetro bastante utilizado no estudo de vida de ferramentas.

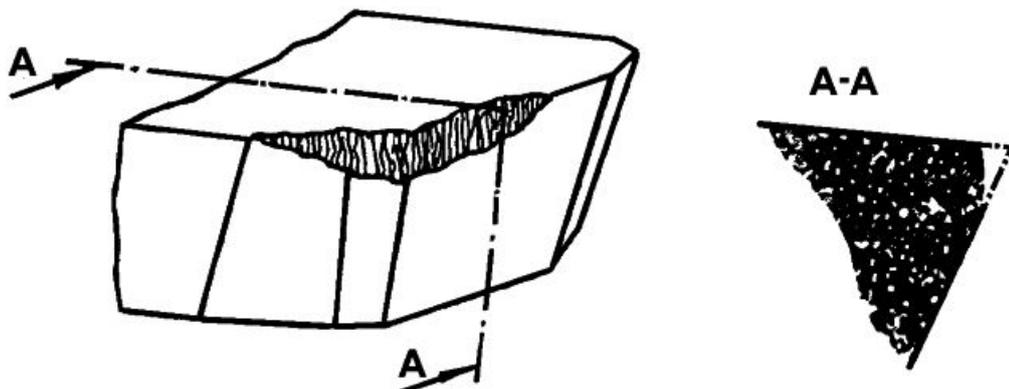


Figura 2.9 – Desgaste uniforme de flanco conforme ISO 8688-1 (1989).

Segundo Machado *et al.* (2009), em um processo de usinagem todos os mecanismos de desgastes podem ser observados, porém um deles irá sobressair sobre os demais. A análise do desgaste de ferramenta é uma atividade complexa, onde se deve observar o material da peça o material da ferramenta e as condições de corte.

2.5 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

A Rugosidade é o conjunto de irregularidades que podem ser observadas nas peças em consequência dos reiterados choques pela ferramenta e avaliadas com aparelhos como o rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, já que influi na qualidade de deslizamento, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, na qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, na resistência à corrosão e à fadiga, na vedação e na aparência de peça (NBR ISO 4287, 2002).

A rugosidade é um dos fatores importantes na avaliação da qualidade da peça dos componentes usinados, porque influencia as características funcionais da peça tais como compatibilidade e atrito superficial. O objetivo principal da análise quantitativa da rugosidade é a identificação de uma coleção de parâmetros suficientes para caracterização do acabamento superficial (Chevrier *et al.*, 2003).

A superfície de uma peça tem dois aspectos importantes que devem ser definidos e controlados. O primeiro aspecto refere-se às irregularidades geométricas na superfície topográfica e o segundo às alterações metalúrgicas da camada subsuperficial (Oliveira, 2006). Durante o processo de usinagem, a superfície gerada sofre efeitos mecânicos e térmicos que podem alterar de forma significativa, as características da superfície e abaixo da mesma (Hioki, 2006; Whitehouse, 2000). Tais alterações geram diferentes propriedades tecnológicas que exercem grande influência no desempenho da peça, principalmente no que diz respeito a sua vida útil (Basavarajappa *et al.*, 2007; Javidi *et al.*, 2008). A intensidade desses efeitos depende da interação da energia mecânica e térmica gerada durante o processo de remoção de material e das propriedades do material da peça de trabalho (Rosario, 2006).

Segundo Oliveira (2004), nas superfícies existem irregularidades tais como alturas, espaçamentos e formas. Ao examinar uma superfície real pode-se ver o padrão dos picos e vales que podem ser irregulares ou repetitivos, conforme mostra a Figura 2.10.

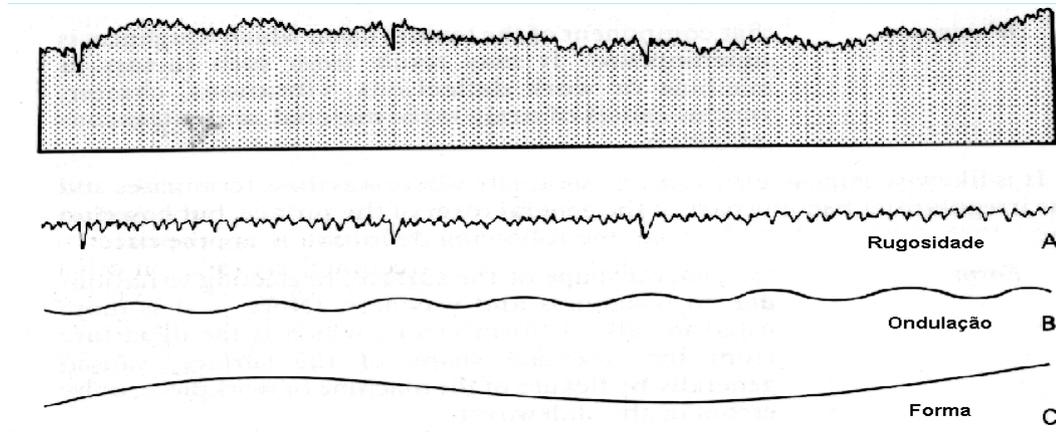


Figura 2.10 – Irregularidades de Superfícies. (A) textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade; (B) ondulações; (C) erro de forma (Oliveira, 2004).

Segundo a norma ANSI B46. 1. (1995), o acabamento superficial é composto por quatro elementos: rugosidade, ondulações, marcas de avanço e falhas, conforme descrita a seguir: (Agostinho *et al.*, 2004).

- Rugosidades da superfície da peça são finas irregularidades resultantes de ação inerente do processo de corte, ou seja, marcas de avanço. A altura ou profundidade média dessas irregularidades são medidas em pequeno comprimento chamado *cut-off* (comprimento da amostra). Pode-se dizer que a rugosidade e ondulações constituem a textura de uma superfície apesar de apresentarem outras caracterizações

- Ondulações consistem de irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores em aproximadamente 1 mm que o *cut-off*, causado por deflexões e vibrações da ferramenta ou da peça.

- Marcas de avanço denotam as direções das irregularidades superficiais, dependendo da orientação da peça e da ferramenta de corte na máquina, ou do movimento relativo entre peça/ferramenta.

- Falhas são interrupções na topografia típica da superfície de um componente, sendo inesperadas e indesejáveis, causadas por defeitos tais como trincas, bolhas, inclusões que podem surgir durante o processo de corte.

2.5.1 Sistemas de medição da rugosidade

São usados dois sistemas básicos de medida: da linha média M e da linha envolvente E. O sistema da linha média é o mais utilizado. Alguns países adotam ambos os sistemas.

No Brasil, pelas Normas ABNT NBR 6405 (1988) e NBR 8404 (1984). No Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR 6405/1985. O sistema adotado pelas normas brasileiras é o sistema de medição da linha média ou sistema M. Neste sistema de medição, todas as grandezas são definidas a partir de uma linha de referência denominada linha média. A linha média é definida como uma linha disposta paralelamente à direção geral do perfil, dentro do percurso de medição, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendida entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores de acordo com Equação 5. A Figura 2.11 apresenta a definição da linha média.

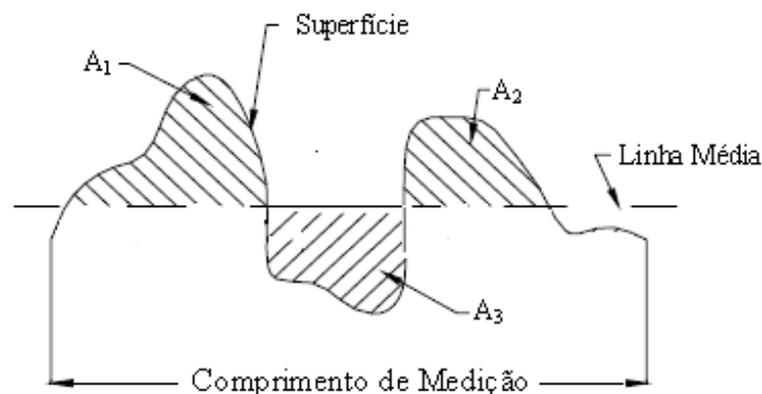


Figura 2.11 – Regra para definição da linha média.

$$A_1 + A_2 = A_3 \quad (5)$$

2.5.2 Parâmetros de rugosidade (R_a)

Segundo Agostinho *et al.* (2004) e Machado *et al.* (2009), o parâmetro de rugosidade R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem conforme Figura 2.12.

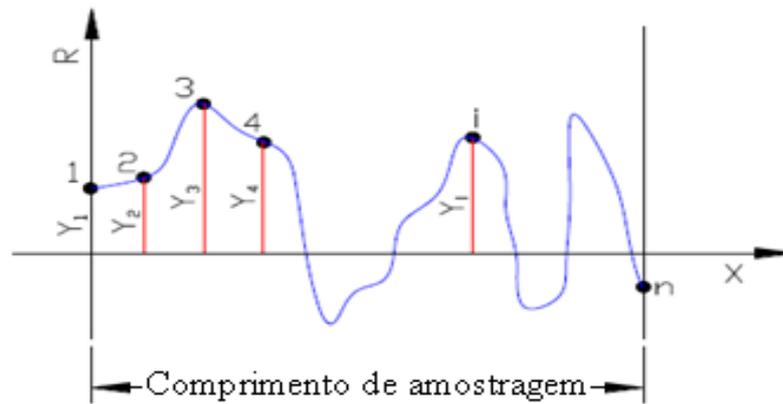


Figura 2.12 – Desvio médio aritmético R_a (Agostinho et al.,2004).

Segundo Agostinho *et al.* (2004), o parâmetro R_a pode ser usado nos seguintes casos:

- Quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
- Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento e fresamento);
- Em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

2.5.3 Parâmetro de rugosidade (R_t)

Segundo Agostinho *et al.* (2004) e Machado *et al.* (2009), a rugosidade R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (L), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i). Conforme Figura 2.13, pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo Z_1 e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo Z_3 . Ambos configuram a profundidade total da rugosidade R_t .

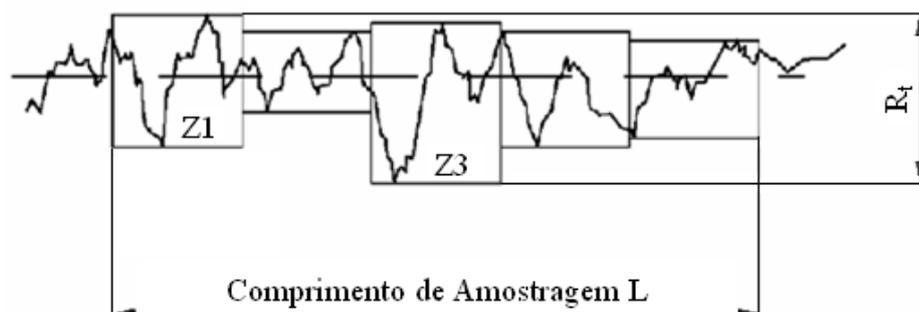


Figura 2.13 – Rugosidade R_t distância entre pico e vale (Agostinho et al., 2004).

Segundo Korkut *et al.* (2007) o acréscimo na velocidade de corte no fresamento resultou em menor valor de rugosidade para o fresamento do aço ABNT 1020.

A geometria da ferramenta tem um efeito significativo no desempenho da usinagem. Entre os vários parâmetros geométricos o ângulo de saída radial e raio da ferramenta são dos mais importantes, pois determinam, respectivamente, a área de contato entre cavaco e ferramenta, portanto, afetam o consumo de energia (Rao, P.V, 2006).

2.5.4 Mecanismo de formação do cavaco

Segundo Diniz *et al.* (2008), a formação do cavaco é um processo cíclico e periódico, que envolve o cisalhamento concentrado ao longo de uma região chamada região de cisalhamento, conforme Figura 2.14.

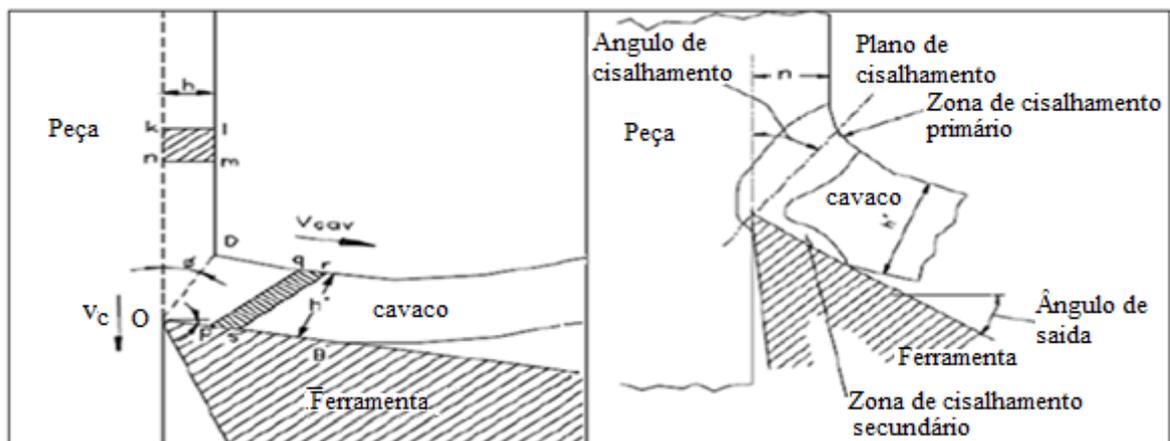


Figura 2.14 – Diagramas esquemáticos da formação do cavaco (Trent e Wright, 2000).

onde:

h – Espessura calculada do cavaco

h' – Espessura do cavaco

$kLmn$ – Volume de material livre de deformação

$pqrs$ – Volume de material deformado

v_c – Velocidade de corte

v_{cav} – Velocidade do cavaco

OD – Plano de cisalhamento primário

f – Ângulo de cisalhamento do plano primário

A ação da ferramenta recalca o volume $klmn$ e o metal começa a sofrer deformações elásticas, conforme Figura 2.14 (a). Prosseguindo, o material da peça atinge o limite de escoamento e se deforma plasticamente. As deformações plásticas prosseguem e as tensões se elevam e ultrapassam o limite de resistência do material, promovendo a sua ruptura, que se inicia com a trinca no ponto O podendo prosseguir até o ponto D . A região destes campos de tensões deformações plásticas, chamada de zona de cisalhamento primária, é simplificada e representada na figura por um plano definido pela linha OD . A extensão da trinca iniciada no ponto O é que vai determinar a classe do cavaco. Após o volume $klmn$ passar pela zona de cisalhamento primário, já deformado plasticamente, passa-se para um novo formato $pqrs$, e se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta, definindo-se a região da zona de cisalhamento secundária, representada pelo plano OB mostrado na Figura 2.14 (a). A figura 2.14 (b) mostra as zonas de cisalhamento primária e secundária.

Segundo Diniz *et al.* (2008) e Machado *et al.* (2009), a superfície superior do cavaco é rugosa devido ao fato da tensão de deformação não ser homogênea. Isto ocorre por causa dos pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão presentes no metal que está sendo usinado. Um plano de cisalhamento passando através de um ponto de concentração de tensão, causa deformação a um valor de tensão mais baixo que aquele que deforma um ponto que não está sob concentração de tensão.

2.6 FLUIDO DE CORTE

Os processos de usinagem utilizam fluidos de corte como meio de lubrificação e refrigeração da peça produzida. A tendência mundial é produzir peças cada vez mais sofisticadas, e ter elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluição (Pereira; Correia; Pivato).

Durante a formação do cavaco, o calor gerado ao longo do plano de cisalhamento primário e secundário, bem como o calor produzido pela aresta de corte será dividido em frações que serão absorvidas pelo cavaco, ferramenta, fluido de corte e pela superfície do

material usinado (Byers *et al.*, 2006). O percentual do calor gerado que é dissipado por cada um dos meios citados varia de acordo com o processo e tipo de material (Diniz *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2009).

2.6.1 Fluido de corte nos processos de usinagem

Para diminuir o calor gerado e melhorar as condições de corte (reduzir atrito na zona de corte) nos processos de usinagem, utilizam-se fluidos de diferentes tipos, conhecidos como fluidos de corte. El Baradie (1996) reforça a utilidade desse agente nos processos de usinagem ao afirmar que a redução da temperatura faz com que o desgaste da ferramenta seja menor, tendo a ferramenta uma vida útil maior. Assim, a redução de temperatura na região de corte pode ser feita conduzindo-se o calor para fora da zona de corte pelo meio da lubrificação adequada da interface cavaco/ferramenta. Quando aplicados de maneira apropriada, os fluidos de corte podem aumentar a produtividade dependendo de cada processo. Dessa maneira, a aplicação efetiva do fluido pode também aumentar a vida útil da ferramenta, reduzir a rugosidade, melhorar a precisão dimensional e, em alguns casos, diminuir a potência exigida durante o processo (El Baradie 1996).

Por outro lado, a aplicação do fluido de corte em processos de usinagem possuem alguns aspectos negativos como: o descarte do fluido de corte corretamente e riscos oferecidos à saúde de operadores de máquinas, expostos ao contato direto com esses fluidos. Por esses motivos, as pesquisas na área de usinagem com refrigeração intensificaram-se, com o objetivo de aperfeiçoar ao máximo o uso de fluidos de corte na indústria metal-mecânica. Os fatores levados em conta nos estudos são a análise dos custos relacionada aos fluidos de corte, questões ecológicas e preservação da saúde do ser humano (Diniz *et al.* 2008).

2.6.2 Funções dos fluidos de corte

Segundo Runge *et al.* (1989) e Machado *et al.* (2009), em processos de usinagem, as exigências básicas são produzir peças dentro de tolerâncias e acabamentos dimensionais predeterminados, ao menor custo possível. Nos processos de usinagem, os fluidos de corte desempenham numerosas funções simultaneamente, contribuindo para que essas exigências de fabricação sejam satisfeitas. Os fluidos de corte ajudam a refrigerar a região de corte em

altas velocidades de corte, lubrificar a região de corte em baixas velocidades e altas tensões de corte, reduzir a força de corte, melhorar a vida da ferramenta, o acabamento superficial, a precisão dimensional da peça, auxiliam na quebra do cavaco, facilitam o transporte de cavaco, deixam uma camada protetora sobre a superfície usinada e protegem a máquina ferramenta contra ação oxidante (El Baradie, 1996; Schroeter, 2002; Diniz *et al.*, 2008).

2.6.3 Os fluidos de corte como refrigerante

Segundo Diniz *et al.* (2008), Runge *et al.* (1989) e Machado *et al.* (2009), os requisitos que um fluido de corte deve possuir para retirar eficientemente o calor da região de corte da peça e da ferramenta são:

- Baixa viscosidade, a fim de fluir facilmente;
- Capacidade de molhar bem o metal para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica.

Tais propriedades são esperadas de um fluido de corte típico de ação refrigerante pois, tal ação ocorre pela retirada do calor do conjunto peça-ferramenta após ele ser gerado durante a usinagem através da deformação do cavaco e atritos entre as superfícies de saída e de folga com o cavaco e superfície usinada, respectivamente (Diniz *et al.* 2008).

2.6.4 Os fluidos de corte como lubrificante

Segundo Diniz *et al.*, (2008), Runge *et al.* (1989) e Machado *et al.*, (2009), a lubrificação permite uma redução do coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta, pois é na superfície de saída da ferramenta que se desenvolvem as maiores temperaturas, devido à zona de aderência ferramenta peça, que facilita o fluxo de cavaco, reduzindo a força e a potência de corte.

O fluido de corte penetra entre as superfícies em contato através do fenômeno da capilaridade, ajudado pela vibração entre ferramenta, peça e cavaco. Se o fluido não atingir a região de corte não se efetivará a ação desejada (Diniz *et al.*, 2008).

Segundo Diniz *et al.* (2008), em processo de corte interrompido como fresamento, a lubrificação fica facilitada, pois óleo com característica lubrificante toca a ferramenta enquanto ela se encontra fora da peça (metade da fresa fica fora da peça). Para que um fluido seja um bom lubrificante, é necessário que ele possua as seguintes características:

- Resistência a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Boas propriedades antifricção e antissoldantes.
- Viscosidade adequada: deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta para uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta.

Além dessas propriedades necessárias para refrigeração e lubrificação, outras propriedades são exigidas do fluido de corte como:

- Não apresentar odores desagradáveis;
- Não corroer (ter capacidades de proteger as máquinas ferramentas);
- Não originar precipitados sólidos que se depositem nas guias da máquina;
- Não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde do operador.

2.6.5 Classificação dos fluidos de corte

A grande diversificação de fluidos de corte com distintas finalidades levou ao surgimento de diferentes classificações, dificultando a padronização das mesmas (Booser, 1988; Edwards, 1993; Diniz *et al.*, 2008). Existem diversas formas de se classificarem os fluidos de corte e não há uma padronização que estabeleça uma única classificação entre as empresas fabricantes. Uma primeira classificação agrupa os fluidos da seguinte forma (Diniz *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2009; Tent, 1991):

- Fluidos gasosos: ar
- Fluidos miscíveis em água: emulsões e soluções
- Fluidos integrais: óleos minerais ou vegetais puros

Uma segunda classificação divide os fluidos de corte em dois grupos (Machado *et al.*, 2009; Diniz *et al.*, 2008).

- Fluidos formados apenas por óleo integral
- Fluidos formados a partir da adição de óleo concentrado à água
- Emulsões
- Soluções.

2.6.6 Óleos integrais

Segundo Sheng *et al.*, (1997) e Machado *et al.*, (2009), Runge *et al.* (1989), os óleos integrais são predominantemente óleos minerais, mas os óleos vegetais ou hidrocarbonetos sintéticos também são utilizados. Podem ser usados totalmente puros (sem mistura) ou combinados (misturados com aditivos). De modo geral, eles têm excelentes propriedades lubrificantes, apresentam bom controle de ferrugem e vida longa, mas não refrigeram de forma similar aos fluidos miscíveis em água. Os fluidos de corte integrais são usados como fornecido pelo fabricante.

2.6.7 Fluidos miscíveis em água

Os fluidos miscíveis em água foram introduzidos na década de 1940 e desenvolvidos com o crescimento das ferramentas de metal duro e consequente aumento da velocidade de corte das máquinas-ferramentas (Sheng *et al.*, 1997; Tolbert *et al.*, 1992). Esses fluidos misturam óleo e água com emulsificadores e deixam um filme sobre a peça que inibe a corrosão. A emulsão é difícil de ser mantida em água com sais minerais ou na presença de bactérias e sais (Owen, 1998). Análises de laboratório são desejáveis para descobrir quais os minerais presentes na água e sua dureza. Também deve ser observado o pH da solução, que deve variar de 8,5 até 9,3. Para um pH menor que 8,5 a probabilidade de oxidação da peça aumenta; e maior que 9,3 a possibilidade de irritação da pele do operador cresce (El Baradie, 1996). A proporção de fluido de corte concentrado na água depende da operação de usinagem. Para alta taxa de remoção de cavaco, é normalmente misturada uma parte de concentrado para 20 ou 30 partes de água (1:20 ou 1:30). Para várias operações de retificação, nas quais é

desejável obter um fluido menos concentrado para melhorar a ação refrigerante, a proporção varia de 1:40 a 1:50. A água tem alto calor específico, alta condutividade térmica e alto calor de vaporização, sendo um dos meios mais eficazes de refrigeração. Diluído em água, o fluido produz uma combinação de refrigeração e lubrificação moderada requerida para operações de remoção de metal conduzida em altas velocidades e baixas pressões.

