

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

TIAGO VACARO

**OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE TOPO ESFÉRICO DE PLANOS
INCLINADOS APLICANDO O MÉTODO DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

CAXIAS DO SUL

2013

TIAGO VACARO

**OTIMIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE TOPO ESFÉRICO DE PLANOS
INCLINADOS APLICANDO O MÉTODO DE ALGORITMOS GENÉTICOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica pela Universidade de
Caxias do Sul.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

Coorientador: Prof. Dr. Leandro L. Corso.

CAXIAS DO SUL

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

V112o Vacaro, Tiago

Otimização do fresamento de topo esférico de planos inclinados aplicando o método de algoritmos genéticos / Tiago Vacaro. - 2013.
126 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.
“Orientação: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann”

1. Fresagem. 2. Algoritmos genéticos. 3. Usinagem. 4. Otimização matemática. I. Título.

CDU 2.ed. : 621.914

Índice para o catálogo sistemático:

1. Fresagem	621.914
2. Algoritmos genéticos	004.021
3. Usinagem	621.9
4. Otimização matemática	517

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Márcia Servi Gonçalves – CRB 10/1500

"Otimização do Fresamento de Topo Esférico de Planos Inclinados Aplicando o Método de Algoritmos Genéticos".

Tiago Vacaro

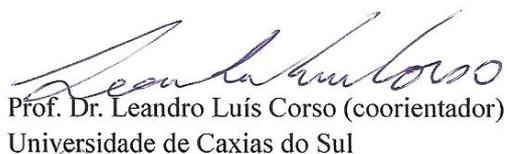
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 01 de agosto de 2013.

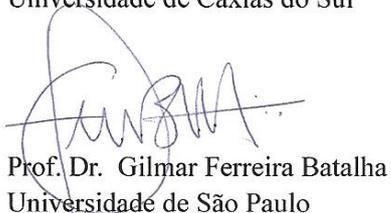
Banca Examinadora:



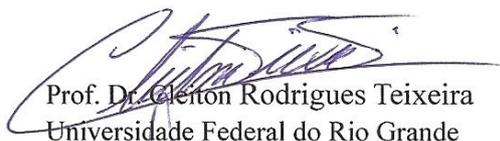
Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann (orientador)
Universidade de Caxias do Sul



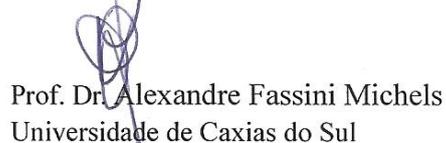
Prof. Dr. Leandro Luís Corso (coorientador)
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha
Universidade de São Paulo



Prof. Dr. Clerton Rodrigues Teixeira
Universidade Federal do Rio Grande



Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

Para os meus pais, Nilo e Iraci,
meus modelos de dedicação,
humildade e integridade.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pelo término de uma importante etapa da minha vida, que muito contribuiu para meu crescimento pessoal e profissional.

À minha família, em especial aos meus pais, Nilo e Iraci, e ao meu irmão, Silvano, que sempre me apoiaram e constituem meu porto seguro frente às turbulências da vida.

Ao meu orientador, Prof. Rodrigo P. Zeilmann, pelos conhecimentos transmitidos, apoio e amizade.

Ao meu coorientador, Prof. Leandro L. Corso, pelos ensinamentos e palavras de motivação.

Ao Prof. Gerson L. Nicola, pelo auxílio fundamental na organização e realização dos ensaios experimentais, companheirismo e amizade.

Aos Profs. Albano L. Weber e Alexandre F. Michels, pelo auxílio no tratamento estatístico dos dados experimentais.

A todos os colegas que tive no Grupo de Usinagem, em especial ao Eng. Fernando M. Bordin, pela amizade e apoio.

Aos professores e colegas do PPGMEC, em especial aos alunos da primeira turma.

À Universidade de Caxias do Sul, pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa Arwi Representações Comerciais Ltda. e ao Sr. Wilson D'Agostini, pelo fornecimento das ferramentas para a realização dos ensaios experimentais, e aos Srs. Ronald Rodrigues e Ronei Ferraro, pelas informações técnicas referentes às ferramentas.

À empresa JR Oliveira Indústria Metalúrgica Ltda. e ao Prof. Juliano M. Oliveira, pela disponibilização da empresa para a realização dos testes de usinagem.

A todos que de alguma forma me auxiliaram nesta jornada, meu muito obrigado.

“More the knowledge lesser the ego,
lesser the knowledge more the ego...”

Albert Einstein

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma aplicação de algoritmos genéticos na otimização de parâmetros de corte em uma operação de fresamento de topo esférico de planos inclinados, considerando quatro estratégias de usinagem e dois diferentes materiais dos corpos de prova (ABNT P20 e ABNT H13). O objetivo da otimização foi minimizar o tempo de usinagem, e a principal restrição técnica foi a rugosidade das superfícies usinadas. A aplicação proposta apresentou resultados satisfatórios na otimização dos parâmetros de corte, mas houve diferenças significativas nos resultados de rugosidade obtidos no modelo matemático e nos ensaios experimentais de validação. Uma análise das superfícies usinadas demonstrou que a formação das mesmas não ocorreu de forma regular e homogênea, e não foram observadas tendências claras de comportamento com relação às diferentes estratégias e materiais. Também foi observada a significativa influência de instabilidades dinâmicas durante a usinagem, cujos efeitos não são considerados no modelo matemático aplicado no problema de otimização, o que explica as diferenças observadas entre os resultados de rugosidade computacionais e experimentais.

Palavras-chave: Fresamento. Otimização. Algoritmos genéticos. ABNT P20. ABNT H13.

ABSTRACT

This dissertation presents an application of genetic algorithms in the optimization of cutting parameters on a ball end milling operation of inclined planes, considering four machining strategies and two different materials of the workpieces (ABNT P20 and ABNT H13). The objective of the optimization was to minimize the machining time, and the main technical restriction was the roughness of the machined surfaces. The proposed application presented satisfactory results in the optimization of cutting parameters, but significant differences occurred between the roughness results obtained with the mathematical model and in the experimental validation. An analysis of the machined surfaces has shown that the formation of the surfaces did not occur on a regular and homogeneous way, and no clear trends with respect to different strategies and materials were observed. The significant influence of dynamic instabilities during machining was also observed, whose effects are not considered in the mathematical model applied to the optimization problem, which explains the differences observed between the results of computational and experimental roughness.

Keywords: Milling. Optimization. Genetic algorithms. ABNT P20. ABNT H13.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diâmetro efetivo da fresa de topo esférico	21
Figura 2.2 – Estratégias concordante e discordante.....	24
Figura 2.3 – Estratégias de corte no fresamento de topo esférico de planos inclinados	25
Figura 2.4 – Representação esquemática da superfície usinada.....	27
Figura 2.5 – Projeções 3D da textura para diferentes estratégias de usinagem.....	28
Figura 2.6 – Parâmetros de rugosidade (a) R_a , (b) R_z e (c) $R_{zI_{max}}$	31
Figura 2.7 – Representação esquemática do fresamento de topo esférico	38
Figura 2.8 – Representação da linha média do perfil de rugosidade	39
Figura 2.9 – Modelo geral de otimização de problemas de usinagem.....	41
Figura 2.10 – Funções unimodal e multimodal	43
Figura 2.11 – Fluxograma de um algoritmo genético.....	47
Figura 2.12 – Pseudocódigo de um algoritmo genético.....	48
Figura 2.13 – Exemplificação do método da roleta	51
Figura 2.14 – Exemplificação do método do torneio.....	52
Figura 2.15 – Exemplo do cruzamento de um ponto	54
Figura 2.16 – Exemplo do cruzamento multiponto	54
Figura 2.17 – Exemplo do cruzamento uniforme	55
Figura 2.18 – Exemplo de mutação	56
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da metodologia.....	63
Figura 3.2 – Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios	70
Figura 3.3 – Imagens da fresa de topo esférico empregada nos ensaios.....	71
Figura 3.4 – Especificações dimensionais e geométricas das ferramentas utilizadas	71
Figura 3.5 – Dimensões principais dos corpos de prova.....	72
Figura 3.6 – Representação esquemática da fixação dos corpos de prova.....	73
Figura 3.7 – Representação esquemática das estratégias de corte empregadas	74
Figura 3.8 – Representação esquemática das condições empregadas nos corpos de prova.....	75
Figura 3.9 – Rugosímetro portátil utilizado nas medições de rugosidade	76
Figura 3.10 – Microscópios utilizados nas análises de textura	78
Figura 4.1 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição P20 ascendente	83
Figura 4.2 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição P20 descendente	84
Figura 4.3 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição H13 ascendente	84
Figura 4.4 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição H13 descendente	84

Figura 4.5 – Gráficos dos resultados de rugosidade dos corpos de prova de P20.....	89
Figura 4.6 – Gráfico dos resultados de rugosidade dos corpos de prova de H13.....	90
Figura 4.7 – Comparação dos resultados de rugosidade média R_a dos dois materiais	91
Figura 4.8 – Imagens de textura da condição P20 vertical ascendente.....	93
Figura 4.9 – Perfis de rugosidade da condição P20 vertical ascendente.....	93
Figura 4.10 – Imagens de textura da condição P20 horizontal ascendente.....	94
Figura 4.11 – Perfis de rugosidade da condição P20 horizontal ascendente.....	94
Figura 4.12 – Imagens de textura da condição P20 vertical descendente	95
Figura 4.13 – Perfis de rugosidade da condição P20 vertical descendente.....	95
Figura 4.14 – Imagens de textura da condição P20 horizontal descendente.....	95
Figura 4.15 – Perfis de rugosidade da condição P20 horizontal descendente.....	96
Figura 4.16 – Imagens de textura da condição H13 vertical ascendente	96
Figura 4.17 – Perfis de rugosidade da condição H13 vertical ascendente	97
Figura 4.18 – Imagens de textura da condição H13 horizontal ascendente	97
Figura 4.19 – Perfis de rugosidade da condição H13 horizontal ascendente.....	97
Figura 4.20 – Imagens de textura da condição H13 vertical descendente	98
Figura 4.21 – Perfis de rugosidade da condição H13 vertical descendente	98
Figura 4.22 – Imagens de textura da condição H13 horizontal descendente	99
Figura 4.23 – Imagens de textura da condição H13 horizontal descendente	99
Figura 4.24 – Perfis de rugosidade de processos de corte estável e instável	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resumo de estudos sobre fresamento de topo esférico de planos inclinados	26
Quadro 2.2 – Valores de rugosidade média de superfícies usinadas	31
Quadro 3.1 – Configurações de implementação do algoritmo genético	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplos de esquemas	59
Tabela 2.2 – Exemplos de ordem e tamanho de esquemas	60
Tabela 3.1 – Valores limites dos parâmetros de corte	65
Tabela 3.2 – Parâmetros de configuração do AG	68
Tabela 3.3 – Valores de batimento das ferramentas	76
Tabela 3.4 – Comprimentos de amostragem e avaliação de rugosidade	77
Tabela 4.1 – Resultados da aplicação do AG	81
Tabela 4.2 – Valores de diâmetro efetivo e rotação relativos às soluções obtidas no AG	82
Tabela 4.3 – Valores de rugosidade média teórica relativos às soluções obtidas no AG	82
Tabela 4.4 – Comparação dos resultados de tempos de usinagem	86
Tabela 4.5 – Comparação dos resultados calculados e medidos de rugosidade média	87
Tabela C.1 – Exemplo do cálculo de incerteza de medição de rugosidade	122
Tabela C.2 – Incerteza expandida das medições de rugosidade	123
Tabela D.1 – Nível de confiança amostral	124

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície usinada [mm ²]
a _e	Profundidade radial de corte [mm]
a _p	Profundidade axial de corte [mm]
C _p	Constante de penalização
c _i	Coefficiente de sensibilidade
d	Diâmetro da ferramenta [mm]
d _{ef}	Diâmetro efetivo de corte [mm]
FO	Função objetivo
FO _{pen}	Função objetivo penalizada
f(H)	Valor médio de aptidão do esquema H
f'	Valor médio de aptidão da população
f _z	Avanço por gume [mm]
g	Geração de indivíduos
h	Altura máxima da crista [mm]
H	Esquema
K	Fator de abrangência
l	Número de caracteres da sequência
l _e	Comprimento de amostragem [mm]
LI _i	Limite inferior do parâmetro x _i
l _m	Percurso de medição [mm]
LS _i	Limite superior do parâmetro x _i
m	Número esperado de instâncias de um esquema
N	Tamanho da população
n	Rotação da ferramenta [rpm]
O(H)	Ordem do esquema H
P	População
p _c	Probabilidade de cruzamento
p _m	Probabilidade de mutação
R	Raio da ferramenta [mm]
R _a	Rugosidade R _a [μm]
R _z	Rugosidade R _z [μm]
R _{z1max}	Rugosidade R _{z1max} [μm]

r_c	Valor calculado da restrição
$r_{m\acute{a}x}$	Valor máximo da restrição
t_c	Tempo de corte [min]
U	Incerteza expandida
u_c	Incerteza padrão combinada
u_i	Contribuio para a incerteza
u_{xi}	Incerteza padrão
v_c	Velocidade de corte [m/min]
v_{eff}	Grau de liberdade efetivo
v_i	Grau de liberdade
y	Posio da linha média do perfil de rugosidade [mm]
z	Número de gumes da ferramenta
z_i	Rugosidade parcial [μm]
$\delta(H)$	Comprimento do esquema H
θ	ngulo entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal  superfície usinada [rad]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Estrutura do trabalho	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Introdução	20
2.2 Fresamento de topo esférico.....	20
2.2.1 Características do processo	20
2.2.2 Estratégias de corte.....	23
2.2.3 Qualidade superficial.....	26
2.2.4 Modelagem matemática do tempo de usinagem	32
2.2.5 Modelos matemáticos de caracterização da superfície	34
2.3 Otimização de processos de usinagem	41
2.3.1 Aplicação de otimização em processos de usinagem.....	41
2.3.2 Classificação dos métodos de otimização	42
2.4 Algoritmos genéticos	44
2.4.1 Introdução	44
2.4.2 Terminologia usada em algoritmos genéticos	46
2.4.3 Estrutura básica dos algoritmos genéticos.....	46
2.4.4 Operadores genéticos	50
2.4.5 Parâmetros dos algoritmos genéticos	56
2.4.6 Critérios de convergência	58
2.4.7 Teorema fundamental dos algoritmos genéticos.....	59
2.5 Considerações finais.....	61
3 MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1 Introdução	63
3.2 Etapas da metodologia proposta.....	63
3.2.1 Definição da função objetivo e das restrições do processo	64
3.2.2 Definição dos valores limites das restrições do problema de otimização	64
3.2.3 Modelagem matemática do problema de otimização	66

3.2.4 Seleção dos elementos de configuração do algoritmo genético.....	68
3.2.5 Aplicação do algoritmo genético	69
3.2.6 Ensaios experimentais de validação do modelo matemático.....	70
3.2.7 Análise dos resultados	78
4 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO	80
4.1 Introdução	80
4.2 Resultados da aplicação do algoritmo genético.....	80
4.2.1 Soluções obtidas pelo algoritmo genético	80
4.2.2 Curvas de convergência do algoritmo genético	83
4.3 Resultados dos ensaios experimentais de validação	85
4.3.1 Validação dos resultados de tempo de usinagem.....	85
4.3.2 Validação dos resultados de rugosidade média	86
4.3.3 Análise das superfícies usinadas	88
5 CONCLUSÃO.....	102
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	104
REFERÊNCIAS.....	105
APÊNDICE A – RESULTADOS DAS EXECUÇÕES DO AG.....	115
APÊNDICE B – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE.....	116
APÊNDICE C – CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE .	120
APÊNDICE D – CÁLCULO DO NÍVEL DE CONFIANÇA AMOSTRAL.....	124
ANEXO A – RELATÓRIO DE ENSAIO DE DUREZA	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

As indústrias de manufatura buscam constantemente a melhoria de seus processos produtivos, com o objetivo de reduzir seus custos de fabricação e, dessa forma, manterem-se competitivas no mercado.

Nesse contexto, existem dois problemas práticos principais que os engenheiros enfrentam em um processo de fabricação. O primeiro é determinar os valores adequados dos parâmetros de processo para atender as especificações técnicas, e o segundo é maximizar o desempenho do sistema de produção utilizando os recursos disponíveis (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003).

No setor metal-mecânico, destacam-se os processos de usinagem como as operações de manufatura mais utilizadas nesse segmento. Logo, têm um papel significativo em termos de eficiência produtiva e composição de custos de produto, principalmente em operações de acabamento.

Nas operações de usinagem, geralmente a maior parcela dos custos totais da operação corresponde aos custos com a máquina-ferramenta e com mão de obra (DINIZ et al., 2003). O custo de máquinas-ferramenta com controle numérico computadorizado (CNC) é elevado, o que leva à necessidade de utilizar essas máquinas da forma mais eficiente possível, a fim de obter o retorno desejado. A operação econômica das máquinas depende, principalmente, da minimização do tempo de usinagem, o que por sua vez depende da escolha adequada dos parâmetros de usinagem (JANAKIRAMAN e SARAVANAN, 2010; RAJA e BASKAR, 2012).

Tradicionalmente, a seleção de parâmetros de corte é baseada em catálogos técnicos disponibilizados pelos fabricantes de ferramentas, bancos de dados de usinagem e na experiência dos operadores. Entretanto, estes valores são normalmente conservadores e não garantem um resultado ótimo (AGGARWAL e SINGH, 2005; CONCEIÇÃO ANTÓNIO et al., 2009; MILFELNER et al., 2006). Dessa forma, verifica-se um significativo potencial de melhoria dos processos, que pode ser explorado pela aplicação de técnicas de otimização (MUKHERJEE e RAY, 2006; SARAVANAN et al., 2005; YUSUP et al., 2012).

Embora importantes avanços tenham sido alcançados, problemas de otimização de processos de usinagem ainda constituem um importante assunto de investigação e, nos últimos anos, tem havido um interesse crescente na aplicação de abordagens para melhorar o

desempenho desses processos (YILDIZ, 2013). Entre os estudos para a otimização de processos de fresamento, embora a fresa de topo esférico seja uma das ferramentas mais utilizadas para operações de acabamento (JUNG et al., 2005; TOH, 2004a), verifica-se na literatura uma predominância de estudos de otimização em processos de acabamento utilizando fresas de topo reto (ÖKTEM et al., 2005, 2006; OZCELIK et al., 2005; PALANISAMY et al., 2007; RAJU et al., 2011; REDDY e RAO, 2005, 2006; WIBOWO e DESA, 2012; ZAIN et al., 2010a). Portanto, há um significativo campo de estudos de otimização para o fresamento de topo esférico.

O processo de otimização de parâmetros nas operações de usinagem é realizado em duas etapas: modelagem da relação entre os parâmetros do processo; e determinação das condições de corte ótimas. A modelagem do processo fornece a entrada matemática básica necessária para a formulação da função objetivo e das restrições do processo. A técnica de otimização proporciona a solução ótima para o problema de otimização formulado (MUKHERJEE e RAY, 2006).

As técnicas tradicionais de otimização (métodos determinísticos), como as programações geométrica, dinâmica, inteira e quadrática, tendem a não apresentar bons resultados na otimização de problemas de usinagem. Devido à complexidade das relações entre variáveis e restrições, e ao comportamento não linear do processo, os métodos determinísticos tendem a obter uma solução ótima local (RAJA e BASKAR, 2010; RAO e PAWAR, 2010; SARAVANAN et al., 2005). No fresamento, em particular, que é ditado por um mecanismo de corte complexo, o problema de otimização torna-se ainda mais difícil. A otimização de parâmetros de corte no fresamento é um problema com diversas restrições e não linear (BOUZAKIS et al., 2008).

A tendência atual da otimização de processos de usinagem aponta para a utilização de métodos não determinísticos. A maior parte destas técnicas é inspirada pela natureza ou comportamento animal, tais como algoritmos genéticos, otimização por colônia de formigas, otimização por enxame de partículas e recozimento simulado (CHANDRASEKARAN et al., 2010; MUKHERJEE e RAY, 2006).

No entanto, além dos parâmetros de corte, outro dois aspectos merecem destaque na otimização de processos de usinagem, especialmente em operações de acabamento: a qualidade superficial; e a estratégia de usinagem. A qualidade da superfície produzida na usinagem depende de vários parâmetros tecnológicos, como os parâmetros de corte, e as especificações da ferramenta e da peça (ANTONIADIS et al., 2003). Uma vez que a operação de acabamento é geralmente o estágio final na usinagem de um produto, é essencial o controle

da qualidade superficial gerada, e a rugosidade desempenha um papel significativo nessa avaliação (ÖKTEM et al., 2006). A predição de rugosidade na usinagem é uma tarefa desafiadora, mas fundamental para uma adequada otimização do processo (CHANDRASEKARAN et al., 2010).

A estratégia de usinagem tem influência significativa sobre o desempenho dos processos de usinagem e, para as operações de acabamento, tem importante relação com a qualidade das superfícies usinadas (NG et al., 2000; TOH, 2006). A estratégia implica na posição relativa da ferramenta de corte e a peça, bem como na cinemática da ferramenta durante a usinagem (VAKONDIOS et al., 2012). A seleção da estratégia é um dos principais critérios na usinagem de planos inclinados, que constituem uma das mais básicas e predominantes formas geométricas na fabricação por usinagem (NICOLA et al., 2010).

Dentre os inúmeros elementos que influenciam o resultado de processos de usinagem, dois fatores merecem ser citados por sua relação com o estudo realizado neste trabalho: a ocorrência de vibrações; e o comportamento do processo na usinagem de diferentes materiais. Segundo König e Klocke (2002), as vibrações constituem uma fonte de interferência importante no fresamento, e geralmente ocorrem em razão da frequência de contato do gume da fresa, ou de ressonâncias surgidas no processo.

O tipo de material usinado também tem influência muito significativa no fresamento de acabamento. Nos experimentos realizados neste trabalho, foram empregados dois materiais comumente utilizados na fabricação de moldes e matrizes e, conseqüentemente, típicas aplicações do fresamento de topo esférico: o ABNT P20; e o ABNT H13. Esses materiais apresentam diferentes usinabilidades e comportamentos de formação de cavaco, o que tende a gerar diferenças na formação das superfícies usinadas.

Inserido neste contexto, este trabalho apresenta um estudo de otimização do processo de fresamento de topo esférico de planos inclinados, considerando diferentes estratégias de usinagem. A técnica de algoritmos genéticos foi aplicada para a otimização do processo, onde foi buscada a seleção de valores de parâmetros de corte de modo a minimizar o tempo de usinagem. A principal restrição técnica considerada foi a qualidade superficial, mensurada pela rugosidade. A partir de ensaios experimentais, foi realizada a validação dos resultados computacionais e a avaliação da formação das superfícies usinadas, para as diferentes estratégias consideradas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo geral otimizar parâmetros de corte no processo de fresamento de topo esférico de planos inclinados, e compreender a formação das superfícies usinadas, considerando diferentes estratégias de usinagem.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral do trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) determinar a função objetivo e as restrições do processo de usinagem considerado;
- b) realizar a modelagem matemática do problema de otimização;
- c) aplicar a técnica de otimização ao problema;
- d) realizar ensaios experimentais de validação do modelo matemático;
- e) analisar os resultados experimentais, comparando-os com os resultados computacionais e da literatura científica; e
- f) avaliar a formação da superfície nas diferentes estratégias consideradas.

1.3 Estrutura do trabalho

Além deste primeiro capítulo, introdutório ao tema da dissertação, o presente trabalho tem sua estrutura dividida em outras cinco seções principais. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os temas usinagem por fresamento de topo esférico, otimização de processos de usinagem e algoritmos genéticos. No capítulo 3 é relatada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho, bem como a abordagem utilizada na resolução do problema de otimização. O capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia proposta para a otimização do processo e a análise dos resultados obtidos. Por fim, a quinta seção apresenta as conclusões principais do trabalho, e no capítulo 6 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do trabalho proposto. Inicialmente são apresentados os elementos relativos ao processo de fresamento de topo esférico. Em seguida, é discutida a modelagem matemática do processo, onde são apresentadas as relações entre os parâmetros de corte e o tempo de corte, bem como entre os parâmetros e a qualidade superficial gerada. Na sequência são trabalhados os conceitos referentes à otimização de processos de usinagem e, por fim, são apresentados os fundamentos teóricos relativos à técnica de algoritmos genéticos, ferramenta escolhida para a otimização do processo neste trabalho.

2.2 Fresamento de topo esférico

2.2.1 Características do processo

Entre os processos de fabricação, a usinagem é um dos processos mais importantes e, dentre as operações de usinagem, o fresamento é o processo mais utilizado na indústria de manufatura (MURTHY e RAJENDRAN, 2010). O fresamento é um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta denominada fresa, geralmente provida de múltiplos gumes (excepcionalmente um só), dispostos simetricamente ao redor de um eixo (STEMMER, 1995).

Segundo a disposição dos gumes ativos na fresa, classifica-se a operação da seguinte maneira (DINIZ et al., 2003):

- a) fresamento tangencial: os gumes ativos da fresa estão na superfície cilíndrica da ferramenta – o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada; e
- b) fresamento frontal: os gumes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta – o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada.

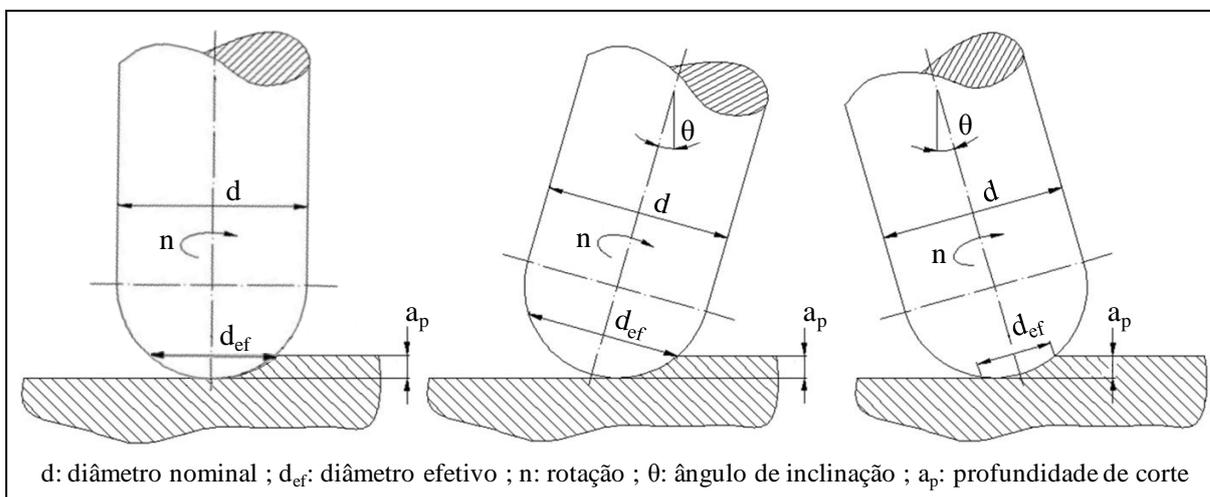
O fresamento de topo é um processo de fresamento circunferencial e frontal, empregando uma fresa de topo. É utilizado com vantagem na execução de superfícies de forma livre, bem como rasgos e cortes de todos os tipos e tamanhos. Distinguem-se ferramentas de corte direito, corte esquerdo, de hélice direita e de hélice esquerda, e

ferramentas de endentamento reto. O lado frontal da fresa de topo é configurado geralmente de forma plana ou semi-esférica (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

No fresamento de acabamento, a forma final da peça é geralmente obtida utilizando uma fresa de topo esférico (ANTONIADIS et al., 2003; TOH, 2005; VAKONDIOS et al., 2012). Essa operação é empregada na manufatura de componentes com elevadas especificações de qualidade, como moldes e matrizes, peças automotivas, peças aeroespaciais, componentes médicos, dispositivos eletrônicos, entre outras aplicações de engenharia (DAYMI et al., 2009; ÖKTEM, 2009). Nas operações de acabamento, a precisão dimensional e a rugosidade da peça são geralmente os critérios mais importantes. Logo, essas operações geralmente requerem a maior parcela dos tempos de usinagem, devido às baixas profundidades de corte e avanços empregados (TOH, 2005).

O fresamento de topo esférico tem particularidades importantes: o diâmetro efetivo de corte; e a variação da velocidade de corte de acordo com a posição de contato do gume em relação à superfície da peça. O diâmetro efetivo de corte é o diâmetro máximo da região de contato da ferramenta com o material a ser usinado. Ele depende da profundidade axial de corte e do ângulo de inclinação da ferramenta, conforme ilustra a figura 2.1.

Figura 2.1 – Diâmetro efetivo da fresa de topo esférico



Fonte: Adaptado de Sadílek et al. (2011)

Com relação à variação da velocidade de corte, o fresamento de topo esférico é caracterizado por apresentar velocidade nula no centro da ferramenta, quando a mesma é utilizada em posição perpendicular à superfície da peça (CHEN et al., 2005; OLIVEIRA e DINIZ, 2009). Devido a isto, efeitos indesejáveis podem surgir, tais como: aumento da temperatura de corte; aumento de vibrações; e formação de gume postiço. Estes fenômenos

resultam em uma pior qualidade superficial e diminuem a durabilidade da ferramenta (SADÍLEK et al., 2011). Portanto, o ajuste do ângulo de inclinação do eixo axial da ferramenta em relação à superfície da peça tende a melhorar o desempenho da ferramenta e a qualidade da superfície (KO et al., 2001; TOH, 2004a; VAKONDIOS et al., 2012). O trabalho de Iqbal et al. (2008) comprova este comportamento. Nos experimentos realizados no fresamento de topo esférico dos aços AISI D2 e X210Cr12, em planos horizontais e inclinados, os resultados de rugosidade foram significativamente menores nos planos inclinados.

Mas deve-se atentar para o fato de que existem valores ou faixas de ângulos de inclinação mais adequados a cada operação considerada. Com o emprego de ângulos de inclinação elevados, o corte tem de ser feito por uma parte menor do gume, o que resulta em maiores solicitações mecânicas e térmicas, que podem comprometer a vida da ferramenta. Além disso, ângulos maiores podem ocasionar aumento da rugosidade, pois a ferramenta deflete mais devido a maiores forças de corte. Com ângulos de inclinação pequenos, um maior gradiente de velocidades de corte existe ao longo do gume. A velocidade é máxima na periferia do gume, enquanto que no centro do gume a velocidade é baixa, de modo que a deformação e o atrito se sobrepõem ao corte (SCHULZ e HOCK, 1995; TOH, 2004b).

Em geral, o emprego de um ângulo de inclinação entre 5° e 20° é adequado para garantir uma boa qualidade superficial (CHEN et al., 2005; KANG et al., 2001; KO et al., 2001; SCHULZ e HOCK, 1995). Alguns trabalhos apontam a existência de uma faixa de transição, ou seja, a qualidade da superfície é melhorada com o aumento do ângulo de inclinação até um valor crítico, a partir do qual ocorre a piora da qualidade superficial se empregados maiores valores de inclinação. O trabalho de Bouzakis et al. (2003) ilustra esse comportamento. Os autores realizaram experimentos de fresamento de topo esférico em um aço carbono (GS 45) com ferramentas de metal-duro, ângulos de inclinação de 0° , 5° , 10° , 30° e 60° , e diferentes estratégia de usinagem. Os resultados encontrados neste estudo apontaram, em relação à condição inicial de ângulo de inclinação nulo, redução da rugosidade com o emprego dos ângulos de inclinação de 5° e 10° , e um aumento gradual da rugosidade com a utilização dos ângulos maiores.

Inúmeros elementos têm influência sobre os resultados do fresamento topo esférico. Devido à relação com o estudo conduzido neste trabalho, dois elementos merecem ser citados: a ocorrência de vibrações; e o comportamento do processo na usinagem de diferentes materiais.

A usinagem dos materiais é comumente acompanhada de vibrações entre a peça e a ferramenta. O nível máximo das vibrações tolerável depende da sua aplicação. Em operações de acabamento, a qualidade da superfície e a precisão dimensional são os parâmetros determinantes (POLLI, 2005). As vibrações podem ocorrer na máquina-ferramenta ou entre a ferramenta e a peça. A colocação de massas adicionais pode evitar a ocorrência de vibrações na máquina. As vibrações de processo ocorrem principalmente devido a forças surgidas entre a ferramenta e a peça, que podem ocorrer por folgas na fixação da peça ou por formação indevida do cavaco (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

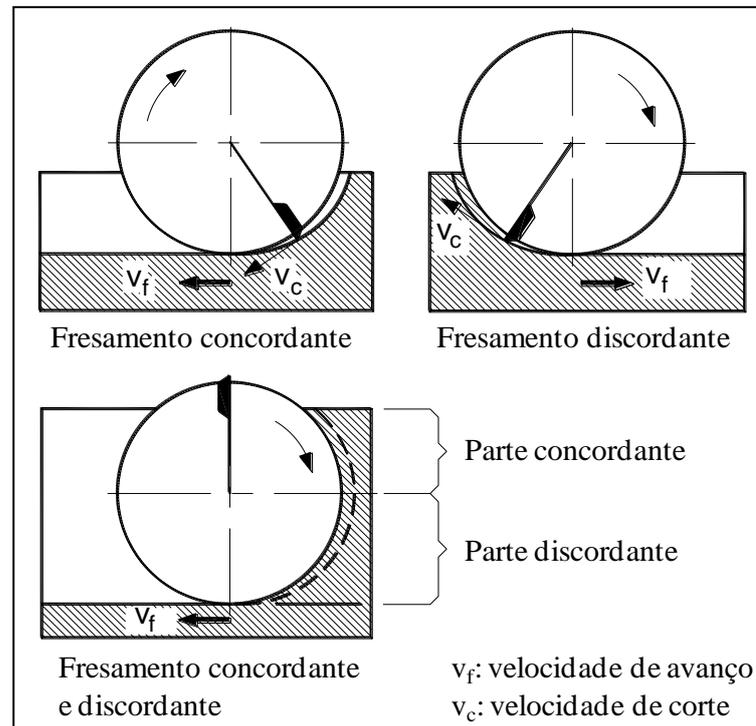
Outro elemento de influência importante no fresamento de topo esférico é o tipo de material usinado. Nos experimentos realizados neste trabalho (detalhes no capítulo 3), foram utilizados dois diferentes materiais na confecção dos corpos de prova: o ABNT P20; e o ABNT H13. As diferentes durezas das amostras utilizadas (~ 37 HRc para o P20 e ~ 54 HRc para o H13) implicam em diferenças significativas de usinabilidade e formação de superfície. Segundo König e Klocke (2002), os aços endurecidos (acima de 50 HRc) adquirem sua dureza principalmente através da martensita, e são praticamente indeformáveis a temperatura e pressão ambiente. Com isso, resultam mecanismos especiais de formação de cavaco que não se baseiam na formação da superfície de cisalhamento, como na usinagem de materiais dúcteis.

2.2.2 Estratégias de corte

Além dos parâmetros e condições de corte, a estratégia de usinagem tem uma influência significativa sobre o fresamento de topo esférico (NG et al., 2000). A escolha adequada da estratégia de corte é importante para alcançar a qualidade superficial desejada (TOH, 2006). No fresamento podem ser identificadas estratégias conforme as direções de corte e de avanço, bem como em função da trajetória da ferramenta.

De acordo com as direções de corte e de avanço, distinguem-se o fresamento concordante ou para baixo e o fresamento discordante ou para cima. No fresamento concordante (*climb milling, down milling*), os movimentos de corte (da ferramenta) e de avanço (da peça) têm o mesmo sentido, iniciando-se o corte com a espessura máxima do cavaco. No fresamento discordante (*conventional milling, up milling*), os movimentos de corte e de avanço têm sentidos opostos, iniciando-se o corte com a espessura mínima do cavaco (STEMMER, 1995). A figura 2.2 ilustra as estratégias concordante e discordante.

Figura 2.2 – Estratégias concordante e discordante



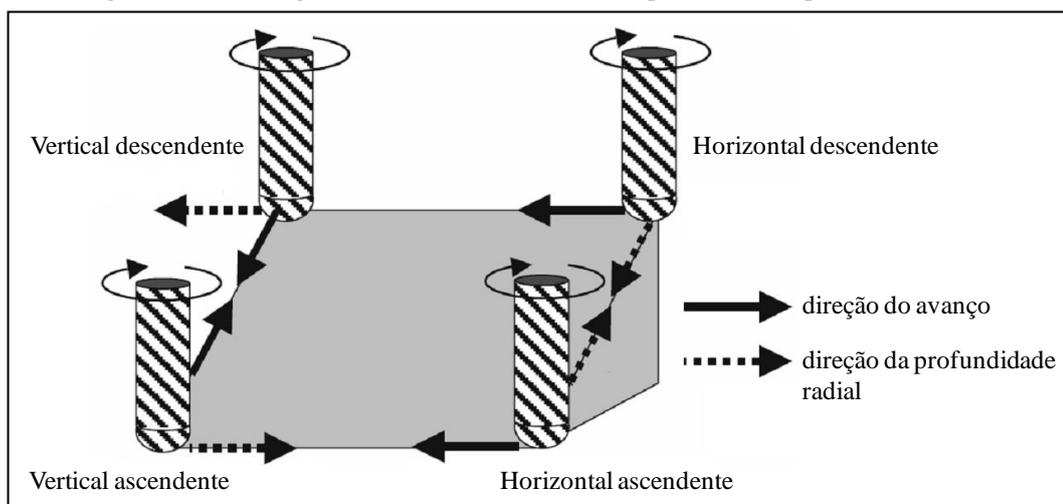
Fonte: Adaptado de König e Klocke (2002)

Segundo König e Klocke (2002), o fresamento concordante em geral apresenta vantagens:

- a) a resultante das forças empurra a peça contra sua fixação na mesa, minimizando a possibilidade de vibração;
- b) menor desgaste e, por consequência, maior vida da ferramenta;
- c) melhor qualidade superficial gerada, devido ao movimento relativo entre as velocidades de avanço e de corte; e
- d) menor potência de avanço.

Com relação à trajetória da ferramenta, diversas estratégias podem ser empregadas no fresamento de topo esférico. Na usinagem de planos inclinados, as mais comumente encontradas na literatura são definidas pela direção e pelo sentido de corte, podendo a direção ser horizontal ou vertical, e o sentido ser ascendente ou descendente. Configuram-se assim quatro estratégias distintas: vertical ascendente; vertical descendente; horizontal ascendente; e horizontal descendente. A figura 2.3 representa esquematicamente as quatro estratégias, em corte concordante.

Figura 2.3 – Estratégias de corte no fresamento de topo esférico de planos inclinados



Fonte: Adaptado de Toh (2006)

Em alguns estudos anteriores essas quatro estratégias foram empregadas no fresamento de topo esférico de planos inclinados. Kang et al. (2001) realizaram um estudo comparativo das características da usinagem de um aço com dureza de 28 HRc no fresamento de planos com ângulos de inclinação de 15° e 45° , utilizando as quatro estratégias e o sentido de corte concordante. Observaram maior vibração da ferramenta para as estratégias de corte verticais, e os melhores resultados de rugosidade foram obtidos com a estratégia horizontal ascendente, na inclinação de 15° . Para este valor de inclinação, a estratégia horizontal descendente apresentou maus resultados de rugosidade devido à ocorrência de corte concordante e discordante.

Ko et al. (2001) realizaram um estudo do efeito do ângulo de inclinação sobre o desgaste da ferramenta, as forças de corte e a rugosidade da superfície. Eles analisaram as trajetórias de corte horizontal e vertical, ascendente e descendente, além do corte concordante e discordante, totalizando oito diferentes estratégias. Os autores também avaliaram diferentes ângulos de inclinação, entre 10° e 45° . Por meio de um método numérico e validações experimentais, apontaram que o ângulo de inclinação de 15° e a trajetória vertical descendente, em corte concordante, apresentaram os melhores resultados dentre as condições analisadas.

Toh (2006) realizou uma análise do fresamento de topo esférico utilizando as quatro estratégias de corte (em corte concordante) na usinagem de planos inclinados a 75° do aço AISI H13 endurecido (52 HRc). O emprego da estratégia ascendente, em particular a estratégia vertical ascendente, propiciou os menores valores de rugosidade. Em contrapartida, o pior acabamento foi obtido com as estratégias descendentes, com pior resultado para a

horizontal descendente. Conforme o autor, o melhor desempenho das estratégias ascendentes se deve ao fato de que a área de contato na parte superior da fresa de topo esférico corresponde a uma região de maior gradiente de velocidades de corte, o que induz menores forças de corte e, conseqüentemente, menores deformações na superfície. Em contraste, a parte inferior da fresa, correspondente à menor variação da velocidade de corte, é submetida a uma maior interferência entre o flanco e a superfície da peça.

Ng et al. (2000) avaliaram o efeito da estratégia de corte sobre a vida da ferramenta, forças de corte, formação do cavaco e rugosidade, no fresamento de topo esférico com fresas de metal-duro. Utilizaram as quatro diferentes estratégias na usinagem de planos inclinados a 45°, do material Inconel 718. Os melhores resultados de rugosidade foram obtidos com a estratégia horizontal descendente.

O quadro 2.1 sumariza as análises e resultados obtidos nos trabalhos citados acima. Como pode ser observado no quadro, nos quatro estudos os melhores resultados foram obtidos com estratégias diferentes. Embora existam diferenças entre os trabalhos (material, ângulos, ferramentas), verifica-se que não há uma estratégia que se sobreponha às demais, e a escolha da mais adequada depende das especificidades de cada aplicação.

Quadro 2.1 – Resumo de estudos sobre fresamento de topo esférico de planos inclinados

Referência	Material usado	Diâmetro da ferramenta	Ângulo de melhores resultados	Estratégia de melhores resultados
Kang et al. (2001)	aço (28 HRc)	10 mm	15°	horizontal ascendente
Ko et al. (2001)	aço (52-55 HRc)	6 mm	15°	vertical descendente
Toh (2006)	aço AISI H13 (52 HRc)	10 mm	testes somente com 75°	vertical ascendente
Ng et al. (2000)	Inconel 718 (45 HRc)	8 mm	testes somente com 45°	horizontal descendente

Fonte: O autor

2.2.3 Qualidade superficial

As propriedades de superfície constituem uma medida significativa da qualidade dos componentes usinados, porque influenciam características como precisão dimensional, coeficiente de atrito, desgaste, aparência e custo (VAKONDIOS et al., 2012). As análises

mais comumente utilizadas na avaliação da qualidade superficial de componentes usinados são a análise de textura e a medição de rugosidade.

2.2.3.1 Textura superficial

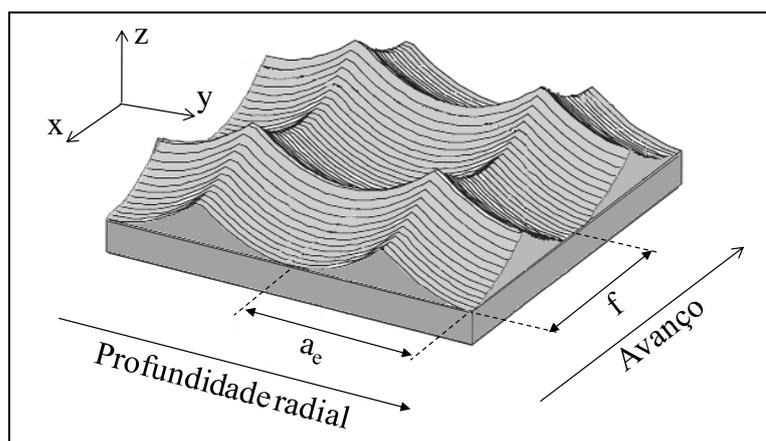
A textura da superfície é a combinação de certos desvios repetitivos ou aleatórios da superfície real em relação à superfície geométrica, a qual compõe a superfície topográfica tridimensional (SONG e VORBURGER, 1992). O conjunto de causas de desvio da superfície nominal pode ser identificado mediante a avaliação de três tipos de irregularidades: a rugosidade; a ondulação; e os sulcos da passagem da ferramenta (WHITEHOUSE, 1994).

A rugosidade será discutida mais detalhadamente na seção 2.2.3.2.

As ondulações são os componentes de textura mais largamente espaçados e são provenientes de deflexões e vibrações da máquina e da ferramenta, tratamento térmico ou tensões de deformação. Os sulcos indicam a direção predominante das ranhuras deixadas pela ferramenta sobre a superfície da peça. Cada processo de fabricação deixa marcas características sobre a superfície trabalhada. O processo de fresamento geralmente produz um padrão de sulcos regular e repetitivo, com uma direção preferencial claramente observável, e sulcos bem definidos (BET, 1999).

Segundo Chen et al. (2005), no fresamento de topo esférico os gumes da ferramenta realizam um movimento combinado de rotação e translação. Essa variação periódica da orientação do gume durante a rotação do fuso resulta na geração de uma superfície usinada caracterizada por dois tipos de cristas: a crista gerada pela profundidade radial de corte (a_e); e a crista gerada pelo movimento de avanço (f), como mostrado na figura 2.4.

Figura 2.4 – Representação esquemática da superfície usinada

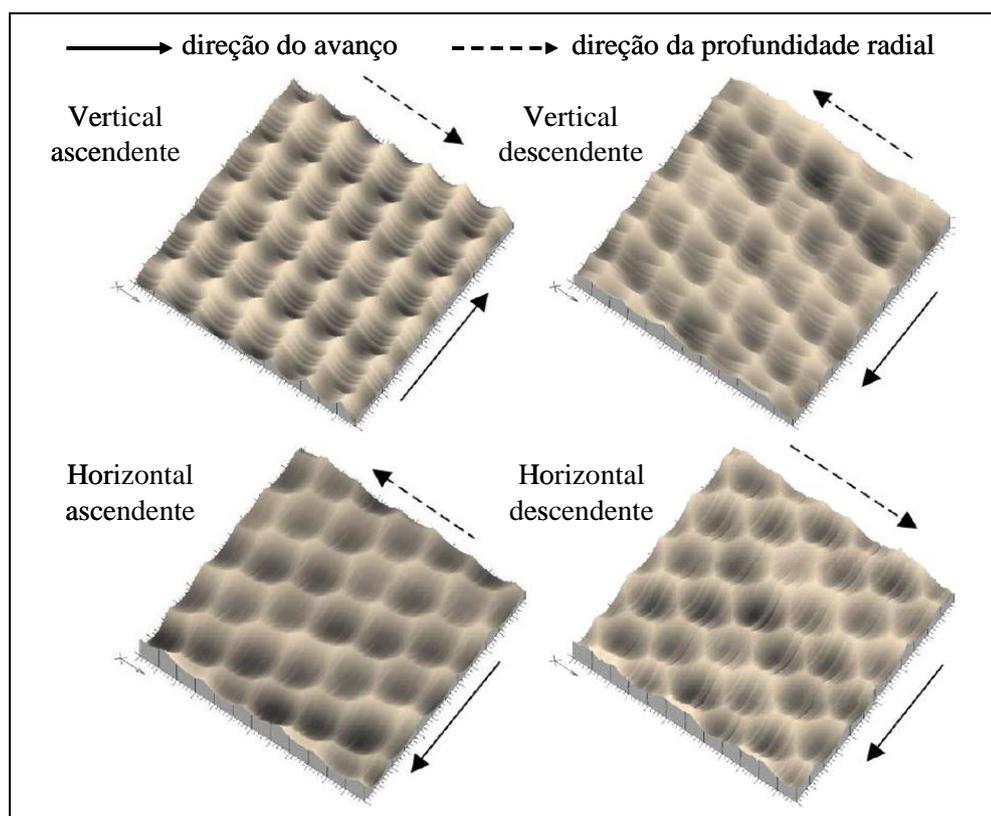


Fonte: Adaptado de Jung et al. (2005)

A profundidade radial de corte exerce uma influência significativa na formação da altura das cristas e, devido às características geométricas da fresa de topo esférico, esta influência é maior se comparada às fresas de topo reto e toroidal (NICOLA, 2008).

No fresamento de topo esférico de planos inclinados, a estratégia de usinagem também tem influência significativa sobre a textura da superfície. A variação da estratégia implica em mudança nas condições de contato dos gumes com a superfície, o que ocasiona variações na textura resultante. No trabalho de Toh (2004a), o autor avaliou a textura da superfície na usinagem de planos inclinados a 75° do aço AISI H13, empregando as estratégias vertical ascendente e descendente, e horizontal ascendente e descendente. A figura 2.5 apresenta projeções tridimensionais das superfícies usinadas com as diferentes estratégias. Como pode ser observado nas imagens, há diferenças marcantes entre as texturas obtidas pelas diferentes estratégias.

Figura 2.5 – Projeções 3D da textura para diferentes estratégias de usinagem



Fonte: Adaptado de Toh (2004a)

A variação da textura em função das diferentes estratégias de usinagem empregadas é resultante da complexa interface observada no fresamento de topo esférico, entre os gumes da

ferramenta e a superfície da peça. Portanto, a avaliação da textura constitui uma importante ferramenta para a análise dos fenômenos envolvidos nessa interface.

Outro aspecto relevante da textura no fresamento de topo esférico é o ângulo de inclinação do eixo axial da ferramenta em relação à superfície da peça, discutido na seção 2.2.1. Assim como a estratégia de corte, a variação do ângulo de inclinação implica em mudanças nas condições de contato entre os gumes da ferramenta e a superfície da peça e, conseqüentemente, na textura resultante. O emprego de um ângulo de inclinação nulo tende a produzir uma má qualidade superficial, e seus efeitos podem ser observados na textura da superfície.

Batista (2006) verificou os problemas decorrentes da utilização de um ângulo nulo, em seus experimentos com fresas de topo esférico revestidas (TiAlN) de 6 mm de diâmetro, na usinagem do aço AISI 1.2367 (50-52 HRC). O autor identificou, por meio de análises microscópicas de textura das superfícies usinadas, a ocorrência de esmagamento do material no centro da trajetória da ferramenta. Com o emprego do ângulo nulo, a velocidade de corte é igual a zero no centro da ferramenta e, portanto, não ocorre o corte, mas apenas a deformação do material na superfície.

Os resultados obtidos no referido trabalho exemplificam como a avaliação da textura constitui um importante suporte à análise de superfícies usinadas. A avaliação qualitativa dos aspectos referentes à textura, em conjunto com os resultados quantitativos de rugosidade, possibilitam uma melhor compreensão dos elementos envolvidos na geração da qualidade superficial. Dessa forma, fornecem subsídios para a identificação e correção de problemas e, conseqüentemente, para a implementação de melhorias nos processos de usinagem.

2.2.3.2 *Rugosidade*

A rugosidade é amplamente utilizada como um índice da qualidade do produto em processos de usinagem de acabamento e, na maioria dos casos, uma exigência técnica para produtos mecânicos (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003; SAMANTA et al., 2008; WIBOWO e DESA, 2012). Além de ser um importante critério de avaliação da qualidade superficial, a rugosidade tem influência sobre diversos elementos relativos ao comportamento funcional dos componentes, como desgaste, corrosão, lubrificação, condutividade elétrica e fadiga (RAJA e BASKAR, 2012; REDDY e RAO, 2005).

A rugosidade pode ser definida como o conjunto de irregularidades causadas pelo processo de fabricação, caracterizadas por pequenas saliências e reentrâncias na topografia da

superfície (ERZURUMLU e OKTEM, 2007; HAMDAN et al., 2012). Diversos elementos influenciam de forma significativa a rugosidade de superfícies usinadas, tais como parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidades de corte, avanço), estratégias de usinagem, geometria da ferramenta, material da ferramenta e da peça, desgaste da ferramenta, e posicionamento da ferramenta em relação à peça (ANTONIADIS, 2003; BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003; LU, 2008; VAKONDIOS et al., 2012). Mas a rugosidade também é afetada por variáveis mais difíceis de serem controladas, como as propriedades mecânicas do material e a vibração produzida durante o processo (HAMDAN et al., 2012).

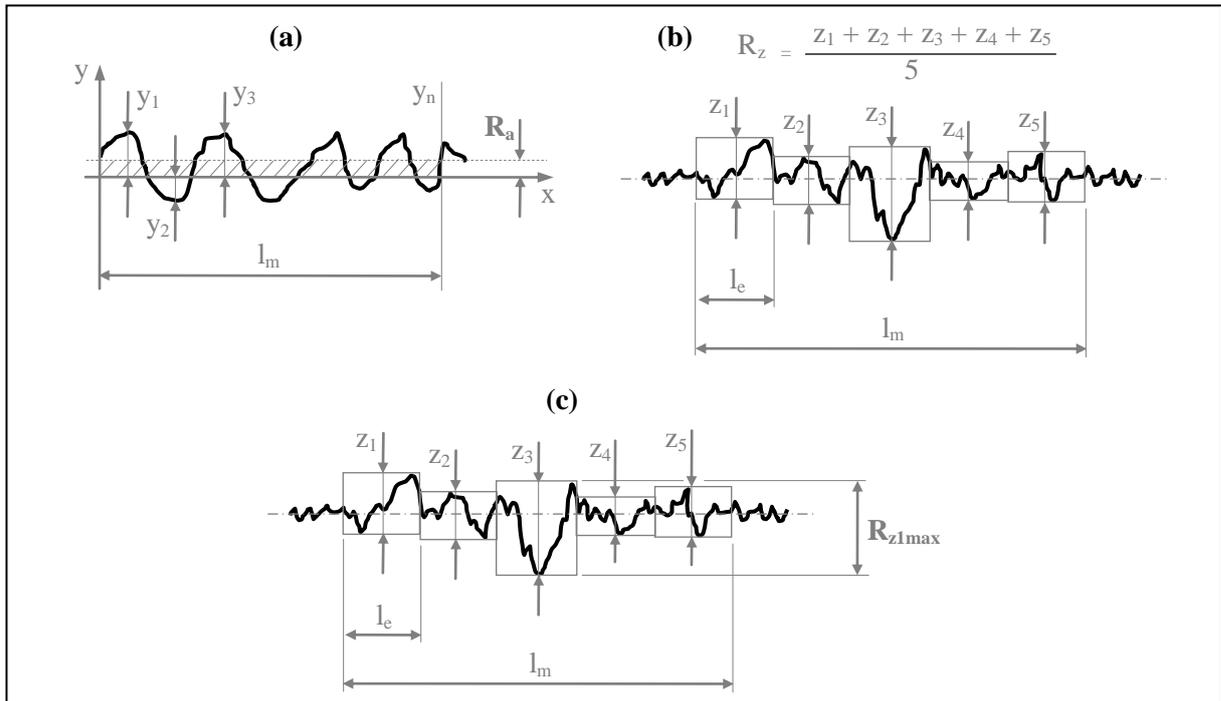
Como citado na seção 2.2.2, em geral o fresamento concordante possibilita melhores resultados de rugosidade. No fresamento discordante ocorre uma alternância da componente vertical da força de usinagem, causando vibrações que prejudicam o acabamento e a tolerância da peça fresada. Já no fresamento concordante, a componente vertical da força de usinagem tem sempre o mesmo sentido (empurrando a peça na direção da mesa). Com isso, o fresamento concordante tende a possibilitar um melhor acabamento da peça (DINIZ et al., 2003).

A ISO 4287:1997¹ define diversos parâmetros para a avaliação dos perfis de superfície. Os parâmetros de rugosidade são medidos como desvios em relação à linha média do perfil, definida pela norma como a linha determinada pelo ajuste de mínimos quadrados à linha da forma nominal do perfil. Dentre os diversos parâmetros de rugosidade, estão entre os mais utilizados os seguintes, representados na figura 2.6 (ISO 4287:1997):

- a) R_a : é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m);
- b) R_z : corresponde à média aritmética das rugosidades parciais (z_i) de cinco comprimentos de amostragem (l_e) consecutivos. Rugosidade parcial é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem; e
- c) R_{z1max} ²: é definido como o maior valor das rugosidades parciais (z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m). No exemplo ilustrado na figura 2.6 (c), o valor correspondente a este parâmetro é o da rugosidade parcial z_3 .

¹ Existe uma norma brasileira referente aos parâmetros de rugosidade, a NBR ISO 4287 (2002). A opção pela norma internacional se deu pelo fato de ser esta a utilizada pelo rugosímetro empregado neste trabalho.

² Este parâmetro é usualmente conhecido no ambiente industrial e na literatura técnica como R_y .

Figura 2.6 – Parâmetros de rugosidade (a) R_a , (b) R_z e (c) R_{z1max} 

Fonte: Adaptado de ISO 4287:1997

A rugosidade média R_a é o parâmetro mais comumente utilizado para descrever a rugosidade de uma superfície usinada (ÖKTEM, 2009; PALANISAMY et al., 2007, ZAIN et al., 2010b). O trabalho de Baptista e Simões (2000) apresenta os valores típicos de rugosidade média de superfícies usinadas, para diferentes níveis de acabamento, quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Valores de rugosidade média de superfícies usinadas

Rugosidade média R_a (μm)	Nível de acabamento
$\approx 0,5$	Rugosidade resultante de polimento manual
$\approx 1,0$	Rugosidade aceitável em processos de acabamento (requer polimento manual posterior)
$\approx 1,8$	Rugosidade ainda aceitável (necessita de menor tempo de usinagem, mas implica em maior tempo de polimento manual posterior)

Fonte: Adaptado de Baptista e Simões (2000)

Além do parâmetro de rugosidade mais adequado a cada aplicação, deve-se atentar para a direção em que se realiza a medição dos parâmetros de rugosidade, pois esta pode exercer influência nos resultados obtidos. Em superfícies fresadas, que são caracterizadas por sulcos ordenados, há a dependência da direção na qual é efetuada a medição, sendo que a

diferença entre as rugosidades longitudinal e transversal aos sulcos pode ser significativa (SILVA FILHO, 2000). Conforme Chen et al. (2005), em processos convencionais de fresamento, os valores de avanço são geralmente inferiores aos de profundidade radial de corte. Logo, a rugosidade tende a ser maior na direção da profundidade radial.

2.2.4 Modelagem matemática do tempo de usinagem

O primeiro passo necessário para a otimização de parâmetros em um processo de usinagem é compreender os princípios que regulam o processo através do desenvolvimento de um modelo matemático, que pode ser de dois tipos: analítico ou empírico (MUKHERJEE e RAY, 2006). Modelos analíticos são aqueles baseados na física do processo, onde a mesma é compreendida por um pesquisador e convertida em forma matemática (DEB e DIXIT, 2008). Os modelos empíricos são formulados a partir de dados experimentais, utilizando métodos estatísticos (MONTGOMERY, 2001).

A modelagem do tempo de corte para processos de usinagem de geometria definida tem modelos analíticos bem consolidados na literatura científica. Para o fresamento de topo esférico, o tempo de corte é definido a partir das equações fundamentais do torneamento cilíndrico, que podem ser obtidas em Diniz et al. (2003) e Stemmer (2005). A partir da velocidade de corte e do diâmetro da ferramenta, a rotação da ferramenta pode ser calculada com a equação (1):

$$n = \frac{1000 v_c}{\pi d} \quad (1)$$

onde n é a rotação da ferramenta [rpm], v_c é a velocidade de corte [m/min] e d é o diâmetro da ferramenta [mm].

Multiplicando-se o valor da rotação pelo valor do avanço, obtém-se a velocidade de avanço, equação (2):

$$V_f = n f = n f_z z = \frac{1000 v_c f_z z}{\pi d} \quad (2)$$

onde V_f é a velocidade de avanço [mm/min], f é o avanço por rotação [mm/rot], f_z é o avanço por gume [mm] e z é o número de gumes da ferramenta.

O tempo de corte representa a totalidade dos tempos ativos, ou seja, os tempos em que os movimentos de corte e/ou de avanço estão efetivamente ocorrendo. A partir da equação (3), o tempo de corte pode ser calculado:

$$t_c = \frac{l}{V_f} = \frac{\pi l d}{1000 v_c f_z z} \quad (3)$$

onde t_c é o tempo de corte [min] e l é comprimento usinado [mm].

Quando da usinagem de superfícies retangulares, como na aplicação realizada neste trabalho, o comprimento usinado pode ser substituído pela razão entre a área da superfície e a profundidade radial de corte. Assim, obtém-se a equação (4):

$$t_c = \frac{\pi l d}{1000 v_c f_z z} = \frac{\pi A d}{1000 a_e v_c f_z z} \quad (4)$$

onde A é a área da superfície usinada [mm²] e a_e é a profundidade radial de corte [mm].

Para o fresamento de topo esférico, o tempo de corte é calculado a partir da equação (4), porém substituindo o valor do diâmetro da ferramenta pelo valor do diâmetro efetivo de corte. O cálculo do diâmetro efetivo de corte de planos inclinados varia de acordo com a estratégia de corte adotada. Quando é utilizado o corte ascendente, o diâmetro efetivo é calculado a partir da equação (5):

$$d_{ef} = d \operatorname{sen}\left[\operatorname{acos}\left(\frac{d - 2a_p}{d}\right) + \theta\right] \quad (5)$$

onde d_{ef} é o diâmetro efetivo de corte [mm], a_p é a profundidade axial de corte [mm] e θ é o ângulo [rad] entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal à superfície da peça.

Para o cálculo do diâmetro efetivo no corte descendente, é empregada a equação (6):

$$d_{ef} = d \operatorname{sen}(\theta) \quad (6)$$

Com o valor do diâmetro efetivo, o tempo de corte no fresamento de topo esférico pode ser obtido a partir da equação (7):

$$t_c = \frac{\pi A d_{ef}}{1000 a_e v_c f_z z} \quad (7)$$

Esta equação constitui a função objetivo do problema de otimização, sendo portanto utilizada como função de avaliação do algoritmo genético.

2.2.5 Modelos matemáticos de caracterização da superfície

A modelagem matemática de superfícies usinadas é um elemento essencial na otimização de operações de usinagem de acabamento. Os modelos são geralmente utilizados para prever ou caracterizar as condições da superfície, com o objetivo de determinar as melhores condições e parâmetros de corte a serem empregados.

Os fenômenos físicos complexos envolvidos nos processos de usinagem dificultam o desenvolvimento de modelos confiáveis, capazes de otimizar esses processos sob condições reais de manufatura. A rugosidade é uma característica especialmente crítica de ser prevista a partir de modelos matemáticos (GRZENDA e BUSTILLO, 2013).

Por ser o processo mais utilizado em operações de acabamento, o fresamento de topo esférico já foi alvo de muitos estudos com o objetivo de desenvolver modelos matemáticos de caracterização da superfície. Conforme citado na seção 2.2.4, os modelos matemáticos podem ser agrupados em dois grandes grupos: analíticos e empíricos. Na modelagem de superfícies usinadas, há ainda uma importante derivação dos modelos analíticos, que são os modelos numéricos.

2.2.5.1 Modelos analíticos

No fresamento de topo esférico, os modelos analíticos são definidos a partir de relações geométricas entre a fresa e a superfície gerada. Em uma aproximação comumente encontrada na literatura e em catálogos técnicos, a altura máxima da crista gerada no fresamento de topo esférico é determinada pela equação (8) (DINIZ et al., 2003):

$$h = \frac{f_z^2}{8R} \quad (8)$$

onde h é a altura máxima da crista [mm], f_z é o avanço por gume [mm] e R é o raio da fresa [mm].

O trabalho de Jung et al. (2005) apresenta uma equação que acrescenta um termo referente à profundidade radial de corte (a_e). Assim, a altura máxima da crista é dada pela equação (9):

$$h = \frac{f_z^2}{8R} + \frac{a_e^2}{8R} \quad (9)$$

Neste mesmo trabalho, os autores apresentam uma nova abordagem para a predição da rugosidade no fresamento de topo esférico. O chamado “método das cristas” (*ridge method*) é definido por três tipos de cristas, cujas equações representam a superfície gerada durante o corte. As equações analíticas são definidas em função do raio da ferramenta, do avanço e do ângulo de rotação dos gumes.

Em Lacalle e Lamikiz (2008) é apresentada uma equação para o cálculo da altura máxima da crista, considerando o ângulo de inclinação (θ) da ferramenta em relação à peça, equação (10):

$$a_e = \sqrt{(8Rh - 4h^2)} \cos \theta \quad (10)$$

No trabalho de Alauddin et al. (1995) é apresentada uma equação para o cálculo analítico da rugosidade média, equação (11):

$$R_a = \frac{f^2}{32(R \pm f/\pi)} \quad (11)$$

onde R_a é a rugosidade média da superfície (mm), o sinal positivo refere-se ao corte discordante e o sinal negativo refere-se ao corte concordante.

2.2.5.2 Modelos numéricos

Os modelos numéricos geralmente utilizam relações geométricas da fresa de topo esférico e relações cartesianas do deslocamento dos gumes durante o corte. A partir dessas

equações, são aplicados métodos numéricos para a simulação da topografia superficial e o cálculo da rugosidade.

No trabalho de Mizugaki et al. (2001), o modelo parte da aproximação do gume com a geometria esférica, e as equações estabelecem relações geométricas da trajetória dos gumes. O cálculo numérico foi feito utilizando o método de Newton-Raphson e a exibição gráfica foi realizada por um sistema CAD. Um segundo trabalho destes autores (MIZUGAKI et al., 2003) apresenta um método de estimativa teórica do perfil da superfície usinada. Por meio das equações, é calculada a altura da crista em qualquer ponto da superfície a partir da relação geométrica entre o movimento do gume e a linha normal ao ponto. Utilizando o cálculo numérico, o perfil da superfície usinada é estimado e ilustrado graficamente.

Chen et al. (2005) desenvolveram um modelo de simulação do mecanismo de formação de cristas no fresamento de topo esférico, considerando dois tipos de cristas: a gerada pela profundidade radial de corte e a crista gerada pelo movimento de avanço. Soares (2007) aprimorou este modelo, adequando-o para o corte bidirecional e ferramentas com mais de dois gumes.

Os trabalhos de Gao et al. (2006) e Liu e Loftus (2006) apresentam modelos numéricos para a simulação da superfície baseados na trajetória do gume da ferramenta em relação à peça.