Os fluidos solúveis em água são principalmente utilizados para processos a altas velocidades, pois possuem melhor capacidade de refrigeração nessas condições. Esses fluidos são melhores também no resfriamento dos componentes, evitando distorções térmicas (El Baradie, 1996).

2.6.8 Emulsões

As emulsões são compostas por óleos e água (El Baradie, 1996). Compõem-se de pequena porcentagem de um concentrado de óleo emulsificador e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas na água. Os emulsificadores são substâncias que reduzem a tensão superficial da água e, com isso, facilitam a dispersão do óleo na água, mantendo-o finamente disperso como uma emulsão estável. Portanto, não são soluções de óleo em água (óleo e água não se misturam), mas sim água com partículas de óleo dispersas em seu interior. Assim, o nome de óleo solúvel normalmente dado a esse produto não é correto. A proporção óleo-água nesses compostos varia de 1:10 a 1:100 (Diniz *et al.*, 2008; Machado *et al.*, 2009). Como essas duas substâncias não se misturam (imiscíveis), trata-se então de água com partículas de óleo em seu interior. Esse estado somente é obtido com a adição de emulsificadores, que são substâncias que contêm materiais tenso-ativos, os quais conferem a cada gotícula de óleo uma carga negativa. A repulsão entre as gotículas mantém a estabilidade da emulsão (Bianchi *et al.*, 2004).

Segundo (Diniz *et al.*, 2008) o emprego dos óleos integrais e minerais puros como fluido de corte tem perdido espaço para os óleos solúveis ou emulsificáveis em água, devido ao alto custo em relação aos demais, à ineficiência a altas velocidades de corte, ao baixo poder refrigerante e a formação de fumo, além de oferecerem riscos à saúde humana.

2.7 PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DOE)

A estatística utiliza-se de teoria probabilística, para explicar a frequência da ocorrência de eventos, tanto em estudos observacionais quanto em experimentos de modelar a aleatoriedade, de forma a estimar ou possibilitar a previsão de fenômenos futuros (Weber *et al.*, 2006). Algumas práticas estatísticas incluem, por exemplo, o planejamento, a sumarização e a interpretação de observações (Moore *et al.*, 1992). Dado que, o objetivo da estatística é a produção da melhor informação possível a partir dos dados disponíveis, alguns autores sugerem que a estatística é um ramo da teoria da decisão. Devido às suas raízes empíricas e seu foco em aplicações, a estatística geralmente é considerada uma disciplina distinta da matemática, e não um ramo dela (Chance *et al.*, 2005).

O projeto de experimentos (DOE) consiste em técnicas que objetivam planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma análise estatística que resulte em conclusões válidas e objetivas. Preconiza a variação simultânea dos fatores envolvidos em um experimento com o objetivo de construir modelos de previsão para as respostas de interesse, a cada diferente combinação de níveis dos fatores dá-se o nome de tratamento para o conjunto analisado (Montgomery, 2005).

Segundo Grine *et al.* (2010) e Haridy *et al.* (2010) afirmam que o Projeto e Análise de Experimentos (DOE) é um método estruturado e organizado, utilizado na determinação do relacionamento entre os diferentes fatores de entrada e saídas do processo, envolvendo a definição do conjunto de experimentos, nos quais todos os fatores relevantes são variados sistematicamente. Quando os resultados desses experimentos são analisados, ajudam a identificar aqueles fatores que mais influenciam os resultados, as interações e as sinergias entre eles e as condições ótimas.

De acordo com Montgomery (2005), as técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (DOE), têm encontrado uma ampla aplicação em diversas áreas de conhecimento, mostrando-se como um conjunto de ferramentas importantes para o desenvolvimento de produtos e processos. Os principais benefícios alcançados com o emprego das técnicas do DOE podem ser resumidos em:

- Melhoria do rendimento dos processos;
- Redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais;

- Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
- Redução de custos.

Os três princípios básicos do Projeto de Experimentos (DOE), segundo Montgomery (2005), são a aleatorização, a replicação e a blocagem. A aleatorização consiste na execução dos experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação. A replicação e a repetição de um mesmo teste várias vezes, criando uma variação para a variável de resposta utilizada para avaliação do erro experimental.

O emprego da abordagem estatística no Projeto e Análise de Experimentos (DOE), necessita que as pessoas envolvidas nos experimentos tenham uma idéia clara a respeito do fenômeno que se pretende estudar, de como os dados serão coletados e de um entendimento básico das ferramentas de análise utilizadas. Assim, Montgomery (2005), propõe que o emprego do Projeto e Análise de Experimentos deve considerar as seguintes etapas:

- Definição do problema;
- Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho;
- Seleção das variáveis de resposta;
- Escolha do projeto experimental;
- Execução dos experimentos;
- Análise estatística dos dados;
- Conclusões e recomendações;

Com relação aos projetos experimentais, tem-se que técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta (Nilo Júnior 2003). Dessa forma, o Quadro 2.2 apresenta as principais características relacionadas a cada uma dessas técnicas experimentais.

Quadro 2. 2– Características fundamentais das principais técnicas do projeto e análise de experimento. Adaptado de Gomes *et al.* (2012).

| <i>Projeto experimental</i> | <i>Vantagens</i> | <i>Desvantagens</i> | <i>Aplicações</i> |
|---------------------------------------|--|---|--|
| Fatorial Completo 2^k | Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis. | Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis. | Processos em que já se tenha um prévio domínio e nos quais as realizações das corridas não demandem maior tempo ou custo. |
| Fatorial Fracionado 2^{k-p} | Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas. | Não promove a varredura completa da região experimental. | Processos em que se deseje um pré-conhecimento e nos quais a literatura seja limitada Corridas que demandem maior tempo ou custo. |
| Taguchi | Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos | Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis. | Processos em que haja pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou em que as corridas demandem alto custo ou tempo |
| Metodologia de Superfície de Resposta | Permite a verificação de variações intermediárias do processo | Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nesses níveis. | Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão. |

Com relação ao Taguchi, vários artigos foram analisados nos quais percebe-se que a utilização conjunta de técnicas de projeto e análise de experimentos (DOE), Paiva (2006), Chen e Chen (2007), Julie *et al.* (2007), Fung *et al.* (2005), Tang *et al.* (2007), Vijian *et al.* (2006), Yang (2007) Zhang *et al.* (2007), esta metodologia tem uma característica particularmente interessante para a abordagem híbrida na análise das respostas através da relação sinal-ruído. De acordo com Montgomery (2005), esta relação transforma uma resposta original em uma função que deve ser sempre maximizada, o que simplifica muito o processo de otimização.

Segundo Phadke (1989) há diversos arranjos propostos por Taguchi, como o arranjo ortogonal L8, por exemplo, (2^{7-4}); L9, L12, L16, nos quais os índices indicam o número de experimentos a serem realizados e que possuem equivalência com outros tipos de planejamentos fracionários. Assim, a matriz externa (parâmetros de projeto) é cruzada com a matriz interna (fatores de ruído) fornecendo o tamanho da matriz experimental. A teoria geral de arranjos ortogonais foi proposta por (Kackar, 1985).

Entre os projetos experimentais anteriores, o presente trabalho utilizou a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), Projeto de Parâmetro Robusto (PPR) e o arranjo ortogonal L9 Taguchi para a confirmação dos experimentos, já que este estudo se propõe à otimização do processo de fresamento com três tipos de desgaste de inserto e o uso de fluido de corte. Sendo assim, os principais conceitos que fundamentam a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e Projeto de Parâmetro Robusto (PPR) são discutidos com maiores detalhes no item seguinte.

2.8 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (MSR)

Segundo Montgomery (2005), 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).

Após a Segunda Guerra mundial a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), foi introduzida na indústria química e nos processos industriais de empresas nos Estados Unidos e Europa. Sua notória eficácia fez dela uma das principais ferramentas de melhoria de processos (PAIVA, 2006).

De acordo com Myers e Montgomery (1995), a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis e também a resposta deva alcançar um valor ótimo, a forma de relacionamento entre a variável de resposta e as variáveis independentes seja desconhecida conforme Equação 6. Supõe-se que se deseje descobrir quais os níveis de temperatura (x_1) e pressão (x_2) que maximizam o rendimento (y) de um processo. Pode-se escrever o rendimento (y) como função dos níveis de temperatura e pressão, tal que o ε representa o erro observado na resposta. Em muitos problemas de superfície de resposta, a forma de relacionamento entre a variável de resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Portanto, o primeiro passo dentro da metodologia MSR é encontrar uma aproximação razoável para o verdadeiro relacionamento entre y e o conjunto de variáveis. Usualmente, emprega-se um polinômio de baixa ordem, supondo que a resposta esperada $E(Y)$ seja função de K variáveis preditoras x_1, x_2, \dots, x_k , codificadas de tal maneira que o centro da região de interesse seja a origem $(0, 0, \dots, 0)$. O relacionamento entre y e as variáveis de predição pode ser expresso segundo uma expansão em Série de Taylor, conforme a Equação 6 (Paiva, 2006; Box e Draper, 1987):

$$E(y) = \eta = \eta_0 + \sum_{i=1}^r \left[\frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right] x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial^2 \eta}{\partial x_i \partial x_j} \right] + \varepsilon \quad (6)$$

Onde o subscrito zero indica a avaliação na origem. Se os termos de alta ordem forem ignorados, a expansão produzirá a Equação 7:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (7)$$

onde:

y – Resposta de interesse

x_i – Variáveis independentes

β_i – Coeficientes a serem estimados

k – Número de variáveis independentes

ε – Erro experimental

Se, em adição, forem mantidos os termos de segunda ordem, a aproximação se tornará a Equação 8:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (8)$$

Quase todos os problemas de superfície de resposta utilizam um ou ambos os modelos acima. Além disso, é improvável que o modelo polinomial se comporte como uma aproximação adequada para todo o espaço experimental coberto pelas variáveis independentes. Entretanto, para uma região específica, tais modelos têm se mostrado eficientes.

Para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos o algoritmo tipicamente usado é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS). O método dos mínimos quadrados ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*) é usado para estimar os regressores β do modelo polinomial que, em forma matricial, podem ser representados como a Equação 9:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

Sendo X é a matriz de fatores codificados e Y é a resposta.

Para casos em que a variância não é constante, pode-se utilizar o método dos mínimos quadrados ponderados (*Weighted Least Squares – WLS*) no qual uma matriz de ponderação W pode ser representada pelo inverso do quadrado dos resíduos do modelo ajustado, pelo inverso da incerteza de medição ou pela variância calculada com experimentos replicados (Cho e Park, 2005). Os regressores β podem ser estimados como conforme a Equação 10:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T W Y \quad (10)$$

Com isso, fica construída a função aproximada que relaciona a resposta de interesse com as variáveis do processo. Após a construção do modelo, a significância do mesmo é verificada através de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância). Esse teste de significância é importante para avaliar se o modelo é estatisticamente significativo. Além disso, a ANOVA também permite verificar quais dentre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos. O ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a esse coeficiente, encontra-se o R^2 ajustado

($R^2(adj)$), que considera o fato de que R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Uma visão mais detalhada envolvendo o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, Análise de Variância e ajuste dos modelos pode ser observada em Paiva (2006), juntamente com outras análises importantes como a análise de resíduos e o teste de falta de ajuste (*Lack-of-fit*).

2.9 ARRANJO COMPOSTO CENTRAL (CCD)

Segundo Montgomery (2005), o arranjo composto central (CCD) é um arranjo largamente utilizado para ajustar um modelo de superfície de resposta de segunda ordem devido à sua relativa eficiência com respeito ao número de experimentos necessários.

O arranjo composto central (CCD) é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou fracionado; um conjunto de pontos centrais (*Center Points*) e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados Pontos Axiais. Se a distância entre o centro do arranjo e o ponto fatorial (+1; -1) for aproximadamente 1 (em módulo), a distância do centro ao ponto axial será maior que a unidade onde essa distância comumente representada por α . A Figuras 2.15 (a) e (b), confere ao arranjo experimental a propriedade da “Rotacionalidade”.

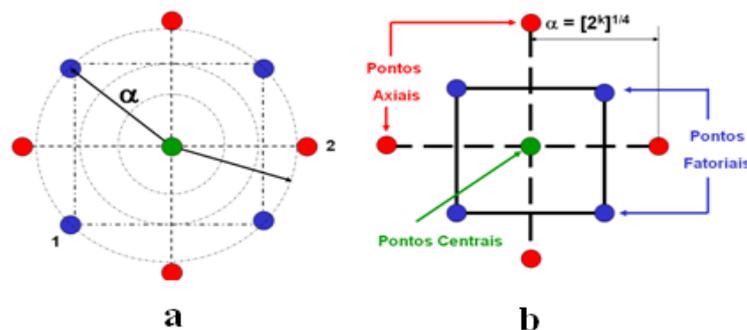


Figura 2.15 – Arranjos CCD. (a) rotacionalidade do CCD; (b) CCD para 2 Fatores; (Adaptado de Paiva, 2006).

Segundo Montgomery (2005), a rotacionalidade é a capacidade que os arranjos de superfície de resposta têm de apresentar a mesma variância para a resposta prevista $Var[y(x)]$ para todos os pontos presentes em uma circunferência de raio α . Quanto mais

afastado do centro do arranjo um ponto estiver, maior será o erro de previsão do modelo associado a ele.

O número de pontos axiais em um arranjo composto central (CCD) é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. Em função de sua localização, podem ser circunscritos, inscritos ou de face centrada. A Figura 2.16 representa os diferentes tipos de um arranjo composto central (CCD).

O Arranjo Circunscrito (CCC) é o arranjo composto central (CCD) original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância α do centro, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Esse arranjo requer 5 (cinco) níveis para cada fator.

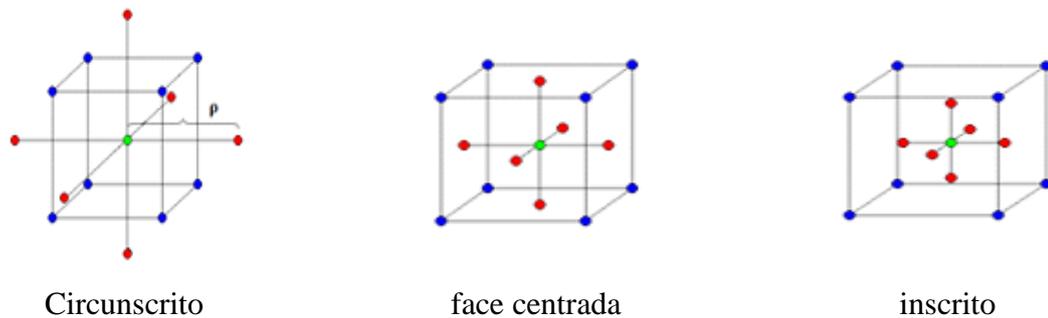


Figura 2.16 – Tipos de CCD.

O Arranjo de Face Centrada (CCF) caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja, $\alpha = +1$ ou -1 . Requer três níveis para cada fator. O Arranjo Inscrito (CCI) é adequado às situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis.

Um CCC explora o maior espaço fatorial possível, enquanto que um CCI explora o menor. Ambos, CCC e CCI, são rotacionáveis. O mesmo não se aplica ao CCF.

Segundo Box e Drapper (1987), para manter a rotacionalidade de um arranjo, o valor de α depende do número de experimentos (k) da porção fatorial do arranjo composto central CCD, conforme a Equação 11:

$$\alpha = (\text{numero de experimentos})^{1/4} = (2^k)^{1/4} \quad (11)$$

Segundo Montgomery (2005) o arranjo composto central CCD ajusta-se, quando necessário, em um modelo polinomial de segunda ordem.

Geralmente, um arranjo composto central CCD com k fatores requer 2^k corridas fatoriais, $2 \times k$ corridas axiais e, no mínimo, um ponto central. Três a cinco pontos centrais são recomendados na literatura (Montgomery 2005). Este modelo é adequado, uma vez que muitos processos podem ser aproximados por uma expansão em série de Taylor, truncada em um termo quadrático.

2.10 PROJETO DE PARÂMETRO ROBUSTO (PPR)

Segundo Ardakani e Noorossana (2008), Projeto de Parametros Robusto (PPR) 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 Projeto de Parametros Robusto (PPR) procura uma combinação de fatores controláveis tais que dois objetivos principais sejam alcançados: a localização da media 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).

Segundo Montgomery (2005), o projeto de parâmetros robustos (PPR) é uma abordagem para a análise e melhoria de processos cujo foco é a determinação dos níveis das variáveis de controle visando os seguintes objetivos: (1) garantir que a média das respostas do processo se estabeleça em um nível desejado (alvo) e (2) garantir que a variabilidade em torno dos valores alvo seja a menor possível. Quanto às técnicas utilizadas para a modelagem e análise dos dados, Montgomery (2005) afirma que a Metodologia de Superfície de Resposta tem se mostrado como uma estratégia eficiente para a abordagem do Projeto de Parâmetros Robustos (PPR) e, nesse sentido, o método de análise é desenvolvido a partir de um dos seguintes arranjos experimentais: os arranjos cruzados ou os arranjos combinados. Para o presente trabalho, a estratégia experimental foi baseada em um arranjo combinado.

Os arranjos combinados são definidos como o sequenciamento de experimentos nos quais as variáveis de ruído, para fins de experimentação, são tratadas como variáveis de controle e, dessa forma, variáveis de controle e ruídos são combinadas em um único arranjo

experimental. Com isso, a partir das informações coletadas nos experimentos, torna-se possível a construção de um modelo de superfície de resposta que relaciona as variáveis de controle, os ruídos e suas respectivas interações. A Equação (12) descreve o modelo de segunda ordem desenvolvido a partir de um arranjo combinado (Montgomery, 2005).

$$y(x, z) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^r \gamma_i z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \delta_{ij} x_i z_j + \varepsilon \quad (12)$$

onde:

y – Resposta de interesse

x_i – Variáveis de controle

z_i – Variáveis de ruído

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i, \delta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados

k – Número de variáveis de controle

r – Número de variáveis de ruído

ε – Erro experimental

Segundo Montgomery (2005), para se ter dois fatores controláveis x_1 e x_2 e somente um fator de ruído z_1 , assumindo que ambos estão expressos como as variáveis usuais codificadas (isto é, eles estão centrados em zero e têm limites, inferior e superior ($\pm a$)). Para tanto, é considerar um modelo de primeira ordem envolvendo as variáveis controláveis, conforme Equação 13:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \gamma_1 z_1 + \delta_{11} x_1 z_1 + \delta_{21} x_2 z_1 + \varepsilon \quad (13)$$

Pode ser observado conforme a Equação 14, que esse modelo tem os efeitos principais dos fatores controláveis e sua interação, bem como os efeitos principais da variável de ruído; além das interações entre as variáveis controláveis e do ruído. Esse tipo de modelo que incorpora o controle e as variáveis de ruído é muitas vezes chamado de modelo de resposta. A menos que, um dos coeficientes de regressão $\delta_{11} \delta_{21}$ seja diferente de zero, com isso não haverá problema de projeto robusto. Normalmente, chamamos o projeto contendo fatores controláveis e ruído de projeto de matriz combinada. Como mencionado anteriormente, as

variáveis de ruído são variáveis aleatórias, embora sejam controláveis para fins experimentais (Montgomery, 2005).

$$E_z(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (14)$$

Onde o z subscrito na equação é para tomar o valor esperado com relação às variáveis aleatórias Z_1 e ε conforme Equação 15. Para encontrar um modelo para a variância da resposta y , é usada uma transmissão de abordagem de erro. Em primeiro lugar, expande-se a equação modelo, em primeira ordem da série de Taylor em torno de $Z_1 = 0$ tem-se (Montgomery, 2005).

$$y = y_{z=0} + \frac{dy}{dz}(z_1 - 0) + R + \varepsilon = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + (\gamma_1 + \delta_{11} x_1 + \delta_{21} x_2) z_1 + R + \varepsilon \quad (15)$$

Onde R é chamado de termo restante na série de Taylor, como é prática usual, ignora-se esse resto. Agora, a variância de y pode ser obtida e aplicada na expressão (sem R), conforme a Equação 16:

$$v_z(y) = \sigma^2(\gamma_1 + \delta_{11} x_1 + \delta_{21} x_2)^2 + \sigma^2 \quad (16)$$

Novamente, é usado o subscrito z na equação de variância como um lembrete de que tanto Z_1 e ε são variáveis aleatórias, derivando o modelo simples para média a variância da resposta, pode ser observado que:

1. A média e modelo de variância envolvem apenas as variáveis controláveis. Essas médias podem potencialmente alterar as variáveis controláveis para resultar um valor objetivo de média e minimizar a variabilidade transmitida para o ruído;
2. O modelo de variância envolve apenas as variáveis controláveis, também envolve os coeficientes de regressão de interação entre controle e variáveis de ruído;
3. O modelo de variância é uma função quadrática das variáveis de controles;
4. O modelo de variância (σ^2), é apenas o quadrado da inclinação de ajuste do modelo de resposta na direção da variável de ruído;

Para usar os modelos citados anteriormente, é necessário:

1. Realizar um experimento que melhor se adapte em um modelo de resposta apropriada, tal como a Equação 12.

2. Substituir os coeficientes de regressão desconhecidos nos modelos de médias e variância com os seus mínimos quadrados estimados a partir do modelo de resposta e substituir (σ^2) no modelo de variância e média do resíduo encontrado na montagem do modelo de resposta.

Podem-se generalizar resultados, supondo-se que existam variáveis controláveis e variáveis de ruído (r). O modelo de resposta geral envolvendo essas variáveis, conforme a Equação 17 (Montgomery, 2005).

$$y(x, z) = f(x) + h(x, z) + \varepsilon \quad (17)$$

em que $f(x)$ é a função do modelo que envolve apenas as variáveis controláveis e $h(x, z)$ são os termos que envolvem os efeitos principais dos fatores de ruído e das interações entre os fatores controláveis e do ruído, dada pela Equação 18. Tipicamente, a estrutura para $h(x, z)$ é:

$$h(x, z) = \sum_{i=1}^k \gamma_i z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \delta_{ij} x_i z_j \quad (18)$$

A estrutura para $f(x)$ vai depender de que tipo de modelo para as variáveis controláveis o experimentador achar que é apropriado. As escolhas lógicas são o modelo de primeira ordem com interação e do modelo de segunda ordem, conforme equação 19. Com isso assumindo-se que as variáveis de ruído têm média e variância zero e covariância zero, e que as variáveis de ruído e ε erros aleatórios têm covariância zero, então o modelo de média para a resposta é apenas:

$$E_z = [y(x, z)] = f(x) \quad (19)$$

Segundo Montgomery (2005) o modelo de variância para a resposta ficará conforme a Equação 20:

$$v_z[y(x, z)] = \sigma_z^2 \sum_{i=1}^r \left[\frac{\partial y}{\partial z_i}(x, z) \right]^2 + \sigma^2 \quad (20)$$

2.11 ARRANJO COMBINADO

Segundo 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 *et 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 de Parâmetro Robusto (PPR).

A abordagem Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), 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 elas. Esses modelos são capazes de modelar os efeitos principais de fatores controláveis e ruído e também as suas interações (Montgomery, 2005).

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.

2.12 OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE

As superfícies de resposta duais (DRS) formam uma classe de problemas na qual se gera uma superfície de resposta para a média $\hat{y}(x)$ e outra para a variância $\hat{\sigma}^2(x)$ de cada característica, utilizando para tal as réplicas experimentais, os arranjos cruzados ou combinados. Essas funções, usualmente escritas como modelos OLS de segunda ordem, podem ser utilizadas em algoritmos de otimização em diferentes esquemas de função objetivo e restrições (Kazemzadeh *et al.*, 2008; Del Castillo *et al.*, 1999). Por exemplo, estabeleceram

a variância como função objetivo, tal que a sua minimização $Min \hat{\sigma}^2(x)$, ficasse sujeita à satisfação da restrição $\hat{y}(x) = T$, onde T é o alvo para a média da característica $\hat{y}(x)$.

Entretanto, a maioria dos trabalhos com Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), a escolha mais comum para otimização dual é a combinação de média e variância em uma única função objetivo que deve ser minimizada. Essa função é conhecida como Erro Quadrático Médio (EQM). A função objetivo EQM é restrita apenas ao espaço experimental de solução, tal que $Min [\hat{y}(x) - T]^2 + \sigma^2$ (Paiva *et al.*, 2012; Shin *et al.*, 2011; Kovach *et al.*, 2009). Supondo que média e variância possam ter diferentes graus de importância, a função objetivo EQM pode assumir a forma $EQM_w = W_1(\hat{y}(x) - T)^2 + W_2 \times \hat{\sigma}^2(x)$ na qual os pesos w_1 e w_2 são constantes positivas pré-especificadas (Kazemzadeh *et al.*, 2008; Tang *et al.*, 2002). Esses pesos também podem ser escolhidos a partir de diferentes combinações convexas, de tal modo que $w_1 + w_2 = 1$ com $w_1 > 0$ e $w_2 > 0$, gerando um conjunto de soluções.

Com o desenvolvimento das equações de média e variância, a otimização dual do processo pode ser conduzida empregando-se as diversas técnicas de otimização de múltiplos objetivos disponíveis na literatura. Neste trabalho, utilizou-se o conceito do erro quadrático médio (EQM), que é apresentado por Köksoy (2006), como a soma da variância com a diferença quadrática entre a média da resposta e o seu valor alvo. Sendo assim, a minimização do erro quadrático médio garante, então, que o valor médio da resposta se estabeleça o mais próximo possível do seu alvo, apresentando ao mesmo tempo o mínimo de variabilidade. Tal otimização é obtida a partir da seguinte formulação Equação 21:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad EQM(y) &= [\mu(y) - T_y]^2 + \sigma^2(y) \\ \text{Sujeito a} \quad \quad \quad \quad &ax^T x \leq \alpha^2 \end{aligned} \tag{21}$$

onde:

$EQM(y)$ – Erro quadrático médio da resposta y

$\mu(y)$ – Modelo para a média da resposta y

T_y – Alvo da resposta y

$\sigma^2(y)$ – Modelo para a variância da resposta y

$ax^T x \leq \alpha^2$ – Restrição esférica para o espaço experimental

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL

Para cumprir com os objetivos deste trabalho no fresamento de topo do aço ABNT 1045, forjado, com dureza de 180 HB na forma de barra com seção quadrada de 100 x 100 mm e comprimento de 300 mm, fixado por dispositivo usinado, e composição química conforme o Quadro 3.1.

Quadro 3. 1– Composição química (%) do aço ABNT 1045.

| <i>Material</i> | <i>C</i> | <i>Mn</i> | <i>P_{máx}</i> | <i>S_{máx}</i> |
|-----------------|---------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Aço ABNT 1045 | 0,430 - 0,500 | 0,600 - 0,900 | 0,040 | 0,050 |

3.2 MÁQUINA E FERRAMENTAS

A execução dos ensaios foram realizados no Laboratório de Automoção da Manufatura da UNIFEI. A máquina-ferramenta utilizada foi um centro de usinagem CNC marca Fadal com potência de 15 kW e máxima rotação de 7500 rpm conforme Figura 3.1.



Figura 3.1 – Centro de usinagem Fadal (UNIFEI).

Durante os ensaios, utilizou-se a fresa de topo código (Sandvik) R390-025A25-11M, diâmetro 25 mm, ângulo de posição $K_r = 90$ graus, haste cilíndrica, passo médio com três insertos e fixação mecânica por pinça. Na fresa foram usados insertos de metal duro ISO P25, revestidos com nitreto de titânio (TiN), código R390-11T308M-PM GC 1025 do fabricante (Sandvik), conforme a Figura 3.2.

Utilizou-se o fluido de corte ME-II sendo um óleo solúvel sintético, concentrado (alta taxa de diluição em água), ecológico (isento de nitritos, cloro, enxofre, solventes aromáticos e metais pesados) que refrigera e lubrifica com rendimento e com vida útil da ferramenta bastante satisfatória. Tem ação anticorrosiva, não ataca componentes da máquina- ferramenta e das peças usinadas. Não causa risco para operador nem produz vapores irritantes no ambiente de trabalho.

Segundo o fabricante Tapmatic (2012), é de aplicação universal sendo recomendado para operações de Rosqueamento e usinagem pesada. É indicado para a usinagem de metais, em máquinas que trabalham com óleos de corte re-circulantes. Este fluido de corte foi utilizado nas concentrações 5%; 10% e 15% para todos os ensaios realizados.



Figura 3.2 – Cabeçote com insertos para o fresamento de topo.

3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo principal a determinação da melhor condição de velocidade de corte e avanço tendo como ponto de partida as recomendações de catálogo do fabricante da ferramenta para o material a ser usinado. Outro objetivo destes ensaios foi determinar a melhor maneira de fixação da peça na mesa da máquina-ferramenta.

Inicialmente, os parâmetros foram pré-fixados baseando-se nas condições dos dados apresentados pelo Quadro 3.2. Em seguida, testes preliminares foram realizados para verificar se o processo ocorria nas condições extremas de cada variável de controle.

Quadro 3. 2– Ensaio preliminares.

| <i>1ª Fase: Semi – Acabamento</i> | | | | |
|--|------------------|-----------|------------------------|--------------------------|
| Variáveis de controle | Símbolo | Parâmetro | Variáveis de saída | Condição de refrigeração |
| Avanço por dente | f_z (mm/dente) | 0,12 | Desgaste da ferramenta | Sem fluido |
| Profundidade de corte | a_p (mm) | 3,0 | Vida da ferramenta | Mínima vazão |
| Velocidade de corte | v_c (m/min) | 245 e 294 | Rugosidade (R_a) | Máxima vazão |
| Penetração de trabalho | a_e (mm) | 17,5 | | |
| <i>2ª Fase: Acabamento</i> | | | | |
| Variáveis de controle | Símbolo | Parâmetro | Variáveis de saída | Condição de refrigeração |
| Avanço por dente | f_z (mm/dente) | 0,10 | Desgaste da ferramenta | Sem fluido |
| Profundidade de usinagem | a_p (mm) | 1,0 | Vida da ferramenta | Mínima vazão |
| Velocidade de corte | v_c (m/min) | 325 e 390 | Rugosidade (R_a) | Máxima vazão |
| Penetração de trabalho | a_e (mm) | 17,5 | | |

De acordo com o Quadro 3.2, tanto para as condições de semi-acabamento e acabamento, a mínima vazão foi 150 *ml/min* e a máxima vazão foi de 20 *l/min*, o critério de fim de vida da ferramenta utilizado foi o desgaste de flanco $v_b = 0,2$ mm, para assegurar a qualidade de acabamento da peça.

Finalmente, após alguns ajustes, chegou-se aos limites finais para as faixas de trabalho de cada parâmetro. A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros analisados juntamente com os níveis de trabalho definitivos. Primeiramente, foram definidos quais parâmetros seriam adotados para cada nível das variáveis de controle. Essa definição foi importante para que não fossem adotados valores que inviabilizassem a execução dos experimentos ou que resultassem em

condições inseguras para execução dos ensaios. Para tanto, foram consideradas informações de catálogo do fabricante da fresa e dos insertos e do material usinado. Para as variáveis de ruídos foram arbitrados valores conforme Tabela 3.2, construída em software estatístico MINITAB, também embasado nos ensaios preliminares.

Tabela 3.1 – Variáveis de controle selecionadas.

| <i>Variáveis de controle</i> | <i>Símbolo</i> | <i>Níveis</i> | | | | |
|------------------------------|------------------|---------------|-------|------|------|--------|
| | | -2,82 | -1,0 | 0,0 | 1,0 | 2,82 |
| Avanço por dente | f_z (mm/dente) | 0,008 | -0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,29 |
| Profundidade de usinagem | a_p (mm) | 0,064 | 0,75 | 1,12 | 1,50 | 2,18 |
| Velocidade de corte | v_c (m/min) | 254 | 300 | 325 | 350 | 395,71 |
| Penetração de trabalho | a_e (mm) | 12,25 | 15,0 | 16,5 | 18,0 | 20,74 |

Tabela 3.2 – Variáveis de ruído selecionadas.

| <i>Fatores de Ruídos</i> | <i>Símbolo</i> | <i>Níveis</i> | | |
|-----------------------------------|----------------|---------------|------|------|
| | | -1 | 0 | 1 |
| Desgaste de flanco (v_b) (mm) | Z_1 | 0 | 0,15 | 0,30 |
| Concentração do fluido C (%) | Z_2 | 5 | 10 | 15 |
| Vazão do fluido Q <i>ml/min</i> | Z_3 | 0 | 10 | 20 |

Durante os ensaios do fresamento de topo do aço ABNT 1045, os ensaios foram planejados, para um desgaste de flanco máximo (v_b) de 0,3 mm. A Figura 3.3 (A e B) mostra a comparação da ferramenta antes e após os ensaios no laboratório.

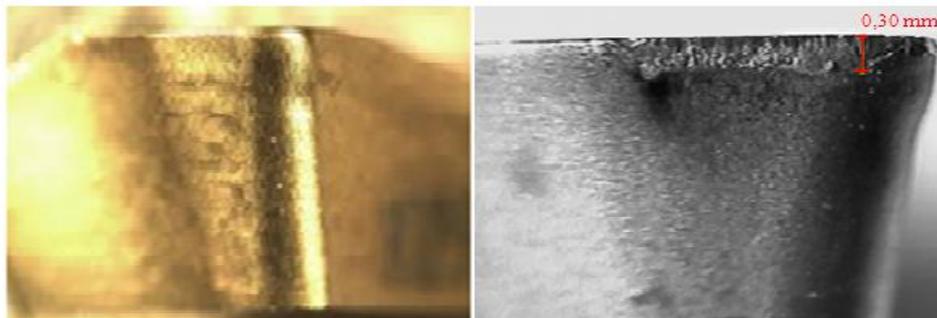


Figura 3.3 – Ferramentas utilizadas; (A) ferramenta nova. (B) ferramenta desgastada.

3.4 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

As medições dos desgastes de flanco na superfície de folga das pastilhas (v_b) foi obtido em um analisador de imagem (*Global Image Analyser*) acompanhado do respectivo software (*Global Lab Image*). Este equipamento é constituído de um microscópio estereoscópico modelo SZ 61 com ampliação de 45 vezes, acoplado a uma câmara de vídeo em um computador compatível, conforme Figura 3.4.



Figura 3.4 – Montagem do microscópio Olympus.

A medição dos valores de rugosidade do corpo de prova foi registrada pelo rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest 201 fabricado pela Mitutoyo, aferido e calibrado antes do início das medições. O parâmetro *de cut-off* foi ajustado para 0,8 mm em todas as medidas.

Os valores medidos para as variáveis de resposta R_a e R_t foram obtidos simultaneamente, durante cada passada da unidade de avanço e posteriormente registrados em planilha eletrônica através de um cabo USB até ao computador. Esse rugosímetro, mostrado na Figura 3.5 é periodicamente aferido pelo laboratório de metrologia da UNIFEI.



Figura 3.5 – Rugosímetro utilizado no experimento.

3.5 PROBLEMA DE PESQUISA

Segundo Quinsat *et al.* (2010) a qualidade da superfície resulta na escolha da estratégia e parâmetros correspondentes de usinagem (ferramenta, avanço, velocidade de corte e profundidade de usinagem).

Na otimização do processo do fresamento de topo do aço ABNT 1045 com ferramenta de metal duro busca-se identificar a combinação ótima dos parâmetros de usinagem que permitam a otimização das características geométricas da rugosidade da peça (R_a e R_t) usinada garantido, ao mesmo tempo, melhor qualidade da superfície fresada. Dessa forma, deseja-se:

- Minimizar a rugosidade com ferramentas novas.
- Minimizar a rugosidade com ferramentas desgastadas com 0,15 mm.
- Minimizar a rugosidade com ferramentas desgastadas com 0,30 mm.
- Minimizar a concentração de fluido;
- Minimizar a vazão de fluido.

A descrição do objeto de estudo anterior o caracteriza como um problema complexo de otimização, na medida em que se deseja otimizar múltiplas respostas, considerando que o processo por fresamento empregado é governado por múltiplos parâmetros de entrada. Portanto, uma abordagem científica para esse tipo de problema se torna importante para que as ferramentas de análise sejam corretamente definidas, permitindo que os resultados alcançados sejam coerentes e significativos para os parâmetros de rugosidades (R_a e R_t). Para esse modelo, uma nova condição foi adicionada, o comportamento da otimização frente à possível presença de fatores de ruído, demonstrando ser possível dar o devido tratamento e, ainda assim, obter parâmetros compatíveis de usinagem. A Figura 3.6 apresenta o diagrama do processo para o sistema investigado.

As variáveis de controle adotadas para esse procedimento foram velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), profundidade corte (a_p) e penetração de trabalho (a_e). Essas variáveis são reconhecidamente as mais importantes, uma vez que influencia fortemente o

processo de fresamento, principalmente o acabamento superficial da peça e o desgaste da ferramenta (Diniz *et al.*,2008).

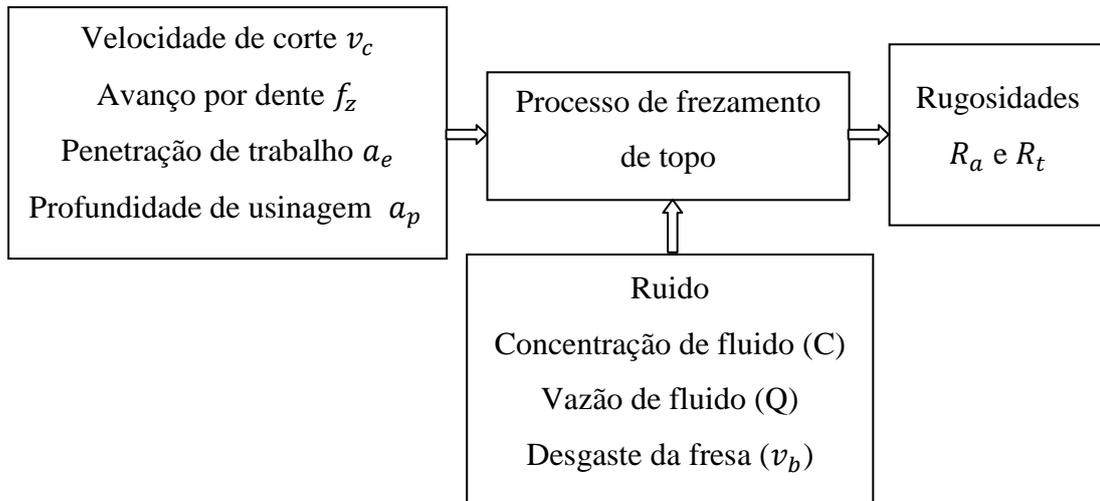


Figura 3.6 – Processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045.

3.6 MÉTODO EXPERIMENTAL

Para a otimização do processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045, o presente trabalho utilizou como método de pesquisa a experimentação. Assim, entre as técnicas de experimentação foi empregado o Projeto e Análise de Experimentos (DOE), para que dados apropriados fossem coletados e depois analisados por métodos estatísticos, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (Montgomery, 2005). Considerando os projetos experimentais do DOE, foi utilizada a Metodologia de Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), que se caracteriza como um conjunto de ferramentas indicada para a otimização de processos, além de permitir um amplo conhecimento a respeito do fenômeno estudado.

O levantamento dos dados propriamente dito é uma atividade muito importante na execução do trabalho. Um banco de dados mal elaborado pode conduzir a resultados insatisfatórios ou deficientes. Dessa forma, é extremamente importante o planejamento detalhado do experimento, bem como sua adequada execução e registro conforme as fases a seguir.

1ª Fase – Metodologia de Superfície de Resposta (MSR): utilizada para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados, modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros em R_a e R_t .

2ª Fase – Otimização do Erro Quadrático Médio (EQM): utilizada para obter a combinação ótima dos parâmetros de usinagem que permitam a maximização dos resultados do processo.

O fluxograma Figura 3.7 apresenta as etapas seguidas em cada fase do método experimental, para o processo do fresamento de topo do aço ABNT 1045.

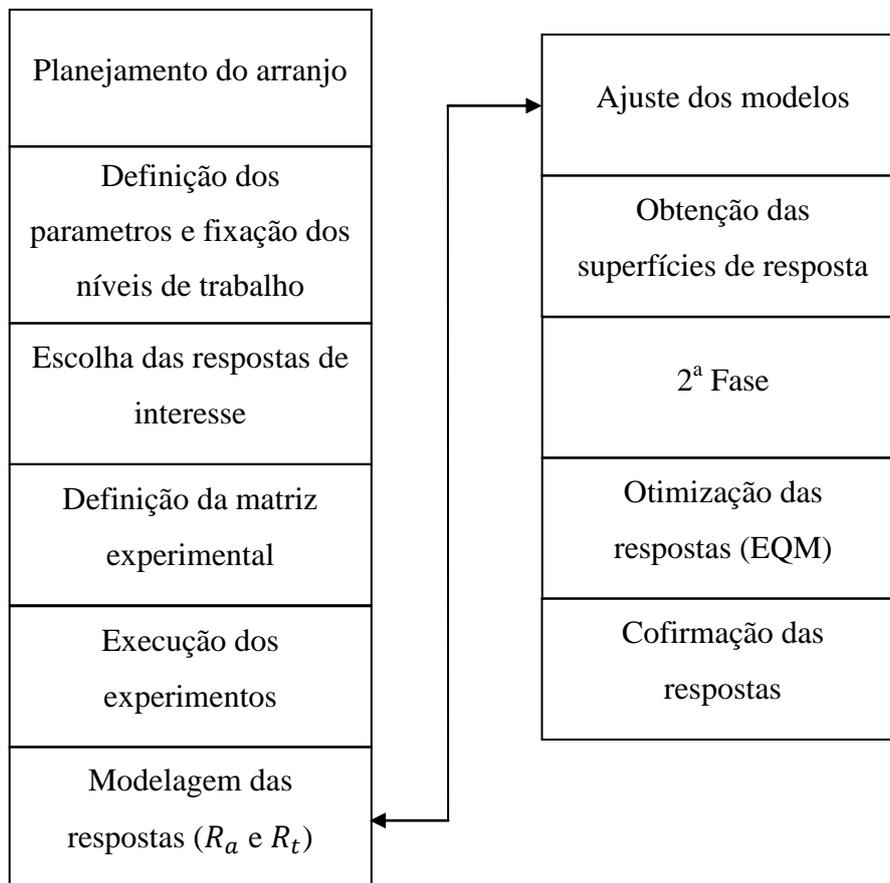


Figura 3.7 – Fases do método experimental.

3.7 DEFINIÇÃO DA MATRIZ EXPERIMENTAL

A Tabela 3.3 apresenta a matriz experimental deste trabalho. O arranjo composto central (CCD) é um arranjo experimental da Metodologia de Superfície de Resposta que incorpora aos experimentos fatoriais um conjunto de pontos centrais e um conjunto de níveis extras, denominados pontos axial (Montgomery 2005).

O arranjo combinado, adotada para esta pesquisa foi construída através do software estatístico *MINITAB*, contendo sete fatores, seis pontos axiais (que foram retirados da matriz experimental), dez pontos centrais e 1 replicação, totalizando 82 experimentos. O valor adotado para α foi 2,82.

O procedimento de modelar a resposta, como uma função dos fatores do experimento, é um método de análise estatística discutido e proposto por vários autores. Shoemaker *et al.* (1991), Montgomery (1991), Quesada e Castilho (2004) e Robinson *et al.* (2006) discutiram este procedimento. A idéia básica é obter mais informações sobre a influência dos fatores de ruído sobre a resposta, incluindo estes fatores no modelo. Os fatores de ruído, geralmente, são incluídos nos experimentos como efeitos fixos; então, superfícies de respostas para a média e variância podem ser construídas, facilmente, pelo uso dos arranjos cruzados ou dos arranjos combinados.

Foi usado o software estatístico *MINITAB*, para a construção do arranjo combinado conforme Tabela 3.3, que gerou um conjunto sequencial de corridas experimentais, sob a influência de quatro fatores de controle e três variáveis de ruído. As variáveis de controle analisadas foram , avanço por dente (x_1), a profundidade de usinagem (x_2) a velocidade de corte (x_3) e a penetração de trabalho (x_4). As variáveis de ruído foram o desgaste de flanco da ferramenta (z_1), a concentração do fluido de corte (z_2) e a vazão do fluido de corte (z_3).

Tabela 3.3 – Matriz experimental - arranjo combinado.

| N° de experimentos | <i>Variáveis de controle</i> | | | | <i>Variáveis de ruído</i> | | |
|--------------------|------------------------------|-------|--------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | z_1 | z_2 | z_3 |
| 1 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 2 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 3 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 4 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 5 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 6 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 7 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 8 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 9 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 10 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 11 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 12 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 13 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 14 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 15 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 00,00 |
| 16 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 5,00 | 20,00 |
| 17 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 18 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |
| 19 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |
| 20 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 21 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |
| 22 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 23 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 24 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |
| 25 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |
| 26 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 27 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 28 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |
| 29 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 30 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |
| 31 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 20,00 |

Continuação da Tabela 3.3 – Matriz experimental - arranjo combinado.

| N° de experimentos | <i>Variáveis de controle</i> | | | | <i>Variáveis de ruído</i> | | |
|--------------------|------------------------------|-------|--------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | z_1 | z_2 | z_3 |
| 32 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 5,00 | 00,00 |
| 33 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 34 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 35 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 36 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 37 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 38 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 39 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 40 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 41 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 42 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 43 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 44 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 45 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 46 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 47 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 20,00 |
| 48 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,00 | 15,00 | 00,00 |
| 49 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |
| 50 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 51 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 52 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |
| 53 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 54 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |
| 55 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |
| 56 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 15,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 57 | 0,10 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 58 | 0,20 | 0,75 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |
| 59 | 0,10 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |
| 60 | 0,20 | 1,50 | 300,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 61 | 0,10 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |

Continuação da Tabela 3.3 – Matriz experimental - arranjo combinado.

| N° de experimentos | <i>Variáveis de controle</i> | | | | <i>Variáveis de ruído</i> | | |
|--------------------|------------------------------|-------|--------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | z_1 | z_2 | z_3 |
| 62 | 0,20 | 0,75 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 63 | 0,10 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 00,00 |
| 64 | 0,20 | 1,50 | 350,00 | 18,00 | 0,30 | 15,00 | 20,00 |
| 65 | 0,01 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 66 | 0,29 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 67 | 0,15 | 0,06 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 68 | 0,15 | 2,19 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 69 | 0,15 | 1,13 | 254,29 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 70 | 0,15 | 1,13 | 395,71 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 71 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 12,26 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 72 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 20,74 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 73 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 74 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 75 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 76 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 77 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 78 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 79 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 80 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 81 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |
| 82 | 0,15 | 1,13 | 325,00 | 16,50 | 0,15 | 10,00 | 10,00 |

3.8 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Todos os experimentos foram executados no sentido concordante, ou seja, a rotação da ferramenta coincidi com o sentido de avanço da mesa do Centro de Usinagem Fadal. A Figura 3.8 ilustra a área de trabalho da máquina com o corpo de prova fixado na mesa.