No estudo de Sriyotha et al. (2006), a peça foi modelada utilizando a técnica Z-mapa e o modelo discreto de fresa de topo esférico foi desenvolvido a partir do corte da ferramenta em uma série de discos circulares axiais.

Quinsat et al. (2008) utilizaram um modelo de simulação da topografia superficial no fresamento de topo esférico em 3 eixos, para propor um parâmetro de rugosidade 3D que fornecesse uma descrição da influência dos parâmetros e estratégias de usinagem sobre a qualidade da superfície. Em um trabalho posterior (QUINSAT et al., 2011), os autores estenderam a caracterização da topografia de superfícies 3D para o fresamento com 5 eixos.

O modelo numérico apresentado por Buj-Corral et al. (2012) tem como variáveis principais o raio da ferramenta e os parâmetros avanço e profundidade radial de corte.

2.2.5.3 Modelos empíricos

Conforme citado na seção 2.2.4, os modelos empíricos são modelos matemáticos obtidos a partir de dados experimentais. E a necessidade desses dados acaba por ser a

principal limitação da utilização desses modelos, pois, para que se obtenha modelos confiáveis, é necessária uma quantidade significativa de resultados experimentais.

Com os dados experimentais, o modelo matemático pode ser obtido pela aplicação de técnicas de regressão estatística, para a obtenção de funções quadráticas, polinomiais ou exponenciais, que constituem uma relação matemática entre as variáveis do projeto. A variável de resposta é modelada como uma função das variáveis do processo consideradas significativas, e os coeficientes dessas variáveis são obtidos pela aplicação das técnicas estatísticas.

Entretanto, existem situações em que as relações entre as variáveis são bastante complexas, e não é possível a obtenção de modelos satisfatórios a partir de técnicas de regressão estatística. Nessas situações, é necessário o emprego de abordagens empíricas mais modernas, como as redes neurais e a lógica *fuzzy* (MUKHERJEE e RAY, 2006).

As redes neurais são sistemas que podem adquirir, armazenar e utilizar conhecimentos adquiridos com dados experimentais. Uma rede neural artificial é capaz de aprender a partir de dados experimentais as relações não lineares e as interações entre as variáveis do processo (CHANDRASEKARAN et al., 2010). Um dos principais atrativos do método é a não necessidade de adoção de uma hipótese para a forma da relação matemática entre os parâmetros do processo (ZAIN et al., 2010b).

A lógica *fuzzy* admite a existência de um tipo de incerteza (ou indecisão) em variáveis do processo de decisão devido à indefinição (referida como "incerteza *fuzzy*"), ao invés de apenas devido à aleatoriedade. Essa técnica é geralmente preferida quando o conhecimento subjetivo ou a opinião de especialistas no processo desempenha um papel fundamental na definição da função objetivo e das variáveis de decisão (RAO, 2011). É uma técnica adequada para problemas de usinagem com características múltiplas de qualidade, onde a hierarquia de importância de cada objetivo não está claramente definida (MUKHERJEE e RAY, 2006).

No trabalho de Daymi et al. (2009), os autores modelaram a rugosidade média de planos inclinados usinados por fresas de topo esférico, tomando como variáveis de processo a velocidade de corte, o avanço e a profundidade radial, e utilizando a técnica estatística de regressão por mínimos quadrados. Samanta et al. (2008) apresentam um modelo semelhante para o fresamento de topo reto, porém substituindo a profundidade radial pela profundidade axial de corte.

Erzurumlu e Oktem (2007) apresentam em seu estudo uma comparação entre a regressão estatística e redes neurais, na modelagem da rugosidade média resultante do fresamento de topo reto, tomando como variáveis os parâmetros velocidade de corte, avanço,

profundidades axial e radial de corte, além da tolerância dimensional. Zain et al. (2012) realizaram comparação semelhante, porém utilizando como variáveis a velocidade de corte, o avanço e o ângulo de saída da ferramenta.

2.2.5.4 Modelo selecionado para o problema de otimização

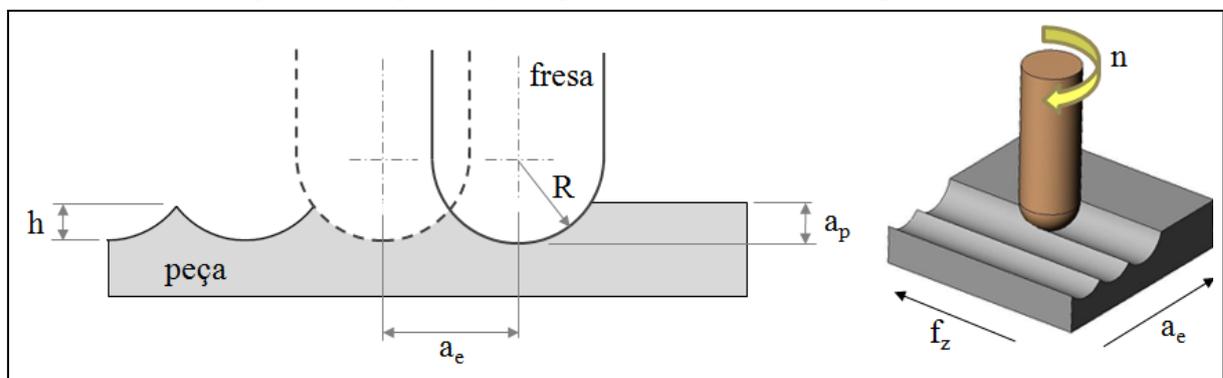
Após uma análise dos modelos encontrados na literatura, foi selecionado um método analítico para aplicação no modelo matemático de otimização proposto neste trabalho. A seleção do modelo foi baseada nos seguintes critérios:

- o modelo deveria fornecer o valor do parâmetro rugosidade média R_a , uma vez que este é o parâmetro mais comumente adotado em aplicações industriais;
- o ângulo de inclinação da ferramenta em relação à superfície da peça deveria estar entre os parâmetros do modelo;
- o modelo deveria apresentar um caráter de aplicação generalista, uma vez que os parâmetros de corte só seriam conhecidos após a aplicação da rotina de otimização; e
- procurou-se buscar um modelo que permitisse uma fácil implementação na rotina de otimização.

Todos estes requisitos foram atendidos pelo modelo analítico obtido no trabalho de Quintana et al. (2010). O modelo é baseado nos aspectos geométricos do corte no fresamento de topo esférico e uma descrição mais detalhada do mesmo é apresentada a seguir.

A figura 2.7 apresenta uma representação esquemática do processo de fresamento de topo esférico.

Figura 2.7 – Representação esquemática do fresamento de topo esférico



Fonte: Adaptado de Quintana et al. (2010)

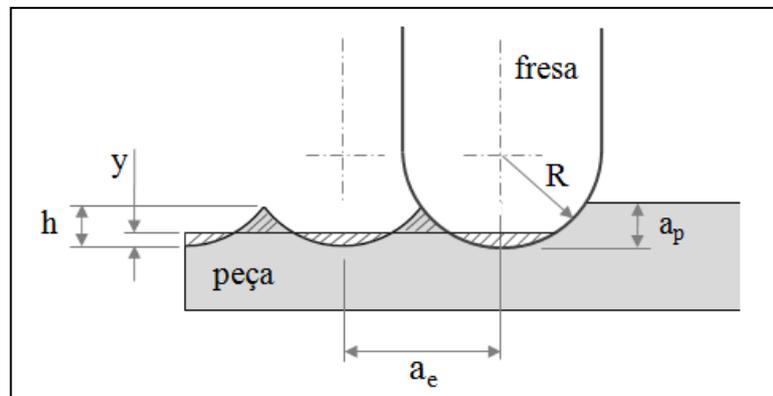
De acordo com Quintana et al. (2010), do ponto de vista geométrico, o raio da ferramenta (R), a profundidade radial de corte (a_e) e o ângulo de inclinação da ferramenta em relação à superfície (θ) são os principais elementos a serem considerados no cálculo teórico da rugosidade no fresamento de topo esférico. A partir da equação da circunferência, os autores definem a altura máxima da crista em função destes elementos na equação (12):

$$h = R - \frac{\sqrt{4R^2 - \left(\frac{a_e}{\cos\theta}\right)^2}}{2} = \left(1 - \frac{\sqrt{4 - \left(\frac{a_e}{R\cos\theta}\right)^2}}{2}\right)R \quad (12)$$

onde h é a altura máxima da crista [mm] e θ é o ângulo [rad] entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal à superfície.

Para o cálculo da rugosidade, conforme a ISO 4287:1997, deve ser considerada a posição da linha média do perfil de rugosidade, como ilustra a figura 2.8.

Figura 2.8 – Representação da linha média do perfil de rugosidade



Fonte: Adaptado de Quintana et al. (2010)

A posição da linha média em relação ao topo da ferramenta é dada pela equação (13):

$$y = \frac{h}{2} + \frac{R}{2} - \frac{R^2 \cos\theta}{a_e} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a_e}{2R\cos\theta} \right) \quad (13)$$

onde y é a posição da linha média [mm].

Substituindo h pelos termos da equação (12), obtém-se a equação (14):

$$y = \left[1 - \frac{\sqrt{4 - \left(\frac{a_e}{R\cos\theta}\right)^2}}{4} - \frac{R\cos\theta}{a_e} \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{a_e}{2R\cos\theta}\right) \right] R \quad (14)$$

Aplicando novamente a equação da circunferência, Quintana et al. (2010) obtiveram a seguinte equação (15) para o cálculo da rugosidade média:

$$R_a = \frac{2\cos\theta}{a_e} \left[R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-y}{R}\right) - [(R-y)\sqrt{2Ry-y^2}] \right] \quad (15)$$

onde R_a é a rugosidade média teórica [mm] da superfície usinada.

Substituindo y pelos termos da equação (14), a forma final da equação da rugosidade média no fresamento de topo esférico definida pelos autores é apresentada na equação (16):

$$\begin{aligned} R_a = \frac{2\cos\theta}{a_e} & \left[R^2 \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4\cos^2\theta}}}{2R} + \frac{R\cos\theta}{a_e} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a_e}{2R\cos\theta} \right) \right) \right. \\ & - \left(\left(\frac{R^2\cos\theta}{a_e} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a_e}{2R\cos\theta} \right) + \frac{\sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4\cos^2\theta}}}{2} \right) \right. \\ & \times \left(-\frac{2R^3\cos\theta}{a_e} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a_e}{2R\cos\theta} \right) + 2R^2 - R \sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4\cos^2\theta}} \right. \\ & \left. \left. \left. - \left(-\frac{R^2\cos\theta}{a_e} \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a_e}{2R\cos\theta} \right) + R - \frac{\sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4\cos^2\theta}}}{2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (16) \end{aligned}$$

Essa equação possibilita o cálculo analítico da rugosidade média, que constitui uma das restrições técnicas do problema de otimização proposto. É importante ressaltar que este equacionamento é cinemático e, portanto, não inclui fontes de influência dinâmica, como vibrações e folgas da máquina-ferramenta. Por isso, nos ensaios buscou-se ajustar a fixação das ferramentas e dos corpos de prova de modo a minimizar estas influências.

2.3 Otimização de processos de usinagem

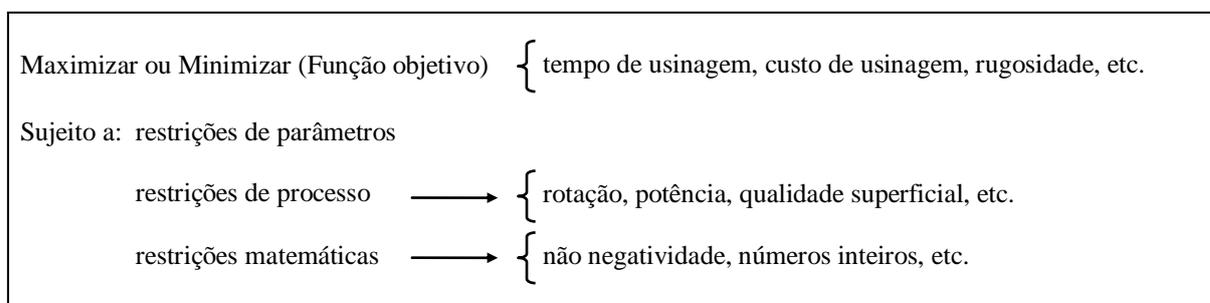
2.3.1 Aplicação de otimização em processos de usinagem

Problemas de otimização são encontrados em diferentes áreas do conhecimento. A idéia de otimização pode ser entendida como escolher a melhor solução entre muitas disponíveis, considerando os critérios e restrições existentes. O processo de otimização contém as seguintes fases (BABILAS et al., 2006):

- a) formulação do problema;
- b) determinação das restrições;
- c) formulação do modelo matemático do problema;
- d) escolha do método de solução;
- e) aplicação do método de otimização; e
- f) análise dos resultados e verificação do modelo.

Em processos de usinagem, melhorias significativas na eficiência do processo podem ser obtidas a partir da otimização de parâmetros (DEL PRETE et al., 2010). A figura 2.9 apresenta um modelo geral de otimização de problemas de usinagem.

Figura 2.9 – Modelo geral de otimização de problemas de usinagem



Fonte: Adaptado de Deb e Dixit (2008)

Em processos de usinagem, a otimização é geralmente empregada em problemas de minimização: de tempos de usinagem (PALANISAMY et al., 2007; WANG et al., 2004); de custos de usinagem (CONCEIÇÃO ANTÓNIO et al., 2009); da rugosidade de superfícies (ÖKTEM et al., 2005, 2006; OZCELIK et al., 2005; RAJU et al., 2011; REDDY e RAO, 2005, 2006; WIBOWO, A; DESA, 2012; ZAIN et al., 2010a); entre outros.

Os limites de valores aplicáveis dos parâmetros de corte constituem uma das principais restrições do problema de otimização. Dentre as restrições de processo, as mais comumente consideradas, dependendo da natureza do problema, são (VOSNIAKOS et al., 2012):

- a) potência da máquina-ferramenta;
- b) esforços de corte (força, torque);
- c) rigidez da máquina-ferramenta (vibrações);
- d) rotação máxima da ferramenta;
- e) geometria da ferramenta;
- f) desgaste da ferramenta;
- g) deflexão da ferramenta;
- h) valores limite dos parâmetros de corte; e
- i) especificações de qualidade superficial.

Além dos valores dos parâmetros e das restrições de processo, a adoção de restrições matemáticas no modelo é necessária, para evitar a obtenção de resultados inviáveis, como valores negativos de parâmetros de corte.

Em operações de acabamento, o objetivo principal é satisfazer os requisitos morfológicos e qualitativos da peça final, de acordo com suas especificações técnicas. Requisitos morfológicos comumente utilizados são as tolerâncias geométricas e os desvios dimensionais da peça. O requisito qualitativo mais comum é a rugosidade da superfície (VOSNIAKOS et al., 2012). Para minimizar os custos de usinagem nessas operações, os parâmetros de corte selecionados devem permitir minimizar o tempo de produção e obter as especificações de qualidade superficial (BOUZID, 2005).

2.3.2 Classificação dos métodos de otimização

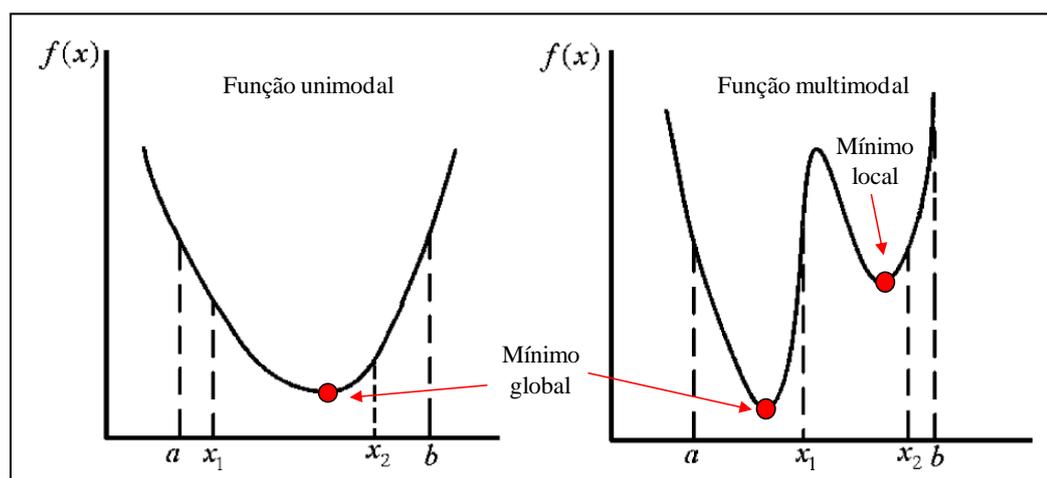
As técnicas de otimização podem ser agrupadas em duas grandes categorias: as abordagens tradicionais ou determinísticas; e os métodos não tradicionais ou não determinísticos. O primeiro grupo compreende métodos algorítmicos exatos, com uma sólida base matemática, para a obtenção do ótimo global. Já os métodos não determinísticos buscam

imitar alguns processos naturais e, apesar de não garantirem o alcance do ótimo global, permitem a obtenção das chamadas soluções “quase ótimas”. Estas técnicas têm um forte componente aleatório (QUIZA e DAVIM, 2008).

Como exemplos de métodos determinísticos pode-se citar: o método de Newton; o método do gradiente descendente; e a programação matemática (geométrica, dinâmica, inteira e quadrática) (QUIZA e DAVIM, 2008; RAJA e BASKAR, 2010). As técnicas não determinísticas incluem: algoritmos genéticos; recozimento simulado; otimização por enxame de partículas; otimização por colônia de formigas; colônia artificial de abelhas; busca tabu; entre outros (CHANDRASEKARAN et al., 2010; MUKHERJEE e RAY, 2006).

Os métodos determinísticos se baseiam no cálculo de derivadas e necessitam de alguma informação do gradiente da função objetivo. Necessitam ainda do passo de cálculo e da direção de busca. Dessa forma, só produzem bons resultados para funções contínuas e unimodais (funções que possuem um ponto de máximo ou de mínimo). Os métodos não determinísticos procuram pela solução ótima utilizando regras de probabilidade e a função objetivo, sem a necessidade do cálculo de derivadas. Isto agrega robustez à técnica, já que em muitos problemas a função a ser otimizada tem vários pontos de máximos (ou mínimos) locais (SCHULTER, 2007). A figura 2.10 ilustra as curvas de uma função unimodal e de uma multimodal, com dois pontos de mínimo.

Figura 2.10 – Funções unimodal e multimodal



Fonte: Adaptado de Deb e Dixit (2008)

Os processos de usinagem são inerentemente complexos e multivariados (DEB e DIXIT, 2008). Modelos de operações de usinagem são, muitas vezes, descontínuos e não diferenciáveis (ZHANG et al., 2006), e geralmente apresentam relações não lineares entre as

variáveis de processo (LIU e WANG, 1999; WANG et al., 2004). As técnicas determinísticas têm dificuldade em resolver problemas de otimização em usinagem, tendendo a obter um ótimo local (RAJA e BASKAR, 2010; RAO e PAWAR, 2010; YILDIZ, 2013).

Na aplicação realizada neste trabalho, o modelo utilizado para o cálculo do tempo de corte (seção 2.2.4) é simples, e as características matemáticas das equações envolvidas permitiriam o emprego de um método determinístico. Entretanto, o modelo selecionado para o cálculo da rugosidade média (seção 2.2.5.4) é não linear e constituído por funções multimodais, o que pode ser deduzido pela presença de termos trigonométricos. Devido a estas características, é necessário o emprego de técnicas não determinísticas.

Dentre os métodos não determinísticos, os algoritmos genéticos (AGs) vêm ganhando espaço entre os métodos utilizados na solução de problemas de otimização em usinagem. O trabalho de revisão de Yusup et al. (2012) apresenta um levantamento bibliográfico de estudos de otimização de processos de usinagem utilizando técnicas não determinísticas, publicados entre os anos de 2007 e 2011. O trabalho avaliou um total de 85 publicações e, dentre estas, os AGs foram utilizados em 48% dos estudos. Conforme Palanisamy et al. (2007), os AGs têm sido usados como uma ferramenta poderosa para otimizar os parâmetros de corte em operações de fresamento de acabamento. Como principais atrativos da técnica, são citados: simplicidade de operação; requisitos mínimos; perspectiva global; eficiência em problemas de otimização multicritérios; e eficiência computacional (BASKAR et al., 2005; BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003; CUS et al., 2006).

Com base nestas considerações, foi realizada a opção pela técnica de algoritmos genéticos para aplicação no problema de otimização abordado neste trabalho.

2.4 Algoritmos genéticos

2.4.1 Introdução

De acordo com Goldberg (1989), os algoritmos genéticos (AGs) são algoritmos de busca baseados nos mecanismos da seleção natural e da genética. O AG opera uma população de soluções potenciais, aplicando o princípio da sobrevivência do mais apto a produzir sucessivamente melhores aproximações para uma solução. A cada geração do AG, um novo conjunto de aproximações é criado pela aplicação de operadores probabilísticos concebidos a partir de metáforas biológicas. Este processo leva à evolução dos indivíduos, que tendem a

constituir soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua (LIU e WANG, 1999).

O poder destes algoritmos é derivado de um pressuposto heurístico simples de que a melhor solução é encontrada nas regiões do espaço de solução contendo elevada proporção de boas soluções, e que estas regiões podem ser identificadas por amostragem do espaço de busca (CUS et al., 2006). Segundo Holland (1992), a capacidade dos AGs de concentrar sua atenção nas regiões mais promissoras do espaço de busca é um resultado direto de sua capacidade de combinar sequências contendo soluções parciais. Boechel (2003) cita que, vista de forma global, a evolução natural implementa mecanismos adaptativos de otimização que, embora estejam longe de serem uma forma de busca aleatória, envolvem aleatoriedade. E é este tipo de busca inteligente, mas não determinística, que os AGs tentam imitar.

Os fundamentos dos AGs têm suas raízes ligadas a um dos mais importantes princípios no campo da evolução da vida, a teoria da Seleção Natural de Darwin, publicada pelo autor em seu livro *The Origin of Species by Means of Natural Selection* (DARWIN, 1953 *apud* RAMOS, 2001). Esta teoria defende a ideia de que, na natureza, os seres vivos com melhores características, ou seja, os mais adaptados, tendem a sobreviver frente aos demais. A perpetuação ou extinção de cada organismo é determinada pela habilidade do mesmo de se adaptar ao seu ambiente.

Em 1975, o engenheiro eletricitista John H. Holland escreveu o livro intitulado *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (HOLLAND, 1975), considerado o marco dos AGs, e que deu origem ao uso desta técnica para problemas de otimização. Posteriormente, a metodologia foi desenvolvida com mais detalhes por David E. Goldberg, antigo aluno de Holland. Os estudos de Goldberg foram publicados no seu livro *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning* (GOLDBERG, 1989).

Diversas vantagens podem ser citadas na utilização dos AGs (DIXIT e DIXIT, 2008; GOLDBERG, 1989; MUKHERJEE e RAY, 2006; ZAIN et al., 2010a):

- a) trabalham com uma população de soluções, ao invés de um único ponto, como em técnicas convencionais;
- b) uma vez que não são baseados em informações de gradiente, não requerem a continuidade ou convexidade do espaço de busca;
- c) dispensam a diferenciabilidade das funções para determinar a direção de busca;
- d) são capazes de lidar com funções objetivo de qualquer complexidade com variáveis discretas e contínuas;

- e) usam regras de transição probabilísticas, não determinísticas e, portanto, são menos propensos a ficarem presos em mínimos locais;
- f) permitem simples complementações do modelo por novos parâmetros de entrada, sem modificar a estrutura do modelo existente; e
- g) constituem uma técnica rápida e simples de otimização.

2.4.2 Terminologia usada em algoritmos genéticos

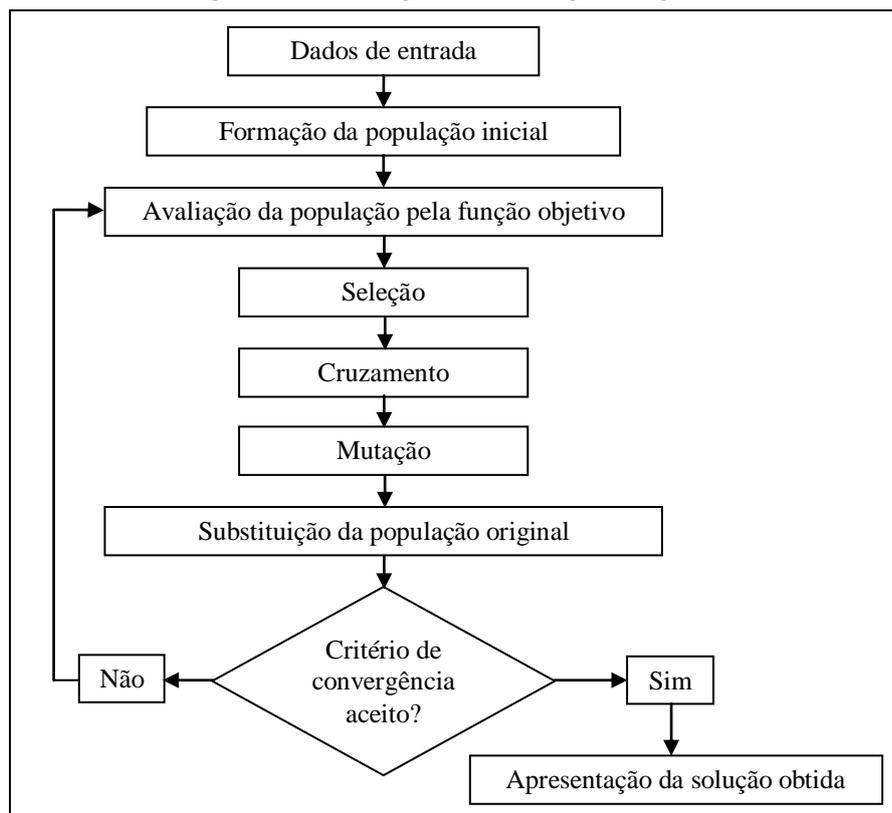
Para vincular a terminologia usada na biologia, e por consequência ao uso de AGs, com a terminologia matemática e de engenharia, apresenta-se a seguinte relação de termos utilizados na fundamentação dos AGs (CASTRO, 2001; MATTA, 2007):

- a) cromossomo: cadeia de caracteres representando informações relativas às variáveis do problema. Cada cromossomo representa uma solução do problema;
- b) gene: é a unidade básica do cromossomo. Cada cromossomo tem um certo número de genes, cada um descrevendo uma variável do problema;
- c) alelo: representa uma das alternativas que um gene pode carregar, um valor que pode ser assumido por uma variável;
- d) operações genéticas: operações que o AG realiza sobre os cromossomos;
- e) aptidão (*fitness*): representa uma medida da capacidade de sobrevivência de um cromossomo durante o processo de evolução e, conseqüentemente, a probabilidade dele se reproduzir com mais frequência. É o valor, para um indivíduo, da função a ser otimizada;
- f) indivíduo: é um membro da população, formado por um cromossomo e seu valor de aptidão;
- g) população: conjunto de cromossomos ou soluções; e
- h) geração: o número da iteração que o AG executa.

2.4.3 Estrutura básica dos algoritmos genéticos

Um AG é estruturado de forma que as informações referentes a um determinado sistema possam ser codificadas de maneira análoga aos cromossomos biológicos. Desta forma, o funcionamento do algoritmo assemelha-se muito ao processo evolutivo natural (MATTA, 2007). A figura 2.11 apresenta o fluxograma do funcionamento de um AG.

Figura 2.11 – Fluxograma de um algoritmo genético



Fonte: Adaptado de Schuller (2007)

Antes da forma o da popula o inicial, o AG necessita de dados de entrada, tais como os limites das variáveis do problema, o tamanho da popula o, o critério de convergência, e valores de probabilidades de cruzamento e muta o. Estes dados são descritos nas se es subsequentes.

A implementa o do AG começa com uma popula o (tipicamente aleatória) de indivíduos, que representam solu es para o problema em questão. Cada indivíduo   avaliado por meio da fun o objetivo, e a ele   atribuído um valor de aptidão. Uma vez que todos os indivíduos da popula o tenham sido avaliados, seus valores de aptidão são usados como base para a sele o. A sele o   implementada através da elimina o dos indivíduos de baixa aptidão e da cópia dos indivíduos de alta aptidão. Os operadores genéticos de cruzamento e muta o são então aplicados probabilisticamente aos indivíduos selecionados, para produzir uma nova popula o (ou gera o) de indivíduos. Os indivíduos resultantes do cruzamento não substituem os indivíduos selecionados, mas sim os indivíduos de baixa aptidão, de forma que a cada gera o a popula o total permanece do mesmo tamanho³. Esse ciclo se repete até que

³ Existem varia es do AG em que ocorre a varia o do tamanho da popula o ao longo do processo evolutivo (MICHALEWICZ, 1996), mas no AG clássico proposto por Holland (1975) este parâmetro   constante.

a condição de convergência seja atendida. O indivíduo da população final com melhor aptidão representa a solução do algoritmo (FORREST, 1993; HOLLAND, 1992).

Computacionalmente, um AG pode ser representado pelo pseudocódigo apresentado na figura 2.12, onde “g” representa a geração atual e “P” a população de indivíduos.

Figura 2.12 – Pseudocódigo de um algoritmo genético

Início Algoritmo	
g = 0	// inicializar o contador
Inicializar P(g)	// inicializar uma população de N indivíduos
Avaliar P(g)	// avaliar a aptidão dos indivíduos da população
Enquanto (condição) Faça	// testar os critérios de convergência
g = g + 1	// incrementar o contador de gerações
Seleção P(g)	// selecionar os pares para cruzamento
Cruzamento P(g)	// realizar o cruzamento dos pares selecionados
Mutação P(g)	// perturbar o grupo gerado pelo cruzamento
Substituir P(g)	// substituir a população
Avaliar P(g)	// avaliar as novas aptidões
Fim Faça	
Fim Algoritmo	

Fonte: Adaptado de Boechel (2003) e Matta (2007)

2.4.3.1 Representação ou codificação

A representação de um AG consiste em uma forma de traduzir a informação do problema em uma maneira viável de ser tratada pelo algoritmo. Quanto mais ela for adequada ao problema, maior a qualidade dos resultados obtidos (LINDEN, 2008). A codificação é feita de acordo com o problema em questão, onde cada variável deve ser discretizada e representada por um conjunto de genes, e o conjunto de variáveis codificadas forma o indivíduo. Para decidir a representação a ser utilizada, deve-se ter bem definido o problema a ser resolvido, ou seja, quais as variáveis que devem ser encontradas e qual a precisão necessária que estas devem apresentar (HAHNE, 2005).

Nos estudos iniciais sobre AGs, as variáveis de decisão foram representadas como sequências binárias. Assim, cada possível solução do problema é representada por uma sequência (cromossomo) consistindo de '0's e '1's. Cada valor '0' e '1' é chamado um bit e é análogo a um gene. Entretanto, em diversas aplicações práticas a utilização de codificação binária leva a um desempenho insatisfatório, pois, para alcançar uma boa precisão, uma

variável tem de ser representada por um número grande de bits. Além disso, quanto maior o número de bits no cromossomo, maior o tamanho da população necessário (DIXIT e DIXIT, 2008).

Nos AGs também é possível usar a codificação real para as variáveis de decisão e, assim, a solução é representada por números reais. Em problemas de otimização numérica, este tipo de codificação apresenta desempenho melhor do que a codificação binária, porque é mais preciso, mais consistente, e leva a uma convergência mais rápida (KIM et al., 2008). Portanto, a codificação real é mais adequada para espaços de busca contínuos (DIXIT e DIXIT, 2008). Testes realizados por Michalewicz (1996) comprovam a maior eficiência da representação real, principalmente quando aplicada a problemas de otimização que possuem variáveis com grandes domínios.

Neste trabalho, as variáveis a serem codificadas são os valores dos parâmetros de corte, e estas variáveis apresentam valores contínuos. Por isso, a codificação real é a escolha mais adequada, e o AG utilizado neste trabalho emprega a codificação real.

2.4.3.2 Inicialização da população

O método mais comum utilizado na inicialização da população é a geração aleatória dos indivíduos. Entretanto, se algum conhecimento inicial a respeito do problema estiver disponível como, por exemplo, soluções aproximadas conhecidas contendo algum tipo de informação prévia, este pode ser utilizado na inicialização da população. Já em problemas com restrições, deve-se tomar cuidado para não gerar indivíduos inválidos na etapa de inicialização (VON ZUBEN, 2000).

A inicialização, em geral, não é crítica, desde que a população inicial contenha cromossomos suficientemente variados. Como no caso biológico, não há evolução sem variedade, ou seja, a evolução natural necessita que os indivíduos tenham diferentes graus de adaptação ao ambiente em que vivem. Portanto, é importante que a população inicial cubra a maior área possível do espaço de busca (BOECHEL, 2003).