Figura 3.8 – Montagem do corpo de prova. (1) ferramenta; (2) corpo de prova; (3) dispositivo de fixação do corpo de prova; (4) mesa fresadora.

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. Por esse motivo, a importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que crescem as exigências do projeto. Superfícies de componentes deslizantes, como o eixo de um mancal, devem ser lisas para que o atrito seja o menor possível. Essas exigências de acabamento não são tão rigorosas no caso das superfícies externas da tampa e da base de um mancal, por exemplo (Agostinho *et al.* (2004)

Existem vários parâmetros de usinagem que pode afetar diretamente o acabamento da superfície da peça usinada. Os principais agentes externo que pode influenciar na rugosidade são: material da peça a ser usinada e da ferramenta e também as condições de corte, rigidez da máquina-ferramenta (Machado *et al.*, 2009).

A condição experimental do arranjo foi conduzida para os 82 experimentos. O corpo de prova foi fresado usando-se três tipos de desgaste de ferramenta (nova, com desgaste de flanco de 0,15 e 0,30 *mm*). As condições de ruído foram utilizadas para simular fenômenos gerais que ocorrem quando se realizam quaisquer operações de fresamento, reproduzindo de certa forma, qual o comportamento da ferramenta durante o processo de fresamento e as condições ocorridas simultaneamente ao desgaste da ferramenta. Obviamente nessas condições, o valor da rugosidade da peça sofrerá algum tipo de variação, independentemente da configuração de controle do processo de usinagem. Assim, o objetivo principal do projeto de parâmetro robusto (PPR) é descobrir os parâmetros de configuração de controle capaz de alcançar uma rugosidade reduzida e com mínima dispersão. O rugosímetro foi montado em

um suporte com movimento deslizante no sentido vertical, com uma lente para ajuste de 0,05 (*mm*) na escala graduada, para facilitar a aproximação e o contato com a superfície usinada. Com isso, o erro a cada medição tem dispersão menor ao aproximar o contato do rugosímetro com a superfície usinada. Conforme mostra Figura 3.9, foram feitas três medições de rugosidade ao longo do comprimento da peça, sendo nas duas extremidades e no centro de cada penetração de trabalho (a_e) para cada condição de ensaio.

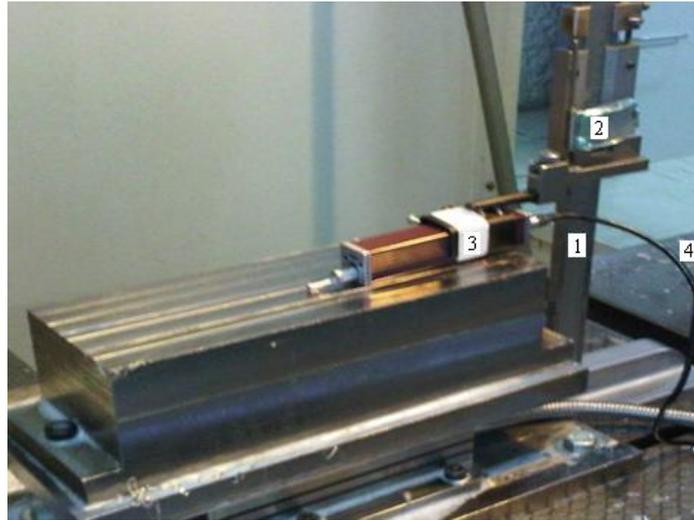


Figura 3.9 – Registro da rugosidade. (1) dispositivo fixação rugosímetro; (2) escala graduada; (3) rugosímetro; (4) cabo USB.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES

As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram o comportamento do desgaste de flanco máximo em função do tempo de corte para as três condições de refrigeração para as velocidades de corte $v_c = 245$ e $294 \text{ m}/\text{mi}_n$, avanço por dente $f_z = 0,12 \text{ mm}/\text{dente}$ e profundidade de usinagem $a_p = 3 \text{ mm}$, respectivamente.

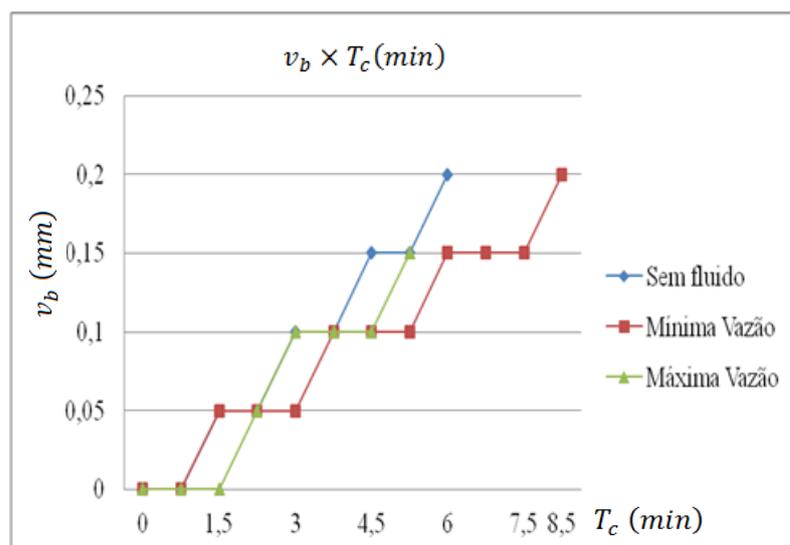


Figura 4.1 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte.

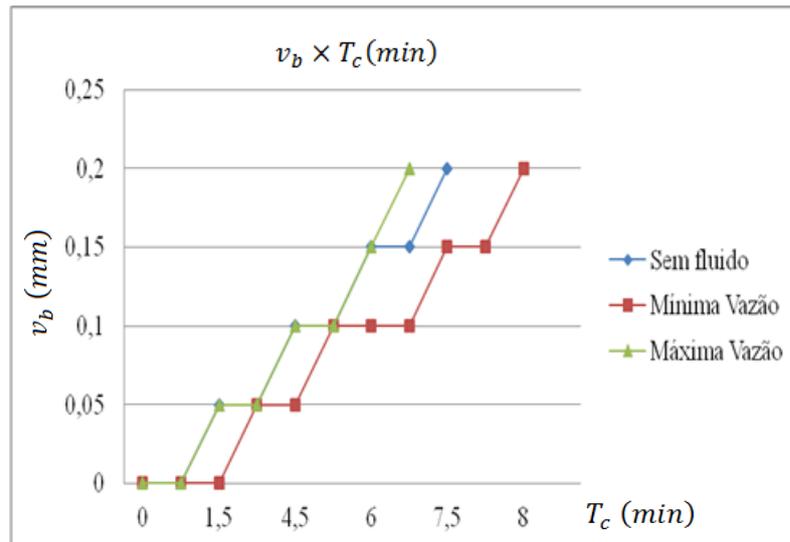


Figura 4.2 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte.

Pode-se observar nas Figuras 4.1 e 4.2 que a condição da mínima vazão proporcionou maior tempo de corte e maior vida da ferramenta nas duas velocidades de corte ensaiadas. Para a velocidade de corte de 245 m/min na condição mínima vazão possibilitou um maior tempo de corte do que na condição de máxima vazão de fluido de corte, onde o inserto quebrou antes do desgaste previsto. Quando se aumenta a velocidade de corte para 294 m/min , esta diferença cai. Isto é devido ao aumento da energia que é imputada ao processo com o aumento da velocidade de corte. A temperatura na região de corte é maior e a queda de temperatura na ferramenta quando ela não está cortando é maior, reduzindo a vida da ferramenta e o tempo de usinagem, devido à capacidade do fluido de corte de retirar calor da região de corte.

Com relação aos ensaios sem fluido de corte, a Figura 4.3 apresenta a foto do desgaste de flanco (v_b) do inserto aproximadamente uniforme na aresta de corte. A geração de calor durante a usinagem sem fluido reduz a resistência mecânica do volume de material na formação do cavaco, aumentando sua ductilidade de tal maneira que a adesão do cavaco na aresta de corte desgastada fica facilitada. Assim que a aresta de corte sai da peça em uma revolução, ela entra em contato com o ar, que possui uma capacidade de refrigeração muito menor que o fluido. Assim, a temperatura do material aderido na ferramenta não diminui muito, mantendo sua resistência mecânica baixa. Na interação entre aresta de corte e peça na próxima revolução, o material aderido na aresta de corte encontra o material da peça com baixa resistência devido à alta temperatura, facilitando a formação do cavaco. Neste caso, observou-se que o desgaste de flanco foi mais homogêneo do que quando o fluido de corte foi

usado e, na maioria dos casos, a área do raio de ponta apresentou um desgaste minimizado pelo material aderido. O súbito crescimento do desgaste de flanco ao fim da vida da ferramenta deve-se à remoção da cobertura e exposição do substrato, e por consequência tem-se a fragilização da aresta de corte.

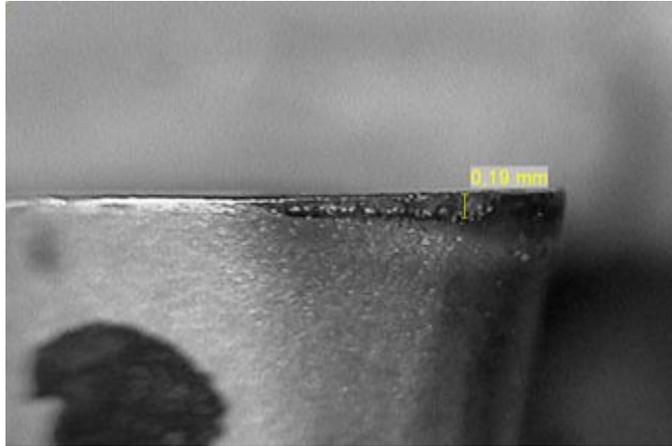


Figura 4.3 – Desgaste de flanco máximo do inserto ($v_b = 0,19$ mm).

As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram o comportamento do desgaste de flanco máximo em função do tempo de corte para as três condições de refrigeração para as velocidade de corte $v_c = 325$ e 390 m/min , avanço por dente $f_z = 0,1$ $mm/dente$ e profundidade de usinagem $a_p = 1$ mm .

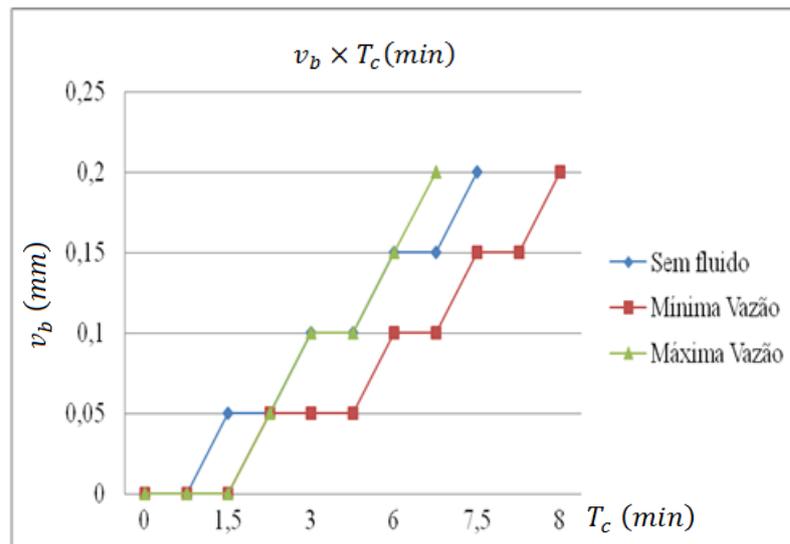


Figura 4.4 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte.

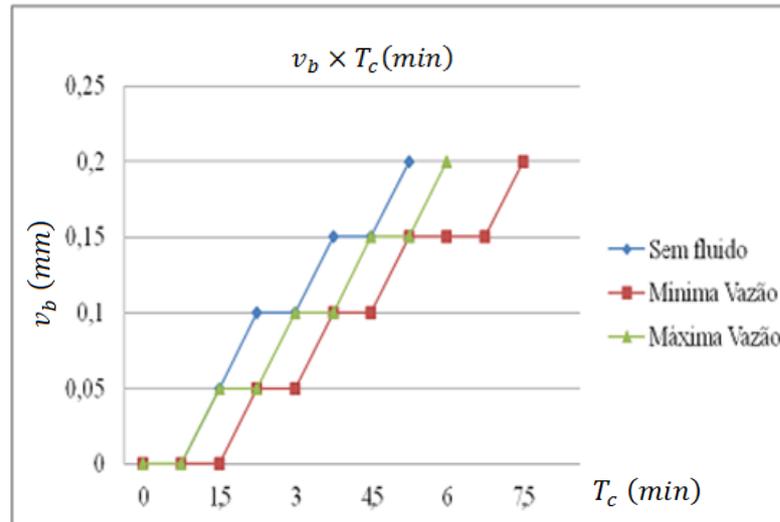


Figura 4.5 – Desgaste de flanco em função do tempo de corte.

Para as três condições ensaiadas é possível observar que as curvas de comportamento do desgaste apresentam uma tendência semelhante, para os tempos de corte diferentes. Com aplicação de fluido na máxima vazão os desgastes foram próximos ou maiores que na condição a seco. Os desgastes desenvolvidos na condição de máxima vazão estão associados ao maior choque térmico gerado no corte interrompido. Já na usinagem sem fluido de corte, pode-se verificar através da inclinação da curva, um comportamento uniforme do desgaste com valores crescentes ao longo do tempo de corte. Com relação à usinagem com mínima vazão de fluido, os valores dos desgastes permanecem constantes por alguns instantes de tempo para depois aumentar no decorrer dos ensaios.

Quando o fluido é aplicado com a mínima vazão, a fina película de fluido lubrifica a superfície da peça e da ferramenta durante o tempo em que aresta de corte gira fora da peça. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para atuar efetivamente como lubrificante, reduzindo o atrito e o calor gerado no processo de fresamento, diminuindo o desgaste e aumentando a vida da ferramenta.

Analisando a influência da profundidade de usinagem (a_p), a diferença entre o corte sem fluido e o corte com máxima vazão fluido é muito pronunciada. Isto se deve ao fato de que na condição com $a_p = 3 \text{ mm}$ se tem maior volume de cavaco removido na unidade de tempo. Com isso, eleva-se o gradiente de temperatura na ferramenta em cada volta quando se utiliza fluido e, assim, maior o choque térmico e menor a vida da ferramenta. O aumento da velocidade de corte acima de 300 m/min não teve grande influência na vida da ferramenta,

amenizada pela redução do avanço (f_z) por dente de 0,12 para 0,10 $mm/dente$ e pela profundidade de usinagem de 3 para 1 mm .

As Figuras 4.6 e 4.7 ilustram o comportamento da rugosidade média R_a em função do tempo de corte para as três condições de refrigeração com os seguintes dados de corte: $v_c = 245$ e 294 n/min , $f_z = 0,12$ $mm/dente$ e $a_p = 3$ mm .

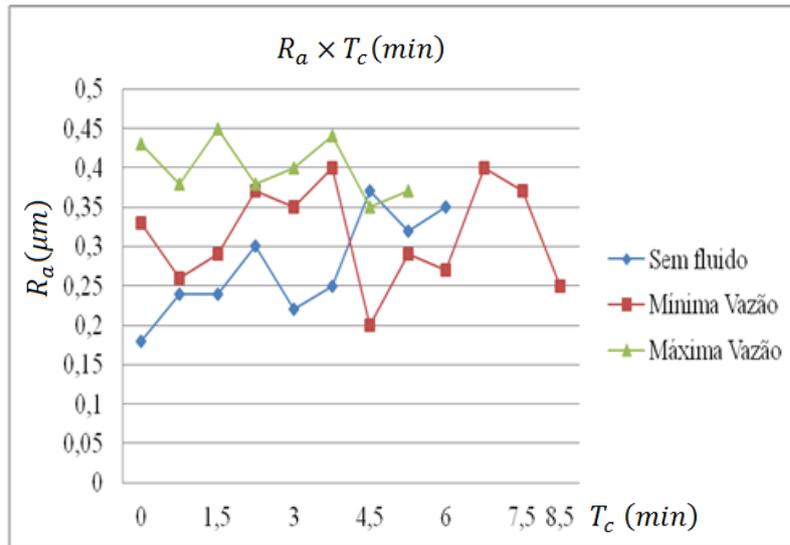


Figura 4.6 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte.

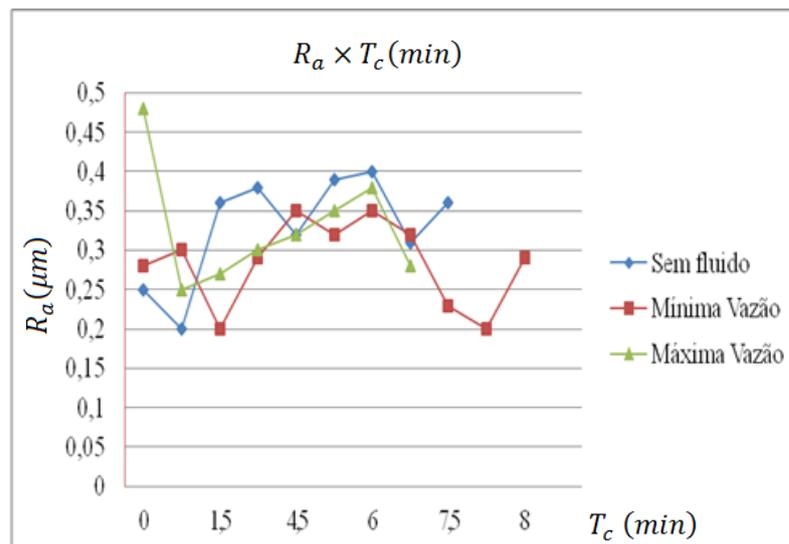


Figura 4.7 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte.

As Figuras 4.8 e 4.9 ilustram o comportamento do parâmetro de rugosidade média R_a em função do tempo de corte para as três condições de refrigeração com os seguintes dados de corte $v_c = 325$ e 390 m/min , avanço por dente $f_z = 0,1$ $mm/dente$ e profundidade de usinagem $a_p = 1$ mm .

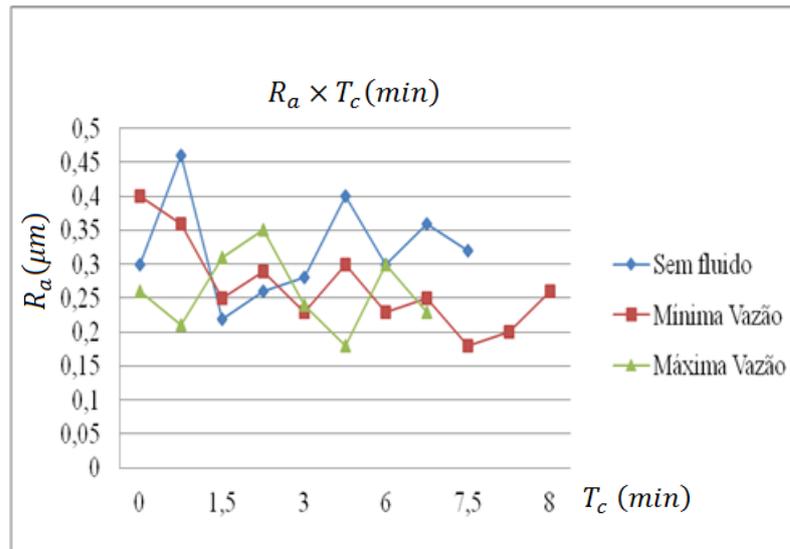


Figura 4.8 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte.

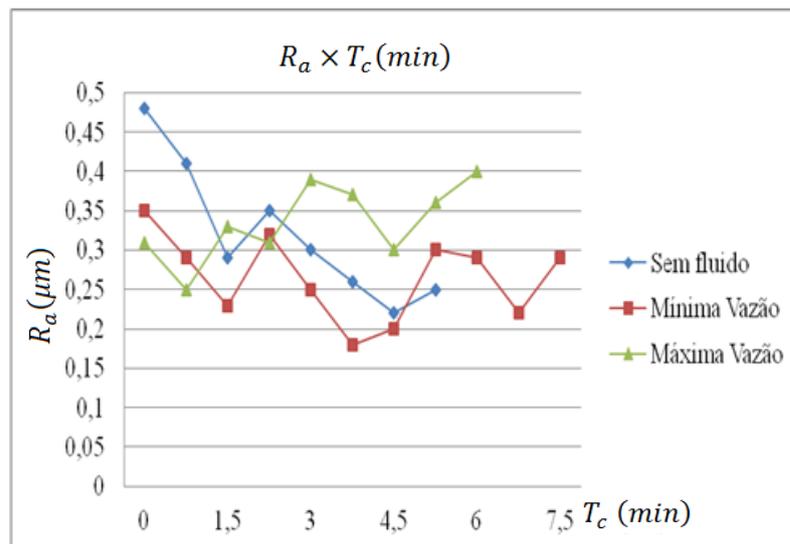


Figura 4.9 – Registro da rugosidade em função do tempo de corte.

Pode-se observar nas Figuras 4.6 a 4.9, que a rugosidade média (R_a) medida durante os ensaios varia de forma aleatória, alternando entre 0,2 e 0,5 μm e demonstrando não ter correlação com o desgaste de flanco crescente ao longo do tempo de corte. Isto ocorreu porque a aresta secundária de corte é que está em contato com a superfície da peça usinada. Como sua função é de apenas “alisar” a superfície sendo formada, esta aresta tem um desgaste muito reduzido. Deste modo, o fato do desgaste de flanco crescer de forma rápida e mudar a geometria da aresta principal de corte, este não tem efeito sobre a rugosidade.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 observou-se na condição sem fluido de corte, o comportamento menos aleatório da rugosidade em função do desgaste mais uniforme da ferramenta nesta condição. Em todas as condições de corte, a condiç

ão com máxima vazão apresentou grande dispersão da rugosidade ao longo do tempo de corte. Justifica-se este fato pelo maior desgaste da ferramenta (v_b) nesta condição de lubri-refrigeração, pois o uso intenso de fluido eleva o gradiente de temperatura na ferramenta, gerando micro-trincas de origem térmica, que acelera o seu desgaste.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 mostram que na condição de mínima vazão houve uma redução dos valores de rugosidade R_a , tanto na média como na sua dispersão. Isto se deve ao melhor comportamento da ferramenta nesta condição. Nestes ensaios utilizou-se maiores velocidade de corte e menor avanço por dente, que contribuíram com os resultados do acabamento da peça. No geral os valores de rugosidade R_a obtidos foram bastante positivos ficando na faixa entre 0,2 e 0,5 μm .

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DEFINITIVO

A análise dos resultados foi dividida em etapas consecutivas e independentes. A primeira etapa trata do processo de modelagem de todas as variáveis de resposta medidas neste trabalho e são representadas matematicamente. Para tanto, foram utilizados o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) e Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). A segunda etapa trata do processo de otimização das variáveis de resposta visando um projeto de parâmetro robusto do processo em questão. Nesta etapa, o método proposto pelo Erro Quadrático Médio (EQM). A terceira e última etapa trata do experimento de confirmação pelo método de Taguchi que foi executado para verificar se o ponto ótimo indicado pelo método de otimização proposto realmente conduz aos valores esperados para as variáveis de resposta conforme previsto pelos modelos adotados.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados experimentais das 82 corridas do arranjo combinado.

Tabela 4.1– Resultados experimentais do arranjo combinado.

| <i>N° Experimentos</i> | <i>Fatores controláveis</i> | | | | <i>Ruídos</i> | | | <i>Replicações</i> | | | | | | <i>Média (R_a)</i> | <i>Média (R_t)</i> |
|------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| | <i>f_z</i> | <i>a_p</i> | <i>v_c</i> | <i>a_e</i> | <i>v_b</i> | <i>C</i> | <i>Q</i> | <i>R_{a1}</i> | <i>R_{a2}</i> | <i>R_{a3}</i> | <i>R_{t1}</i> | <i>R_{t2}</i> | <i>R_{t3}</i> | | |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 0,29 | 0,25 | 0,35 | 1,98 | 1,76 | 2,55 | 0,297 | 2,097 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,60 | 1,62 | 2,20 | 7,76 | 6,85 | 8,15 | 1,807 | 7,587 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 1,02 | 0,64 | 0,31 | 4,50 | 3,81 | 2,09 | 0,657 | 3,467 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 2,52 | 2,69 | 2,51 | 8,86 | 8,63 | 9,38 | 2,573 | 8,957 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 0,34 | 0,37 | 0,35 | 2,24 | 1,90 | 2,34 | 0,353 | 2,160 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 3,04 | 3,35 | 2,65 | 9,31 | 10,05 | 8,62 | 3,013 | 9,327 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 0,20 | 0,30 | 0,31 | 1,71 | 2,14 | 2,07 | 0,270 | 1,973 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 2,72 | 2,08 | 2,45 | 9,00 | 7,74 | 9,49 | 2,417 | 8,743 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 0,27 | 0,32 | 0,37 | 1,91 | 1,89 | 2,46 | 0,320 | 2,087 |
| 10 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 3,46 | 3,34 | 2,71 | 11,81 | 11,6 | 11,34 | 3,170 | 11,583 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 0,23 | 0,31 | 0,30 | 1,34 | 1,81 | 1,92 | 0,280 | 1,690 |
| 12 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 3,19 | 3,24 | 2,20 | 10,67 | 10,13 | 9,76 | 2,877 | 10,187 |
| 13 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 0,24 | 0,29 | 0,28 | 1,73 | 2,32 | 2,03 | 0,270 | 2,027 |
| 14 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 3,13 | 3,3 | 2,66 | 12,27 | 10,88 | 10,44 | 3,030 | 11,197 |
| 15 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 0,0 | 0,55 | 0,49 | 0,61 | 3,54 | 2,85 | 3,63 | 0,550 | 3,340 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,0 | 5,0 | 20 | 1,87 | 1,03 | 1,66 | 8,71 | 5,72 | 6,7 | 1,520 | 7,043 |
| 17 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 0,35 | 0,61 | 0,53 | 3,32 | 5,61 | 4,75 | 0,497 | 4,560 |
| 18 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 2,52 | 2,97 | 2,82 | 10,59 | 10,92 | 11,41 | 2,770 | 10,973 |

Continuação da Tabela 4.1 – Resultados experimentais do arranjo combinado.

| <i>N° Experimentos</i> | <i>Fatores controláveis</i> | | | | <i>Ruídos</i> | | | <i>Replicações</i> | | | | | | <i>Média (R_a)</i> | <i>Média (R_t)</i> |
|------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| | <i>f_z</i> | <i>a_p</i> | <i>v_c</i> | <i>a_e</i> | <i>v_b</i> | <i>C</i> | <i>Q</i> | <i>R_{a1}</i> | <i>R_{a2}</i> | <i>R_{a3}</i> | <i>R_{t1}</i> | <i>R_{t2}</i> | <i>R_{t3}</i> | | |
| 19 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 0,43 | 0,35 | 0,37 | 2,83 | 2,57 | 2,72 | 0,383 | 2,707 |
| 20 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 2,68 | 3,33 | 3,73 | 11,62 | 11,97 | 13,83 | 3,247 | 12,473 |
| 21 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 0,73 | 0,80 | 0,75 | 4,05 | 4,80 | 5,09 | 0,760 | 4,647 |
| 22 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 0,68 | 0,79 | 0,93 | 3,65 | 5,19 | 4,90 | 0,800 | 4,580 |
| 23 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 0,47 | 0,50 | 0,53 | 2,75 | 3,95 | 4,28 | 0,500 | 3,660 |
| 24 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 2,46 | 2,61 | 2,44 | 11,19 | 10,62 | 10,46 | 2,503 | 10,757 |
| 25 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 0,25 | 0,44 | 0,50 | 1,70 | 3,62 | 3,31 | 0,397 | 2,877 |
| 26 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 0,97 | 1,35 | 0,87 | 6,43 | 5,62 | 5,97 | 1,063 | 6,007 |
| 27 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 0,32 | 0,32 | 0,46 | 1,39 | 2,23 | 2,40 | 0,367 | 2,007 |
| 28 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 2,85 | 2,68 | 2,82 | 24,7 | 10,13 | 11,16 | 2,783 | 15,33 |
| 29 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 0,77 | 0,97 | 0,55 | 4,04 | 4,47 | 4,14 | 0,763 | 4,217 |
| 30 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 1,56 | 1,40 | 1,35 | 7,55 | 7,61 | 6,60 | 1,437 | 7,253 |
| 31 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 20 | 0,45 | 0,36 | 0,34 | 4,61 | 2,28 | 2,52 | 0,383 | 3,137 |
| 32 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 | 5,0 | 0,0 | 2,83 | 3,04 | 3,01 | 11,66 | 12,87 | 10,30 | 2,960 | 11,610 |
| 33 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 0,75 | 0,82 | 0,84 | 3,63 | 3,63 | 4,76 | 0,803 | 4,007 |
| 34 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0,0 | 15 | 20 | 1,96 | 2,09 | 2,04 | 6,77 | 7,54 | 7,33 | 2,030 | 7,213 |
| 35 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,0 | 15 | 20 | 0,58 | 0,60 | 0,43 | 3,39 | 7,80 | 2,56 | 0,537 | 4,583 |
| 36 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 2,22 | 2,33 | 1,78 | 9,43 | 10,15 | 7,77 | 2,110 | 9,117 |

Continuação da Tabela 4.1 – Resultados experimentais do arranjo combinado.

| N° Experimentos | <i>Fatores controláveis</i> | | | | <i>Ruídos</i> | | | <i>Replicações</i> | | | | | | Média (R_a) | Média (R_t) |
|-----------------|-----------------------------|-------|-------|-------|---------------|-----|-----|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| | f_z | a_p | v_c | a_e | v_b | C | Q | R_{a_1} | R_{a_2} | R_{a_3} | R_{t_1} | R_{t_2} | R_{t_3} | | |
| 37 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,0 | 15 | 20 | 0,90 | 0,77 | 1,09 | 4,03 | 3,87 | 5,54 | 0,920 | 4,480 |
| 38 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 1,56 | 1,55 | 2,12 | 6,37 | 6,84 | 8,26 | 1,743 | 7,157 |
| 39 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 0,34 | 0,26 | 0,27 | 2,11 | 2,14 | 1,88 | 0,290 | 2,043 |
| 40 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,0 | 15 | 20 | 1,02 | 0,95 | 0,86 | 4,31 | 4,74 | 4,33 | 0,943 | 4,460 |
| 41 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,0 | 15 | 20 | 0,41 | 0,42 | 0,71 | 2,74 | 2,8 | 3,38 | 0,513 | 2,973 |
| 42 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 2,21 | 2,07 | 1,98 | 7,76 | 7,42 | 7,47 | 2,087 | 7,550 |
| 43 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 0,40 | 0,45 | 0,44 | 2,42 | 2,99 | 3,06 | 0,430 | 2,823 |
| 44 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,0 | 15 | 20 | 2,21 | 3,25 | 2,21 | 10,38 | 12,55 | 8,78 | 2,557 | 10,57 |
| 45 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 0,47 | 0,37 | 0,21 | 3,91 | 2,00 | 1,46 | 0,350 | 2,457 |
| 46 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,0 | 15 | 20 | 2,07 | 1,06 | 1,97 | 7,18 | 5,40 | 6,94 | 1,700 | 6,507 |
| 47 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,0 | 15 | 20 | 0,61 | 0,87 | 0,37 | 2,95 | 3,73 | 2,49 | 0,617 | 3,057 |
| 48 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,0 | 15 | 0,0 | 1,97 | 1,7 | 1,57 | 7,06 | 9,22 | 8,54 | 1,747 | 8,273 |
| 49 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0,3 | 15 | 20 | 0,94 | 0,75 | 0,78 | 5,64 | 3,86 | 4,57 | 0,823 | 4,690 |
| 50 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 2,74 | 3,25 | 3,03 | 11,66 | 11,48 | 12,22 | 3,007 | 11,787 |
| 51 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 0,74 | 0,54 | 0,65 | 9,47 | 2,92 | 3,30 | 0,643 | 5,230 |
| 52 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0,3 | 15 | 20 | 2,82 | 3,25 | 2,74 | 9,66 | 10,09 | 9,86 | 2,937 | 9,870 |
| 53 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 0,73 | 0,78 | 0,90 | 3,85 | 5,69 | 5,45 | 0,803 | 4,997 |
| 54 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0,3 | 15 | 20 | 2,24 | 2,25 | 2,17 | 9,42 | 9,75 | 10,22 | 2,220 | 9,797 |
| 55 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0,3 | 15 | 20 | 0,51 | 0,38 | 0,50 | 3,14 | 2,62 | 2,62 | 0,463 | 2,793 |

Continuação da Tabela 4.1 – Resultados experimentais do arranjo combinado.

| Nº Experimentos | <i>Fatores controláveis</i> | | | | <i>Ruídos</i> | | | <i>Replicações</i> | | | | | | Média (R_a) | Média (R_t) |
|-----------------|-----------------------------|-------|-------|-------|---------------|-----|-----|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| | f_z | a_p | v_c | a_e | v_b | C | Q | R_{a_1} | R_{a_2} | R_{a_3} | R_{t_1} | R_{t_2} | R_{t_3} | | |
| 56 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 2,33 | 1,59 | 2,69 | 9,74 | 8,8 | 10,93 | 2,203 | 9,823 |
| 57 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 0,95 | 0,76 | 0,75 | 5,53 | 5,95 | 4,55 | 0,820 | 5,343 |
| 58 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,3 | 15 | 20 | 2,48 | 2,68 | 2,48 | 10,33 | 10,44 | 11,22 | 2,547 | 10,663 |
| 59 | -1 | 1 | -1 | 1 | 0,3 | 15 | 20 | 0,38 | 0,37 | 0,38 | 2,46 | 2,19 | 3,03 | 0,377 | 2,560 |
| 60 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 1,39 | 2,73 | 2,46 | 8,16 | 8,93 | 9,47 | 2,193 | 8,853 |
| 61 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,3 | 15 | 20 | 0,64 | 0,49 | 0,78 | 3,98 | 3,13 | 5,04 | 0,637 | 4,050 |
| 62 | 1 | -1 | 1 | 1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 2,22 | 2,22 | 2,30 | 9,62 | 9,25 | 9,90 | 2,247 | 9,590 |
| 63 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 | 15 | 0,0 | 0,49 | 0,49 | 0,47 | 4,20 | 2,98 | 3,02 | 0,483 | 3,400 |
| 64 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 | 15 | 20 | 3,14 | 2,76 | 2,76 | 11,32 | 10,27 | 12,39 | 2,887 | 11,327 |
| 65 | -2,83 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,07 | 0,12 | 0,11 | 0,58 | 0,98 | 0,90 | 0,100 | 0,820 |
| 66 | 2,83 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 2,37 | 2,67 | 2,28 | 10,80 | * | * | 2,440 | 10,760 |
| 67 | 0 | -2,83 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,35 | 0,31 | 0,39 | 2,12 | 1,32 | 2,29 | 0,350 | 1,910 |
| 68 | 0 | 2,83 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 1,59 | 1,87 | 1,26 | 6,87 | 7,45 | 6,13 | 1,573 | 6,817 |
| 69 | 0 | 0 | -2,83 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,61 | 0,87 | 0,47 | 6,04 | 6,13 | 3,6 | 0,650 | 5,257 |
| 70 | 0 | 0 | 2,83 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,48 | 0,5 | 0,34 | 3,80 | 3,25 | 3,19 | 0,440 | 3,413 |
| 71 | 0 | 0 | 0 | -2,83 | 0,15 | 10 | 10 | 0,3 | 0,34 | 0,53 | 2,57 | 2,72 | 4,86 | 0,390 | 3,383 |
| 72 | 0 | 0 | 0 | 2,83 | 0,15 | 10 | 10 | 1,68 | 1,3 | 0,57 | 11,72 | 2,96 | 4,01 | 1,183 | 6,230 |
| 73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,36 | 0,29 | 0,38 | 3,45 | 2,36 | 3,16 | 0,343 | 2,990 |
| 74 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,50 | 0,45 | 0,67 | 3,35 | 2,69 | 3,81 | 0,540 | 3,283 |

Continuação da Tabela 4.1 – Resultados experimentais do arranjo combinado.

| N° Experimentos | <i>Fatores controláveis</i> | | | | <i>Ruídos</i> | | | <i>Replicações</i> | | | | | | Média (R_a) | Média (R_t) |
|-----------------|-----------------------------|-------|-------|-------|---------------|-----|-----|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| | f_z | a_p | v_c | a_e | v_b | C | Q | R_{a_1} | R_{a_2} | R_{a_3} | R_{t_1} | R_{t_2} | R_{t_3} | | |
| 75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,71 | 0,7 | 0,63 | 4,31 | 3,88 | 4,06 | 0,680 | 4,083 |
| 76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,72 | 0,26 | 0,58 | 4,90 | 1,59 | 3,25 | 0,520 | 3,247 |
| 77 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,41 | 0,61 | 0,60 | 2,83 | 4,72 | 4,72 | 0,540 | 4,090 |
| 78 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,40 | 0,22 | 0,35 | 4,52 | 1,63 | 2,83 | 0,323 | 2,993 |
| 79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,52 | 0,57 | 0,49 | 3,53 | 7,11 | 4,33 | 0,527 | 4,990 |
| 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,71 | 0,57 | 0,54 | 3,68 | 3,76 | 2,92 | 0,607 | 3,453 |
| 81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,64 | 0,68 | 0,77 | 5,00 | 5,01 | 4,9 | 0,697 | 4,970 |
| 82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 0,47 | 0,36 | 0,46 | 3,16 | 2,38 | 3,05 | 0,430 | 2,863 |

Após a medição de todas as respostas de interesse, reunidas na matriz experimental, apresentada pela Tabela 4.1, nota-se que na linha 66 os dados referentes à R_a e R_t foram eliminados do estudo. Nesses dados foram caracterizados como *outliers* e a presença dos mesmos poderia influenciar de maneira negativa a modelagem matemática das respostas.

A presença de dados extremos (*outliers*) influencia muito a qualidade das equações de regressão, aumentando significativamente o erro de previsão dos modelos ((Montgomery e Runger, 2003).

4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS RESPOSTAS

A partir dos resultados experimentais apresentados pela Tabela 4.1 é possível estabelecer relações matemáticas entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. O modelo de superfície de resposta de segunda ordem será utilizado para representar a relação aproximada entre as respostas de interesse R_a e R_t e as variáveis de entrada e variáveis de ruídos. Dessa forma, considerando o processo abordado pelo presente trabalho, em que são estudados os efeitos de quatro parâmetros de entrada e três parâmetros de ruídos, pode-se escrever as Equações 22 e 23 a seguir:

$$R_a(x, z) = \beta_0 + \beta_1 f_z + \beta_2 a_p + \beta_3 v_c + \beta_4 a_e + \beta_{11} f_z^2 + \beta_{22} a_p^2 + \beta_{33} v_c^2 + \beta_{44} a_e^2 + \beta_{12} f_z a_p + \beta_{13} f_z v_c + \beta_{14} f_z a_e + \beta_{23} a_p v_c + \beta_{24} a_p a_e + \beta_{34} v_c a_e + \gamma_1 v_b + \gamma_2 C + \gamma_3 Q + \delta_{11} f_z v_b + \delta_{12} f_z C + \delta_{42} a_e C + \delta_{43} a_e Q \quad (22)$$

$$R_t(x, z) = \beta_0 + \beta_1 f_z + \beta_2 a_p + \beta_3 v_c + \beta_4 a_e + \beta_{11} f_z^2 + \beta_{22} a_p^2 + \beta_{33} v_c^2 + \beta_{44} a_e^2 + \beta_{12} f_z a_p + \beta_{13} f_z v_c + \beta_{14} f_z a_e + \beta_{23} a_p v_c + \beta_{24} a_p a_e + \beta_{34} v_c a_e + \gamma_1 v_b + \gamma_2 C + \gamma_3 Q + \delta_{11} f_z v_b + \delta_{12} f_z C + \delta_{13} f_z Q + \delta_{21} a_p v_b + \delta_{22} a_p C + \delta_{23} a_p Q + \delta_{31} v_c v_b + \delta_{32} v_c C + \delta_{33} v_c Q + \delta_{41} a_e v_b + \delta_{42} a_e C + \delta_{43} a_e Q \quad (23)$$

onde:

R_a e R_t – Resposta de interesse

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i, \delta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3, 4 \quad i < j$)

f_z – (avanço por dente)

a_p – (Profundidade de usinagem)

v_c – (Velocidade de corte)

a_e – (Penetração de trabalho)

v_b – (Desgaste de flanco).

C – (concentração de fluido).

Q – (vazão de fluido).

Na equação anterior, as variáveis, f_z , a_p , v_c e a_e são expressas em sua forma codificada. Os coeficientes do modelo foram estimados conforme Equações 22 e 23 utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS), através do software estatístico *MINITAB*. A Tabela 4.2 apresenta os coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos desenvolvidos para as respostas consideradas.

Tabela 4.2 – Coeficientes estimados.

| R_a | | | | | R_t | | | | |
|------------------|----------------|----------------|---------------|--------------|------------------|----------------|----------------|---------------|--------------|
| <i>Termo</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> | <i>Termo</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> |
| Constante | 0,84483 | 0,1403 | 6,021 | 0,000 | Constante | 4,67464 | 0,4715 | 9,915 | 0,000 |
| f_z | 0,91972 | 0,06578 | 13,981 | 0,000 | f_z | 3,07726 | 0,2211 | 13,921 | 0,000 |
| a_p | 0,06438 | 0,05955 | 1,081 | 0,285 | a_p | 0,29131 | 0,2001 | 1,456 | 0,152 |
| v_c | -0,0839 | 0,05955 | -1,409 | 0,165 | v_c | -0,3469 | 0,2001 | -1,733 | 0,089 |
| a_e | 0,01601 | 0,05955 | 0,269 | 0,789 | a_e | 0,11156 | 0,2001 | 0,557 | 0,580 |
| v_b | 0,06443 | 0,06658 | 0,968 | 0,338 | v_b | 0,63802 | 0,2238 | 2,851 | 0,056 |
| C | -0,0055 | 0,06658 | -0,082 | 0,935 | C | 0,02792 | 0,2238 | 0,125 | 0,901 |
| Q | 0,02109 | 0,06658 | 0,317 | 0,753 | Q | 0,02563 | 0,2238 | 0,115 | 0,909 |
| $f_z \times f_z$ | 0,33337 | 0,0706 | 4,722 | 0,000 | $f_z \times f_z$ | 0,91186 | 0,2373 | 3,843 | 0,000 |
| $a_p \times a_p$ | 0,06526 | 0,05149 | 1,267 | 0,211 | $a_p \times a_p$ | 0,11395 | 0,173 | 0,659 | 0,513 |
| $v_c \times v_c$ | 0,01317 | 0,05149 | 0,256 | 0,799 | $v_c \times v_c$ | 0,11041 | 0,173 | 0,638 | 0,526 |
| $a_e \times a_e$ | 0,04338 | 0,05149 | 0,842 | 0,403 | $a_e \times a_e$ | 0,16936 | 0,173 | 0,979 | 0,332 |
| $f_z \times a_p$ | 0,09193 | 0,06658 | 1,381 | 0,173 | $f_z \times a_p$ | 0,43469 | 0,2238 | 1,943 | 0,058 |
| $f_z \times v_c$ | -0,104 | 0,06658 | -1,562 | 0,124 | $f_z \times v_c$ | -0,3127 | 0,2238 | -1,398 | 0,168 |
| $f_z \times a_e$ | 0,03005 | 0,06658 | 0,451 | 0,654 | $f_z \times a_e$ | 0,32771 | 0,2238 | 1,465 | 0,149 |
| $f_z \times v_b$ | 0,01307 | 0,06658 | 0,196 | 0,845 | $f_z \times v_b$ | 0,15021 | 0,2238 | 0,671 | 0,505 |
| $f_z \times C$ | -0,0824 | 0,06658 | -1,238 | 0,221 | $f_z \times C$ | -0,3732 | 0,2238 | -1,668 | 0,101 |
| $f_z \times Q$ | 0,04307 | 0,06658 | 0,647 | 0,521 | $f_z \times Q$ | 0,19615 | 0,2238 | 0,877 | 0,385 |
| $a_p \times v_c$ | -0,0361 | 0,06658 | -0,542 | 0,590 | $a_p \times v_c$ | -0,116 | 0,2238 | -0,519 | 0,606 |
| $a_p \times a_e$ | 0,02547 | 0,06658 | 0,383 | 0,704 | $a_p \times a_e$ | 0,12854 | 0,2238 | 0,574 | 0,568 |
| $a_p \times v_b$ | 0,08995 | 0,06658 | 1,351 | 0,183 | $a_p \times v_b$ | 0,14979 | 0,2238 | 0,669 | 0,506 |
| $a_p \times C$ | -0,0837 | 0,06658 | -1,257 | 0,214 | $a_p \times C$ | -0,2872 | 0,2238 | -1,284 | 0,205 |
| $a_p \times Q$ | -0,073 | 0,06658 | -1,096 | 0,278 | $a_p \times Q$ | -0,158 | 0,2238 | -0,706 | 0,483 |
| $v_c \times a_e$ | 0,05807 | 0,06658 | 0,872 | 0,387 | $v_c \times a_e$ | 0,20781 | 0,2238 | 0,929 | 0,357 |
| $v_c \times v_b$ | 0,00797 | 0,06658 | 0,12 | 0,905 | $v_c \times v_b$ | 0,03052 | 0,2238 | 0,136 | 0,892 |
| $v_c \times C$ | -0,0344 | 0,06658 | -0,517 | 0,607 | $v_c \times C$ | -0,0735 | 0,2238 | -0,329 | 0,744 |
| $v_c \times Q$ | -0,0429 | 0,06658 | -0,644 | 0,523 | $v_c \times Q$ | -0,1698 | 0,2238 | -0,759 | 0,451 |
| $a_e \times v_b$ | -0,0542 | 0,06658 | -0,814 | 0,419 | $a_e \times v_b$ | -0,1737 | 0,2238 | -0,776 | 0,441 |
| $a_e \times C$ | 0,00609 | 0,06658 | 0,092 | 0,927 | $a_e \times C$ | -0,0777 | 0,2238 | -0,347 | 0,73 |
| $a_e \times Q$ | -0,0278 | 0,06658 | -0,417 | 0,678 | $a_e \times Q$ | 0,09021 | 0,2238 | 0,403 | 0,689 |

Continuação da Tabela 4.2 – Coeficientes estimados.

| R_a | | | | | R_t | | | | |
|-------------------------------------|-------------|----------------|----------|--------------|-----------------------------------|-------------|----------------|----------|--------------|
| <i>Term</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> | <i>Term</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> |
| Constante | 0,84483 | 0,1403 | 6,021 | 0,000 | Constante | 4,67464 | 0,4715 | 9,915 | 0,000 |
| S = 0,532674 PRESS = 57,4533 | | | | | S = 1,79001 PRESS = 606,628 | | | | |
| R - Sq = 80,92% R-Sq(pred) = 24,26% | | | | | R-Sq = 81,65% R-Sq(pred) = 31,88% | | | | |
| R - Sq (adj) = 70,08% | | | | | R - Sq (adj) = 71,22% | | | | |

Os valores em negrito representam os termos significativos (P-value < 5%).