2.4.3.3 Avaliação da população

O processo de avaliação consiste na aplicação de uma função de avaliação em cada um dos indivíduos da população corrente. Esta função deve expressar a qualidade de cada indivíduo da população no contexto do problema considerado e é extremamente importante,

uma vez que constitui o principal elo entre o AG e o problema em questão. Por isso, a função de avaliação depende fortemente da forma como as soluções são representadas (MAZZUCCO JR., 1999).

A função de avaliação recebe o nome de função de aptidão. A cada indivíduo é associado um valor numérico, denominado valor de aptidão (em inglês denominado de *fitness*), cujo significado é uma métrica da qualidade da solução obtida usando-se os valores armazenados no cromossomo (os parâmetros) (GRIGOLETTI, 2008).

Para problemas de otimização, a função de aptidão está intimamente ligada à função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar. A escolha desta função é, para a maioria das aplicações, a etapa crítica do processo, já que ela deverá ser avaliada para cada cromossomo, de cada população, dentro do processo evolutivo (MATTA, 2007).

2.4.4 Operadores genéticos

Linden (2008) define os operadores genéticos como aproximações computacionais de fenômenos vistos na natureza, como a reprodução sexuada e a mutação genética. Segundo o autor, estes operadores utilizam uma caracterização da qualidade de cada indivíduo como solução do problema, e geram um processo de evolução natural destes indivíduos, que eventualmente deverá gerar um indivíduo que caracterizará uma boa solução para o problema analisado.

De acordo com Goldberg (1989), um AG simples, que alcança bons resultados em muitos problemas práticos, é composto de três operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação.

2.4.4.1 Seleção

O operador de seleção permite que indivíduos sejam copiados para serem incluídos na próxima geração. A chance de um indivíduo ser copiado é baseada no seu valor de aptidão. Para cada geração, o operador de seleção escolhe os indivíduos que serão utilizados para criar a geração seguinte (CUS e BALIC, 2003).

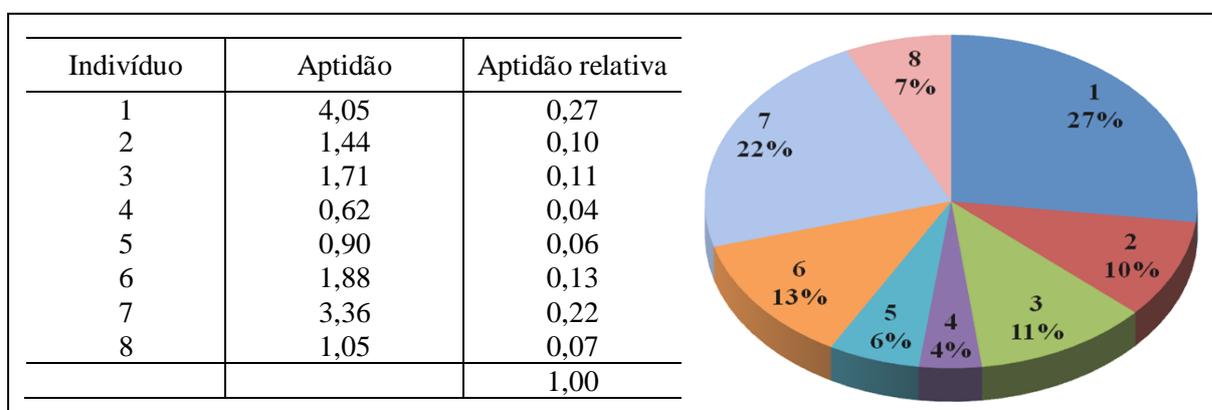
Para Linden (2008, p. 67) “o método de seleção deve simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies biológicas, em que os pais mais capazes geram mais filhos, ao mesmo tempo em que os pais menos aptos também podem gerar descendentes”. Ou seja, deve-se privilegiar os indivíduos com aptidões altas, sem desprezar completamente os

indivíduos com aptidões baixas. Segundo o autor, este aspecto é importante, pois indivíduos com aptidões baixas podem ter características genéticas que sejam favoráveis à criação de um indivíduo que seja a melhor solução para o problema em análise, e estas características podem não estar presentes em nenhum outro cromossomo da população.

Existem diversos métodos de seleção aplicáveis aos AGs. Entretanto, os mais comumente encontrados na literatura são o método da roleta, o torneio, a ordenação e o elitismo.

O método da roleta é o esquema original de seleção proposto por Holland (1975). Nesta técnica, cada indivíduo da população é representado em uma roleta proporcionalmente ao seu valor de aptidão. Deste modo, aos indivíduos com aptidão mais elevada é destinada uma fatia maior da roleta, enquanto os de menor aptidão recebem uma fatia relativamente menor da mesma. Em seguida, a roleta é girada uma quantidade definida de vezes, dependendo do número de elementos da população, e então são selecionados, como indivíduos que participarão do processo de reprodução, aqueles que forem sorteados (RAMOS, 2001). A figura 2.13 ilustra um exemplo de composição da roleta.

Figura 2.13 – Exemplificação do método da roleta



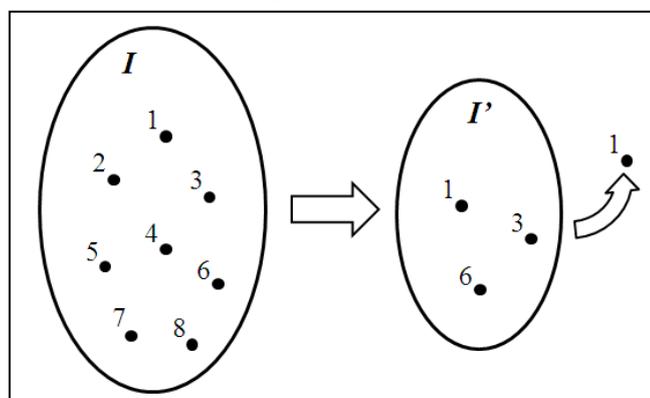
Fonte: Adaptado de Schuler (2007)

A roleta está dividida em oito partes, cada uma representando a aptidão de um indivíduo, em percentual, relativa à soma das aptidões dos oito indivíduos da população. A roleta é então girada tantas vezes quantas forem necessárias, até obter o número requerido de pares de indivíduos para o cruzamento e a mutação.

O método do torneio é um dos modelos mais simples para implementação computacional com bons resultados encontrados. A ideia é promover um torneio entre um grupo de indivíduos aleatoriamente tomados da população. Assim, o indivíduo com o maior

valor de aptidão no grupo é selecionado, enquanto que os demais são descartados (CASTRO, 2001). A figura 2.14 ilustra um exemplo do método.

Figura 2.14 – Exemplificação do método do torneio



Fonte: Adaptado de Schuler (2007).

Neste exemplo, indivíduos da população I são selecionados aleatoriamente para formar a subpopulação I' . O indivíduo com a maior aptidão do subconjunto I' vence o torneio e se torna o selecionado.

É interessante observar que, tanto no método da roleta como do torneio, os indivíduos com maior aptidão têm maiores chances de serem selecionados. Porém, isso não impede que indivíduos menos aptos também sejam selecionados. Dessa forma, indivíduos de baixo desempenho têm chances de formar pares, preservando assim o material genético contido neles.

Na seleção por ordenação, os indivíduos são classificados de acordo com seus valores de aptidão. O grau N é atribuído ao melhor indivíduo, e o grau 1 é atribuído ao pior. Então, a cada indivíduo é atribuída uma probabilidade de seleção tomada de uma dada distribuição, de acordo com o grau do indivíduo. As distribuições de probabilidade mais comumente utilizadas são a linear e a exponencial (CUS e BALIC, 2003).

O modelo de seleção elitista normalmente é acoplado a outros métodos de seleção, com o objetivo de se aumentar a velocidade de convergência do algoritmo. Este processo simplesmente copia os melhores indivíduos da população corrente para a próxima geração, garantindo que estes cromossomos não sejam destruídos nas etapas de cruzamento e mutação. A principal vantagem do elitismo é garantir que não se perca o melhor indivíduo durante o processo evolutivo e, na maioria das implementações, pelo menos o elitismo do melhor indivíduo é utilizado (CASTRO, 2001).

2.4.4.2 Cruzamento

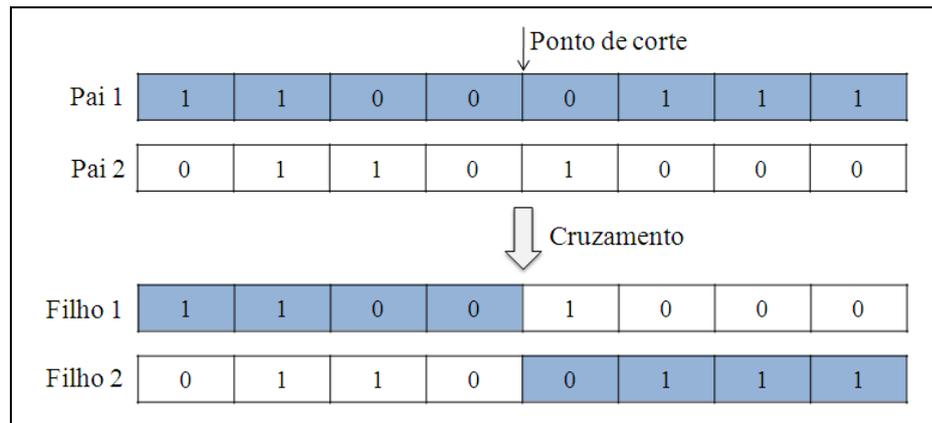
Segundo Mitchell (1996), uma das principais características dos AGs que os distinguem das demais técnicas de busca é o operador de cruzamento. O objetivo do cruzamento é a permutação de material genético entre pares de indivíduos previamente selecionados (ÁVILA, 2002). Para Linden (2008), o cruzamento é o operador mais importante dos AGs, pois, somado ao princípio de seleção proporcional à avaliação de um indivíduo, é o responsável pelo fato de um AG não poder ser comparado a uma busca aleatória. Assim, o AG utiliza a seleção para determinar as áreas mais promissoras de busca, e o cruzamento para combiná-las de forma a tentar gerar soluções de maior qualidade para o problema em questão.

Todos os indivíduos escolhidos pelo operador de seleção fazem parte da próxima população automaticamente, e uma parte destes indivíduos dá origem a novos indivíduos (MAZZUCCO JR., 1999). Na operação de cruzamento, o AG seleciona aleatoriamente dois indivíduos entre os selecionados pelo operador de seleção. Em seguida, o AG calcula se o cruzamento deve ser realizado utilizando um parâmetro chamado probabilidade de cruzamento. Se o AG decide não realizar o cruzamento, os dois indivíduos são simplesmente copiados para a nova população. Se o cruzamento for realizado, os dois indivíduos dão origem a dois novos indivíduos, e estes também são colocados na nova população (CUS e BALIC, 2003).

Existem diversos métodos de implementação do operador de cruzamento. O trabalho de Larrañaga et al. (1999) apresenta um extenso levantamento dos diferentes métodos encontrados na literatura. No entanto, não há nenhum operador de cruzamento que claramente apresente um desempenho superior aos demais. Uma conclusão a que se pode chegar é que cada operador de cruzamento é mais eficiente para uma determinada classe de problemas e menos eficiente para outras (VON ZUBEN, 2000). As formas de cruzamento mais comumente encontradas na literatura são: de um ponto; multiponto; e uniforme.

O cruzamento de um ponto é realizado a partir da escolha aleatória de um único ponto de corte. Cada par de cromossomos escolhidos como pais gera dois descendentes por meio da permuta de suas partes finais, depois do ponto de corte (BOECHEL, 2003). Na figura 2.15 é apresentada uma representação desse tipo de cruzamento, na qual foi escolhido o ponto de corte 4.

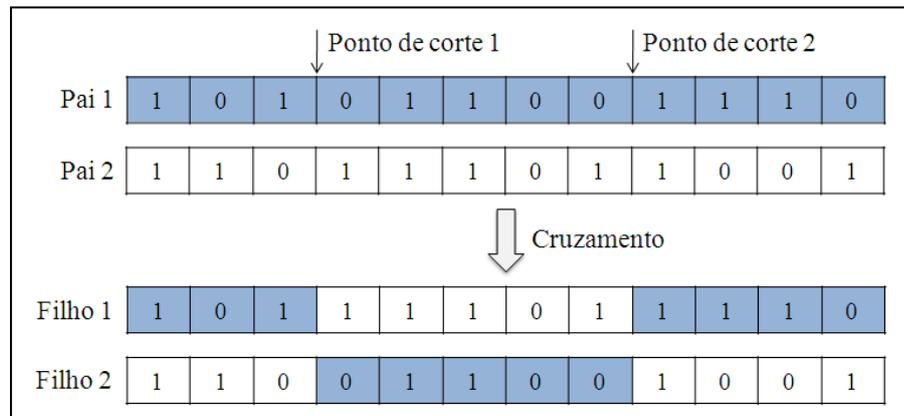
Figura 2.15 – Exemplo do cruzamento de um ponto



Fonte: Adaptado de Boechel (2003)

O cruzamento multiponto é semelhante ao operador de um ponto, mas busca melhorá-lo, sendo escolhidos mais pontos de corte para troca de material genético entre o par de geradores (BOECHEL, 2003). A figura 2.16 mostra um exemplo de cruzamento multiponto, com 2 pontos de corte.

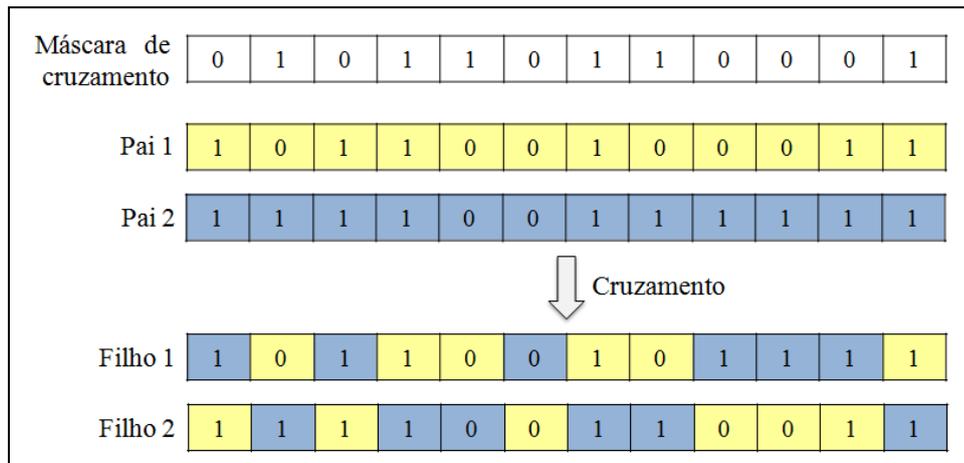
Figura 2.16 – Exemplo do cruzamento multiponto



Fonte: Adaptado de Boechel (2003)

No cruzamento uniforme, cada gene do descendente é criado a partir da cópia de um gene dos pais, escolhido de acordo com uma máscara de cruzamento gerada aleatoriamente. Onde há “1” na máscara de cruzamento, o gene correspondente é copiado do primeiro pai, e onde há “0”, é copiado do segundo. O processo é repetido com os pais trocados para produzir o segundo descendente. Uma nova máscara de cruzamento é criada para cada par de pais (MATTA, 2007). Na figura 2.17 é apresentado um exemplo do cruzamento uniforme.

Figura 2.17 – Exemplo do cruzamento uniforme



Fonte: Adaptado de Boechel (2003) e Ramos (2001)

O operador de cruzamento é o maior responsável pela criação de novos indivíduos, por isso a probabilidade de cruzamento é geralmente alta. Isto é similar ao que ocorre na natureza, onde a maioria dos casais possui filhos (ÁVILA, 2002).

Após o cruzamento, os novos indivíduos formados são submetidos ao operador genético de mutação.

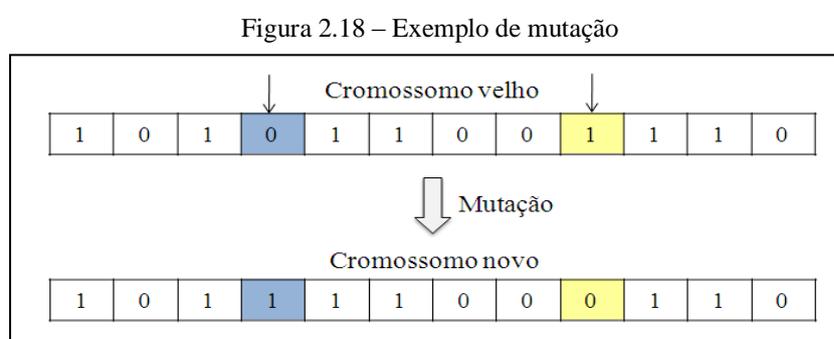
2.4.4.3 Mutação

Os operadores de seleção e cruzamento podem gerar uma grande quantidade de indivíduos diferentes. No entanto, dependendo da população inicial escolhida, pode não haver variedade suficiente de indivíduos para assegurar que o AG cubra todo o espaço de busca do problema, ou o AG pode convergir para indivíduos que não estão perto da região do ponto ótimo. Esses problemas podem ser superados pela introdução de um operador chamado de mutação (CUS e BALIC, 2003).

A mutação tem o objetivo de inserir material genético novo por meio da mudança nos valores dos parâmetros dos indivíduos. Neste processo, ainda há possibilidade de restauração de material genético perdido durante a seleção, o cruzamento e a própria mutação (SCHULTER, 2007). Este processo pode ou não ocorrer, da mesma forma que o cruzamento, de acordo com uma dada probabilidade de mutação. Esta probabilidade deve ser baixa, para que a busca pelo indivíduo ótimo não seja puramente aleatória. Isto é análogo ao comportamento da natureza, onde raramente se veem mutações ou anormalidades nos indivíduos (ÁVILA, 2002).

O operador de mutação é fundamental para o bom desempenho do AG, pois é ele que garante a continuidade da existência de diversidade genética na população, enquanto que o operador de cruzamento contribui fortemente para a igualdade entre os indivíduos (LINDEN, 2008). Desta forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais (GRIGOLETTI, 2008).

Da mesma forma que os operadores de seleção e cruzamento, a mutação pode ser implementada de diferentes maneiras. O trabalho de Larrañaga et al. (1999) discute as principais formas encontradas na literatura. A figura 2.18 exemplifica o operador clássico de mutação onde, em codificação binária, ‘1’s são alterados para ‘0’s e vice-versa.



Fonte: Adaptado de Boechel (2003)

A população modificada pelos operadores de cruzamento e mutação substitui a população original, dando origem a uma nova geração.

2.4.5 Parâmetros dos algoritmos genéticos

Os principais parâmetros de um AG são o tamanho da população, a probabilidade de cruzamento e a probabilidade de mutação (LINDEN, 2008). A configuração desses parâmetros é um dos aspectos mais relevantes dentro da estratégia dos AGs, uma vez que tem influência direta na eficiência e no funcionamento do algoritmo. Conforme apontam alguns estudos (PONGCHAROEN et al., 2002; SADEGHEIH, 2006; SIRIWARDENE e PERERA, 2006), a convergência e o tempo de processamento dos AGs podem ser fortemente influenciados pela variação dos valores dos parâmetros de configuração.

Entretanto, a determinação dos parâmetros de configuração é uma das principais dificuldades na utilização de AGs (RAO e PAWAR, 2010). Nunez-Letamendia (2007) cita que, embora não seja uma questão completamente compreendida, a determinação dos

parâmetros de configuração de um AG depende principalmente das características do problema a ser resolvido. Ou seja, diferentes problemas de otimização podem responder de forma diferenciada ao mesmo conjunto de parâmetros.

Uma alternativa interessante é a realização de testes preliminares, como os realizados no trabalho de Raju et al. (2011), onde os autores efetuaram uma série de testes com diferentes combinações de valores dos parâmetros do AG, para identificar os valores que propiciavam melhor desempenho ao algoritmo. Para a aplicação realizada neste trabalho, esta foi a estratégia utilizada na determinação dos parâmetros de configuração do AG.

2.4.5.1 Tamanho da população – N

O tamanho da população indica o número de cromossomos em cada população, ou seja, é o conjunto das soluções encontradas. As principais influências deste parâmetro estão relacionadas com o desempenho global e a eficiência do AG (MATTA, 2007).

Populações reduzidas podem diminuir o desempenho do algoritmo, pois fornecem uma pequena cobertura (poucas soluções) do domínio do problema. Já populações maiores fornecem uma melhor cobertura do domínio do problema e previnem a convergência prematura para soluções locais. Entretanto, exigem maiores recursos computacionais e tempos de processamento (GRIGOLETTI, 2008; RAMOS, 2001).

Não existem regras bem definidas para a escolha do tamanho da população. Um parâmetro que pode ser utilizado é o tamanho do cromossomo, sendo que quanto maior for este tamanho, maior deve ser o tamanho da população, para que esta seja representativa do conjunto de soluções possíveis (HAHNE, 2005).

2.4.5.2 Probabilidade de cruzamento – p_c

Este parâmetro indica com qual probabilidade pode ocorrer o cruzamento entre indivíduos selecionados na população. Quanto maior for esta probabilidade, mais rapidamente novos indivíduos são introduzidos na população. Em contrapartida, se ela for muito alta, indivíduos com boas aptidões podem ser retirados mais rapidamente da população, ocorrendo a perda de indivíduos de alta aptidão. Valores baixos podem ainda tornar a convergência do algoritmo muito lenta (CASTRO, 2001).

Linden (2008) cita que, historicamente, a probabilidade de cruzamento empregada em aplicações de AGs varia de 0,60 a 0,95. Para Deb e Dixit (2008), esses valores de probabilidade estão geralmente situados entre 0,75 e 0,95.

2.4.5.3 Probabilidade de mutação – p_m

Este parâmetro determina a probabilidade de que uma mutação ocorra. Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada posição fique estagnada em um valor, além de possibilitar que se chegue a qualquer ponto do espaço de busca. Com uma taxa alta, a busca se torna essencialmente aleatória, além de aumentar a possibilidade de que uma boa solução seja destruída (GRIGOLETTI, 2008).

Conforme Deb e Dixit (2008), a probabilidade de mutação é normalmente mantida em valores baixos, entre 0,01 e 0,05.

2.4.6 Critérios de convergência

A convergência de um AG acontece de acordo com um critério pré-determinado, que determina a condição de finalização do algoritmo. Se a aptidão requerida é conhecida, pode-se trabalhar com a opção de um erro máximo admissível. Desta forma, assim que o AG encontra um indivíduo que proporcione um erro menor que o estipulado, finaliza o algoritmo (ÁVILA, 2002).

Entretanto, há diversas opções para o critério de convergência. Pode-se optar por um número máximo de gerações e/ou de verificações da função objetivo. Outro critério utilizado é a avaliação da diversidade genética da população, em que se analisa a aptidão média da população e a do melhor indivíduo no decorrer do processo evolutivo. Quando o valor da aptidão média tende ao do melhor indivíduo, a população encontra-se homogênea e não há mais diversidade genética a ser explorada, podendo-se então interromper o processo evolutivo (SCHULTER, 2007). Há ainda situações em que a convergência é definida usando a ideia de estagnação, ou seja, quando não se observa melhoria da população depois de várias gerações consecutivas (BOECHELS, 2003).

Normalmente, usa-se uma combinação destes critérios para garantir que o processo não seja interrompido antes que um valor razoável seja atingido, ou então que o processo se arraste por gerações que não evoluem (MATTA, 2007).

2.4.7 Teorema fundamental dos algoritmos genéticos

Este tópico apresenta as bases de fundamentação do funcionamento dos AGs. O tópico é propositalmente apresentado no final da revisão bibliográfica, pois, para um melhor entendimento do mesmo, é necessário o conhecimento dos conceitos anteriormente apresentados relativos à caracterização dos AGs.

A teoria que fundamenta o funcionamento dos AGs é chamada de Teoria do Esquema, e foi proposta por Holland (1975). Goldberg (1989) define esquema como um gabarito (*template*) descrevendo um subconjunto de sequências (*strings*) dentro da população, com similaridades em alguma(s) posição(s) da sequência.

Utilizando a codificação binária, um esquema pode ser representado por uma sequência de caracteres no alfabeto $\{0, 1, *\}$. O símbolo “*” significa "não importa", isto é, que os indivíduos que correspondem a um esquema diferem exatamente nas posições onde encontra-se este símbolo. A tabela 2.1 apresenta exemplos de esquemas e os indivíduos representados pelos mesmos.

Tabela 2.1 – Exemplos de esquemas

Esquema	Indivíduos que representa
1*	10, 11
1*0*1	10001, 10011, 11001, 11011
**0	000, 010, 100, 110

Fonte: Linden (2008)

Conforme Linden (2008), o número de esquemas presentes em um determinado indivíduo é dependente do comprimento da sequência (número de caracteres) e do número de opções presentes no alfabeto de codificação. Se uma sequência tem tamanho l e o alfabeto de esquemas contém q símbolos, então o número de esquemas existente na população é igual a q^l . Por exemplo, para uma sequência de comprimento 2, considerando o alfabeto $\{0, 1, *\}$, o número de esquemas possíveis é $3^2 = 9$ esquemas, que são os seguintes: 00, 01, 10, 11, 1*, 0*, *1, *0, **.

O mesmo autor afirma ainda que um esquema tem duas características importantes: sua ordem e seu tamanho. A ordem de um esquema, denotada por $O(H)$, corresponde ao número de posições neste esquema diferentes de “*”, e o tamanho do esquema, representado por $\delta(H)$, se refere ao número de pontos de corte entre a primeira e a última posições

diferentes de “*” dentro do esquema. A tabela 2.2 apresenta exemplos para melhor entendimento.

Tabela 2.2 – Exemplos de ordem e tamanho de esquemas

Esquema	Ordem	Tamanho
*****1***	1	0
1*****0	2	7
11*0	3	5
101010	6	5

Fonte: Linden (2008)

A hipótese fundamental feita pelo AG é que indivíduos com alto grau de aptidão são portadores de bons esquemas, e que esses esquemas podem ser utilizados na construção de indivíduos com aptidões ainda mais altas. O AG constrói, portanto, uma nova geração por meio da exploração das informações contidas nos blocos de construção dos indivíduos da geração corrente (MAZZUCCO JR., 1999).

Os esquemas contêm as características positivas e negativas que podem levar a uma boa ou má avaliação, e o AG tenta propagar bons esquemas por toda a população durante sua execução. Os mecanismos de seleção fazem com que os melhores esquemas acabem reproduzindo mais e permanecendo mais tempo na população. Isto quer dizer que o importante não é o indivíduo, e sim o esquema. Pode ser que o indivíduo morra, mas o esquema que o torna bom tende a proliferar e continuar na população (LINDEN, 2008).

O teorema fundamental dos AGs (ou teorema dos esquemas), enunciado por Holland (1975), mostra que a potencialidade do AG consiste na sua habilidade de processar esquemas. Esse mecanismo é responsável por uma importante característica dos AGs: o paralelismo implícito. Ou seja, o AG calcula explicitamente a avaliação de N indivíduos (a população corrente), mas implicitamente ele calcula a avaliação de um número muito maior de esquemas, que são instanciados por cada indivíduo da população. A análise de Holland mostra ainda que, quanto maior for o tamanho do esquema, maior a sua probabilidade de ser destruído pela aplicação do operador de cruzamento e, quanto maior a ordem do esquema, maiores as chances deste ser corrompido pelo operador de mutação (LINDEN, 2008; MAZZUCCO JR., 1999).

Matematicamente, o teorema fundamental dos AGs é definido por Goldberg (1989)⁴ na equação (17):

$$m(H, g + 1) \geq m(H, t) \frac{f(H)}{f'} \left[1 - p_c \frac{\delta(H)}{l - 1} - O(H)p_m \right] \quad (17)$$

onde:

$m(H, g)$ é o número esperado de instâncias do esquema H na geração g ;

$f(H)$ é o valor médio de aptidão do esquema H na geração g ;

f' é o valor médio de aptidão da população na geração g ;

p_c é a probabilidade de cruzamento;

p_m é a probabilidade de mutação;

$\delta(H)$ é o comprimento do esquema H ;

$O(H)$ é a ordem do esquema H ; e

l é o número de caracteres da sequência.

Conceitualmente, o teorema pode ser definido da seguinte forma (LINDEN, 2008, p. 109): "o AG tende a preservar com o decorrer do tempo aqueles esquemas com maior avaliação média e com menores ordem e tamanho, combinando-os como blocos de montar de forma a buscar a melhor solução".

2.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou os fundamentos teóricos que embasaram a metodologia proposta e a implementação da otimização do processo de fresamento de topo esférico de planos inclinados. Com base no referencial apresentado, pôde-se verificar que esse processo de usinagem apresenta mecanismos de formação da superfície complexos, que sofrem a influência de inúmeros fatores, em especial dos parâmetros e das estratégias de corte.

Devido às relações complexas e não lineares entre as variáveis, a otimização de parâmetros do processo exige o emprego de métodos não determinísticos de otimização, entre os quais se encontram os AGs. Conforme pôde ser verificado, os AGs são bastante empregados em problemas de otimização de processos de usinagem. Entretanto, o alcance de bons resultados depende de uma adequada representação do problema e de suas

⁴ Na obra de Goldberg (1989) pode ser encontrado o desenvolvimento matemático para a obtenção da equação.

peculiaridades, por meio da definição da função objetivo e das restrições do processo. Nesse ponto, a modelagem matemática do processo assume um papel fundamental, pois define a representação matemática dos fenômenos físicos que caracterizam o processo. Além disso, a escolha dos parâmetros de configuração também tem grande influência no desempenho do AG, o que torna importante a realização de testes preliminares para a seleção destes elementos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

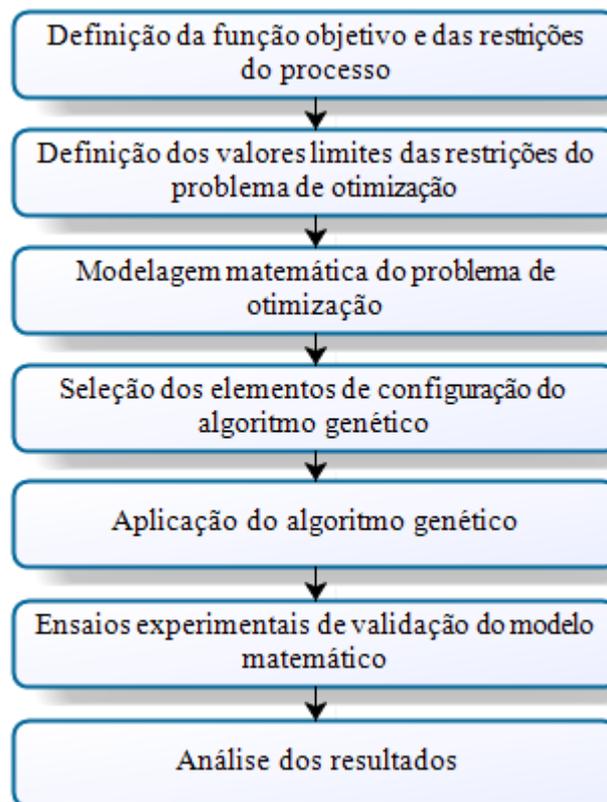
3.1 Introdução

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para a otimização do processo de fresamento de topo esférico, por meio da aplicação da técnica de algoritmos genéticos. As diferentes etapas da metodologia são descritas ao longo do capítulo, desde a definição da função objetivo e das restrições do processo, até a avaliação dos resultados computacionais e experimentais.

3.2 Etapas da metodologia proposta

A metodologia proposta para a otimização do processo de fresamento de topo esférico foi desenvolvida por meio das etapas apresentadas no fluxograma da figura 3.1. As seções subsequentes descrevem cada uma das etapas.

Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da metodologia



Fonte: O autor

3.2.1 Definição da função objetivo e das restrições do processo

Conforme discutido no capítulo 1, o objetivo da otimização selecionado neste trabalho foi a minimização do tempo de usinagem do processo de fresamento de topo esférico. O tempo considerado foi o tempo de corte, ou seja, a totalidade dos tempos de movimentos de corte e/ou de avanço efetivos. Dessa forma, os tempos secundários, como deslocamentos em vazio da ferramenta, não foram considerados.

Dentre as restrições, a otimização de qualquer operação de usinagem exige a avaliação dos valores limites dos parâmetros de processo, os quais devem obedecer a limites inferiores e superiores, determinados em função do tipo e material da ferramenta, tipo e características do material da peça, e limitações da máquina-ferramenta. Os parâmetros utilizados foram a profundidade radial de corte, a velocidade de corte, o avanço e o ângulo entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal à superfície da peça. A profundidade axial de corte foi mantida constante, uma vez que em operações de acabamento geralmente existe um sobremetal definido, para que sejam obtidas as especificações dimensionais da peça.

Com relação às limitações da máquina-ferramenta, a restrição considerada foi a rotação, cujo valor deveria respeitar um limite superior, em função das especificações da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios experimentais. No fresamento de topo esférico, os esforços e a potência de corte em geral não são elevados, por se tratar de uma operação de acabamento. Portanto, esses elementos relativos à máquina-ferramenta não foram considerados como restrições do problema.

Uma das restrições mais importantes em processos de acabamento é a qualidade superficial das peças. Como apresentado na seção 2.2.3.2, a rugosidade média R_a é o parâmetro mais comumente utilizado para descrever a qualidade de uma superfície usinada. Assim, optou-se por este parâmetro de avaliação, utilizando um valor de limite superior.

3.2.2 Definição dos valores limites das restrições do problema de otimização

Os valores das restrições do problema de otimização foram definidos com base na aplicação experimental proposta para a validação dos resultados computacionais. A aplicação prática consistiu na usinagem de planos inclinados dos materiais ABNT P20 e ABNT H13, utilizando fresas de topo esférico de 10 mm de diâmetro e dois gumes. Para cada material foram utilizadas as estratégias de corte vertical ascendente e descendente, e horizontal

ascendente e descendente. Um maior detalhamento dos ensaios experimentais é apresentado na seção 3.2.6.

A partir das condições da aplicação experimental, os valores limites dos parâmetros de corte foram definidos com base no catálogo técnico do fabricante das ferramentas. Embora os catálogos não forneçam as condições ótimas para cada processo, constituem um bom referencial, a partir do qual podem ser determinados os valores limites para a otimização do processo. Assim, com base nos valores ou faixas indicados pelo catálogo, foram determinados os limites inferiores e superiores para os parâmetros de corte, e os mesmos são apresentados na tabela 3.1. O valor da profundidade axial de corte (a_p), o qual foi mantido constante, foi definido em 0,2 mm.

Tabela 3.1 – Valores limites dos parâmetros de corte

Parâmetro	P20		H13	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
Profundidade radial de corte a_e [mm]	0,05	0,25	0,05	0,25
Avanço por gume f_z [mm]	0,05	0,15	0,05	0,15
Velocidade de corte v_c [m/min]	150	300	50	200
Ângulo de inclinação θ [°]	5	85	5	85

Fonte: O autor (Baseado em Sandvik Coromant, 2012)

Com base nas especificações da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios, que apresenta rotação máxima do *spindle* de 15.000 rpm, foi definido o valor de 12.000 rpm como limite superior da restrição de rotação do problema de otimização, de forma a não utilizar a máquina-ferramenta em seu limite máximo, visto que esse é o procedimento comumente adotado nas indústrias. Esta estratégia também teve por objetivo evitar uma maior possibilidade de ocorrência de vibrações, que existiria com a utilização da máquina em sua rotação limite.

Para a definição do limite superior da rugosidade média R_a , foram utilizados os valores apresentados por Baptista e Simões (2000), quadro 2.2, seção 2.2.3.2. De acordo com os autores, o valor de 1 μm constitui uma especificação geralmente utilizada em processos de acabamento. Assim, este foi o valor utilizado como limite superior da restrição da rugosidade média.

3.2.3 Modelagem matemática do problema de otimização

Com a definição dos valores das restrições e seguindo a estrutura geral apresentada na seção 2.3.1, a modelagem matemática do problema de otimização analisado pode ser apresentada na forma a seguir:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar} && t_c(a_e, f_z, v_c, \theta, a_p, A, R, z) \\
 &\text{Sujeito a:} && LI_{ae} \leq a_e \leq LS_{ae} \\
 &&& LI_{fz} \leq f_z \leq LS_{fz} \\
 &&& LI_{vc} \leq v_c \leq LS_{vc} \\
 &&& LI_{\theta} \leq \theta \leq LS_{\theta} \\
 &&& n \leq 12.000 \text{ rpm} \\
 &&& R_a \leq 1 \mu\text{m} \\
 &&& a_p = 0,2 \text{ mm} \\
 &&& A = 400 \text{ mm}^2 \\
 &&& R = 5 \text{ mm} \\
 &&& z = 2 \\
 &&& a_e, f_z, v_c, n, R_a > 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

onde:

t_c é o tempo de corte [min];

a_e é a profundidade radial de corte [mm];

f_z é o avanço por gume [mm];

v_c é a velocidade de corte [m/min];

θ é o ângulo entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal à superfície da peça [rad];

a_p é a profundidade axial de corte [mm];

A é a área da superfície usinada [mm²];

R é o raio da ferramenta [mm];

z é o número de gumes da ferramenta;

LI_i é o valor limite inferior do parâmetro i ;

LS_i é o valor limite superior do parâmetro i ;

n é a rotação da ferramenta [rpm]; e

R_a é a rugosidade média [μm].

O valor da função objetivo, que corresponde ao tempo de corte do processo, é calculado a partir da equação (7) (seção 2.2.4). Para o cálculo do diâmetro efetivo, necessário ao cálculo do tempo de corte, são utilizadas as equações (5) ou (6) (seção 2.2.4). A equação (5) é utilizada para as estratégias de corte ascendentes e a equação (6) para as estratégias descendentes.

Para a obtenção dos valores da restrição de rotação é utilizada a equação (1) (seção 2.2.4), levando em consideração que o valor do diâmetro a ser empregado é o diâmetro efetivo. A equação (16) (seção 2.2.5.4) é utilizada para o cálculo da rugosidade média R_a .

Como valores constantes têm-se, além da profundidade axial de corte, o valor da área da superfície usinada, o raio da ferramenta e o número de gumes da fresa.

As restrições de rotação e rugosidade foram inseridas no modelo matemático de otimização de forma a incluir a penalização da função objetivo (FO), quando da violação das restrições. A penalização é utilizada para que o algoritmo não prossiga a busca em regiões cujas soluções violam as restrições, porém sem deslocá-lo para uma região totalmente diferente do espaço de busca, já que a solução ótima pode estar em cima da própria restrição. Assim, o deslocamento no espaço de busca é proporcional à magnitude do erro da violação. O mesmo procedimento de penalização foi adotado para as duas restrições, e é descrito a seguir.

Se o valor da restrição excede o valor máximo definido, é calculado o erro da violação, utilizando a equação (19):

$$erro = \frac{r_c - r_{m\acute{a}x}}{r_c} \quad (19)$$

onde r_c e $r_{m\acute{a}x}$ são, respectivamente, o valor calculado e o valor máximo definido da restrição.

A partir do valor do erro é calculada a penalização da FO, com a equação (20):

$$penaliza\c{c}o = (1 + erro)C_p \quad (20)$$

onde C_p é uma constante de penalização, cujo valor utilizado neste trabalho foi 10.

Assim, o valor da FO penalizada é dado pela equação (21):

$$FO_{pen} = penaliza\c{c}o(FO) \quad (21)$$

3.2.4 Seleção dos elementos de configuração do algoritmo genético

De acordo com discussão realizada na seção 2.4.5, um mesmo conjunto de valores de parâmetros do algoritmo genético (AG) pode apresentar diferenças significativas de resultados, quando aplicados em diferentes problemas. Portanto, é importante a realização de testes preliminares para determinar os elementos de configuração mais adequados a cada caso. Dessa forma, esta foi a estratégia adotada neste trabalho.

Os testes preliminares foram utilizados para determinar os valores dos parâmetros do AG (tamanho da população, probabilidade de cruzamento e probabilidade de mutação), os tipos de operadores genéticos e os critérios de convergência. Na seleção dos valores das probabilidades de cruzamento e mutação, para que os testes iniciais não fossem baseados em escolhas aleatórias, os mesmos foram definidos a partir das faixas de valores normalmente utilizados na literatura. Estes valores, citados na seção 2.4.5, são:

- a) probabilidade de cruzamento (p_c): 0,60 a 0,95; e
- b) probabilidade de mutação (p_m): 0,01 a 0,05.

A abordagem adotada nos testes preliminares foi baseada no trabalho de Raju et al. (2011). Inicialmente foram utilizados os valores padrão do *software* de otimização, variando-se apenas o tamanho da população. Uma vez identificado o tamanho da população que apresentou o melhor resultado, os testes seguintes foram realizados com o tamanho de população selecionado, variando-se apenas um dos elementos de configuração do AG, e os demais elementos com seu valor padrão. Essa sequência foi repetida para a definição de todos os elementos de configuração, sempre agregando o valor do elemento definido na etapa anterior.

A partir da realização dos testes preliminares, foram definidos para os parâmetros do AG os valores apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de configuração do AG

Parâmetro	Valor
Tamanho da população N	150
Probabilidade de cruzamento p_c	0,85
Probabilidade de mutação p_m	0,035

Fonte: O autor

Dentre os operadores genéticos, o método de seleção escolhido foi o da roleta, associado com o elitismo de 2 indivíduos, e o tipo de cruzamento selecionado foi o de um ponto. Os critérios de convergência definidos foram o número máximo de gerações e a avaliação da evolução do valor de aptidão. O número máximo de gerações foi definido em 100. E o segundo critério consistiu na comparação da variação média do valor de aptidão, após um número mínimo de gerações, com um valor limite. Se a variação é menor que o limite estipulado, o algoritmo é finalizado. O valor limite utilizado foi 1×10^{-6} , sendo a comparação realizada após 50 gerações.

Quanto à codificação das variáveis, conforme discussão realizada na seção 2.4.3.1, o tipo de codificação utilizada foi a real.

3.2.5 Aplicação do algoritmo genético

Para a implementação do AG, foi utilizado o *toolbox Genetic Algorithm Tool*, presente no *software* Matlab®. A inserção da função objetivo e das restrições das variáveis no *toolbox* é realizada por meio de arquivos do *software* denominados *functions*, que servem como elementos de entrada.

Assim, além dos elementos de configuração do AG, foram utilizados como valores de entrada: os limites dos parâmetros de corte; o limite de rotação da ferramenta; a especificação de qualidade superficial (valor máximo da rugosidade média R_a); a área da superfície usinada (A); o valor do raio da ferramenta (R); e o número de gumes da ferramenta (z). Como elementos de saída do AG foram obtidos os valores otimizados dos parâmetros de corte: profundidade radial de corte (a_e); avanço por gume (f_z); velocidade de corte (v_c); e ângulo entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal à superfície da peça (θ). Além destes, para cada condição otimizada o modelo matemático utilizado no AG forneceu os valores correspondentes de tempo de corte (t_c), rotação (n) e rugosidade média R_a .

De acordo com o equacionamento apresentado na seção 2.2.4, o cálculo do diâmetro efetivo difere para o corte ascendente e descendente, mas não ocorre diferenciação quanto às estratégias vertical e horizontal. Além disso, os limites dos parâmetros de corte são diferentes para os dois materiais utilizados, conforme tabela 3.1. Portanto, o AG foi implementado em quatro configurações diferentes, sendo duas para cada tipo de material, contemplando as condições de corte ascendente e descendente. O quadro 3.1 relaciona as configurações de implementação do AG e as estratégias nas quais os parâmetros de saída foram aplicados.

Quadro 3.1 – Configurações de implementação do algoritmo genético

Configuração	Material	Estratégia de corte	Estratégias de aplicação dos parâmetros de saída do AG
1	P20	ascendente	vertical ascendente
			horizontal ascendente
2		descendente	vertical descendente
			horizontal descendente
3	H13	ascendente	vertical ascendente
			horizontal ascendente
4		descendente	vertical descendente
			horizontal descendente

Fonte: O autor

3.2.6 Ensaios experimentais de validação do modelo matemático

Após a aplicação do AG e a obtenção dos resultados computacionais, foram realizados ensaios experimentais de validação do modelo matemático, onde foram utilizados os valores obtidos no AG dos parâmetros de corte e do ângulo entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal à superfície da peça.

3.2.6.1 Máquina-ferramenta e ferramentas

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem CNC Awea, modelo AF 610, com três eixos, rotação máxima de 15.000 rpm e 16 kW de potência, mostrado na figura 3.2.

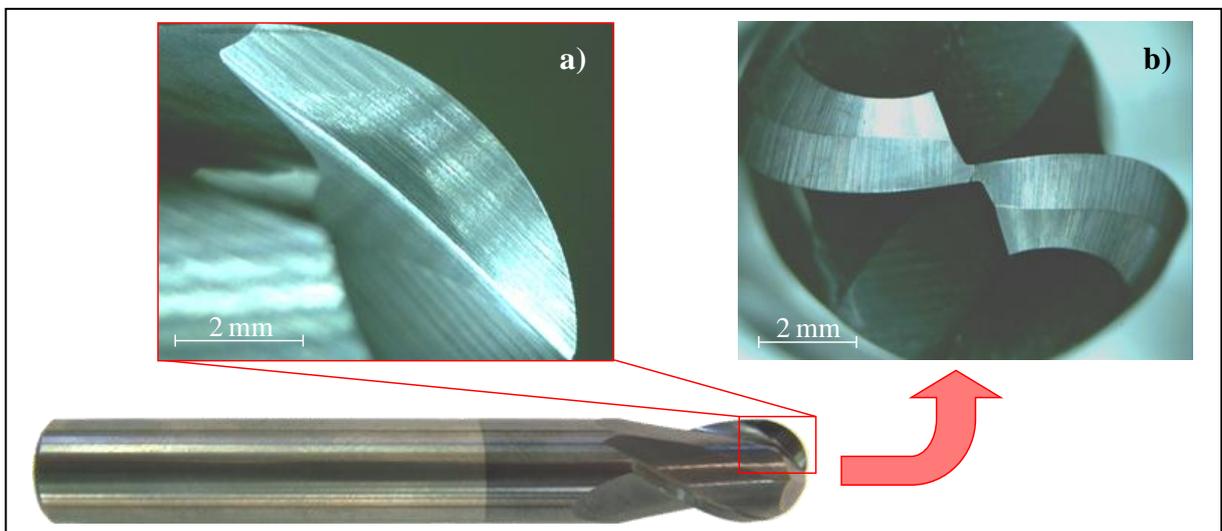
Figura 3.2 – Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios



Fonte: JR Oliveira Indústria Metalúrgica Ltda.

As ferramentas utilizadas foram fresas inteiriças de topo esférico, com dois gumes, diâmetro de 10 mm e revestidas com nitreto de titânio alumínio (TiAlN). As ferramentas são constituídas de metal-duro classe ISO K40. Essa classe de material é formada por grãos ultrafinos ($0,6 \mu\text{m}$) e um percentual de cobalto de 10%, características que propiciam alta dureza e boa tenacidade às ferramentas, tornando-as adequadas à usinagem de materiais endurecidos (KÖNIG e KLOCKE, 2002), como a realizada neste trabalho. A figura 3.3 apresenta imagens ilustrativas da ferramenta utilizada.

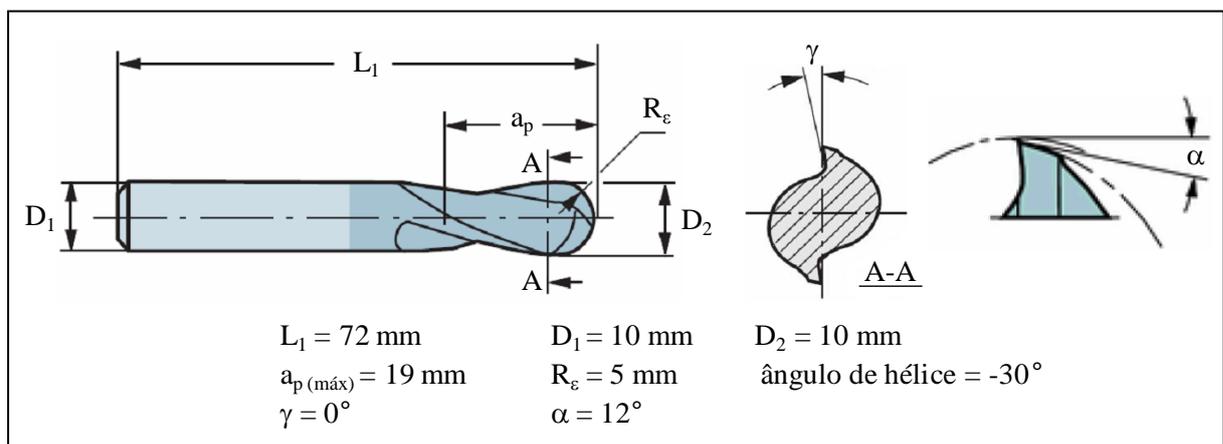
Figura 3.3 – Imagens da fresa de topo esférico empregada nos ensaios: a) vista da face da fresa; b) vista de topo da ferramenta



Fonte: O autor

Na figura 3.4 são apresentadas as principais especificações dimensionais e geométricas das ferramentas utilizadas.

Figura 3.4 – Especificações dimensionais e geométricas das ferramentas utilizadas



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2012)

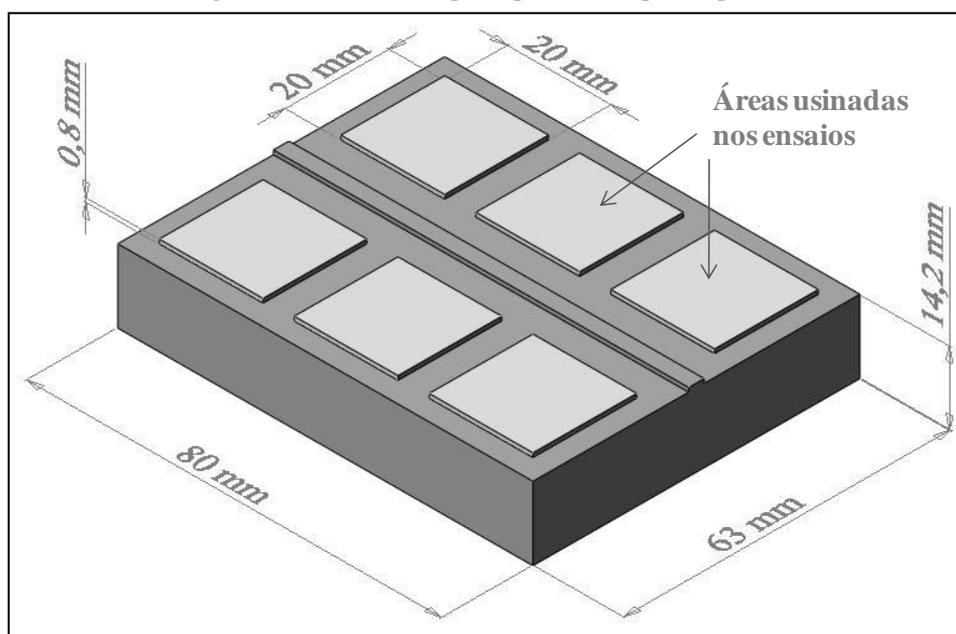
A fixação das ferramentas foi realizada utilizando um cone ISO BT 40, do tipo porta-pinça. No ajuste do balanço da ferramenta, definido pela relação de fixação comprimento livre/diâmetro nominal (l/d) da ferramenta, procurou-se reduzir esta relação, de forma a minimizar a possibilidade de ocorrência de vibrações. Assim, o valor utilizado para o l/d de fixação foi de 3,2.

3.2.6.2 Material usinado

Foram utilizados dois materiais diferentes na confecção dos corpos de prova, o ABNT P20 e o ABNT H13. Essas ligas de aço são comumente utilizadas na fabricação de moldes e matrizes, que constitui uma das principais aplicações do fresamento de acabamento de topo esférico.

Ambos os materiais foram utilizados na condição endurecida, com durezas médias de 37 HRC para o ABNT P20 e 54 HRC para o ABNT H13, conforme relatório de ensaio apresentado no anexo A. Foram confeccionados dois corpos de prova de cada material, nas dimensões 80 x 65 x 15 mm. Em cada corpo de prova foram preparadas seis áreas com dimensões de 20 x 20 mm, onde foram aplicadas as diferentes estratégias e os parâmetros de corte obtidos no AG. A figura 3.5 contém um desenho com as principais dimensões dos corpos de prova utilizados.

Figura 3.5 – Dimensões principais dos corpos de prova

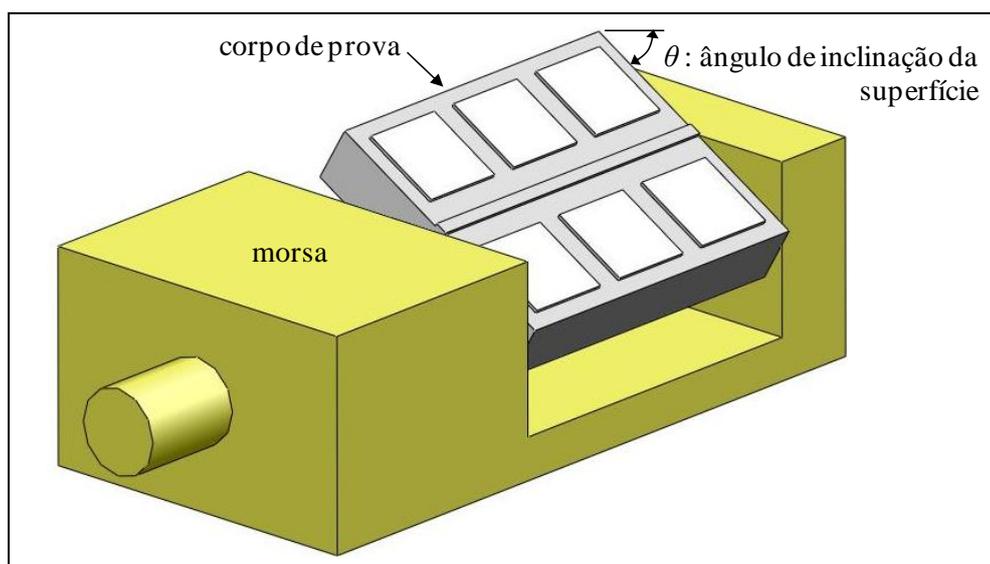


Fonte: O autor

Com o objetivo de obter uma maior precisão no posicionamento dos corpos de prova, foi realizada uma operação de pré-acabamento. Para isso, os corpos de prova foram fixados na morsa com o auxílio de um goniômetro, e foi realizada a operação de pré-acabamento com o ângulo de inclinação desejado. Na operação de pré-acabamento foi utilizada uma fresa de topo esférico, diâmetro de 16 mm, com insertos intercambiáveis de metal-duro revestidos com nitreto de titânio (TiN). Uma vez feito este ajuste, foi realizada o ensaio com as fresas de 10 mm de diâmetro e os parâmetros obtidos no AG.

Para proporcionar uma fixação mais rígida dos corpos de prova, eles foram fixados de forma que apenas três faces ficassem acima da morsa. Portanto, após a usinagem dessas três faces, os corpos de prova foram virados para a usinagem das outras três faces, sendo repetido todo o procedimento de fixação e usinagem de pré-acabamento. A figura 3.6 ilustra a fixação dos corpos de prova.

Figura 3.6 – Representação esquemática da fixação dos corpos de prova



Fonte: O autor

Portanto, a sequência aplicada nos ensaios pode ser resumida da seguinte forma:

- a) posicionamento do corpo de prova, utilizando o goniômetro;
- b) usinagem de pré-acabamento com uma fresa de 16 mm de diâmetro;
- c) ensaio de usinagem de três regiões do corpo de prova, utilizando uma fresa de 10 mm de diâmetro e os parâmetros obtidos no AG;
- d) remoção do corpo de prova da morsa e rotação do mesmo, para a usinagem das três regiões remanescentes; e

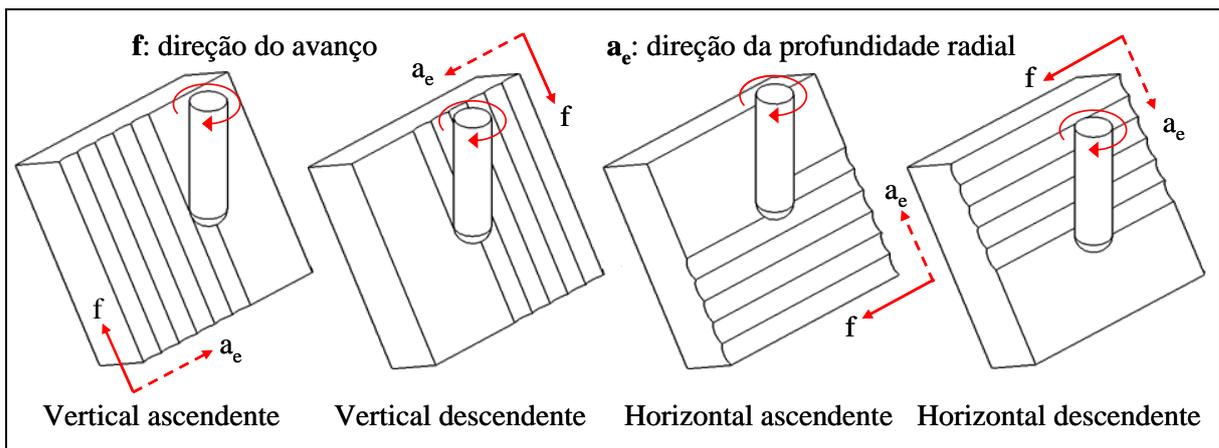
- e) repetição dos itens a, b e c, utilizando na usinagem das três regiões uma nova ferramenta.

3.2.6.3 Estratégias de corte

Conforme discutido na seção 2.2.2, a estratégia de corte concordante tende a propiciar uma menor probabilidade de ocorrência de vibrações e uma melhor qualidade superficial. Portanto, esta foi a opção adotada nos ensaios experimentais.

Com relação à trajetória da ferramenta, foram utilizadas as estratégias também citadas na seção 2.2.2: vertical ascendente; vertical descendente; horizontal ascendente; e horizontal descendente. Na figura 3.7 são apresentadas de forma esquemática as estratégias empregadas nos ensaios experimentais.

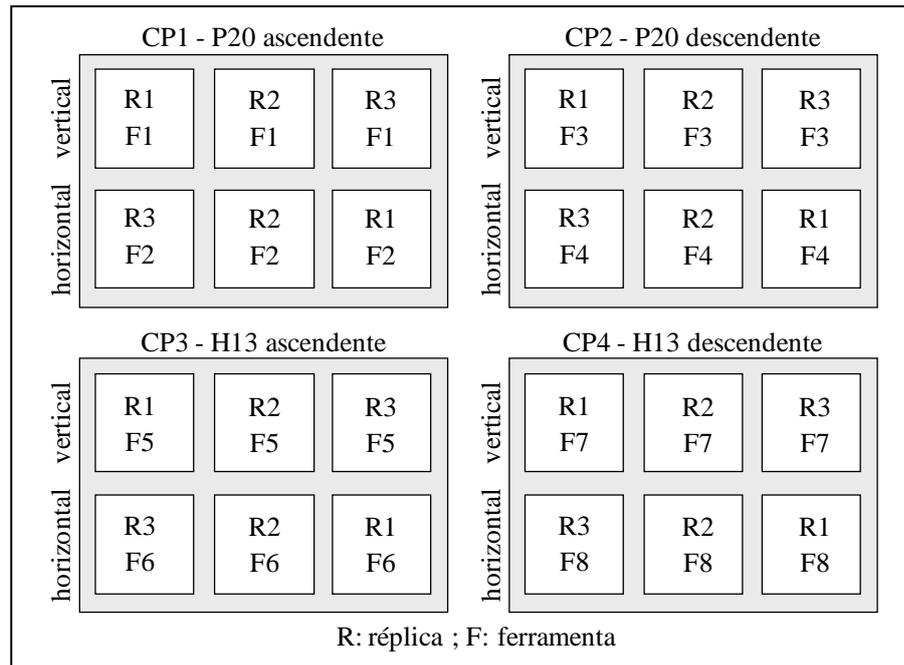
Figura 3.7 – Representação esquemática das estratégias de corte empregadas



Fonte: Adaptado de Nicola (2008)

Para cada um dos materiais, um corpo de prova foi utilizado para as estratégias ascendentes e outro para as estratégias descendentes, sendo que cada condição foi replicada três vezes, totalizando as seis áreas usinadas por bloco. Cada ferramenta foi utilizada em três áreas, configurando duas ferramentas por corpo de prova. A figura 3.8 ilustra a distribuição das diferentes condições de usinagem nos corpos de prova.

Figura 3.8 – Representação esquemática das condições de ensaio empregadas nos corpos de prova



Fonte: O autor

Em cada condição foi utilizada uma ferramenta nova, totalizando as 8 ferramentas empregadas. Testes preliminares foram realizados, onde foi verificado que não houve desgaste significativo nas ferramentas ao longo da realização das réplicas, o que poderia prejudicar a interpretação dos resultados.

Após a fixação de cada ferramenta na máquina, também foi realizada a medição de batimento. O batimento é uma tolerância geométrica que determina o afastamento máximo radial do diâmetro da ferramenta em relação ao seu diâmetro nominal, tendo como referência o eixo de rotação (NBR 6409:1997). O batimento é proveniente de erros no encaixe entre o cone porta-ferramenta e a interface do fuso da máquina, e da excentricidade da haste da ferramenta e seus gumes. Os erros decorrentes da fixação da ferramenta podem ser causados por folgas nessas fixações e impurezas nas regiões de contato entre o cone e o fuso (NICOLA, 2008). Para as medições de batimento foi utilizado um relógio apalpador Mitutoyo, modelo 513-204, com capacidade de 0,8 mm e graduação de 0,01 mm. Os valores de batimento medidos são expressos na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores de batimento das ferramentas

Condição	Batimento [μm]
P20 vertical ascendente	6
P20 horizontal ascendente	5
P20 vertical descendente	9
P20 horizontal descendente	10
H13 vertical ascendente	8
H13 horizontal ascendente	5
H13 vertical descendente	10
H13 horizontal descendente	6

Fonte: O autor

Quanto à condição de lubrificação, os testes foram realizados sem aplicação de nenhum meio lubrificante, ou seja, na condição a seco.

3.2.6.4 Análises de qualidade superficial

As análises de qualidade superficial incluíram medições de rugosidade e a obtenção de imagens de textura. Para as medições de rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-301, mostrado na figura 3.9.

Figura 3.9 – Rugosímetro portátil utilizado nas medições de rugosidade



Fonte: UCS

O rugosímetro possui um apalpador de diamante do tipo estilete (*stylus*), raio de ponta de 5 μm , e resolução de 0,01 μm . O equipamento utiliza o método de detecção por indutância diferencial e uma força de medição de 4 mN.

A norma utilizada para a obtenção dos valores dos parâmetros de rugosidade foi a ISO 4287:1997 e o filtro empregado foi o Gauss. O valor do comprimento de amostragem foi definido com base na ISO 4288:1996⁵, cujos valores orientativos são apresentados na tabela 3.4. De acordo com os valores esperados de rugosidade média R_a de até 1 μm , selecionou-se o comprimento de amostragem de 0,8 mm.

Tabela 3.4 – Comprimentos de amostragem e avaliação de rugosidade

Rugosidade (μm)		Comprimento de amostragem (<i>Cut-off</i>) (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
R_a	R_z		
< 0,02	< 0,1	0,08	0,4
0,02-0,1	0,1-0,5	0,25	1,25
0,1-2	0,5-10	0,8	4,0
2-10	10-50	2,5	12,5
> 10	> 50	8,0	40,0

Fonte: ISO 4288:1996

A medição de rugosidade foi realizada na direção da profundidade radial e na direção do movimento de avanço da ferramenta, e foram obtidos valores de rugosidade para três parâmetros: rugosidade média R_a ; rugosidade média R_z ; e rugosidade máxima R_{z1max} . Foram realizadas três medições em pontos equidistantes em cada direção, desconsiderando a distância de 5 mm no início e no final da faixa. O valor considerado foi a média das medições realizadas.

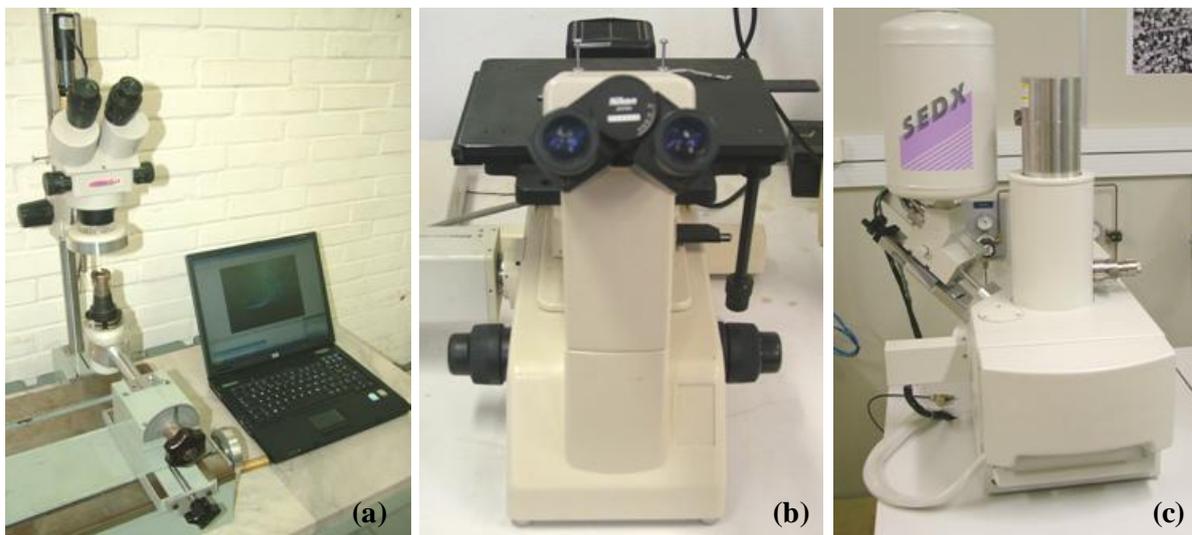
O rugosímetro utilizado também permitiu a obtenção de perfis de rugosidade das superfícies usinadas. A avaliação gráfica das irregularidades superficiais, em conjunto com a análise microscópica da textura, possibilitou uma melhor compreensão dos resultados numéricos de rugosidade.