Pode ser observado pela Tabela 4.2 só o avanço por dente foi significativo onde proporcionou um ajuste baixo para o modelo ($R^2(adj)$) correspondente a 70,08% para R_a e 71,22% para R_t .

4.4 ADEQUAÇÃO E AJUSTE DOS MODELOS

A adequação dos modelos foi verificada através da Análise de Variância (ANOVA), realizada pelo software *MINITAB*. A Tabela 4.3 e 4.4 apresentam os resultados dessa análise e mostra que nem todos os modelos desenvolvidos são adequados. No item interação dos modelos desenvolvidos, apresentam um *P-values* superiores a 5% de significância, para R_a e R_t . Os resultados do ANOVA também indicam que, os modelos desenvolvidos apresentaram falta de ajustes, já que os valores de ($R^2(adj)$) foram baixo. Além disso, o modelo apresentou também falta de ajuste com *P-values* inferiores a 5% para o item (*Lack-of-fit*). Para o aspecto do ajuste obtido, foi de 70,08% para R_a e 71,22% para R_t , considerado um ajuste não muito bom, porém aceitável. No entanto, esses dados puderam ser corrigidos através do procedimento de redução dos modelos.

Tabela 4.3 – Análise de variância para rugosidade (R_a).

| <i>Fonte</i> | <i>DF</i> | <i>Seq SS</i> | <i>Adj SS</i> | <i>Adj MS</i> | <i>F</i> | <i>P</i> |
|------------------|-----------|---------------|---------------|----------------|--------------|--------------|
| Regressão | 29 | 61,3847 | 61,3847 | 2,11672 | 7,460 | 0,000 |
| Linear | 7 | 50,887 | 56,6747 | 8,09638 | 28,530 | 0,000 |
| Quadrático | 4 | 6,557 | 6,557 | 1,63926 | 5,780 | 0,001 |
| Interação | 18 | 3,9407 | 3,9407 | 0,21893 | 0,770 | 0,721 |
| ErroResidual | 51 | 14,4708 | 14,4708 | 0,28374 | | |
| Falta de ajuste | 42 | 14,3277 | 14,3277 | 0,34113 | 21,450 | 0,000 |
| Puro Erro | 9 | 0,1432 | 0,1432 | 0,01591 | | |
| Total | 80 | 75,8555 | | | | |

Tabela 4.4 – Análise de variância para a rugosidade (R_t).

| <i>Fonte</i> | <i>DF</i> | <i>Seq SS</i> | <i>Adj SS</i> | <i>Adj MS</i> | <i>F</i> | <i>P</i> |
|------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| Regressão | 29 | 727,124 | 727,124 | 25,0732 | 7,830 | 0,000 |
| Linear | 7 | 622,452 | 664,459 | 94,9228 | 29,630 | 0,000 |
| Quadrático | 4 | 48,542 | 48,542 | 12,1356 | 3,790 | 0,009 |
| Interação | 18 | 56,13 | 56,13 | 3,1183 | 0,970 | 0,503 |
| ErroResidual | 51 | 163,41 | 163,41 | 3,2041 | | |
| Falta de ajuste | 42 | 157,691 | 157,691 | 3,7545 | 5,910 | 0,000 |
| Puro Erro | 9 | 5,719 | 5,719 | 0,6355 | | |
| Total | 80 | 890,534 | | | | |

Após a verificação da adequação dos modelos, estes foram reduzidos através da remoção dos termos não significativos. O critério adotado para a remoção dos termos não significativos foi o aumento do valor do ajuste ($R^2(adj)$). Dessa forma, visando a aumentar a capacidade de representação dos dados, o modelo foi corrigido utilizando-se a ponderação pelo inverso do quadrado dos resíduos (i/e^2). Após a correção dos modelos, foram obtidos novos valores apresentados pela Análise de Variância (ANOVA), sendo o novo ajuste igual a 99,9% R_a e 99,1% R_t . As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram novos valores para Análise de Variância ajustado.

Tabela 4.5 – Análise de variância ajustado (R_a).

| Fonte | DF | SS | MS | F | P |
|------------------|-----------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| Regressão | 29 | 90745,5 | 3129,2 | 3437,05 | 0,000 |
| Erro Residual | 51 | 46,4 | 0,9 | | |
| Total | 80 | 90791,9 | | | |

S = 0,954159 R-Sq = 99,9% R-Sq(adj) = 99,9%

Tabela 4.6 – Análise de variância ajustado R_t .

| Fonte | DF | SS | MS | F | P |
|------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Regressão | 29 | 8576,8 | 295,75 | 300,17 | 0,000 |
| Erro Residual | 51 | 50,25 | 0,99 | | |
| Total | 80 | 8627,05 | | | |

S = 0,992609 R-Sq = 99,4% R-Sq(adj) = 99,1%

Com a construção do modelo para o arranjo combinado, as equações de média e variância para o parâmetro de rugosidade R_a e R_t foram extraídas da Equação (24) gerando-se as Equações 24 a 28.

$$R_t, R_t(x, z) = \beta_0 + \beta_1 f_z + \beta_2 a_p + \beta_3 v_c + \beta_4 a_e + \beta_{11} f_z^2 + \beta_{22} a_p^2 + \beta_{33} v_c^2 + \beta_{44} a_e^2 + \beta_{12} f_z a_p + \beta_{13} f_z v_c + \beta_{14} f_z a_e + \beta_{23} a_p v_c + \beta_{24} a_p a_e + \beta_{34} v_c a_e + \gamma_1 v_b + \gamma_2 C + \gamma_3 Q + \delta_{11} f_z v_b + \delta_{12} f_z C + \delta_{13} f_z Q + \delta_{21} a_p v_b + \delta_{22} a_p C + \delta_{23} a_p Q + \delta_{31} v_c v_b + \delta_{32} v_c C + \delta_{33} v_c Q + \delta_{41} a_e v_b + \delta_{42} a_e C + \delta_{43} a_e Q \quad (24)$$

$$\mu(R_a)(x, z) = 0,689 + 0,898 f_z + 0,041 a_p + 0,066 v_c + 0,004 a_e + 0,493 f_z^2 + 0,096 a_p^2 + 0,010 v_c^2 + 0,064 a_e^2 + 0,074 f_z a_p - 0,087 f_z v_c + 0,030 f_z a_e - 0,039 a_p v_c + 0,018 a_p a_e + 0,043 v_c a_e \quad (25)$$

$$\sigma^2(R_a) = 0,010 + 0,010 f_z + 0,002 a_p + 0,004 v_c - 0,011 a_e + 0,011 f_z^2 + 0,006 a_p^2 + 0,003 v_c^2 + 0,004 a_e^2 + 0,013 f_z a_p + 0,004 f_z v_c - 0,005 f_z a_e + 0,006 a_p v_c + 0,0012 a_p a_e + 0,0008 v_c a_e \quad (26)$$

$$\mu(R_t) = 4,72 + 3,17 f_z + 0,251 a_p - 0,261 v_c - 0,0458 a_e + 0,877 f_z^2 + 0,0403 a_p^2 + 0,0492 v_c^2 + 1,04 a_e^2 + 0,176 f_z a_p - 0,000 f_z v_c + 0,173 f_z a_e - 0,498 a_p v_c + 0,225 a_p a_e + 0,233 v_c a_e \quad (27)$$

$$\sigma^2(R_t) = 0,773 + 0,503f_z - 0,157a_p + 0,212v_c - 0,294a_e + 0,216f_z^2 + 0,068a_p^2 + 0,030v_c^2 + 0,050a_e^2 + 0,021f_z a_p + 0,159f_z v_c - 0,029f_z a_e + 0,006a_p v_c - 0,003a_p a_e - 0,012v_c a_e \quad (28)$$

O controle estatístico de processos tenta “manter” o processo em faixas de controle denominadas limites de controle. A média do processo não coincide com a dimensão nominal especificada pelo projeto. Para tentar se manter e trabalhar com as dimensões nominais, devem-se realizar experimentos com as variáveis envolvidas no processo com objetivo de tornar o projeto robusto, sendo mais robusto quanto menos for impactado por fatores de ruído interno ou externo. A robustez de um produto ocorre mais em função de um bom projeto que da rigidez dos controles dos processos de fabricação (Box, Hunter e Hunter, 1978). A Tabela 4.7 compara o modelo completo com o modelo reduzido.

Tabela 4.7 – Comparação entre os ajustes dos modelos completos e modelos finais.

| $R^2(adj)$ (%) | | |
|----------------|-----------------|-----------------|
| Resposta | Modelo Completo | Modelo Reduzido |
| R_a | 70,08 % | 99,90 % |
| R_t | 71,22 % | 99,10 % |

Os resultados da Tabela 4.7 indicam que os modelos finais desenvolvidos se caracterizam como expressões de grande confiabilidade, já que os modelos apresentaram ajustes superiores a 90%. No entanto, o procedimento de redução melhorou o ajuste do aspecto R_a de 70,08 % para 99,9 % e R_t 71,22 % para 99,1 %, fazendo com que o modelo de ajuste aceitável, passasse a apresentar um ajuste muito satisfatório.

4.5 OBTENÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

O software *MINITAB* foi empregado para a construção das superfícies de resposta relacionando os parâmetros estudados com as respostas de R_a e R_t . Entretanto, tais superfícies serão discutidas em maiores detalhes com análise das interações entre os parâmetros. A Tabela 4.8 apresenta o modelo de análise de regressão.

Tabela 4.8 – Análise de regressão para o parâmetro de rugosidade R_a e R_t .

| R_a | | | | | R_t | | | | |
|------------------|----------------|----------------|---------------|--------------|------------------|----------------|----------------|---------------|--------------|
| <i>Termo</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> | <i>Termo</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> |
| Constante | 0,68937 | 0,07211 | 9,560 | 0,000 | Constante | 4,7195 | 0,1751 | 26,960 | 0,000 |
| f_z | 0,89792 | 0,02629 | 34,150 | 0,000 | f_z | 3,17043 | 0,09333 | 33,970 | 0,000 |
| a_p | 0,04076 | 0,02778 | 1,470 | 0,149 | a_p | 0,25084 | 0,08095 | 3,100 | 0,003 |
| v_c | -0,0655 | 0,02393 | -2,740 | 0,008 | v_c | -0,2609 | 0,08576 | -3,040 | 0,004 |
| a_e | -0,0043 | 0,02458 | -0,170 | 0,863 | a_e | 0,04585 | 0,08295 | 0,550 | 0,583 |
| v_b | 0,1023 | 0,02784 | 3,670 | 0,001 | v_b | 0,87714 | 0,09821 | 8,930 | 0,000 |
| C | 0,00167 | 0,03107 | 0,050 | 0,957 | C | 0,04029 | 0,07979 | 0,500 | 0,616 |
| Q | 0,00479 | 0,02771 | 0,170 | 0,863 | Q | -0,0492 | 0,09774 | -0,500 | 0,617 |
| $f_z \times f_z$ | 0,49268 | 0,05545 | 8,880 | 0,000 | $f_z \times f_z$ | 1,0389 | 0,1678 | 6,190 | 0,000 |
| $a_p \times a_p$ | 0,09621 | 0,01366 | 7,040 | 0,000 | $a_p \times a_p$ | 0,17576 | 0,06131 | 2,870 | 0,006 |
| $v_c \times v_c$ | 0,01032 | 0,0306 | 0,340 | 0,737 | $v_c \times v_c$ | 0,000 | 0,106 | 0,000 | 1,000 |
| $a_e \times a_e$ | 0,06383 | 0,01434 | 4,450 | 0,000 | $a_e \times a_e$ | 0,17271 | 0,03953 | 4,370 | 0,000 |
| $f_z \times a_p$ | 0,07444 | 0,02607 | 2,850 | 0,006 | $f_z \times a_p$ | 0,49779 | 0,09061 | 5,490 | 0,000 |
| $f_z \times v_c$ | -0,0875 | 0,02562 | -3,410 | 0,001 | $f_z \times v_c$ | -0,2249 | 0,09474 | -2,370 | 0,021 |
| $f_z \times a_e$ | 0,02978 | 0,02132 | 1,400 | 0,169 | $f_z \times a_e$ | 0,2328 | 0,08805 | 2,640 | 0,011 |
| $f_z \times v_b$ | 0,04771 | 0,02589 | 1,840 | 0,071 | $f_z \times v_b$ | 0,31047 | 0,09835 | 3,160 | 0,003 |
| $f_z \times C$ | -0,0858 | 0,02354 | -3,640 | 0,001 | $f_z \times C$ | -0,2909 | 0,07581 | -3,840 | 0,000 |
| $f_z \times Q$ | 0,04234 | 0,02497 | 1,700 | 0,096 | $f_z \times Q$ | 0,1879 | 0,09912 | 1,900 | 0,064 |
| $a_p \times v_c$ | -0,0392 | 0,02608 | -1,500 | 0,139 | $a_p \times v_c$ | -0,0205 | 0,08448 | -0,240 | 0,809 |
| $a_p \times a_e$ | 0,01766 | 0,02356 | 0,750 | 0,457 | $a_p \times a_e$ | 0,16432 | 0,08887 | 1,850 | 0,070 |
| $a_p \times v_b$ | 0,01283 | 0,02526 | 0,510 | 0,614 | $a_p \times v_b$ | -0,087 | 0,09301 | -0,940 | 0,354 |
| $a_p \times C$ | -0,0732 | 0,02487 | -2,940 | 0,005 | $a_p \times C$ | -0,2102 | 0,08233 | -2,550 | 0,014 |
| $a_p \times Q$ | -0,0123 | 0,02565 | -0,480 | 0,633 | $a_p \times Q$ | -0,1268 | 0,07899 | -1,610 | 0,115 |
| $v_c \times a_e$ | 0,04324 | 0,02111 | 2,050 | 0,046 | $v_c \times a_e$ | 0,18116 | 0,08122 | 2,230 | 0,030 |
| $v_c \times v_b$ | 0,01977 | 0,02368 | 0,830 | 0,408 | $v_c \times v_b$ | 0,12835 | 0,0799 | 1,610 | 0,114 |
| $v_c \times C$ | -0,0335 | 0,02227 | -1,500 | 0,139 | $v_c \times C$ | -0,1092 | 0,07668 | -1,420 | 0,160 |

Continuação da Tabela 4.8 – Análise de regressão para o parâmetro de rugosidade R_a e R_t .

| R_a | | | | | R_t | | | | |
|------------------|-------------|--------------------|----------|----------|------------------|-------------|--------------------|----------|----------|
| <i>Termo</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> | <i>Termo</i> | <i>Coef</i> | <i>SE Coef</i> | <i>T</i> | <i>P</i> |
| Constante | 0,68937 | 0,07211 | 9,560 | 0,000 | Constante | 4,7195 | 0,1751 | 26,960 | 0,000 |
| $v_c \times Q$ | -0,041 | 0,02235 | -1,830 | 0,072 | $v_c \times Q$ | 0,04193 | 0,08628 | 0,490 | 0,629 |
| $a_e \times v_b$ | -0,0522 | 0,02392 | -2,180 | 0,034 | $a_e \times v_b$ | -0,1578 | 0,06981 | -2,260 | 0,028 |
| $a_e \times C$ | -0,0134 | 0,02482 | -0,540 | 0,592 | $a_e \times C$ | -0,0164 | 0,07314 | -0,220 | 0,824 |
| $a_e \times Q$ | -0,0246 | 0,02208 | -1,110 | 0,272 | $a_e \times Q$ | 0,15729 | 0,07471 | 2,110 | 0,040 |
| S = 0,954159 | | R-Sq = 99,9% | | | S = 0,992609 | | R-Sq = 99,4% | | |
| | | R-Sq (adj) = 99,9% | | | | | R-Sq (adj) = 99,1% | | |

Os valores em negrito representam os termos significativos (P-value < 5%).

Segundo Çolac *et al* (2005), Diniz *et al.* (2008), Machado *et al.* (2009) a rugosidade de uma peça manufaturada é influenciada por diversos fatores, desde o processo de fabricação até a geometria da ferramenta, passando pelos parâmetros de corte.

A análise de regressão revelou que as interações entre os parâmetros se comportaram como fatores significativos. Isso significa que o efeito conjunto desses parâmetros influencia de forma significativa nos resultados do processo de fresamento de topo para os parâmetro de rugosidades R_a e R_t . Sendo assim, a análise sobre tais interações foram realizadas através das superfícies de resposta, para algumas dessas interações julgadas mais importantes, e desenvolvidas nesta seção.

Pode ser observado na Figura 4.10 que a interação entre esses parâmetros de entrada também é significativa. Sendo assim, o aumento do avanço por dente (f_z) juntamente com o aumento da profundidade de usinagem (a_p) faz com que a rugosidade R_a aumente consideravelmente. Análise semelhante pode ser atribuída à Figura 4.11 indicando que aumenta significativamente a rugosidade R_a , quando se trabalha com maiores avanços por dente (f_z) e menores velocidades de corte (v_c). Outra análise semelhante pode ser atribuída à Figura 4.12 indicando que aumenta consideravelmente a rugosidade R_a , quando se trabalha com menores velocidades de corte e maior penetração de trabalho (a_e).

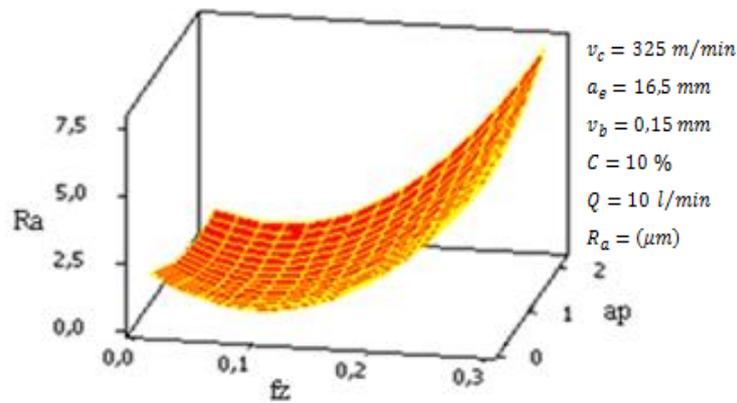


Figura 4.10 – Efeito da interação entre profundidade de usinagem e avanço por dente sobre a rugosidade R_a (μm).

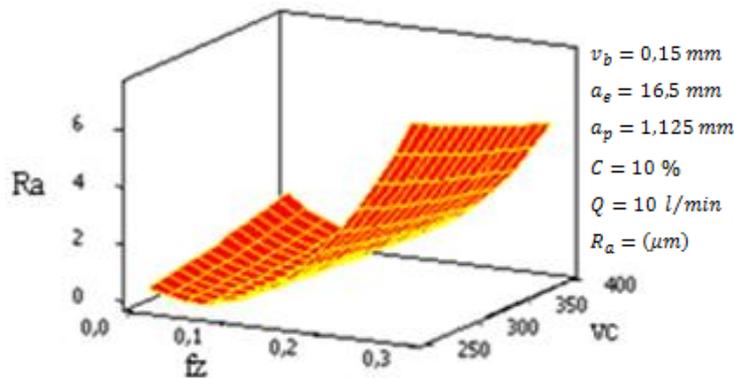


Figura 4.11 – Efeito da interação entre avanço por dente e velocidade de corte sobre a rugosidade R_a (μm).

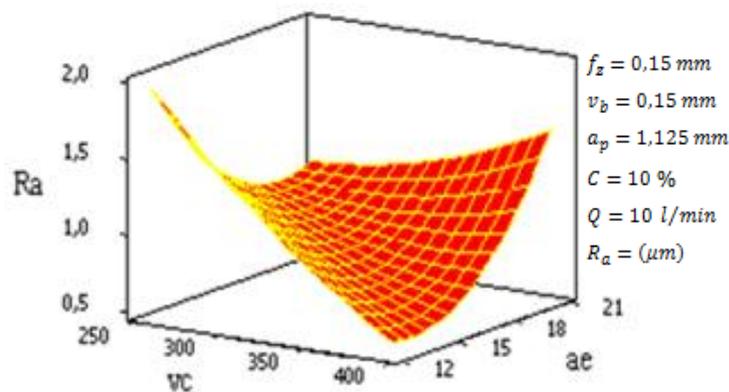


Figura 4.12 – Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_a (μm).

Nas figuras acima são mostradas a variação de R_a , em função das interações dos parâmetros de entrada, para as três condições diferentes de superfície de respostas, pode-se

ver também que a curva tem comportamento diferente para cada uma das superfícies de resposta. Justifica-se estes resultados devido ao aumento do avanço por dente e ao aumento da profundidade de usinagem, provocando choques severos contra a aresta viva do corpo de prova, que gerou certa vibração na haste da ferramenta provocada por pequenas flexões, aumentando os sulcos na superfície usinada. Aumentando a penetração de trabalho e diminuindo a velocidade de corte, o inserto vai passar com menos velocidade, com isso vai forçar mais a deformação plástica e danifica a rugosidade.

Outras interações significativas sobre o fresamento de topo no aço ABNT 1045 podem ser feitas e estão representadas nas figuras que mostram os efeitos das interações entre os parâmetros sobre a rugosidade R_t . Pode-se observar, através da Figura 4.13, que a interação entre os parâmetros de entrada para R_t também é significativa. Sendo assim, o aumento do avanço por dente (f_z) juntamente com o aumento da profundidade de usinagem (a_p) faz com que a rugosidade R_t aumente consideravelmente. Análise semelhante pode ser atribuída à Figura 4.14 indicando que aumenta significativamente a rugosidade R_t , quando se trabalha com maiores avanços por dente (f_z) e menores velocidades de corte (v_c). Outra análise semelhante pode ser atribuída à Figura 4.15 indicando que se aumenta consideravelmente a rugosidade R_t , quando se trabalha com menores velocidades de corte (v_c) e maior penetração de trabalho (a_e), de forma análoga ao comportamento da rugosidade R_a .

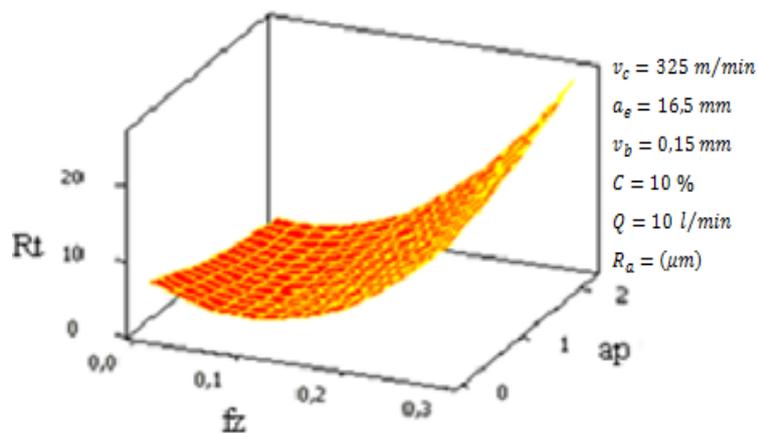


Figura 4.13 – Efeito da interação entre avanço por dente e profundidade radial de corte sobre a rugosidade R_t (μm).