As imagens de textura das superfícies usinadas foram obtidas a partir de três equipamentos de microscopia, cujas imagens são apresentadas na figura 3.10:

⁵ Existe uma norma brasileira referente aos procedimentos de medição de rugosidade, a NBR ISO 4288 (2008). A opção pela norma internacional se deu pelo fato de ser esta a utilizada pelo rugosímetro empregado neste trabalho.

- a) estereoscópio da marca Entex, modelo TNE-10B;
- b) microscópio óptico Nikon Epiphot 200; e
- c) microscópio eletrônico de varredura (MEV) Shimadzu, modelo SSX-550.

Figura 3.10 – Microscópios utilizados nas análises de textura: a) estereoscópio; b) microscópio óptico; c) MEV



Fonte: UCS

Esses três equipamentos apresentam características complementares, o que permite uma completa análise da formação das superfícies. O estereoscópio possibilita a visualização com aumentos de até 90x, mas apresenta uma melhor definição para aumentos menores, devido à restrição de foco característica deste equipamento. Portanto, com o estereoscópio foram registradas imagens com aumento de 10x. O microscópio óptico possibilita a visualização com aumentos maiores, de até 1000x. Entretanto, assim como o estereoscópio, possui restrições de foco dependendo do aumento utilizado e da variação de altura no perfil da superfície analisada. Com esse equipamento foram capturadas imagens com aumentos de 50x e 100x. Já o microscópio eletrônico de varredura (MEV) possibilita a visualização de imagens com aumentos superiores a 100.000x, sem apresentar as restrições de foco dos dois primeiros equipamentos. Utilizando o MEV, foram registradas imagens de textura com aumento de 200x.

3.2.7 Análise dos resultados

A análise dos resultados computacionais avaliou os resultados dos parâmetros de corte obtidos com a aplicação do AG para as diferentes condições, bem como os valores de tempo

de corte, rotação e rugosidade obtidos no modelo matemático referentes a cada solução obtida no AG.

Para a validação dos resultados de tempo de corte, foi realizada a programação do processo utilizando o *software* de CAM (*computer aided manufacturing*) NX Unigraphics, onde foram utilizados os valores dos parâmetros obtidos no AG. Assim, os tempos de corte obtidos pelo modelo matemático utilizado no AG foram comparados com os tempos calculados pelo *software* de CAM.

Com relação aos resultados de qualidade superficial, foram feitas avaliações de rugosidade e textura. Na análise dos resultados de rugosidade, os valores obtidos no modelo matemático foram comparados com os valores medidos nos corpos de prova usinados com os parâmetros obtidos no AG. As análises de textura serviram de suporte a uma melhor compreensão destes resultados.

As imagens de textura também permitiram uma avaliação da formação da superfície para as diferentes condições e estratégias empregadas, de forma a analisar o efeito dos parâmetros e das estratégias na geração das superfícies e na qualidade superficial resultante. Dessa forma, foi possibilitada uma avaliação global dos resultados obtidos e uma melhor compreensão da formação das superfícies fresadas com ferramentas de topo esférico.

4 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta de otimização do processo de fresamento de topo esférico. Inicialmente são apresentados e analisados os resultados da aplicação do algoritmo genético. Posteriormente, estes resultados são comparados com os resultados dos ensaios experimentais de validação. Por fim, é apresentada uma avaliação da formação das superfícies nas diferentes condições e estratégias de corte empregadas.

4.2 Resultados da aplicação do algoritmo genético

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na aplicação do algoritmo genético (AG). Primeiramente, são explicitados e discutidos os valores dos parâmetros resultantes da aplicação do AG, bem como do tempo de corte e das restrições relativas a cada solução obtida pelo algoritmo. Também são apresentadas as curvas de convergência do AG, para as diferentes condições implementadas.

4.2.1 Soluções obtidas pelo algoritmo genético

Conforme discutido na seção 3.2.5 e esquematizado no quadro 3.1, o AG foi implementado em quatro configurações diferentes. Para cada configuração o algoritmo foi executado três vezes, visto que o método gera de forma aleatória a população inicial, e aqui é apresentada a melhor solução obtida (menor tempo de corte). No apêndice A são apresentados os resultados de todas as execuções realizadas.

A tabela 4.1 apresenta os resultados ótimos da aplicação do AG para as diferentes configurações implementadas. Analisando-se os valores dos parâmetros de corte obtidos pelo algoritmo, é possível verificar que, para as quatro configurações aplicadas, os valores dos parâmetros profundidade radial de corte (a_e) e avanço por gume (f_z) correspondem ao limite superior empregado no modelo matemático (tabela 3.1, seção 3.2.2). Com relação à velocidade de corte (v_c), os valores obtidos também são próximos do limite superior empregado, com exceção da condição P20 descendente. Já para os resultados do ângulo de

inclinação (θ), não se verifica nenhuma tendência clara de comportamento nos valores encontrados.

Tabela 4.1 – Resultados da aplicação do AG

Parâmetro	P20 ascendente	P20 descendente	H13 ascendente	H13 descendente
Tempo de corte t_c [min]	0,447	0,446	0,445	0,449
Profundidade radial de corte a_e [mm]	0,25	0,25	0,25	0,25
Avanço por gume f_z [mm]	0,15	0,15	0,15	0,15
Velocidade de corte v_c [m/min]	299	264	192	198
Ângulo de inclinação θ [°]	36,3	44,5	14,4	31,8

Fonte: O autor

O principal ponto a ser destacado nos resultados do AG é referente aos tempos de corte ótimos obtidos para cada condição. Como pode ser verificado, os tempos são praticamente idênticos para as quatro condições, uma vez que a diferença entre o menor e o maior valor é de 0,004 min (0,24 s). Esse resultado é interessante, uma vez que os limites dos parâmetros de corte empregados no modelo matemático apresentam valores de velocidade de corte mais elevados para o material ABNT P20, devido a sua melhor usinabilidade em relação ao ABNT H13. Portanto, esperava-se que os tempos resultantes para o P20 fossem inferiores aos do H13. Entretanto, observa-se que, apesar das velocidades de corte resultantes serem mais elevadas para o P20, isso não implicou em menores tempos de corte.

Conforme o equacionamento apresentado na seção 2.2.4, o tempo de corte é dependente da velocidade de avanço e da rotação empregadas na máquina-ferramenta, e do valor da profundidade radial de corte (a_e), o qual determina o número de passes necessários para usinar a peça. Uma vez que os resultados do AG apontam os mesmos valores de avanço por gume (f_z) e profundidade radial de corte para as quatro condições aplicadas, não há diferenças na influência do valor de f_z na velocidade de avanço, nem diferenças no número de passes, devido ao mesmo valor de a_e . Logo, possíveis diferenças seriam devidas à variação da rotação, em função da velocidade de corte (v_c) e do diâmetro efetivo. A tabela 4.2 contém os valores de rotação e diâmetro efetivo referentes à solução obtida no AG para cada uma das condições aplicadas.

Tabela 4.2 – Valores de diâmetro efetivo e rotação relativos às soluções obtidas no AG

Condição	Rotação [rpm]	Diâmetro efetivo [mm]
P20 ascendente	11.985	7,94
P20 descendente	11.989	7,01
H13 ascendente	11.997	5,10
H13 descendente	11.970	5,27

Fonte: O autor

Como pode ser observado, os valores de rotação das diferentes condições são próximos entre si, e todos próximos do limite superior de rotação empregado no modelo matemático aplicado no AG, de 12.000 rpm⁶. Portanto, mesmo com limites de v_c diferentes para o P20 e o H13, o AG buscou combinações de velocidade de corte e ângulo de inclinação (o qual tem influência sobre o valor do diâmetro efetivo), de forma a obter os maiores valores de rotação possíveis, sem violar a restrição de rugosidade média. Como para todas as condições o algoritmo obteve combinações que resultaram em rotações próximas do limite superior, explica-se a semelhança nos resultados de tempo de corte.

A análise dos valores de diâmetro efetivo aponta maiores valores para as condições do material P20 e menores valores para o H13. Esse resultado é concordante com a análise realizada para os tempos de corte, uma vez que as velocidades de corte resultantes para o P20 também são maiores, e o valor da rotação é diretamente proporcional à velocidade de corte e inversamente proporcional ao diâmetro efetivo.

Na tabela 4.3 são apresentados os valores de rugosidade média teórica calculados pelo modelo matemático, relativos à solução obtida para cada condição de aplicação do AG.

Tabela 4.3 – Valores de rugosidade média teórica relativos às soluções obtidas no AG

Condição	Rugosidade média teórica [μm]
P20 ascendente	0,56
P20 descendente	0,69
H13 ascendente	0,42
H13 descendente	0,51

Fonte: O autor

⁶ Essa condição foi observada em todas as execuções do AG realizadas, como pode ser observado no apêndice A.

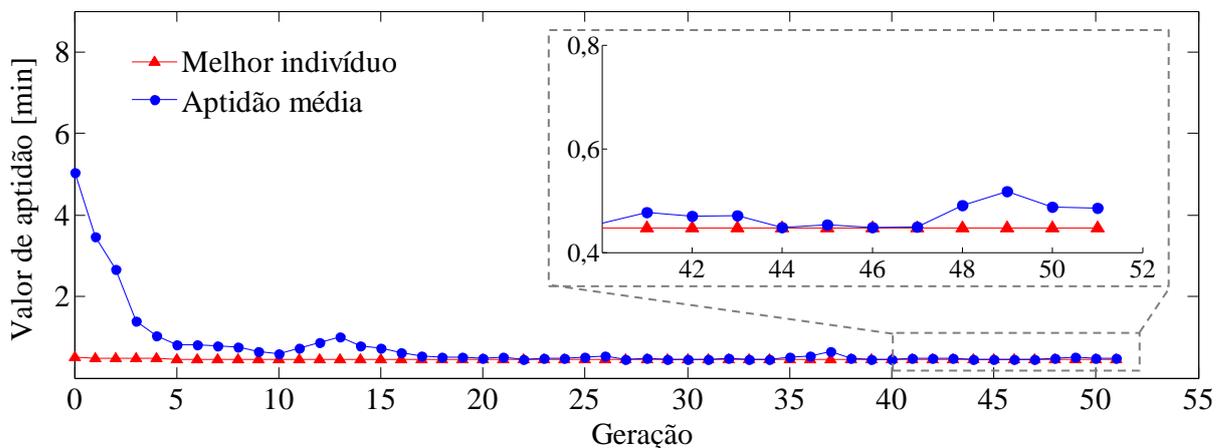
Pode ser observado que, para as quatro condições, o valor obtido para a rugosidade média teórica é significativamente inferior ao limite superior empregado no modelo matemático utilizado no AG, de 1 μm . A condição P20 descendente resultou no maior valor, próximo de 70% do valor utilizado como limite superior, enquanto que na condição H13 ascendente foi obtido o menor resultado, o qual é inferior à metade do valor limite superior. Para as condições P20 ascendente e H13 descendente, foram obtidos valores próximos de 0,50 μm , o qual representa a metade do limite superior empregado.

Na seção 4.3.2 são apresentados os resultados de rugosidade média obtidos nos ensaios experimentais de usinagem, para comparação e validação dos resultados computacionais obtidos pelo modelo matemático utilizado no AG.

4.2.2 Curvas de convergência do algoritmo genético

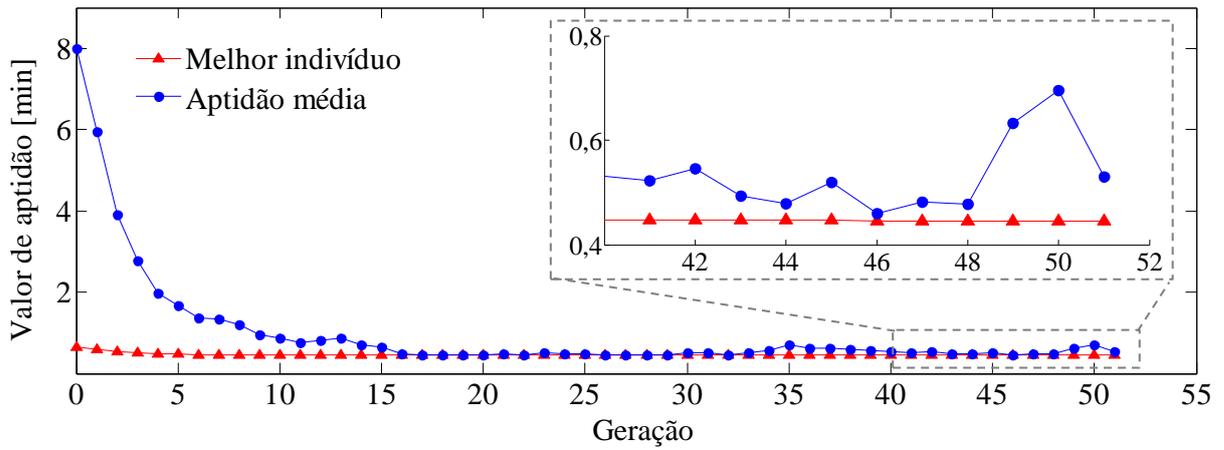
O conjunto de execuções do AG para as diferentes condições implementadas, cujos resultados individuais são explicitados no apêndice A, apresentou comportamentos de convergência semelhantes. Isso pode ser observado nas figuras 4.1 a 4.4, onde são apresentados os gráficos da evolução do valor de aptidão ao longo das gerações para as soluções obtidas nas quatro condições de aplicação do AG. Nos gráficos são mostradas as curvas referentes aos valores de aptidão do melhor indivíduo, e as curvas da aptidão média de cada geração (iteração) do AG.

Figura 4.1 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição P20 ascendente



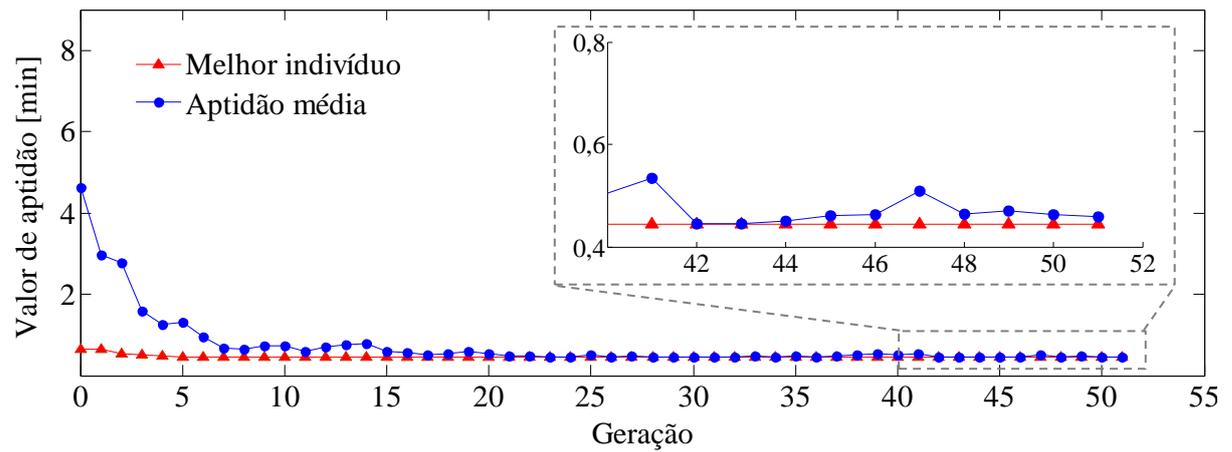
Fonte: O autor

Figura 4.2 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição P20 descendente



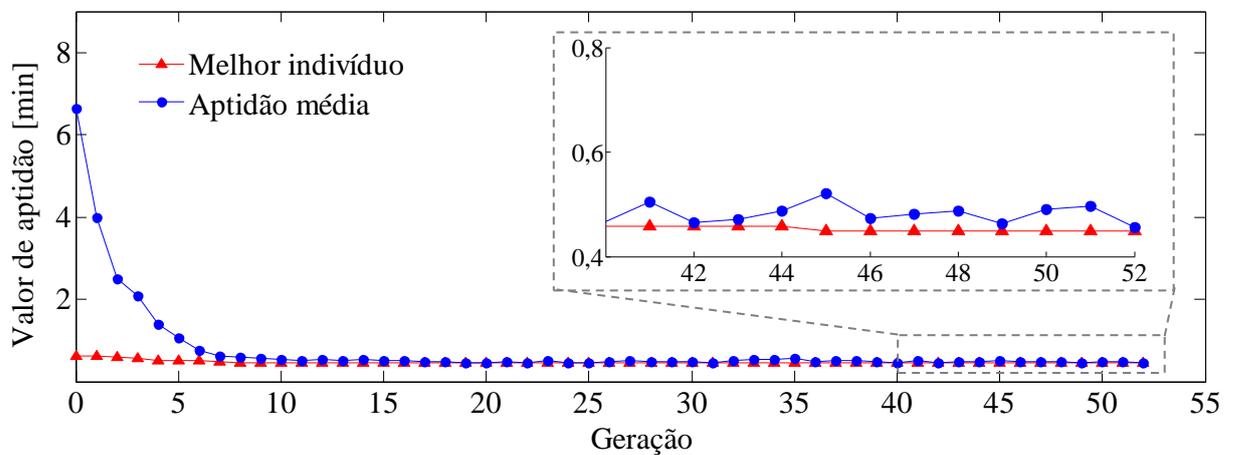
Fonte: O autor

Figura 4.3 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição H13 ascendente



Fonte: O autor

Figura 4.4 – Gráfico da evolução do valor de aptidão para a condição H13 descendente



Fonte: O autor

Na análise dos gráficos, verifica-se que inicialmente há uma diferença considerável entre os valores do melhor indivíduo e da aptidão média da geração, mas com a evolução das gerações ocorre a convergência das curvas. O critério de convergência atingido em todas as execuções do AG realizadas foi a variação da aptidão média inferior ao valor limite definido, havendo variação apenas no número de gerações para este critério ser atingido. Para as duas condições do P20 e para a condição H13 ascendente, a convergência foi atingida após 51 gerações, enquanto que para a condição H13 descendente foram necessárias 52 gerações.

4.3 Resultados dos ensaios experimentais de validação

A partir da realização dos ensaios experimentais, foram obtidos os resultados de tempo de usinagem e rugosidade média R_a , para validação dos resultados computacionais obtidos com o modelo matemático utilizado no AG. Os resultados de textura das superfícies usinadas serviram de suporte à análise dos resultados de validação do modelo matemático. Ainda a partir das imagens de textura, em conjunto com os resultados numéricos e dos perfis de rugosidade, foi possibilitada uma avaliação da formação das superfícies usinadas com diferentes estratégias de usinagem e aplicadas em diferentes materiais.

4.3.1 Validação dos resultados de tempo de usinagem

A análise dos tempos de usinagem obtidos com o modelo matemático aplicado no AG teve o objetivo de validar o equacionamento empregado, em especial do cálculo do diâmetro efetivo, essencial na modelagem da usinagem de planos inclinados. Os valores dos parâmetros de usinagem obtidos no AG foram utilizados na programação com um *software* de CAM, para a comparação entre os tempos obtidos no modelo matemático e os encontrados pelo *software*. É importante ressaltar que os tempos considerados são os tempos ativos, ou seja, os tempos em que ocorrem movimentos efetivos de corte e/ou avanço, desconsiderando os tempos de deslocamento em vazio da ferramenta. Na tabela 4.4 são apresentados os valores para comparação.

Como pode ser observado, a maior diferença encontrada entre os tempos calculados por meio do modelo matemático utilizado no AG e os tempos obtidos a partir do *software* de CAM foi de 1,1%.

Tabela 4.4 – Comparação dos resultados de tempos de usinagem

Condição	Tempo de corte t_c [min]		
	Modelo matemático	Software CAM	Diferença [%]
P20 ascendente	0,447	0,450	0,7
P20 descendente	0,446	0,450	0,9
H13 ascendente	0,445	0,450	1,1
H13 descendente	0,449	0,450	0,2

Fonte: O autor

Esses resultados indicam que o equacionamento utilizado no modelo matemático para o cálculo do tempo de corte é adequado e, portanto, os resultados de tempos obtidos com o AG são confiáveis e condizentes com as condições reais da operação de usinagem.

4.3.2 Validação dos resultados de rugosidade média

Nesta seção são apresentados os resultados de rugosidade média obtidos nas superfícies usinadas, com o objetivo de validar os resultados teóricos de rugosidade obtidos a partir do modelo matemático aplicado no AG. Como o equacionamento utilizado no modelo matemático (seção 2.2.5.4) considera apenas a rugosidade média R_a e a profundidade radial (a_e), a comparação entre as rugosidades teórica e experimental é realizada apenas para este parâmetro de rugosidade e na direção de a_e . Na seção seguinte, onde é discutida a formação das superfícies nas diferentes condições, também são apresentados os resultados para os parâmetros R_z e R_{z1max} , e para as medições realizadas na direção do avanço (f).

Na tabela 4.5 é realizada a comparação entre os valores de rugosidade calculados pelo modelo matemático utilizado no AG e os valores medidos na direção da profundidade radial. Os valores experimentais apresentados correspondem à média de três medições. No apêndice B são apresentados os resultados de todas as medições realizadas, referentes aos três parâmetros de rugosidade mensurados e às duas direções de medição consideradas.

Conforme discutido na seção 3.2.5, os resultados de cada condição implementada no AG são aplicáveis às suas variantes vertical e horizontal. Portanto, os resultados de rugosidade média apresentados na tabela 4.5, referentes ao modelo matemático, são iguais para as duas variantes de cada condição implementada.

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados calculados e medidos de rugosidade média

Condição	Rugosidade média R_a [μm]		
	Modelo matemático	Ensaio experimentais (direção de a_e)	Diferença [%]
P20 vertical ascendente	0,56	0,94	68%
P20 horizontal ascendente	0,56	0,70	24%
P20 vertical descendente	0,69	0,94	36%
P20 horizontal descendente	0,69	0,76	10%
H13 vertical ascendente	0,42	0,69	64%
H13 horizontal ascendente	0,42	0,57	35%
H13 vertical descendente	0,51	0,91	78%
H13 horizontal descendente	0,51	0,93	82%

Fonte: O autor

Uma primeira análise dos resultados aponta diferenças bastante significativas entre os resultados do modelo matemático e os resultados de rugosidade obtidos a partir dos ensaios experimentais. Para todas as condições avaliadas, os valores obtidos a partir dos testes experimentais foram maiores.

Verifica-se também que os resultados experimentais em todas as condições são inferiores ao limite superior definido no modelo matemático, de 1 μm . Ainda assim, os resultados não podem ser considerados satisfatórios, devido às elevadas diferenças entre os resultados computacionais e experimentais.

É interessante observar que o melhor e o pior resultados foram obtidos com a mesma condição, apenas com a diferença do material. A condição P20 horizontal descendente foi a que apresentou a menor diferença (10%), enquanto que o pior resultado foi obtido na mesma condição, para o material H13(82%). Este resultado está em concordância com a análise dos resultados para os dois materiais, onde observa-se que as maiores diferenças ocorreram com o H13. Avaliando-se as diferentes estratégias, verifica-se que, para as estratégias ascendentes, as diferenças encontradas são relativamente semelhantes para os dois materiais. Já para as estratégias descendentes, as diferenças são significativamente superiores para o material H13, constituindo as duas condições com piores resultados entre todas as avaliadas.

Como parte dos estudos realizados a partir dos experimentos de validação, também foi realizada uma análise das superfícies usinadas. Além da avaliação da formação das superfícies para as diferentes condições de usinagem, foram investigadas evidências para procurar

explicar as discrepâncias observadas entre os resultados de qualidade superficial obtidos no modelo matemático e nas superfícies usinadas. Os resultados são discutidos na próxima seção.

4.3.3 Análise das superfícies usinadas

Na análise da formação das superfícies usinadas, foram avaliados resultados numéricos e dos perfis de rugosidade, bem como imagens de textura das superfícies, obtidas por microscopia.

4.3.3.1 Resultados numéricos de rugosidade

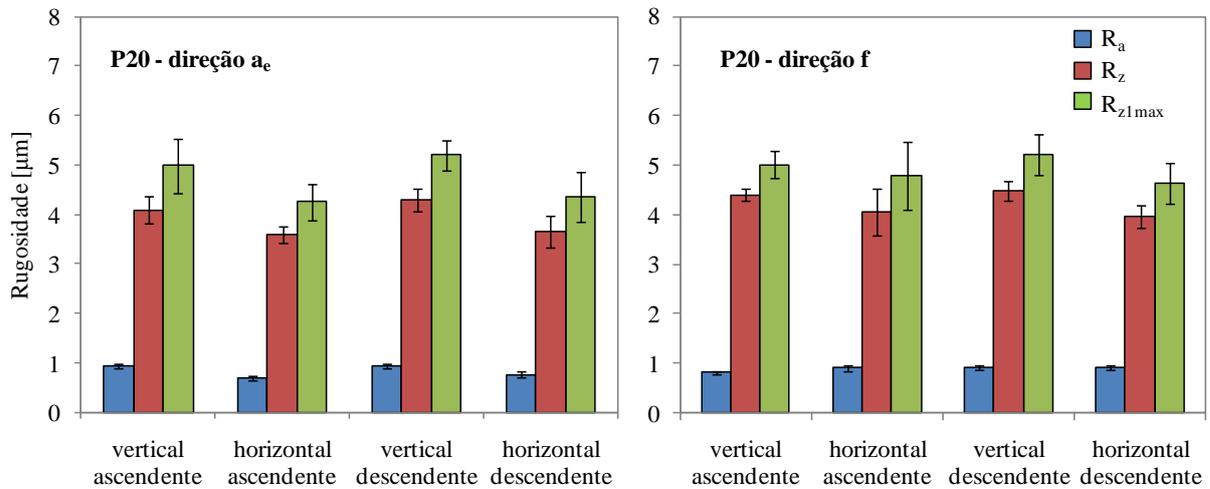
Nesta seção são apresentados os valores médios de rugosidade referentes a cada condição, bem como as barras de erro relativas ao desvio padrão. O apêndice B contém os resultados individuais de todas as medições realizadas. Ainda para os resultados de rugosidade, também foram calculados a incerteza de medição e o nível de confiança amostral. Ambos os indicadores estatísticos foram calculados com base nos resultados de rugosidade média R_a , uma vez que foi este o parâmetro selecionado para comparação com os resultados do modelo matemático.

A incerteza de medição dos resultados de rugosidade foi calculada com base na metodologia GUM (*Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*), descrita no documento JCGM 100:2008. Para um nível de confiança de 95%, foram obtidos valores de incerteza expandida entre 3,8% e 8,2%. O apêndice C contém um breve descritivo da metodologia empregada e os valores de incerteza para cada uma das condições experimentais.

Utilizando-se os resultados de incerteza expandida, foi calculado o nível de confiança amostral, onde foram obtidos valores entre 98,7% e 99,8%. No apêndice D é apresentado o equacionamento utilizado no cálculo dos níveis de confiança, bem como os valores obtidos para cada uma das condições experimentais.

Na figura 4.5 são apresentados os gráficos dos resultados de rugosidade mensurados nos corpos de prova confeccionados com o material ABNT P20, e usinados com as quatro estratégias de corte empregadas nos ensaios experimentais. Os gráficos contêm os resultados para os parâmetros R_a , R_z e R_{z1max} , medidos na direção da profundidade radial de corte (a_e) e na direção do avanço (f).

Figura 4.5 – Gráficos dos resultados de rugosidade dos corpos de prova de P20



Fonte: O autor

Analisando-se apenas os valores medidos na direção de a_e , verifica-se que os resultados foram similares para as duas estratégias verticais, bem como para as duas horizontais, sendo que os valores de rugosidade são maiores para as estratégias verticais. Já para os resultados obtidos na direção de f , não é observado o mesmo comportamento. Considerando a variação estatística dos resultados, pode ser verificado que os resultados são similares para as quatro estratégias empregadas.

Na comparação entre os resultados medidos nas direções de a_e e de f , verifica-se que não há diferenças significativas. Considerando-se as mesmas estratégias para as duas direções de medição e a dispersão estatística dos dados, observa-se que os resultados obtidos são próximos. Esse resultado pode ser considerado inesperado, uma vez que o valor de a_e empregado em todas as condições foi de 0,25 mm, enquanto que o valor de f_z utilizado, também para todas as condições, foi de 0,15 mm. Portanto, esperava-se que os resultados de rugosidade fossem maiores na direção de a_e . Conforme Chen et al. (2005), em processos convencionais de fresamento, os valores de profundidade radial de corte em geral são superiores aos de avanço por gume, resultando na formação de maiores cristas e, conseqüentemente, maiores valores de rugosidade na direção de a_e . Dessa forma, os resultados obtidos indicam a possibilidade de terem ocorrido instabilidades dinâmicas na usinagem dos corpos de prova. Esta hipótese poderia explicar as significativas diferenças encontradas entre os valores de rugosidade média R_a obtidos a partir do modelo matemático aplicado no algoritmo genético e dos ensaios experimentais.

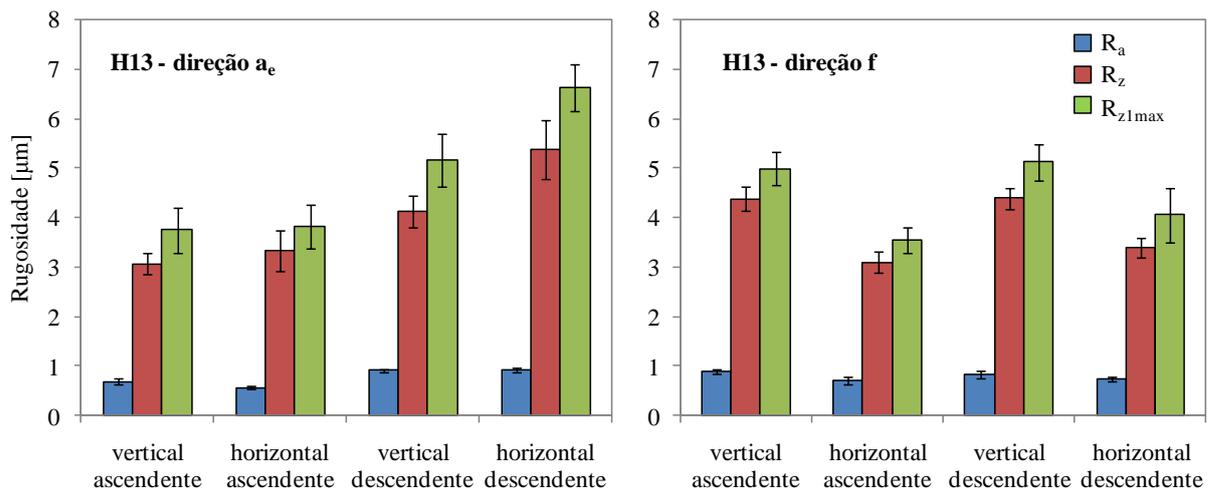
Outro elemento indicativo da ocorrência de instabilidades na formação das superfícies é a diferença significativa observada, na maioria das condições analisadas, entre os resultados

dos parâmetros R_z e R_{z1max} . Conforme Faccio (2002), a análise conjunta dos parâmetros R_z e R_{z1max} fornece uma ideia mais clara para a monitoração da variação do acabamento superficial em um processo de fabricação. Valores similares destes parâmetros indicam um acabamento superficial consistente, enquanto que diferenças significativas destes indicam defeitos superficiais e irregularidades na formação da superfície.

Segundo Polli (2005), existe uma relação entre as vibrações durante o processo e o acabamento da superfície usinada. Em um trabalho isento de vibrações, o movimento relativo entre a ferramenta e a peça é dado pela combinação do avanço e da velocidade. Porém, quando ocorrem vibrações da ferramenta, é imposta uma componente na direção normal ao avanço, o que confere à peça usinada uma piora na qualidade superficial, do ponto de vista de rugosidade. Ainda segundo o autor, a qualidade superficial pode ser utilizada como uma medida relativa da estabilidade do processo. Assim, um processo estável pode ser caracterizado relativamente por uma boa qualidade da superfície, enquanto que um instável é associado a um acabamento de superfície deteriorado e irregular.

Os resultados de rugosidade obtidos a partir das medições dos corpos de prova confeccionados com o material ABNT H13 são apresentados na figura 4.6. Os resultados são referentes aos três parâmetros de rugosidade mensurados, às duas direções de medição consideradas, e às quatro estratégias de usinagem empregadas.