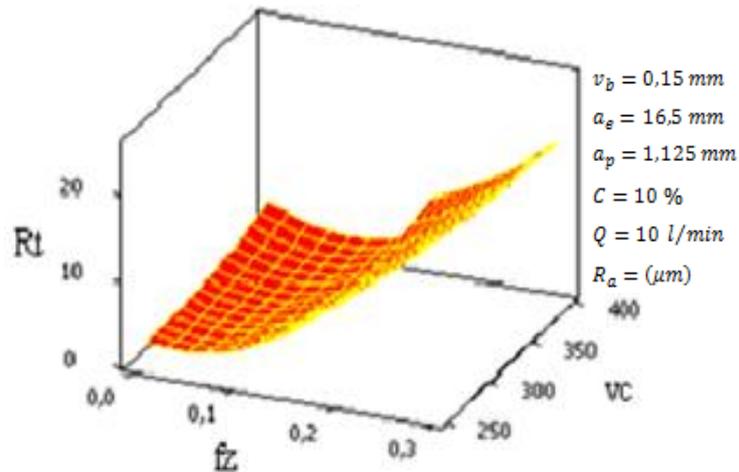


Figura 4.14 – Efeito da interação entre avanço por dente e velocidade de corte sobre a rugosidade R_t (μm).

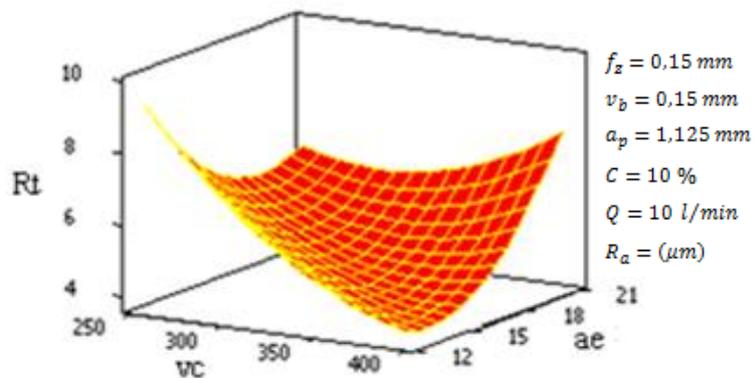


Figura 4.15 – Efeito da interação entre velocidade de corte e penetração de trabalho sobre a rugosidade R_t (μm).

O comportamento da rugosidade R_t é análogo ao comportamento do parâmetro de rugosidade R_a , porém nem toda vez que a rugosidade R_a for baixa significa que a rugosidade R_t também seja. Isso porque se trata de valores médios para R_a e picos e vales máximos R_a .

4.6 OTIMIZAÇÃO DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (EQM)

A análise desenvolvida até o presente momento já apresenta grande relevância para o processo analisado, já que, a partir da modelagem matemática realizada na fase anterior,

muitas informações importantes passam a ser conhecidas. Entre essas informações, o conhecimento da influência dos parâmetros sobre as respostas e a identificação das variáveis significativas são fatores decisivos para um controle adequado e uma gestão eficiente do processo de fresamento. Além disso, tendo-se em mãos modelos confiáveis, é possível fazer com que os resultados sejam otimizados. Nesse contexto, desenvolve-se nesta fase a otimização do processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045, empregando o Erro Quadrático Médio (EQM).

4.7 ANÁLISE ENTRE AS RESPOSTAS

Uma vez que as equações de média e variância foram estabelecidas, partiu-se para a otimização do processo através da minimização do erro quadrático médio. No entanto, para a construção da formulação apresentada pela Equação 12, torna-se necessário que o valor alvo da rugosidade seja especificado. A fixação desse valor foi então baseada na otimização individual do valor médio de R_a e R_t com a minimização das Equações (22 e 23). Assim, adotou-se como alvo de R_a o valor de $0,2301 \mu m$ e R_t o valor $1,7954 \mu m$. A formulação do problema foi escrita combinando as Equações 29 e 30 de maneira analítica em uma única função objetivo, dessa maneira pode-se utilizar uma soma ponderada tal como na Equação 31:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad EQM(R_a) &= [\mu(R_a) - 0,2301] + \sigma^2(R_a) \\ \text{Sujeito a} \quad & f_z^2 + ap^2 + v_c^2 + a_e^2 \leq 4 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad EQM(R_t) &= [\mu(R_t) - 1,7954] + \sigma^2(R_t) \\ \text{Sujeito a} \quad & f_z^2 + ap^2 + v_c^2 + a_e^2 \leq 4 \end{aligned} \quad (30)$$

$$EQM_{total} = w_1\{[\mu R_a - TR_a]^2 + \sigma^2 R_a\} + w_2\{[\mu R_t - TR_t]^2 + \sigma^2 R_t\} \quad (31)$$

onde:

$EQM(R_a)$ – Erro quadrático médio para a rugosidade R_a

$\mu(R_a, R_t)$ – Modelo para a média, descrito na Equação 25

$\sigma^2(y)(R_a, R_t)$ – Modelo para a variância, descrito na Equação 26

A determinação dos parâmetros robustos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045 foi então obtida com o emprego do algoritmo do Erro Quadrático Médio (EQM) na formulação anterior. Para isso, utilizou-se o suplemento Solver do Microsoft Excel, após o problema de otimização ser devidamente programado na planilha do software. A Tabela 4.9 apresenta os resultados ótimos individual para valores codificados, para um peso de 50% para rugosidades R_a e R_t .

Tabela 4.9 – Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045.

| | R_a | R_t | $Z(x)$ | $EQM(R_a)(x): 0,0354$ | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Const | 0,689 | 4,720 | 1,000 | $EQM(R_t)(x): 1,2261$ | | |
| f_z | 0,898 | 3,170 | -1,373 | Pesos | | |
| a_p | 0,041 | 0,251 | 0,771 | w_1 | w_2 | |
| v_c | -0,066 | -0,261 | -0,645 | 0,5 | 0,5 | |
| a_e | -0,004 | 0,046 | 1,051 | EQM total de (x) | | 0,6308 |
| $f_z \times f_z$ | 0,493 | 1,039 | 1,885 | | | |
| $a_p \times a_p$ | 0,096 | 0,176 | 0,595 | (-1) | (+1) | |
| $v_c \times v_c$ | 0,010 | 0,000 | 0,416 | x_1 | 0,1 | 0,2 |
| $a_e \times a_e$ | 0,064 | 0,173 | 1,104 | x_2 | 0,75 | 1,5 |
| $f_z \times a_p$ | 0,074 | 0,498 | -1,059 | x_3 | 300 | 350 |
| $f_z \times v_c$ | -0,088 | -0,225 | 0,885 | x_4 | 15 | 18 |
| $f_z \times a_e$ | 0,030 | 0,233 | -1,443 | | | |
| $a_p \times v_c$ | -0,039 | -0,021 | -0,497 | Ótimo | | |
| $a_p \times a_e$ | 0,018 | 0,164 | 0,811 | f_z | 0,081 | |
| $v_c \times a_e$ | 0,043 | 0,181 | -0,677 | a_p | 1,414 | |
| Ótimo Individual | 0,3918 | 1,9886 | $f(x)$ | v_c | 308,886 | |
| Alvos | 0,2301 | 1,7954 | Alvos | a_e | 18,076 | |
| | $G(x):$ | 4 | 4 | | | |
| | R_a | | | R_t | | |
| Termo | $\partial R_a / \partial z_1$ | $\partial R_a / \partial z_2$ | $\partial R_a / \partial z_3$ | $\partial R_t / \partial z_1$ | $\partial R_t / \partial z_2$ | $\partial R_t / \partial z_3$ |
| b0 | 0,1023 | 0,0017 | 0,0048 | 0,8771 | 0,0403 | -0,0492 |
| f_z | 0,0477 | -0,0858 | 0,0423 | 0,3105 | -0,2909 | 0,1879 |
| a_p | 0,0128 | -0,0732 | -0,0123 | -0,087 | -0,2102 | -0,1268 |
| v_c | 0,0198 | -0,0335 | -0,041 | 0,1284 | -0,1092 | 0,0419 |
| a_e | -0,0522 | -0,0134 | -0,0245 | -0,1578 | -0,0164 | 0,1573 |
| $[\partial y(x, z) / \partial z_i]$ | -0,0209 | 0,07054 | -0,0622 | 0,13526 | 0,33071 | -0,2667 |
| $[\partial y(x, z) / \partial z_i]^2$ | 0,00044 | 0,00498 | 0,00387 | 0,0183 | 0,10937 | 0,07113 |
| $Var[y(x, z)]$ | 0,0093 | | | 1,1888 | | |

Nota-se que o parâmetro robusto determinado para o fresamento do aço ABNT 1045 caracteriza o ponto de ótimo como uma condição satisfatória para o processo, na medida em que o resultado esperado para a média da rugosidade R_a se mostra como um valor baixo em relação às medidas observadas nos experimentos. Além disso, a variabilidade de $0,0093 \mu m$ se traduz em uma variância de $0,0044 \mu m$ para R_a e variabilidade de $1,1888 \mu m$ que se traduz em uma variância de $0,01830 \mu m$ para R_t , também considerado um valor satisfatório em comparação às medidas experimentais.

Para os casos nos quais se tornar necessário ajustar o processo atribuindo, ponderações iguais para média e a variância de R_a , R_t . Dessa forma, chega-se a um conjunto de parâmetros robustos otimizados nos quais o processo pode ser configurado, de modo a se ter o melhor resultado para as respostas em diferentes cenários.

De acordo com o que foi apresentado no capítulo 2 de revisão da literatura os modelos de média e variância desenvolvidos através de um arranjo combinado são escritos como função apenas das variáveis de controle, embora as variáveis de ruído sejam testadas em diferentes níveis durante os experimentos. No entanto, dado que a derivação da equação de variância leva em consideração os efeitos provocados pelas variáveis de ruído, o ajuste das variáveis de controle para se ter o mínimo de variabilidade garante a robustez do processo em relação a esses efeitos. A Tabela 4.10 mostra a atribuição de pesos iguais para os parâmetros de rugosidades R_a e R_t .

Tabela 4.10 – Parâmetro otimizado para R_a e R_t .

| <i>Pesos</i> | | f_z | a_p | v_c | a_e | R_a | R_t | EQM_1 | EQM_2 |
|--------------|------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| w_1 | w_2 | -1,3730 | 0,7714 | -0,6446 | 1,0509 | 0,3918 | 1,9886 | 0,0354 | 1,2261 |
| 0 | 1 | -1,4502 | 0,8551 | -0,3471 | 1,0223 | 0,4461 | 1,9773 | 0,0568 | 1,2173 |
| 0,05 | 0,95 | -1,4445 | 0,8508 | -0,3690 | 1,0263 | 0,4422 | 1,9779 | 0,0550 | 1,2174 |
| 0,1 | 0,9 | -1,4384 | 0,8458 | -0,3925 | 1,0303 | 0,4380 | 1,9786 | 0,0531 | 1,2175 |
| 0,15 | 0,85 | -1,4320 | 0,8401 | -0,4173 | 1,0342 | 0,4335 | 1,9793 | 0,0512 | 1,2178 |
| 0,2 | 0,8 | -1,4250 | 0,8334 | -0,4444 | 1,0379 | 0,4286 | 1,9802 | 0,0491 | 1,2182 |
| 0,25 | 0,75 | -1,4176 | 0,8259 | -0,4729 | 1,0414 | 0,4234 | 1,9811 | 0,0470 | 1,2189 |
| 0,3 | 0,7 | -1,4098 | 0,8174 | -0,5034 | 1,0446 | 0,4178 | 1,9822 | 0,0448 | 1,2197 |
| 0,35 | 0,65 | -1,4014 | 0,8077 | -0,5357 | 1,0472 | 0,4119 | 1,9834 | 0,0425 | 1,2208 |
| 0,4 | 0,6 | -1,3926 | 0,7970 | -0,5698 | 1,0492 | 0,4056 | 1,9849 | 0,0402 | 1,2222 |
| 0,45 | 0,55 | -1,3622 | 0,7565 | -0,6850 | 1,0502 | 0,3843 | 1,9911 | 0,0330 | 1,2288 |
| 0,5 | 0,5 | -1,3730 | 0,7714 | -0,6446 | 1,0509 | 0,3918 | 1,9886 | 0,0354 | 1,2261 |
| 0,55 | 0,45 | -1,3622 | 0,7565 | -0,6850 | 1,0502 | 0,3843 | 1,9911 | 0,0330 | 1,2288 |
| 0,6 | 0,4 | -1,3507 | 0,7401 | -0,7277 | 1,0480 | 0,3763 | 1,9941 | 0,0306 | 1,2321 |
| 0,65 | 0,35 | -1,3382 | 0,7220 | -0,7730 | 1,0442 | 0,3679 | 1,9980 | 0,0282 | 1,2361 |
| 0,7 | 0,3 | -1,3246 | 0,7022 | -0,8213 | 1,0382 | 0,3589 | 2,0029 | 0,0258 | 1,2411 |
| 0,75 | 0,25 | -1,3093 | 0,6803 | -0,8733 | 1,0297 | 0,3492 | 2,0095 | 0,0234 | 1,2474 |
| 0,8 | 0,2 | -1,2917 | 0,6562 | -0,9302 | 1,0176 | 0,3388 | 2,0186 | 0,0211 | 1,2555 |
| 0,85 | 0,15 | -1,2704 | 0,6298 | -0,9942 | 1,0006 | 0,3274 | 2,0322 | 0,0187 | 1,2666 |
| 0,9 | 0,1 | -1,2417 | 0,6011 | -1,0697 | 0,9760 | 0,3144 | 2,0552 | 0,0164 | 1,2833 |
| 0,95 | 0,05 | -1,1933 | 0,5712 | -1,1700 | 0,9385 | 0,2991 | 2,1054 | 0,0138 | 1,3166 |
| 1 | 0,000 | -0,8989 | 0,3726 | -0,6072 | 0,5945 | 0,2811 | 2,6353 | 0,0079 | 1,9679 |

Usando o software *MINITAB* na Tabela 4.10 também são mostrados os valores gerados pela otimização usando pesos diferentes para os parâmetros de rugosidades R_a e R_t e o Erro Quadrático Médio (EQM_1 e EQM_2). Assim foi gerada a curva de Pareto, conforme as Figuras 4.16 (a e b).

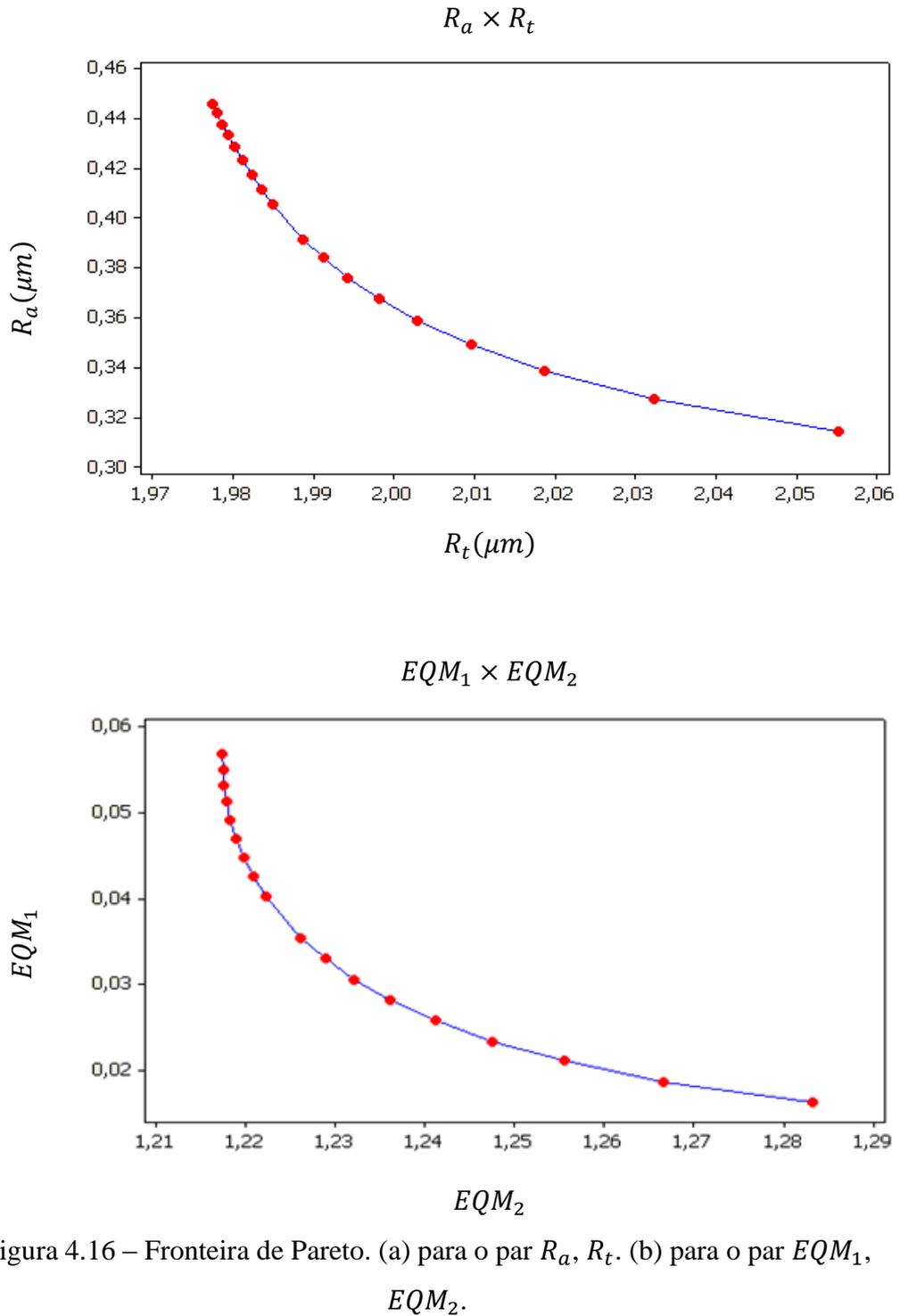


Figura 4.16 – Fronteira de Pareto. (a) para o par R_a, R_t . (b) para o par EQM_1, EQM_2 .

É possível notar-se que pela fronteira de Pareto, apesar de altamente correlacionadas as rugosidades R_a e R_t não são otimizadas pelo mesmo *setup*, isto porque a sensibilidade que otimiza R_a não é a mesma que otimiza R_t . Mas pelo ponto de vista de usinagem as rugosidades R_a e R_t são de extrema importância, cada uma em suas devidas aplicações. A rugosidade R_a para as superfícies lisas e deslizantes e outras aplicações a rugosidade R_t para faces de flanges e outras aplicações.

4.8 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Experimentos de confirmação foram realizados com o objetivo de comparar os resultados reais com os resultados obtidos para a condição otimizada. Dessa forma, foi empregada a combinação ótima dos parâmetros determinada através do Erro Quadrático Médio (EQM), para as condições de parâmetro de máquina fixo. A Tabela 4.11 apresenta os parâmetros ótimos a serem inseridos no comando centro de usinagem CNC.

Tabela 4.11 – Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045.

| | <i>Variáveis de controle</i> | | | | R_a | R_t | $\sigma^2(R_a)$ | $\sigma^2(R_t)$ |
|------------------------|------------------------------|-------|---------|--------|---------|---------|-----------------|-----------------|
| | f_z | a_p | v_c | a_e | | | | |
| <i>Resultado ótimo</i> | 0,081 | 1,414 | 308,886 | 18,076 | 0,3918 | 1,9886 | 0,00044 | 0,0183 |
| <i>Unidade</i> | $\frac{mm}{dente}$ | mm | m/min | mm | μm | μm | μm^2 | μm^2 |

As condições de corte ótimas foram ensaiadas variando a vazão do fluido, concentração do fluido, e condições da ferramenta, novas e desgastadas. Para cada passada foi medida a rugosidade em três pontos com três repetições, sendo 9 medidas para cada condição de ($z_1 z_2 z_3$) no total de 81 medições de R_a e R_t . A ideia básica em otimização de projeto robusto está relacionada a encontrar uma configuração de fatores controláveis que sofra ação de fatores incontroláveis, nesse caso, o ruído. Para testar essa afirmação com o processo em estudo, um projeto L9 Taguchi foi utilizado para avaliar o comportamento da configuração ótima em um cenário entre variáveis de controle e fatores de ruído. A confirmação de corridas dos experimentos foi escolhida entre os vários pontos da fronteira de Pareto. O ponto escolhido, como ideal, para a confirmação deste trabalho, está associado ao peso $w = 0,5$ neste nível de prioridade é igual para os parâmetros de rugosidades R_a e R_t . Após a execução dos ensaios e registros das respostas de confirmação foram obtidos os seguintes resultados apresentados conforme Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados dos experimentos de confirmação.

| z_1 | z_2 | z_3 | R_a (Real) | R_t (Real) |
|----------------|-------|-------|--------------|--------------|
| 0 | 5 | 0 | 0.451 | 2.378 |
| 0 | 10 | 10 | 0.403 | 2.312 |
| 0 | 15 | 20 | 0.422 | 2.155 |
| 0,15 | 5 | 10 | 0.404 | 2.275 |
| 0,15 | 10 | 20 | 0.411 | 2.133 |
| 0,15 | 15 | 0 | 0.407 | 2.588 |
| 0,30 | 5 | 20 | 0.339 | 2.252 |
| 0,30 | 10 | 0 | 0.403 | 2.312 |
| 0,30 | 15 | 10 | 0.389 | 2.848 |
| Média | | | 0,403 | 2,361 |
| Valor previsto | | | 0,392 | 1,989 |
| Erro | | | 2,73% | 15,75% |

O projeto de Taguchi foi verificado através da Análise de Variância (ANOVA), feita também pelo software MINITAB. As Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam os resultados desta análise e mostra que todos os modelos desenvolvidos não são adequados, pois apresentam P-values superiores a 5% de significância, para R_a e R_t . Portanto, os fatores de ruídos analisados não influenciam significativamente as respostas R_a e R_t .

Tabela 4.13 – Análise de variância para experimento de confirmação de R_a .