Figura 4.6 – Gráfico dos resultados de rugosidade dos corpos de prova de H13



Fonte: O autor

Na análise dos resultados obtidos na direção de a_e , verifica-se que os resultados das duas estratégias ascendentes são estatisticamente similares, enquanto que as estratégias descendentes apresentaram maiores valores de rugosidade, sendo que a estratégia horizontal

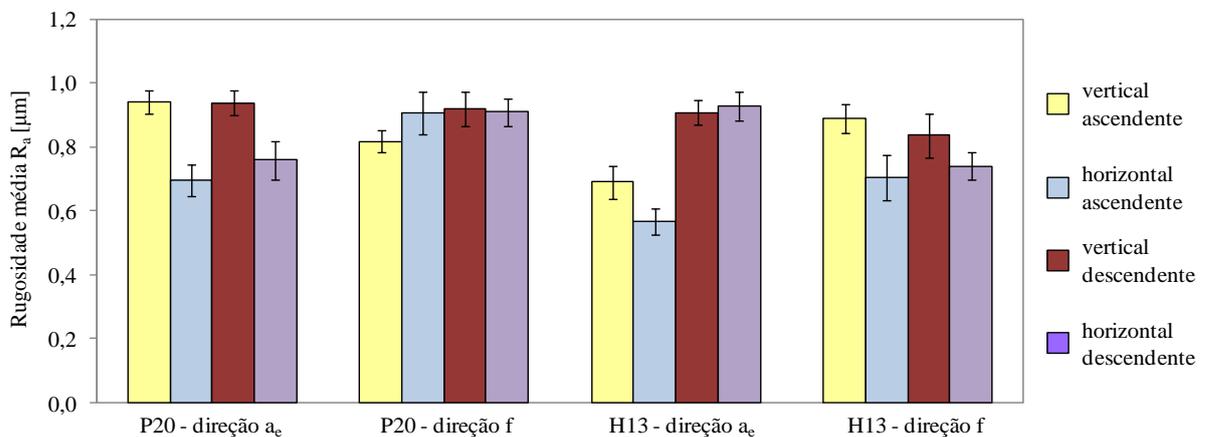
descendente apresentou os maiores valores dentre as quatro estratégias. Na direção de f , os resultados são estatisticamente similares para as duas estratégias verticais e para as duas estratégias horizontais, com os maiores valores sendo observados nas estratégias verticais.

Diferentemente do que foi observado no material P20, os resultados de rugosidade para o material H13 apresentam diferenças entre as direções de medição consideradas. Para a estratégia vertical ascendente, os maiores resultados foram medidos na direção de f . Nas estratégias horizontal ascendente e vertical descendente, considerando a variação estatística dos dados, verifica-se que os resultados são próximos. Já para a estratégia horizontal descendente, os maiores resultados foram obtidos na direção de a_e . Como pode ser observado, apenas para esta última estratégia foi verificado o esperado resultado de maiores valores de rugosidade na direção de a_e .

Portanto, assim como foi observado para o material P20, os resultados do material H13 não apresentaram maiores valores de rugosidade na direção de a_e , com exceção da estratégia horizontal descendente. Outro ponto semelhante também observado nos resultados do material H13 é a significativa diferença verificada, na maioria das condições analisadas, entre os resultados dos parâmetros R_z e R_{z1max} . Dessa forma, observa-se que também nos resultados deste material podem ser apontadas evidências que indicam a ocorrência de instabilidades dinâmicas durante o corte.

Na figura 4.7 é realizada a comparação entre os resultados de rugosidade média R_a obtidos para os dois materiais, considerando as diferentes estratégias de usinagem e as duas direções de medição da rugosidade. Nesse gráfico é possível fazer uma análise mais criteriosa dos resultados deste parâmetro de rugosidade, uma vez que as diferenças entre os mesmos são mais difíceis de serem observadas nos gráficos anteriores, em função do fator de escala.

Figura 4.7 – Comparação dos resultados de rugosidade média R_a dos dois materiais



Fonte: O autor

A análise dos resultados para os dois materiais aponta algumas diferenças, com uma pequena tendência de menores valores de rugosidade para o material H13. Este material apresentou os menores valores de rugosidade para as duas estratégias ascendentes, sendo ambos na direção de a_e . Para a estratégia vertical descendente, os resultados são estatisticamente iguais para as quatro condições analisadas. E na estratégia horizontal descendente, os menores valores de rugosidade foram obtidos na direção de a_e do material P20, e na direção de f do material H13.

Considerando todas as condições analisadas, verifica-se que, para ambos os materiais, os menores valores de rugosidade foram obtidos na estratégia horizontal ascendente, direção de a_e ⁷. Confrontando-se este dado com os resultados obtidos nas referências listadas no quadro 2.1 (seção 2.2.2), verifica-se que a mesma estratégia apresentou os melhores resultados no trabalho de Kang et al. (2001), na usinagem de um aço com dureza de 28 HRc, utilizando ferramentas com 10 mm de diâmetro, o mesmo das ferramentas utilizadas no presente trabalho. No trabalho dos referidos autores, os melhores resultados foram obtidos com ângulos de inclinação⁸ de 15°. No presente trabalho, o ângulo de inclinação empregado para a estratégia horizontal ascendente é próximo para o material H13, onde foi utilizado o valor de 14,4°, e superior para o material P20, onde foi empregado um ângulo de 36,3°.

Uma análise global dos resultados de rugosidade aponta que, embora tenham sido observadas algumas diferenças entre os diferentes materiais e estratégias utilizados, não foram observadas tendências claras de comportamento. Os resultados mais relevantes a serem destacados são o fato de os melhores resultados terem sido obtidos com a mesma estratégia para os dois materiais, como foi discutido no parágrafo anterior, e a indicação de instabilidade dinâmica na usinagem dos corpos de prova, em função da não observância dos esperados menores resultados de rugosidade na direção do avanço, bem como das significativas diferenças entre os resultados dos parâmetros R_z e R_{z1max} .

4.3.3.2 Textura e perfis de rugosidade

A análise da textura das superfícies usinadas, em conjunto com os perfis de rugosidade, foi utilizada com o objetivo de obter um maior detalhamento da formação das superfícies, bem como para a identificação de problemas que possam ter ocorrido durante a

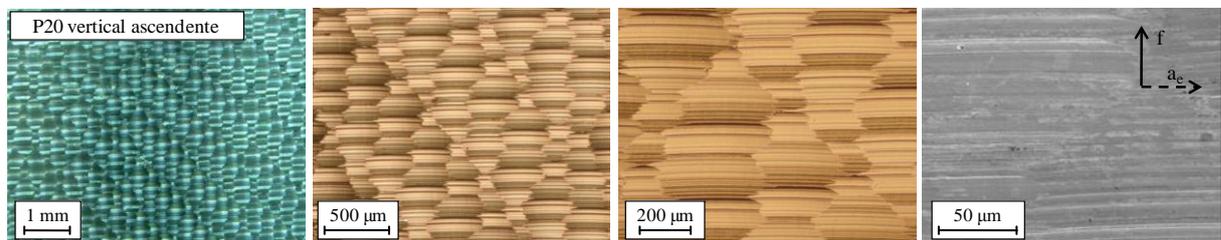
⁷ Considerando apenas os valores médios, pois, no caso do P20, se considerarmos a variação estatística, os resultados das duas estratégias horizontais são estatisticamente iguais.

⁸ Ângulo entre o eixo axial da ferramenta e o eixo normal à superfície da peça.

usinagem. Nas figuras 4.8 a 4.23 são apresentados, para cada condição experimental, imagens de textura e gráficos dos perfis de rugosidade. As figuras com resultados de textura possuem quatro imagens cada: a primeira obtida com o estereoscópio e aumento de 10x; a segunda e a terceira obtidas por microscopia óptica e ampliações de 50x e 100x; e a quarta obtida por microscopia eletrônica de varredura e aumento de 200x. As figuras com os perfis de rugosidade contêm os gráficos dos perfis na direção da profundidade radial de corte (a_e) e na direção do avanço (f).

As figuras 4.8 a 4.15 contêm os resultados relativos aos corpos de prova do material P20, nas diferentes estratégias de usinagem aplicadas.

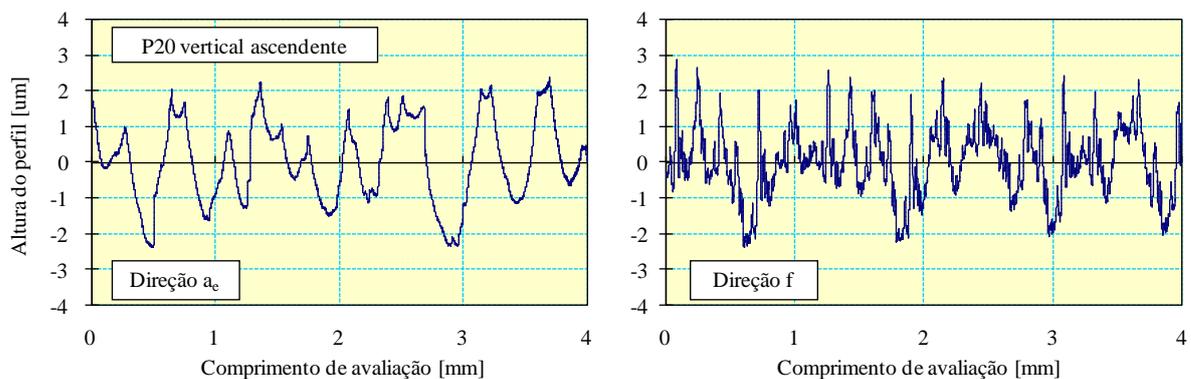
Figura 4.8 – Imagens de textura da condição P20 vertical ascendente



Fonte: O autor

Na textura obtida na condição vertical ascendente, não são verificadas com clareza as marcas de incremento da posição da ferramenta na direção da profundidade radial. Observando-se a formação das células resultantes dos movimentos combinados nas direções do avanço e da profundidade radial, verifica-se o alongamento das mesmas na direção do avanço. Esse resultado é oposto ao inicialmente esperado, uma vez que os valores de profundidade radial empregados nos ensaios foram superiores aos valores de avanço.

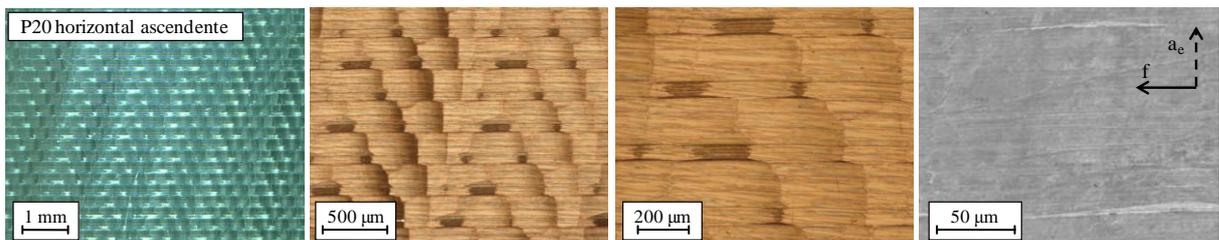
Figura 4.9 – Perfis de rugosidade da condição P20 vertical ascendente



Fonte: O autor

Os perfis de rugosidade relativos à condição vertical ascendente não apresentam um comportamento regular, havendo variações significativas nas alturas dos picos e vales resultantes da formação da superfície. No trabalho de Polli (2005), este tipo de comportamento dos perfis de rugosidade é classificado como indicativo de um processo instável, ou seja, que foi submetido a instabilidades dinâmicas durante a usinagem da superfície.

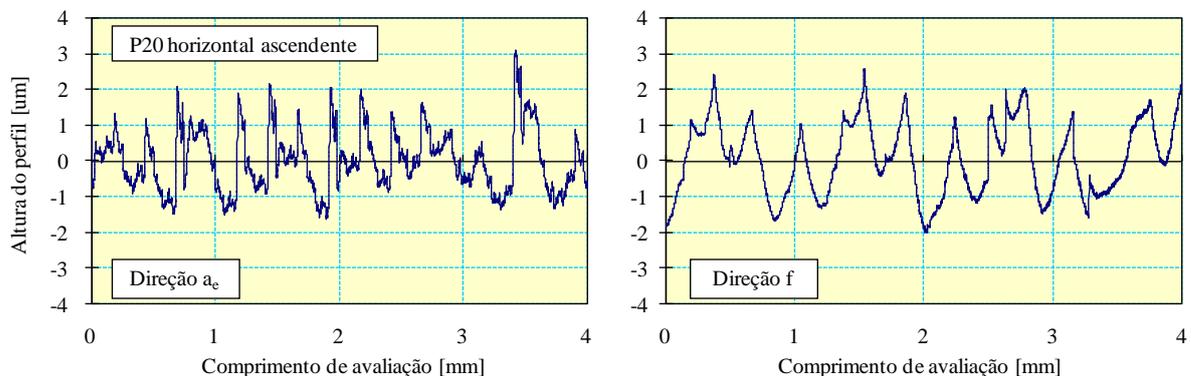
Figura 4.10 – Imagens de textura da condição P20 horizontal ascendente



Fonte: O autor

Nas imagens de textura para a estratégia horizontal ascendente, são verificadas com maior clareza as marcas de incremento da posição da ferramenta na direção da profundidade radial. Na análise da formação das células na superfície, pode-se observar um comportamento irregular, especialmente na terceira imagem da figura 4.10. Como pode ser verificado, há uma variação significativa do tamanho das células na direção da profundidade radial, ocorrendo uma alternância entre células de maior e menor tamanho.

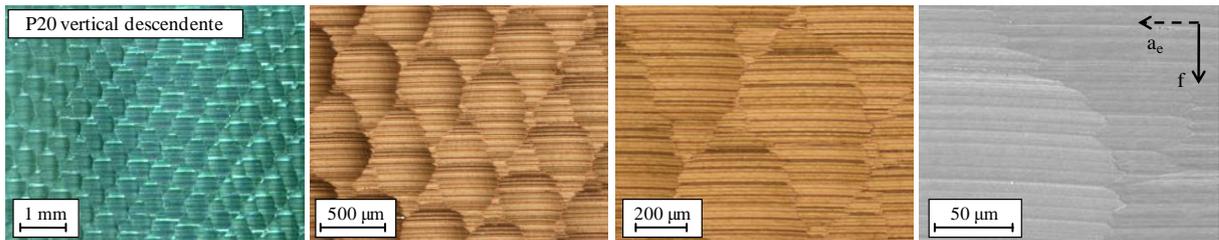
Figura 4.11 – Perfis de rugosidade da condição P20 horizontal ascendente



Fonte: O autor

Na análise dos perfis de rugosidade, também verifica-se para esta estratégia um comportamento irregular. Entretanto, não é identificada de forma clara, no perfil da direção da profundidade radial, a alternância do tamanho das células observada nas imagens de textura.

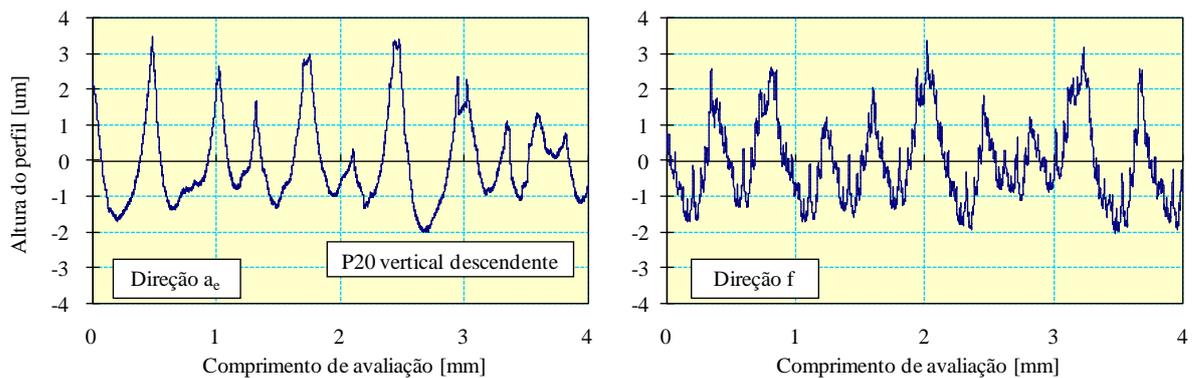
Figura 4.12 – Imagens de textura da condição P20 vertical descendente



Fonte: O autor

Os resultados de textura obtidos para a condição vertical descendente apresentam uma formação mais regular das células da superfície. Entretanto, assim como na estratégia vertical ascendente, é observado um alongamento das células na direção do avanço.

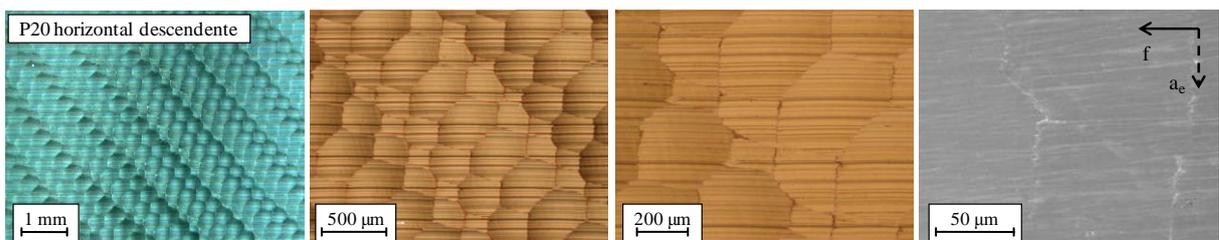
Figura 4.13 – Perfis de rugosidade da condição P20 vertical descendente



Fonte: O autor

De forma similar às condições anteriores, os perfis de rugosidade obtidos na estratégia vertical descendente apresentam um comportamento irregular, com variações significativas nas alturas de picos e vales da superfície.

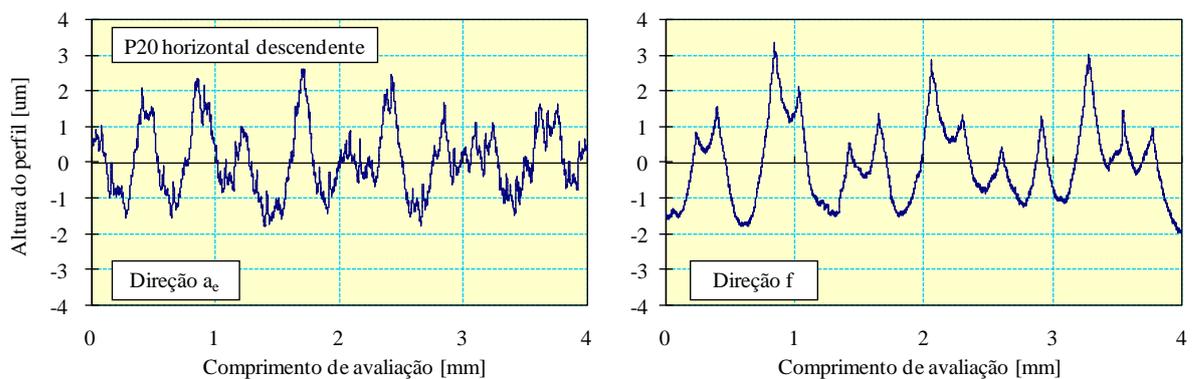
Figura 4.14 – Imagens de textura da condição P20 horizontal descendente



Fonte: O autor

Na textura resultante da estratégia horizontal descendente observa-se, de forma clara, as marcas de passagem da ferramenta na direção do avanço. Entretanto, ao contrário do observado na textura obtida na condição horizontal ascendente, não são claras as marcas de incremento da posição da ferramenta na direção da profundidade radial. Com relação à formação das células da superfície, podem ser identificados os limites das mesmas. Porém, verifica-se uma variação no tamanho das células, com uma alternância na direção do avanço, de células maiores seguidas por duas ou três células menores.

Figura 4.15 – Perfis de rugosidade da condição P20 horizontal descendente

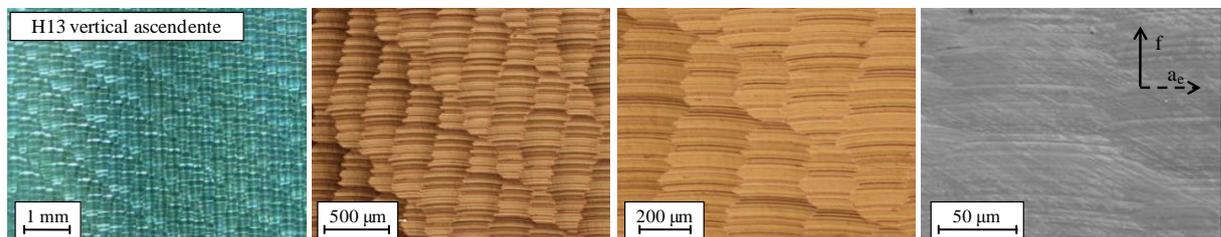


Fonte: O autor

Também na condição horizontal descendente, os perfis de rugosidade apresentam um comportamento significativamente irregular na altura dos picos e vales da superfície.

Nas figuras 4.16 a 4.23 são apresentados os resultados relativos aos corpos de prova confeccionados com o material H13, nas diferentes estratégias de usinagem aplicadas.

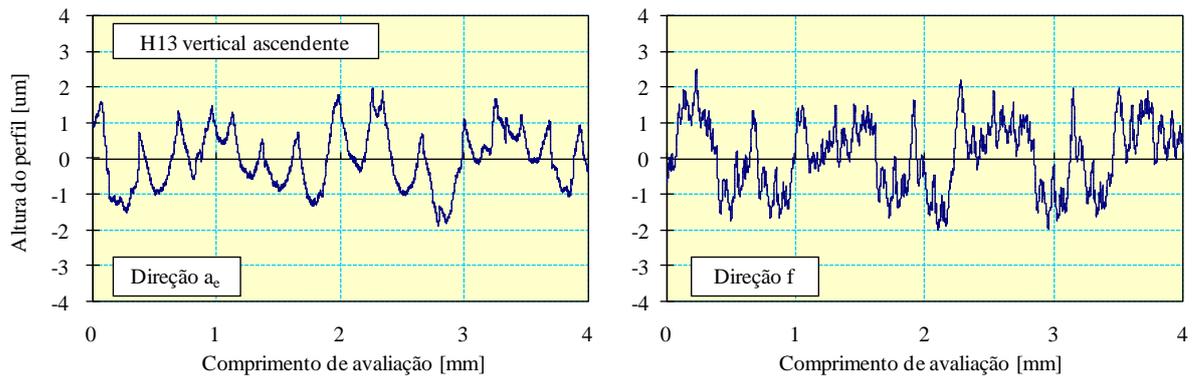
Figura 4.16 – Imagens de textura da condição H13 vertical ascendente



Fonte: O autor

A textura obtida na estratégia vertical ascendente para o material H13 apresentou a mesma característica da resultante das estratégias verticais do material P20, ou seja, os limites das células da superfície podem ser identificados com clareza e verifica-se um alongamento das células na direção do avanço.

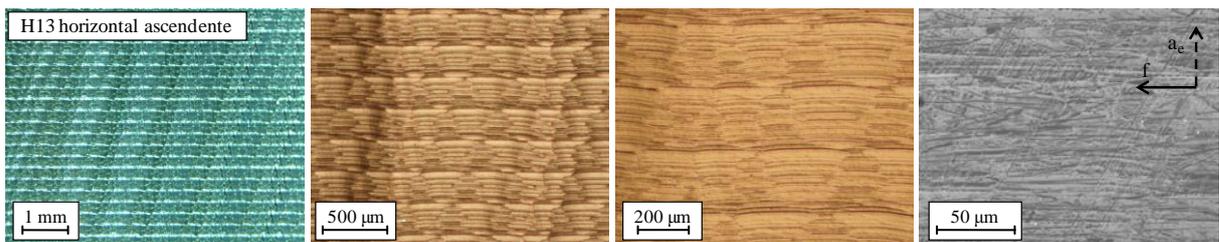
Figura 4.17 – Perfis de rugosidade da condição H13 vertical ascendente



Fonte: O autor

Os perfis de rugosidade obtidos nesta condição são caracterizados pela irregularidade. Embora na direção do avanço possa ser observada uma alternância regular no comportamento do perfil, a altura dos picos e vales não segue a mesma regularidade.

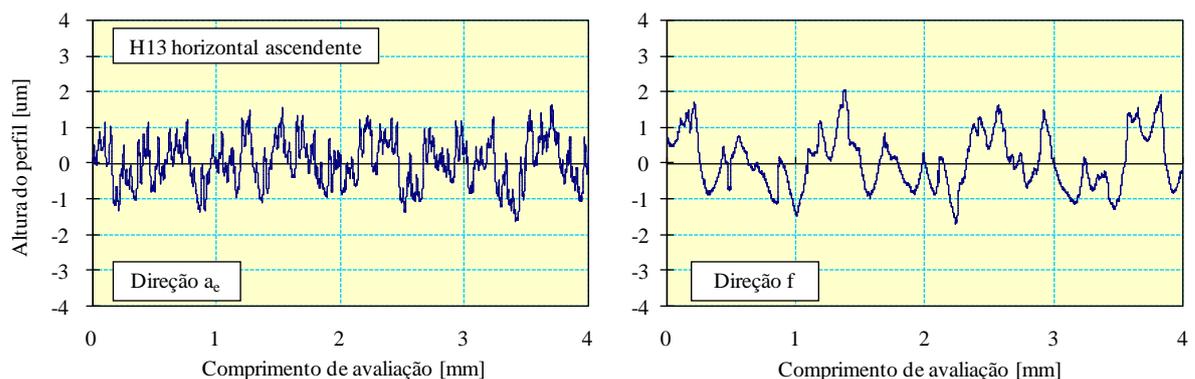
Figura 4.18 – Imagens de textura da condição H13 horizontal ascendente



Fonte: O autor

Na condição horizontal descendente foi obtida uma textura caracterizada pela identificação clara das marcas de incremento da posição da ferramenta na direção da profundidade radial. Entretanto, não são identificadas claramente as células resultantes dos movimentos combinados nas direções do avanço e da profundidade radial.

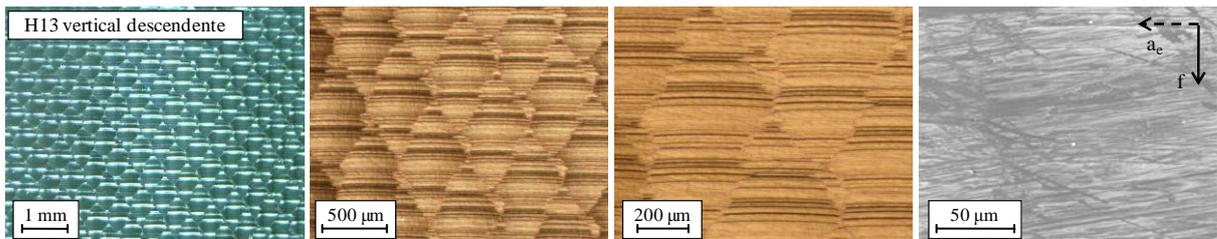
Figura 4.19 – Perfis de rugosidade da condição H13 horizontal ascendente



Fonte: O autor

A análise dos perfis de rugosidade resultantes desta condição aponta também um comportamento irregular, mas com uma menor variação na altura de picos e vales quando comparados às estratégias anteriormente analisadas, em especial na direção da profundidade radial.

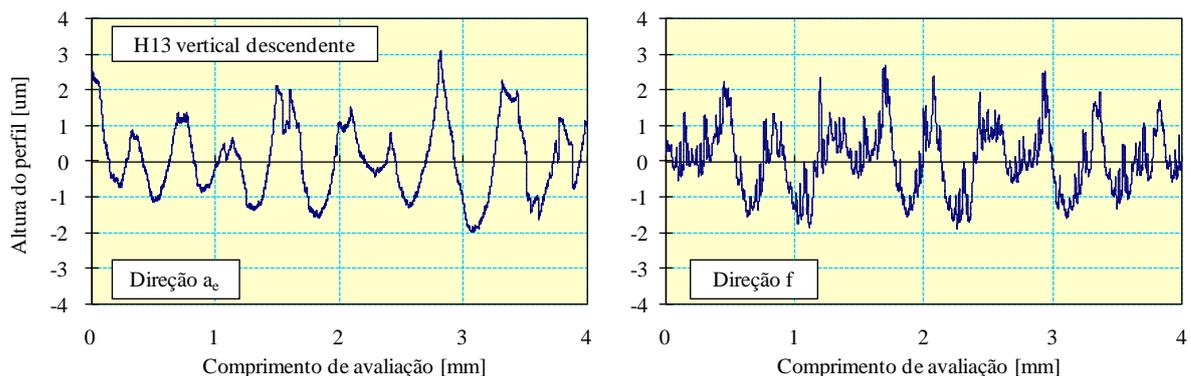
Figura 4.20 – Imagens de textura da condição H13 vertical descendente



Fonte: O autor

A estratégia vertical descendente resultou em uma textura com as mesmas características das demais condições onde foram empregadas estratégias verticais, tanto no material P20 como no H13. Em todas as condições foi observado um alongamento das células da superfície na direção do avanço, e não são observadas claramente as marcas de incremento da posição da ferramenta na direção da profundidade radial. Entretanto, pode ser destacado que, dentre todas as condições analisadas, esta foi a que apresentou o comportamento mais regular de formação das células da superfície, com tamanhos e arranjo homogêneos.

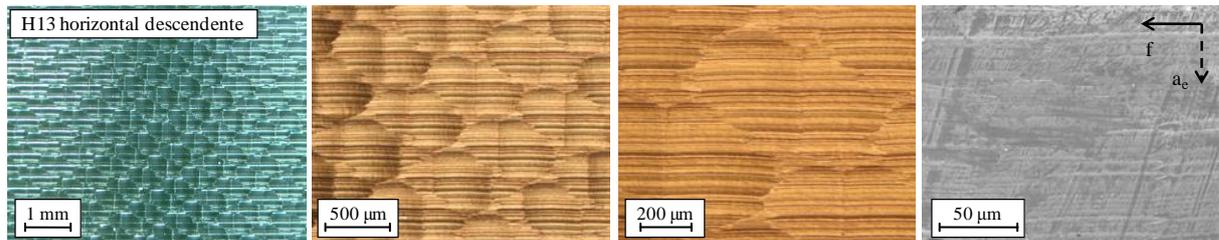
Figura 4.21 – Perfis de rugosidade da condição H13 vertical descendente



Fonte: O autor

A análise dos perfis de rugosidade para esta condição não apresentou a regularidade observada nas imagens de textura. Embora na direção do avanço possa ser observado um padrão de comportamento, a variação das alturas de picos e vales é significativa.

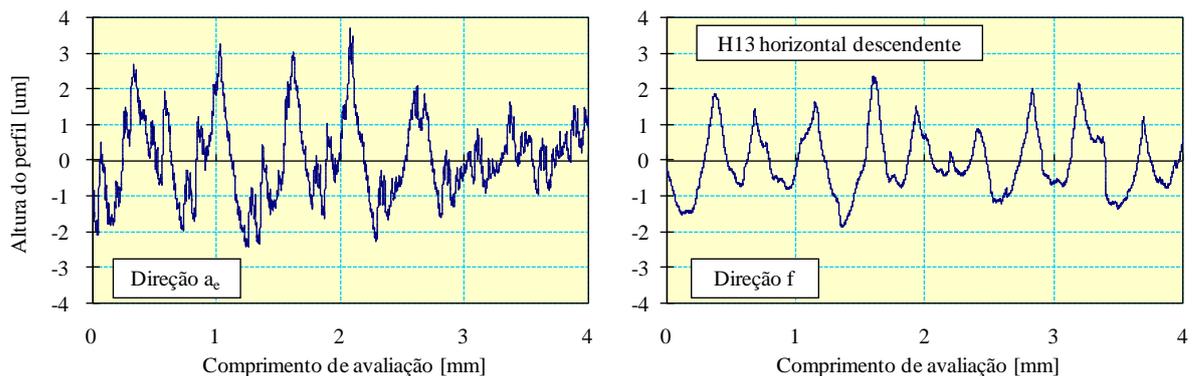
Figura 4.22 – Imagens de textura da condição H13 horizontal descendente



Fonte: O autor

Na textura obtida com a condição horizontal descendente podem ser visualizadas as marcas de passagem da ferramenta na direção do avanço, mas não são identificadas claramente as marcas de incremento da posição da ferramenta na direção da profundidade radial. Também podem ser identificados os limites das células formadas na superfície, mas o tamanho e arranjo das mesmas não segue um comportamento regular.

Figura 4.23 – Imagens de textura da condição H13 horizontal descendente



Fonte: O autor

Também para esta condição, os perfis de rugosidade obtidos apresentam um comportamento irregular, com variações significativas nas alturas de picos e vales.

4.3.3.3 Análise da formação das superfícies usinadas

Uma análise global dos resultados de rugosidade e textura aponta que, para ambos os materiais empregados nos ensaios, a formação das superfícies não ocorreu de forma regular e homogênea, havendo, para todas as condições avaliadas, significativas variações na geração das superfícies durante a usinagem.