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P |
|---------------|----|----------|----------|----------|------|-------|
| v_b | 2 | 0,003606 | 0,003606 | 0,001803 | 1,86 | 0,350 |
| C | 2 | 0,000121 | 0,000121 | 0,00006 | 0,06 | 0,941 |
| Q | 2 | 0,001406 | 0,001406 | 0,000703 | 0,72 | 0,580 |
| Erro residual | 2 | 0,001942 | 0,001942 | 0,000971 | | |
| Total | 8 | 0,007074 | | | | |

Tabela 4.14 – Análise de variância para experimento de confirmação de R_t

| <i>Source</i> | <i>DF</i> | <i>Seq SS</i> | <i>Adj SS</i> | <i>Adj MS</i> | <i>F</i> | <i>P</i> |
|---------------|-----------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
| v_b | 2 | 0,05737 | 0,05737 | 0,02869 | 0,87 | 0,535 |
| C | 2 | 0,1323 | 0,1323 | 0,06615 | 2,01 | 0,333 |
| Q | 2 | 0,1523 | 0,1523 | 0,07615 | 2,31 | 0,302 |
| Erro residual | 2 | 0,06598 | 0,06598 | 0,03299 | | |
| Total | 8 | 0,40796 | | | | |

Os experimentos de confirmação mostram que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados teóricos, já que a maior diferença entre eles foi de 15,87 %, observada para parâmetro de rugosidades R_t e 2,73% e para o parâmetro de rugosidade R_a . Portanto, na medida em que os valores reais se mostraram condizentes com os valores calculados, ficam validados os resultados obtidos para a otimização do processo no fresamento de topo do aço ABNT 1045. Estende-se essa validação para os modelos matemáticos desenvolvidos, considerando-se que os mesmos apresentam baixos erros quanto à previsão do parâmetros de rugosidade R_a e R_t e que os ruídos não interferem nas respostas analisadas. A Tabela 4.15 apresenta os parâmetro de rugosidade R_a e R_t obtidas durante os experimentos de confirmação. Pode ser observado os valores encontrados para os parametros de rugosidade R_a e R_t medidos pela confirmação estão dentro do intervalo de confiança, calculados pelo algoritmo

Tabela 4.15 – Experimentos de confirmação para parâmetro de rugosidades R_a e R_t .

| <i>LI R_a</i> | <i>LS R_a</i> | <i>Real R_a</i> | <i>LI R_t</i> | <i>LS R_t</i> | <i>Real R_t</i> |
|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0,228 | 0,575 | 0,451 | 0,914 | 2,614 | 2,378 |
| 0,329 | 0,671 | 0,403 | 1,488 | 2,772 | 2,312 |
| 0,368 | 0,828 | 0,422 | 1,634 | 3,358 | 2,155 |
| 0,129 | 0,499 | 0,404 | 0,921 | 2,688 | 2,275 |
| 0,270 | 0,555 | 0,411 | 1,579 | 2,761 | 2,133 |
| 0,335 | 0,686 | 0,407 | 1,788 | 3,284 | 2,588 |
| 0,012 | 0,466 | 0,339 | 0,797 | 2,892 | 2,252 |
| 0,151 | 0,499 | 0,403 | 1,472 | 2,949 | 2,312 |
| 0,257 | 0,590 | 0,389 | 1,779 | 3,374 | 2,848 |

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentados neste trabalho os resultados para o parâmetro de rugosidade R_a e R_t na superfície fresada do aço ABNT 1045, com insertos intercambiáveis de metal duro com cobertura de nitreto de titânio (TiN). Dessa forma, a partir da discussão dos conceitos relacionados ao fresamento e à estatística que é uma ferramenta aliada ao processo, entre as aplicações da usinagem por fresamento, o presente trabalho se dedicou relacionar o desgaste dos insertos e também a aplicação de fluido de corte, dando ênfase sempre à qualidade da superfície usinada. Nesse contexto, foram definidos os parâmetros de usinagem no aço ABNT 1045 usando insertos com aresta novas e desgastadas. A análise das pesquisas anteriores relacionadas ao processo de usinagem por fresamento mostrou que o interesse industrial e acadêmico pelo processo vem crescendo nos últimos anos, caracterizando este como um tema de pesquisa atual e de relevância científica. Considerando as pesquisas que empregaram o fresamento, observou-se que o método de parâmetro robusto é ainda um elemento escasso na literatura. Assim, identifica-se aqui mais uma lacuna com que o presente trabalho se propôs a contribuir. Além disso, a análise das respostas consideradas pelos trabalhos anteriores confirmou a importância da busca para resolver os diversos desafios impostos pelas inúmeras variáveis do processo de fresamento, independentemente da análise. Por fim, a interação entre os parâmetros foi identificada como um fator também significativo, de modo que sua análise não pode ser negligenciada.

Quanto às ferramentas de análise e otimização, foram apresentados os conceitos que envolvem o Projeto e Análise de Experimentos (DOE), caracterizando esta como uma importante técnica para o estudo científico dos problemas de engenharia. Entre os seus projetos experimentais, foi discutido a Metodologia de Superfície de Resposta, que é um conjunto de ferramentas indicado para a otimização de problemas. Em seguida, foi apresentado o erro médio quadrático (EQM) como método de otimização, mostrando que sua principal vantagem, diz respeito ao fato de tratar da otimização de múltiplas respostas considerando a estrutura de correlação entre elas. No entanto, o erro médio quadrático EQM considera as respostas com o mesmo nível de importância. Sendo assim, foi proposta uma estratégia de ponderação das respostas para o EQM, visando contribuir para o aprimoramento do método quanto à otimização de múltiplas respostas correlacionadas com graus de importância diferentes. Finalmente, foram apresentados os conceitos relacionados ao Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), que é o algoritmo utilizado neste trabalho para a solução das

equações dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) e também dos mínimos quadrados ponderados (WLS) relacionando variáveis de controle e ruídos. A escolha por esse algoritmo de busca se justifica pelo fato ser um algoritmo de otimização global, ao contrário dos métodos gradientes, que podem estacionar em pontos de ótimos locais.

Dessa forma, as etapas necessárias para o desenvolvimento da Metodologia de Superfície de Resposta e da Otimização (EQM) foram aplicadas de forma sistemática, o que contribuiu para que resultados importantes fossem obtidos. Por fim, vale também destacar que a estratégia de ponderação das respostas proposta para o (EQM) foi empregada com sucesso para a otimização do processo estudado. Com os parâmetros ótimos encontrados foi possível aplicar o método de Taguchi (L9), para confirmar os resultados do algoritmo com valores práticos. Os valores ótimos obtidos nos experimentos de confirmação para os parâmetros de rugosidade R_a e R_t ficou dentro do intervalo de confiança.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, algumas conclusões podem ser obtidas para o fresamento de topo do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro revestidas com Nitreto de Titânio (TiN).

5.1 CONCLUSÕES DOS ENSAIOS PRELIMINARES

- O fresamento com a mínima vazão de fluido apresentou menor desgaste de flanco e maior vida da ferramenta em todas as condições de corte ensaiadas;
- A condição com mínima vazão de fluido apresentou o melhor comportamento de rugosidade Ra em termos de média e dispersão ao longo dos ensaios, principalmente nas condições de maior velocidade e baixo avanço;
- Na usinagem sem fluido de corte o desgaste de flanco da ferramenta é exponencial para todas condições ensaiadas, devido a energia imputada pelo processo de fresamento;
- O comportamento da rugosidade ao longo da vida da ferramenta apresentou uma leve tendência de queda em função da presença do desgaste de flanco;

- O efeito refrigerante da maior vazão de fluido é mais prejudicial à vida da ferramenta e à rugosidade da peça na condição de maior profundidade de usinagem .

5.2 CONCLUSÕES DOS ENSAIOS DEFINITIVOS

- Os modelos matemáticos desenvolvidos para as respostas de interesse se caracterizaram como expressões de grande confiabilidade, já que apresentaram ajustes superiores a 70% para R_a e R_t ;

- A análise das interações entre os parâmetros se mostrou como um elemento importante para o controle do processo, evidenciando que a ação conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma dada resposta pode conduzir a efeitos significativos. Portanto, essa análise não pode ser negligenciada;

- A estratégia de ponderação das respostas proposta para o erro quadrático médio (EQM) foi empregada com sucesso, obtendo-se melhores resultados otimizados, em comparação ao obtido com o método OLS. Portanto, o erro quadrático médio (EQM) se caracteriza como uma ferramenta eficiente para a otimização de múltiplas respostas correlacionadas, apresentando diferentes níveis de importância;

- Após a aplicação do EQM, verificou-se que a otimização do processo de fresamento de topo no aço ABNT 1045 é alcançada com o emprego da seguinte combinação dos parâmetros: $f_z = 0,081 \text{ mm/dente}$, $a_p = 1,414 \text{ mm}$, $v_c = 308,886 \text{ m/min}$, $a_e = 18,076 \text{ mm}$, valores estes satisfatórios para o processo de usinagem por fresamento de topo do aço ABNT 1045 em questão;

- Os experimentos de confirmação mostraram que a maior diferença entre as respostas reais e as respostas teóricas resultou em 2,73% para $R_a(\mu\text{m})$ e 15,75%, observado para a rugosidade $R_t(\mu\text{m})$. Com isso, obteve-se a validação dos resultados ótimos e também dos modelos desenvolvidos para as respostas. Portanto, tais resultados fazem desses modelos expressões úteis para um adequado controle do processo, na medida em que apresentam baixos erros quanto à previsão das respostas;

- A capacidade e a qualidade do modelamento do processo de fresamento de topo, utilizando-se o procedimento de projeto de parâmetro robusto (PPR) apresentado, é fortemente dependente da qualidade do conjunto de dados experimentais;
- O projeto L9 Taguchi foi utilizado para avaliar o comportamento da configuração ótima em um cenário entre variáveis de controle e fatores de ruído, e que o ruído não interferem nas respostas analisadas;

5.3 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Como sugestões para estudos futuros, ficam as seguintes considerações:
 - Comparar o fresamento concordante com o discordante deste mesmo aço ABNT1045, usando as mesmas combinações.
 - Comparar o mesmo processo de fresamento, porém com ferramentas com ângulo 45 graus usando as mesmas combinações.
 - Comparar o mesmo processo de fresamento de topo, porém em canais usando as mesmas combinações.
 - Emprego do erro quadrático médio (EQM) em outros problemas de otimização em operações por fresamento, visando a testar a aplicabilidade do método com mais respostas.
 - Emprego do erro quadrático médio (EQM) em outros problemas de otimização em operações por fresamento, visando a testar a aplicabilidade do método com mais respostas, incluindo emissão acústica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6405 (1988) e NBR 8404 (1984).

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE, ANSI B 46.1. (1995). Surface Texture.

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES. A. C. S., LIRANI, J. (2004). Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões. Editora Edgard Blucher. S Paulo.

A. RICHETTI, A. R.; MACHADO, MB; DA SILVA, E.; O.; EZUGWU, J.; BONNY. (2004). Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face milling of steels, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, pp. 695–700.

ARDAKANI, M. K., NOOROSSANA R. (2008). 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.

BASAVARAJAPPA, S., CHANDRAMOHAN, G., PRABU, M., MUKUND, K., ASHWIN, M. (2007). Drilling of hybrid Metal Matrix Composites - Workpiece surface integrity. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 92-96.

BOX, G. E. P., DRAPER, N. R. (1987). Empirical Model-Building and Response Surfaces. John Wiley e Sons, 1ª ed., 650 p.

BOX, G. (1988). Signal-to-noise ratios, performance criteria, and transformations. Technometrics, 30, pp. 1-40.

BYERS, J. P. (2006). Metalworking Fluids. CRC Press. 2ª ed., New York, 463 p.

BOOSER, E. R. (1998). Handbook of Lubrication Theory and Practice of Tribology, v. II. 6^o ed., pp. 335- 379.

BOOTHROYD, G., KNIHT, W.A. (2006). “Fundamentals of Machining and Machine Tools”. Nova Iorque. CRC Press. ISBN 1-57444-659-2.

CALDERANI FILHO, J. (1998). Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis, 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP, Campinas.

Diniz, A. E., Caldeirani Filho, J. (1999). Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process, Wear, v. 232(1), pp. 67-75.

ÇOLAC. O., KURBANOGLU, C., KAYACAN, M. C. (2005). Milling Surface Roughness prediction using evolutionary programming methods. Materials & Design, Oxford, v. 28, no. 2, pp. 657- 666.

CHANCE, BETH L.: ROSSMAN, ALLAN J. (2005), Investigating statistical Concepts Applications and Methods (S.1): Dubury Press.

CHENG, K. (2009). Machining Dynamics. Fundamentals, Applications and Practices, 1^a ed. London: Springer, Cap. 5, pp. 117-150.

CHEVIER, P., TIDU, A., BOLLE, B., CEZARD, P., TINNES, J. P. (2003). Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 43, pp. 1135-1142.

CHO, B. R., PARK, C. (2005). Robust design modeling and optimization with unbalanced data. Computers & Industrial Engineering, v. 48, pp. 173-180.

CHEN, D.C., CHEN, C.F. (2007). Use of Taguchi method to Study a Robust Design for the Sectioned beams Curvature Duringrolling Journal. Mater. Process. Technol. 190, 130–137.

DAVIM, J. P. (2008). Machining: Fundamentals and Recents Advances. 1^a Ed. London: Springer.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. (2008). Tecnologia da usinagem dos materiais. 6^a ed. São Paulo: Artliber Editora, 262 p.

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

DEL CASTILLO, E., FAN, S. K., SEMPLE, J. (1999). Optimization of dual response systems: a comprehensive procedure for degenerate and nondegenerate problems. European Journal of Operational Research, 112, 174-186.

EL BARADIE, M. A. (1996) “Cutting fluids: Part I. Characterization”. Journal of Materials Processing Technology, v. 56, pp. 786-797.

FERRARESI, D., RUFINO, R.T., PALLEROSI, C. A. (1972). “Usingem dos metais” Apostila da ABM, 71 p.

EDWARDS, R. (1993). Cutting Tools The Institute of Materials London. The University Press, Cambridge, 200 p.

GHANI, J. A., CHOUDHURY, I. A., HASSAN, H. H. (2004), Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, Journal of Materials Processing Technology, v. 145, no. 1, pp. 84-92.

GRINE, K., ATTAR, A., AOUBED, A., BREYSSE, D. (2010) Using the design of experiment to model the effect of silica sand and cement on crushing properties of carbonate sand. Materials and Structures, v. 44, pp. 195-203.

GOMES, J. H. F., CAMPOS, P. H. S., LOPES, L. G. D., COSTA, S. C., PAIVA, A. P. (2012). Otimização Robusta da Diluição e da Largura do Cordão na Soldagem com Arame Tubular para Aplicações de Revestimento do aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L, Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luís (MA), Brasil.

HARIDY, S., GOUDA, S. A., WU, Z. (2010). An integrated framework of statistical process control and design of experiments for optimizing wire electrochemical turning process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-010-2828-7.

HIOKI, D. (2006). Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido. São Paulo, SP. Tese de Doutorado. USP, 233 p.

HUTCHINGS, I. M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, 1ª ed. Londres: Arnold.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. (1989). International Standard – ISO 8688-1 – Tool Life Testing in Milling – Part 1. Face Milling. 1st ed. Genève, Switzerland 32 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. (1989). International Standard – ISO 8688-2 – Tool Life Testing in Milling – Part 2. End Milling. 1st ed. Genève, Switzerland 31 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. (1993). International Standard – ISO 3685 – Tool-life Testing With Single-point. Turning Tools. 2nd ed. Genève, Switzerland 54 p.

JAVIDI, A., RIEGER, U., EICHLSEDER, W. (2008), The Effect of Machining on the Surface Integrity and Fatigue Life. International Journal of Fatigue.

JULIE Z. ZHANG, JOSEPH C. CHEN, E. DANIEL KIRBY. (2007). Surface Roughness Optimization in end-Milling Operation using the Taguchi Design Method'. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 184, pp. 233–239.

KACKAR, R. N. (1985). Off-line quality control, parameter design and the Taguchi method. *Journal of quality technology*. v.17, no. 4, pp. 176-189.

KAZEMZADEH, R. B., BASHIRI, M., ATKINSON A. C., NOOROSSANA, R. (2008). A general framework for multiresponse optimization problems based on goal programming. *European Journal of Operational Research*, 189, 421-429.

KOPAC, J., KRAJNIK, P. (2007). Robust design of flank milling parameters based on grey-Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 191, no. 1-3, pp. 400-403.

KORKUT, I., DONERTAS, M. A. (2007). The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling *Materials & Design* , v. 28, pp. 308-312.

KökSOY, O. (2006). Multiresponse robust design Mean square error (MSE) criterion. *Applied Mathematics and Computation*, 175, 1716-1729.

KOVACH, J., CHO, B. R. (2009). A D-optimal design approach to constrained multiresponse robust design with prioritized mean and variance considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 57, 237-245.

MACHADO, A. R., COELHO, R.T., ABRÃO, A.M.; DA SILVA, M.B. (2009), *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 384 p.

MARCELINO, A. P., DOMINGOS, D. C., CAMPOS, D. V. V., SCHROETER, R. B. (2004). *Medição e Simulação dos Esforços de Usinagem no Fresamento de Topo Reto de Ligas de Alumínio Tratável Termicamente 6061*. IX CREEM, Rio de Janeiro, Paper CRE04-PF25

MOORE, DAVID (1992). Statistics for the Twenty-First Century. Washington, DC: The Mathematical Association of America, 14–25 p.

METALS HANDBOOK. MACHINNING. (1989). Estados Unidos; ASM Internacional, v. 16, 9499 p.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. (2003). Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2ª ed., pp. 570.

MONTGOMERY, D. C. (2005) Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, 6ª ed., 643 p.

MOTTA, M. F., MACHADO, A. R. (1995). Fluidos de Corte. Tipos Funções, Seleção, Métodos de Aplicação e Manutenção. Revista Máquinas e Metais, v. 30, p. 44-56, setembro.

MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C. (1995). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments, 2ª ed, Wiley – Interscience, New York, USA, 700 p.

N. CAMUSCU, E., ASLAN, A. (2005). “Comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel”, Journal of Materials Processing Technology 170 121–126.

NBR ISO 4287. (2002). Especificações Geométricas do Produto (GPS), Rugosidade: Método do perfil- termos, definições e parâmetros da rugosidade. ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA C. J. (2004). Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens. Dissertação de Mestrado PUC Minas.

OLIVEIRA, J. M. (2006). Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas para Produção de Moldes e Matrizes. Caxias do Sul, RS. Dissertação de Mestrado. UCS, 110 p.

PAIVA, A. P. (2006), Metodologia de Superfície de Resposta Multivariada – Uma proposta de otimização para processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas. 279 p. Tese de Doutorado – UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

PAIVA, A. P., CAMPOS, P. H., FERREIRA, J. R., LOPES, L. G. D., PAIVA, E. J., BALESTRASI, P. P. (2012). 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*, 30, 152-163.

PEREIRA, C., CORREIA, S. J., PIVATO, C. (2005). Como se apresentam e para que servem os lubrificantes e refrigerantes. *Maquinas e Metais*. São Paulo. Editora Aranda, no. 471, pp. 352-361, abr.

PHADKE, M. S. (1989) *Quality Engineering Using Robust Design*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.

QUESADA, G. M., CASTILHO, E. D. (2004). Dual-response approach to the multivariate robust parameter design problem, *Technometrics*, v. 46, no. 2, pp. 176-186.

ROBINSON, T. J, WUFF, S. S., MONTGOMERY, D.C., KHURI, A. I. (2006). Robust parameter design using generalized linear mixed models, *Journal of Quality Technology*, v. 38, no. 1, pp. 65-75.

QUINSAT, Y., LAVERNHE, S., LARTIGUE, C. (2010). Characterization of 3D surface Topography in 5-axis milling. *Wear* article in press.

RAO, P. V., REDDY, N. S. K. (2006). Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, pp. 189-198.

SANDVIK COROMANT. (2011). *Manual Técnico de Usinagem*, Sandviken, Suécia.

SANTOS, S. C. SALES, W. F. (2007). Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Metais. 1ª ed. São Paulo, Artliber.

SOKOVIC, M., MIJANOVIC, K. (2001). Ecological Aspects of Cutting Fluids and its Influence on Quantifiable Parameters of the Cutting Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, Slovenia, no. 109, pp. 181-189.

SCHROETER, R. B., WEINGAERTNER, W. L. (2002). Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida – parte 1. Apostila do curso de Engenharia Mecânica.

SHENG, P. S., OBERWALLENEY, S. (1997). Life cycle Planning of Cutting Fluids a Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 119, no. 4 (b), pp. 791-800.

SHIN, S., SAMANLIOGLU, F., CHO, B. R., WIECEKi, M. M. (2011). Computing trade-offs in robust design: perspectives of the mean squared error. *Computers & Industrial Engineering*, 60, 248-255.

SHOEMAKER, A. C., TSUI, K. L., WU, C. F. J. (1991) Economical experimentation methods for robust design. *Technometrics*, v. 33, no. 4.

TAGUCHI, G. (1986). Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Process. Tokyo, Japan: Asian Productivity Organization.

TANG, S. H., TAN, V. J., SAPUAN, S. M., SULAIMAN, S., ISMAIL, N., SAMIN, R. (2007). The use of Taguchi Method in the Design of Plastic Injection Mould for Reducing Warpage. *J. Mater. Process. Technol.* 182, 418–426.

TELES, J. M. (2007). Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Itajubá, 124 p.

TOBERTT, P. E., EISEN, E. A., POTHIER, L. J., MONSON, R. R., HALLOCK, M. F., SMITH, T. J. (1992). Mortality studies of Machining-fluid Exposure in the Automobile Industry II Risks associated With Specific Fluid Types. *Scandinavian Journal Work Environment Health*, v. 18, pp. 351-360.

TRENT, E. M. (1991). *Metal cutting*. 3th ed. Oxford, Butterworth – Heinemann.

TRENT, E. M. WRIGHT, P. K. (2000). *Metal cutting*, 4th ed., Butterworth-Heinemann, London, 446 p.

WEBER, SAULO HENRIQUE. (2006). Desenvolvimento de nova função densidade de probabilidade para Avaliação de Regeneração Natural. Universidade Federal do Paraná.

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

WHITEHOUSE, D. J. (2000). *Surfaces and their Measurement*. London, Hermes Penton Science, 395 p.

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

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

YANG, L. J. (2007). The effect of specimen thickness on the hardness of plasma surface hardened ASSAB 760 steel specimens. *J. Mater. Process. Technol.* 185, 113–119.

YAN, J. MURAKAMI, Y. DAVIM, J. P. (2009). Tool Design, Tool Wear and Tool Life. In: CHENG, K.; *Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices*. 1. Ed. London: Springer. Cap. 5, pp. 117-150.

ZHANG, J. Z., CHEN, J. C., KIRBY, E. D. (2007). Surface Roughness Optimization in a end-milling Operation Using the Taguchi Design Method. *J. Mater. Process. Technol.* 184, 233–239, 2007.

OWEN, J. V. (1998). Picking a Coolant. *Manufacturing Engineering*, v. 120, no.5, pp. 92-100.

RAO, P. V., REDDY, N. S. K. (2006). Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, pp. 189-198.

ROSA, LUIZ CARLOS. (2005). Acabamento de Superfície, Rugosidade Superficial, OMA Mecânica para automação, UNESP, Sorocaba.

ROSARIO, J. F. A. (2006). Avaliação da Integridade da Superfície no Torneamento de um Ferro Fundido Nodular com Carboneto. São Paulo, SP. Dissertação de Mestrado. USP, 138 p.

RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. (1989). Lubrificantes nas indústrias produção, manutenção e controle. Cotia, SP, Brasil, Triboconcept Edições Técnicas, pp. 71-171.

REDY, N. S. K., RAO, P. V. (2005), A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model in dry milling, *Machining Science and Technology*, v. 9, no. 1, pp. 63-84.

FUNG, C. P., KANG, P. C. (2005). Multi-response Optimization in Friction Properties of PBT Composites using Taguchi Method and Principle Component Analysis *Journal. Mater. Process. Technol.* 170, 602–610.

VIJIAN, P., ARUNACHALAM, V. P. (2006). Optimization of Squeeze Cast Parameters of LM6 Aluminium alloy for Surface Roughness Using Taguchi Method *Journal Mater. Process. Technol.* 180, 161–166.