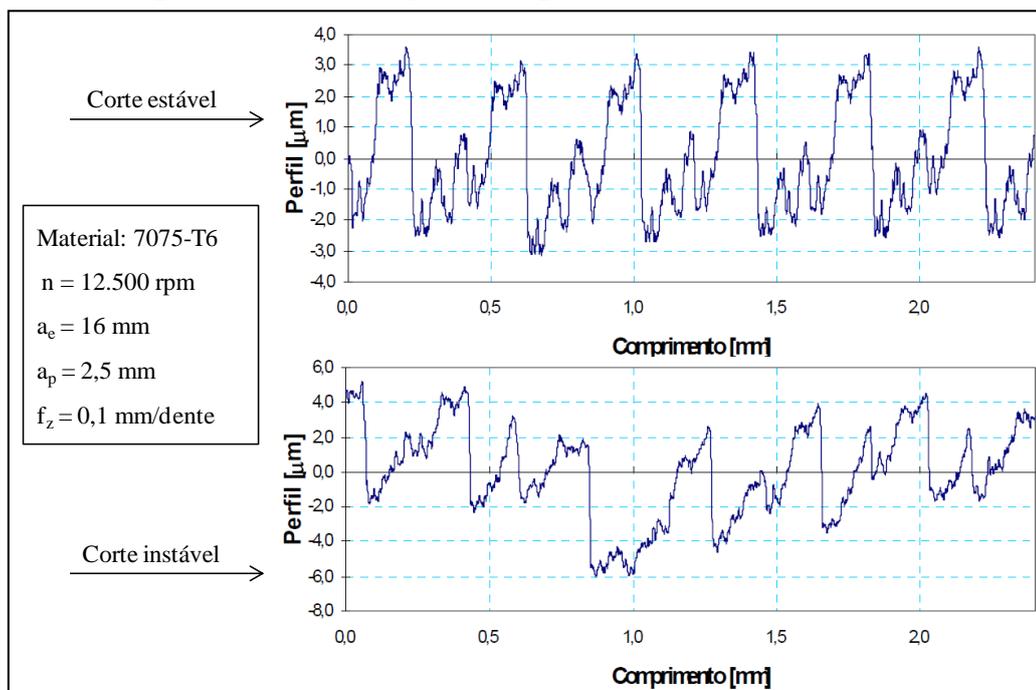
A principal hipótese sugerida para os resultados encontrados é a de terem ocorrido instabilidades dinâmicas durante a usinagem das superfícies. Segundo Maia (2009), na

usinagem, as vibrações são consequências das variações cíclicas nos componentes dinâmicos das forças de corte. Normalmente, estas vibrações começam como pequenas trepidações (*chatter*), responsáveis pelo aspecto ondulado na superfície usinada, e também por irregularidades na espessura do cavaco e, posteriormente, progridem para a vibração propriamente dita.

As vibrações constituem uma das principais causas de instabilidade de processos de corte e um dos maiores responsáveis pelo acabamento pobre na superfície das peças (CAO et al., 2013). De acordo com Quintana e Ciurana (2011), as vibrações podem ser classificadas em duas categorias: primária e secundária. As primárias são geralmente causadas pelo próprio processo de corte, ou seja, pelo atrito entre a ferramenta e a peça, e pelos efeitos termo-mecânicos na formação do cavaco. As secundárias resultam de um mecanismo de auto-excitação na geração da espessura do cavaco, e constituem o principal tipo de vibração observado nas operações de usinagem.

Na figura 4.24 são apresentados dois perfis de rugosidade encontrados no trabalho de Polli (2005). O autor avaliou a estabilidade dinâmica de operações de fresamento, utilizando fresas de topo reto de 16 mm de diâmetro. A figura contém um perfil de rugosidade referente a um processo de corte estável e um referente a um processo instável.

Figura 4.24 – Perfis de rugosidade de processos de corte estável e instável



Fonte: Polli (2005)

Fazendo-se uma relação com os perfis de rugosidade obtidos no presente trabalho, fica evidenciada a ocorrência de instabilidades dinâmicas em todas as condições analisadas, uma vez que em nenhum dos perfis obtidos foi observado um comportamento regular, como o observado no gráfico referente ao corte estável na figura 4.24.

Dessa forma, são explicadas as significativas diferenças observadas entre os resultados de qualidade superficial obtidos no modelo matemático aplicado neste trabalho, e os verificados nas superfícies usinadas nos ensaios experimentais. O modelo matemático utilizado é cinemático e, portanto, não inclui fontes de influência dinâmica. Como os elementos dinâmicos tiveram influência significativa nos resultados dos ensaios de usinagem, fica explicitada a discrepância entre os resultados matemáticos e experimentais.

Um dos elementos que pode ter influenciado a ocorrência de vibrações foi a fixação dos corpos de prova. Embora tenha se buscado uma adequada fixação dos mesmos, a utilização de uma máquina-ferramenta de 3 eixos levou à necessidade de uma fixação inclinada dos corpos de prova, com apoio nas paredes laterais, mas não na face posterior dos mesmos. Uma melhor fixação teria sido obtida com a utilização de uma máquina-ferramenta 5 eixos, mas por problemas de disponibilidade de equipamentos, essa opção não foi possível.

Outro fator que pode ter tido influência na geração de vibrações é o número de gumes das ferramentas utilizadas. Segundo Polli (2005), o emprego de uma fresa com maior número de dentes permite a ação de mais gumes durante o corte, distribuindo de maneira uniforme as solicitações térmicas e mecânicas entre eles, reduzindo assim as variações das forças de usinagem. Neste trabalho foram empregadas fresas de apenas dois gumes e, portanto, fica favorecida a ocorrência de vibrações durante a usinagem. A opção por este tipo de ferramenta se deu pelo fato de ser a mais comumente empregada no ambiente industrial.

5 CONCLUSÃO

A partir do estudo conduzido e dos resultados obtidos nesta dissertação, podem ser apontadas as conclusões apresentadas a seguir.

Com relação ao modelo matemático de otimização, uma das principais dificuldades enfrentadas foi a identificação dos modelos para a descrição do processo. Para o cálculo do tempo de usinagem, existem modelos consolidados e confiáveis na literatura. Entretanto, para o cálculo teórico da rugosidade média, a complexidade é significativamente maior, e não existem na literatura modelos matemáticos que contemplem os diferentes elementos de influência da rugosidade de superfícies usinadas. Outra dificuldade enfrentada foi a definição dos elementos de configuração do algoritmo genético, uma vez que não existem regras consolidadas para a seleção dos mesmos. A estratégia utilizada foi a realização de testes preliminares, seguindo metodologia proposta no trabalho de Raju et al. (2011).

A aplicação do algoritmo apresentou como principal resultado o fato de os tempos de corte ótimos obtidos para as diferentes configurações implementadas serem praticamente idênticos, mesmo utilizando-se dois materiais distintos, com durezas e, conseqüentemente, usinabilidades diferentes. Esse resultado ajuda a desconstruir o paradigma normalmente vigente no chão de fábrica das indústrias, de que materiais com maior dureza necessitam de maiores tempos de usinagem do que materiais com menor dureza.

A realização de ensaios experimentais de validação apresentou resultados diferentes para os tempos de usinagem e para a rugosidade média das superfícies. As diferenças entre os tempos de usinagem obtidos no modelo matemático e os resultantes da programação do processo em um *software* de CAM apresentaram diferenças pouco significativas (máxima de 1,1%). Já com relação à rugosidade média, os resultados não foram satisfatórios, e em todas as condições analisadas os valores medidos nas superfícies usinadas foram maiores que os obtidos no modelo matemático, sendo a menor diferença obtida de 10% e a maior de 82%.

A avaliação dos resultados experimentais de rugosidade apontou que, embora tenham sido observadas algumas diferenças entre os materiais e estratégias utilizados, não foram verificadas tendências claras de comportamento. Um dos resultados relevantes é o fato de os melhores resultados para ambos os materiais terem sido obtidos com a mesma estratégia, a horizontal ascendente. Além disso, também pode ser destacada a indicação de instabilidade dinâmica na usinagem dos corpos de prova, em função da não observância dos esperados menores resultados de rugosidade na direção do avanço, bem como das significativas diferenças observadas entre os resultados dos parâmetros R_z e R_{z1max} .

As análises de textura e dos perfis de rugosidade das superfícies usinadas apontaram que, para todas as condições avaliadas, a formação das superfícies não ocorreu de forma regular e homogênea, havendo significativas variações na geração das superfícies durante a usinagem. O comportamento irregular dos perfis de rugosidade, especialmente, indica que ocorreram instabilidades dinâmicas durante a usinagem das superfícies, gerando vibrações. Devido a este comportamento, são explicadas as significativas diferenças observadas entre os resultados de rugosidade média obtidos no modelo matemático e os medidos nas superfícies usinadas.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para novos trabalhos na área de pesquisa sobre a otimização do fresamento de topo esférico, pode-se sugerir os seguintes tópicos:

- a) a avaliação de outros parâmetros de rugosidade, em especial os relativos à altura de picos e vales (R_p , R_v) e ao espaçamento dos elementos do perfil (RS_m);
- b) a utilização de ferramentas com mais de dois gumes;
- c) o aprimoramento do modelo matemático empregado neste trabalho, incluindo parâmetros relativos à dinâmica do processo de usinagem, em especial a ocorrência de vibrações;
- d) a inclusão do desgaste das ferramentas no modelo matemático, visto que este elemento também têm influência significativa sobre a qualidade superficial em operações de acabamento; e
- e) a modelagem de superfícies complexas, uma vez que este trabalho considerou apenas a usinagem de superfícies planas.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, A.; SINGH, H. Optimization of machining techniques – A retrospective and literature review. **Sādhanā**, v. 30 (6), p. 699-711, 2005.
- ALAUDDIN, M.; EL BARADIE, M. A.; HASHMI, M. S. J. Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 55, p. 123-127, 1995.
- ANTONIADIS, A.; SAVAKIS, C.; BILALIS, N.; BALOUKTSIS, A. Prediction of surface topomorphy and roughness in ball-end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 21, p. 965-971, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409**: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.
- ÁVILA, S. L. **Algoritmos Genéticos aplicados na otimização de antenas refletoras**. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- BABILAS, R.; KRUPIŃSKA, B.; SZEWIECZEK, D. The optimisation of a technological process forms a competitive position of the factory. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 16(1-2), p. 177-183, 2006.
- BAPTISTA, R.; SIMÕES, J. F. A. Three and five axes milling of sculptured surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 103, p. 398-403, 2000.
- BASKAR, N.; ASOKAN, P.; SARAVANAN, R.; PRABHAHARAN. G. Optimization of machining parameters for milling operations using non-conventional methods. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, p. 1078-1088, 2005.
- BATISTA, M. F. **Estudo da rugosidade de superfícies planas usinadas por fresas de topo esférico**. 2006. 103 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BENARDOS, P.G.; VOSNIAKOS, G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 833-844, 2003.

BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. 350 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BOECHEL, T. **Algoritmo de otimização: uma abordagem híbrida utilizando o algoritmo das formigas e genético**. 2003. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BOUZAKIS, K.-D.; AICHOUH, P.; EFSTATHIOU, K. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing milling, with ball end tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 499-514, 2003.

BOUZAKIS, K.-D.; PARASKEVOPOULOU, R.; GIANNOPOULOS, G. Multi-objective optimization of cutting conditions in milling using genetic algorithms. In: International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), 3rd, 2008, Chalkidiki, Greece. **Proceedings...** Chalkidiki: EEAM/PCCM, 2008.

BOUZID, W. Cutting parameter optimization to minimize production time in high speed turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 161, p. 388-395, 2005.

BUJ-CORRAL, I.; VIVANCOS-CALVET, J.; DOMÍNGUEZ-FERNÁNDEZ, A. Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 53, p.151-159, 2012.

CAO, H.; LEI, Y.; HE, Z. Chatter identification in end milling process using wavelet packets and Hilbert-Huang transform. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 69, p. 11-19, 2013.

CASTRO, R. E. **Otimização de estruturas com multiobjetivos via Algoritmos Genéticos**. 2001. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CHANDRASEKARAN, M.; MURALIDHAR, M.; KRISHNA, C. M.; DIXIT, U. S. Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 46, p. 445-464, 2010.

CHEN, J.-S.; HUANG, Y.-K.; CHEN, M.-S. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 1077-1084, 2005.

COMITÊ CONJUNTO PARA GUIAS EM METROLOGIA. **JCGM 100**: Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição. 2008.

CONCEIÇÃO ANTÓNIO, C. A.; CASTRO, C. F.; DAVIM, J. P. Optimization of multi-pass cutting parameters in face-milling based on genetic search. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, p. 1106-1115, 2009.

CUS, F.; BALIC, J. Optimization of cutting process by GA approach. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 19, p. 113-121, 2003.

CUS, F.; MILFELNER, M.; BALIC, J. An intelligent system for monitoring and optimization of ball-end milling process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, p. 90-97, 2006.

DARWIN, C. **The origin of species by means of natural selection**. Chicago: Encyclopedia Britannica, 1953.

DAYMI, A.; BOUJELBENE, M.; LINARES, J.M.; BAYRAKTAR, E.; BEN AMARA, A. Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 35(1), p. 79-86, 2009.

DEB, S. ; DIXIT, U. S. Intelligent machining: Computational methods and optimization. In: DAVIM, J. P. (Org.). **Machining: fundamentals and recent advances**. London: Springer, 2008. cap. 12.

DEL PRETE, A.; DE VITIS, A. A.; ANGLANI, A. Roughness improvement in machining operations through coupled metamodel and genetic algorithms technique. **International Journal of Material Forming**, v. 3, p. 467- 470, 2010.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber, 2003.

DIXIT, P. M.; DIXIT, U. S. **Modeling of metal forming and machining processes: by finite element and soft computing methods**. London: Springer, 2008.

ERZURUMLU, T.; OKTEM, H. Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts. **Materials and Design**, v. 28, p. 459-465, 2007.

FACCIO, I. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte**. 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FORREST, S. Genetic Algorithms: Principles of natural selection applied to computation. **Science**, v. 261, n. 5123, p. 872-878, 1993.

GAO, T.; ZHANG, W.; QIU, K.; WAN, M. Numerical simulation of machined surface topography and roughness in milling process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 128, p. 96-103, 2006.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. USA: Addison Wesley Longman, Inc., 1989.

GRIGOLETTI, G. C. **Otimização via algoritmos genéticos de perfis U formados a frio submetidos à compressão utilizando o método da resistência direta.** 2008. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2008.

GRZENDA, M.; BUSTILLO, A. The evolutionary development of roughness prediction models. **Applied Soft Computing**, v. 13, p. 2913–2922, 2013.

HAHNE, M. N. M. A. **Metodologia de aprendizado baseado em algoritmos genéticos para modelos alternativos de redes IAC.** 2005. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

HAMDAN, A.; SARHAN, A. A. D.; HAMDI, M. An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 58, p. 81-91, 2012.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial Systems.** Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

HOLLAND, J. H. Genetic Algorithms. **Scientific American**, July, p. 66-72, 1992.

IQBAL, A.; NING, H.; KHAN, I.; LIANG, L.; DAR, N. U. Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 199, p. 379-390, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4287:** Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters. Geneva, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4288:** Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture. Geneva, 1996.

JANAKIRAMAN, V.; SARAVANAN, R. Concurrent optimization of machining process parameters and tolerance allocation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 51, p. 357-369, 2010.

JUNG, T.-S.; YANG, M.-Y.; LEE, K.-J. A new approach to analyzing machined surfaces by ball-end milling, part I: Formulation of characteristic lines of cut remainder. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, p. 833-840, 2005.

KANG, M. C.; KIM, K. K.; LEE, D. W.; KIM, J. S.; KIM, N. K. Characteristics of inclined planes according to the variations of cutting direction in high-speed ball-end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 17, p. 323-329, 2001.

KIM, S. S.; KIM, I.-H.; MANI, V.; KIM, H. J. Real-coded genetic algorithm for machining condition optimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 38, p. 884-895, 2008.

KO, T. J.; KIM, H. S.; LEE, S. S. Selection of the machining inclination angle in high-speed ball end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 17, p. 163-170, 2001.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren**. 7. auflage. Berlin: Springer, 2002.

LACALLE, L. N. L. de; LAMIKIZ, A. Sculptured surface machining. In: DAVIM, J. P. (Org.). **Machining: fundamentals and recent advances**. London: Springer, 2008. cap. 8.

LARRAÑAGA, P.; KUIJPERS, C. M. H.; MURGA, R. H.; INZA, I.; DIZDAREVIC, S. Genetic Algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators. **Artificial Intelligence Review**, v. 13, p. 129-170, 1999.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LIU, N.; LOFTUS, M. Prediction of surface quality from ball-nose milling in high-speed machining applications. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 220, p. 571-578, 2006.

LIU, Y.; WANG, C. A modified genetic algorithm based optimization of milling parameters. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, p. 796-799, 1999.

LU, C. Study on prediction of surface quality in machining process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, p. 439-450, 2008.

MAIA, L. H. A. **Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga ABNT 4140 nos sinais vibracionais e de emissão acústica**. 2009. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MATTA, P. S. **Aplicação de Algoritmos Genéticos para a otimização da produção em poços de petróleo canhoneados**. 2007. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MAZZUCCO JR., J. **Uma abordagem híbrida do problema da programação da produção através dos algoritmos *simulated annealing* e genético**. 1999. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3. ed. New York: Springer, 1996.

MILFELNER, M.; KOPAC, J.; CUS, F.; ZUPERL, U. Intelligent system for machining and optimization of 3D sculptured surfaces with ball-end milling. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 14(1-2), p. 171-177, 2006.

MITCHELL, M. **An introduction to Genetic Algorithms**. Massachusetts: MIT Press, 1996.

MIZUGAKI, Y.; HAO, M.; KIKKAWA, K. Geometric generating mechanism of machined surface by ball-nosed end milling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50(1), p. 69-72, 2001.

MIZUGAKI, Y.; KIKKAWA, K.; TERAJ, H.; HAO, M. Theoretical estimation of machined surface profile based on cutting edge movement and tool orientation in ball-nosed end milling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 52(1), p. 49-52, 2003.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

MUKHERJEE, I.; RAY, P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. **Computers & Industrial Engineering**, v. 50, p. 15-34, 2006.

MURTHY, K. S.; RAJENDRAN, I. A study on optimisation of cutting parameters and prediction of surface roughness in end milling of aluminium under MQL machining. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 7(1-2), p. 112-128, 2010.

NG, E. G.; LEE, D. W.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. Experimental evaluation of cutter orientation when ball nose end milling Inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 2(2), p. 108-115, 2000.

NICOLA, G. L. **Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido**. 2008. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

NICOLA, G. L.; MISSELL, F. P.; ZEILMANN, R. P. Surface quality in milling of hardened H13 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, p. 53-62, 2010.

NÚÑEZ-LETAMENDIA, L. Fitting the control parameters of a genetic algorithm: An application to technical trading systems design. **European Journal of Operational Research**, v. 179, p. 847-868, 2007.

ÖKTEM, H. An integrated study of surface roughness for modeling and optimization of cutting parameters during end milling operation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, p. 852-861, 2009.

ÖKTEM, H.; ERZURUMLU, T.; ERZINCANLI, F. Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm. **Materials and Design**, v. 27, p. 735-744, 2006.

ÖKTEM, H.; ERZURUMLU, T.; KURTARAN, H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 170, p. 11-16, 2005.

OLIVEIRA, A. J.; DINIZ, A. E. Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5448-5455, 2009.

OZCELIK, B.; ÖKTEM, H.; KURTARAN, H. Optimum surface roughness in end milling Inconel 718 by coupling neural network model and genetic algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, p. 234-241, 2005.

PALANISAMY, P.; RAJENDRAN, I.; SHANMUGASUNDARAM, S. Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 32, p. 644-655, 2007.

POLLI, M. L. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte**. 2005. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

PONGCHAROEN, P.; HICKS, C.; BRAIDEN, P. M.; STEWARDSON, D. J. Determining optimum Genetic Algorithm parameters for scheduling the manufacturing and assembly of complex products. **International Journal of Production Economics**, v. 78, p. 311-322, 2002.

QUINSAT, Y.; LAVERNHE, S.; LARTIGUE, C. Characterization of 3D surface topography in 5 axis milling. **Wear**, v. 271, p. 590-595, 2011.

QUINSAT, Y.; SABOURIN, L.; LARTIGUE, C. Surface topography in ball end milling process: Description of a 3D surface roughness parameter. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, p. 135-143, 2008.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 51, p. 363-376, 2011.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. de; RIBATALLADA, J. Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 25, p. 386-398, 2010.

QUIZA, R.; DAVIM, J. P. Computational methods and optimization. In: **Machining of hard materials**. London: Springer, 2008. cap. 6.

RAJA, S. B.; BASKAR, N. Optimization techniques for machining operations: a retrospective research based on various mathematical models. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 48, p. 1075-1090, 2010.

RAJA, S. B.; BASKAR, V. Application of Particle Swarm Optimization technique for achieving desired milled surface roughness in minimum machining time. **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 5982-5989, 2012.

RAJU, K. V. M. K.; JANARDHANA, G. R.; KUMAR, P. N.; RAO, V. D. P. Optimization of cutting conditions for surface roughness in CNC end milling. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 12(3), p. 383-391, 2011.

RAMOS, J. M. B. **Implementação e análise do problema do caixeiro viajante usando uma nova abordagem através dos algoritmos genético e *simulated annealing***. 2001. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

RAO, R. V. **Advanced modeling and optimization of manufacturing processes**. London: Springer, 2011.

RAO, R. V.; PAWAR, P. J. Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms. **Applied Soft Computing**, v. 10, p. 445–456, 2010.

REDDY, N. S. K.; RAO, P. V. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, p. 1202-1210, 2005.

REDDY, N. S. K.; RAO, P. V. Selection of an optimal parametric combination for achieving a better surface finish in dry milling using genetic algorithms. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 28, p. 463-473, 2006.

SADEGHEIH, A. Scheduling problem using genetic algorithm, simulated annealing and the effects of parameter values on GA performance. **Applied Mathematical Modelling**, v. 30, p. 147-154, 2006.

SADÍLEK, M.; ČEP, R.; BUDAK, I.; SOKOVIĆ, M. Aspects of using tool axis inclination angle. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 57, p. 681-688, 2011.

SAMANTA, B.; EREVELLES, W.; OMURTAG, Y. Prediction of workpiece surface roughness using soft computing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 222, p. 1221-1232, 2008.

SANDVIK COROMANT. **Ferramentas rotativas 2012**. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com>>. Acesso em: 26/07/2012.

SARAVANAN, R.; SANKAR, R. S.; ASOKAN, P.; VIJAYAKUMAR, K.; PRABHAHARAN, G. Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, p. 30-40, 2005.

SCHULTER, M. **Aplicação de Algoritmos Genéticos na modelagem de transformadores a partir de ensaios**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SCHULZ, H.; HOCK, S. High-speed milling of dies and moulds - Cutting conditions and technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 44, p. 35-38, 1995.

SILVA FILHO, M. S. da. **Fresamento por regiões como uma alternativa na usinagem de cavidades para moldes de injeção através de sistema CAD/CAM**. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SIRIWARDENE, N. R.; PERERA, B. J. C. Selection of genetic algorithm operators for urban drainage model parameter optimization. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 44, p. 415-429, 2006.

SOARES, N. O. **Contribuições ao modelamento do perfil de superfícies fresadas**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SONG, J. F.; VORBURGER, T. V. Surface texture. In: **ASM Handbook: Friction, lubrication and wear technology**, v. 18, p. 184-190, 1992.

SRIYOTHA, P.; SAHASRABUDHE, A.; YAMAZAKI, K.; MORI, M. Geometrical modelling of a ball-end finish milling process for a surface finish. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 220, p. 467-477, 2006.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 6. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1995.

TOH, C. K. Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. **Precision Engineering**, v. 28, p. 386-398, 2004a.

TOH, C. K. A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 152, p. 346-356, 2004b.

TOH, C. K. Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials. **Materials and Design**, v. 26, p. 517-533, 2005.

TOH, C. K. Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, p. 473-480, 2006.

VAKONDIOS, D.; KYRATIS, P.; YALDIZ, S.; ANTONIADIS, A. Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. **Measurement**, v. 45, p. 1480–1488, 2012.

VON ZUBEN, F. J. Computação Evolutiva: Uma Abordagem Pragmática. In: JORNADA DE ESTUDOS EM COMPUTAÇÃO DE PIRACICABA E REGIÃO, 1., 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, 2000.

VOSNIAKOS, G.-C.; BENARDOS, P. G.; KRIMPENIS, A. Intelligent optimisation of 3-axis sculptured surface machining on existing cam systems. In: DAVIM, J. P. (Org.). **Machining of complex sculptured surfaces**. London: Springer, 2012. cap. 5.

WANG, Z. G.; WONG, Y. S.; RAHMAN, M. Optimization of multi-pass milling using genetic algorithm and genetic simulated annealing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 24, p. 727-732, 2004.

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of surface metrology**. Bath: Bookcraft, 1994.

WIBOWO, A; DESA, M. I. Kernel based regression and genetic algorithms for estimating cutting conditions of surface roughness in end milling machining process. **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 11634-11641, 2012.

YILDIZ, A. R. A new hybrid differential evolution algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations. **Applied Soft Computing**, v. 13, p. 1561–1566, 2013.

YUSUP, N., ZAIN, A. M., HASHIM, S. Z. M. Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011). **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 9909-9927, 2012.

ZAIN, A. M.; HARON, H.; QASEM, S. N.; SHARIF, S. Regression and ANN models for estimating minimum value of machining performance. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, p. 1477-1492, 2012.

ZAIN, A. M.; HARON, H.; SHARIF, S. Application of GA to optimize cutting conditions for minimizing surface roughness in end milling machining process. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 4650-4659, 2010a.

ZAIN, A. M.; HARON, H.; SHARIF, S. Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 1755-1768, 2010b.

ZHANG, J. Y.; LIANG, S. Y.; YAO, J.; CHEN, J. M.; HUANG, J. L. Evolutionary optimization of machining processes. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 17, p. 203-215, 2006.

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS EXECUÇÕES DO AG

P20 ascendente									
Teste	t_c [min]	a_e [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]	θ [°]	n° de gerações	d_{ef} [mm]	n [rpm]	R_a [μm]
1	0,457	0,24	0,15	292	34,9	51	7,79	11943	0,52
2	0,459	0,25	0,15	285	32,9	51	7,56	11990	0,52
3	0,447	0,25	0,15	299	36,3	51	7,94	11985	0,56

P20 descendente									
Teste	t_c [min]	a_e [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]	θ [°]	n° de gerações	d_{ef} [mm]	n [rpm]	R_a [μm]
1	0,446	0,25	0,15	264	44,5	51	7,01	11989	0,69
2	0,456	0,25	0,15	271	46,1	51	7,21	11953	0,70
3	0,451	0,25	0,15	259	43,8	51	6,92	11919	0,67

H13 ascendente									
Teste	t_c [min]	a_e [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]	θ [°]	n° de gerações	d_{ef} [mm]	n [rpm]	R_a [μm]
1	0,448	0,25	0,15	189	13,8	51	5,01	11991	0,41
2	0,445	0,25	0,15	192	14,4	51	5,10	11997	0,42
3	0,448	0,25	0,15	200	15,8	51	5,30	11999	0,42

H13 descendente									
Teste	t_c [min]	a_e [mm]	f_z [mm]	v_c [m/min]	θ [°]	n° de gerações	d_{ef} [mm]	n [rpm]	R_a [μm]
1	0,449	0,25	0,15	198	31,8	52	5,27	11970	0,51
2	0,454	0,25	0,15	195	31,3	51	5,19	11985	0,50
3	0,452	0,25	0,15	199	32,2	51	5,33	11875	0,51

APÊNDICE B – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE

P20 vertical ascendente					
		Medição	R_a [μm]	R_z [μm]	$R_{z1\text{max}}$ [μm]
Direção a_e	área 1	1	0,96	3,91	4,43
		2	0,91	3,70	4,36
		3	0,98	3,92	4,38
	área 2	1	0,96	3,80	4,53
		2	0,90	4,13	5,67
		3	0,89	4,51	5,29
	área 3	1	0,92	4,14	5,35
		2	0,96	4,28	5,41
		3	0,98	4,38	5,48
			média	0,94	4,09
		desvio padrão	0,03	0,27	0,55
P20 horizontal ascendente					
		Medição	R_a [μm]	R_z [μm]	$R_{z1\text{max}}$ [μm]
Direção f	área 1	1	0,77	4,50	5,29
		2	0,78	4,35	4,72
		3	0,86	4,28	4,66
	área 2	1	0,84	4,42	5,03
		2	0,85	4,39	4,69
		3	0,82	4,48	5,02
	área 3	1	0,85	4,59	5,38
		2	0,79	4,37	5,13
		3	0,79	4,25	5,20
			média	0,82	4,40
		desvio padrão	0,03	0,11	0,27
Direção a_e	área 1	1	0,69	3,58	4,47
		2	0,69	3,45	3,89
		3	0,61	3,30	3,75
	área 2	1	0,70	3,70	4,01
		2	0,65	3,55	4,24
		3	0,75	3,84	4,94
	área 3	1	0,76	3,74	4,56
		2	0,74	3,56	4,12
		3	0,68	3,58	4,33
			média	0,70	3,59
		desvio padrão	0,05	0,16	0,37
Direção f	área 1	1	0,87	3,96	4,27
		2	0,85	3,31	3,72
		3	0,80	3,46	4,05
	área 2	1	0,96	4,05	5,48
		2	0,98	4,50	5,10
		3	0,94	4,83	5,87
	área 3	1	0,91	4,06	4,87
		2	0,99	4,22	4,91
		3	0,86	4,05	4,88
			média	0,91	4,05
		desvio padrão	0,07	0,47	0,68

P20 vertical descendente					
Direção a _e		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]
	área 1	1	0,96	4,27	5,39
		2	0,96	4,19	5,22
		3	0,92	4,46	5,51
	área 2	1	0,93	4,39	4,82
		2	0,90	4,14	4,71
		3	0,97	4,37	4,99
	área 3	1	0,92	3,97	5,49
		2	1,00	4,73	5,18
		3	0,88	4,14	5,52
média			0,94	4,30	5,20
desvio padrão			0,04	0,22	0,31
Direção f		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]
	área 1	1	0,95	4,51	5,27
		2	1,00	4,67	5,57
		3	0,88	4,28	5,20
	área 2	1	0,92	4,69	5,65
		2	0,95	4,43	4,94
		3	0,90	4,28	5,29
	área 3	1	0,88	4,33	4,77
		2	0,97	4,79	5,69
		3	0,83	4,26	4,49
média			0,92	4,47	5,21
desvio padrão			0,05	0,20	0,41
P20 horizontal descendente					
Direção a _e		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]
	área 1	1	0,76	3,83	4,23
		2	0,84	4,09	5,04
		3	0,85	4,11	4,88
	área 2	1	0,72	3,50	4,08
		2	0,68	3,51	3,97
		3	0,68	3,25	3,71
	área 3	1	0,77	3,42	4,54
		2	0,75	3,37	3,82
		3	0,78	3,81	4,95
média			0,76	3,65	4,36
desvio padrão			0,06	0,32	0,51
Direção f		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]
	área 1	1	0,90	4,03	5,01
		2	0,84	3,94	4,92
		3	0,84	3,52	4,04
	área 2	1	0,93	4,07	5,08
		2	0,92	3,75	4,22
		3	0,96	4,04	4,37
	área 3	1	0,91	3,97	4,28
		2	0,93	3,97	4,93
		3	0,95	4,40	4,89
média			0,91	3,97	4,64
desvio padrão			0,04	0,24	0,40

H13 vertical ascendente						
Direção a_e		Medição	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,68	2,91	3,29	
		2	0,72	3,19	3,50	
		3	0,64	2,74	3,10	
	área 2	1	0,68	3,08	3,86	
2		0,73	3,01	3,73		
3		0,61	2,93	4,63		
área 3	1	0,75	3,44	3,82		
	2	0,65	3,14	3,71		
	3	0,75	3,21	4,12		
média			0,69	3,07	3,75	
desvio padrão			0,05	0,20	0,45	
Direção f		Medição	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,83	3,82	4,25	
		2	0,86	4,34	4,96	
		3	0,88	4,17	5,01	
	área 2	1	0,85	4,55	4,80	
		2	0,89	4,52	5,39	
		3	0,96	4,62	5,34	
	área 3	1	0,88	4,54	4,95	
		2	0,96	4,58	5,13	
		3	0,89	4,32	5,03	
	média			0,89	4,38	4,98
	desvio padrão			0,04	0,26	0,33
	H13 horizontal ascendente					
Direção a_e		Medição	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,53	2,74	3,28	
		2	0,52	2,85	3,27	
		3	0,52	2,82	3,23	
	área 2	1	0,57	3,43	4,02	
		2	0,57	3,61	3,88	
		3	0,56	3,64	4,17	
	área 3	1	0,63	3,72	4,19	
		2	0,62	3,54	4,18	
		3	0,59	3,73	4,22	
média			0,57	3,34	3,83	
desvio padrão			0,04	0,42	0,44	
Direção f		Medição	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,65	2,99	3,54	
		2	0,66	2,94	3,21	
		3	0,61	3,07	3,87	
	área 2	1	0,71	3,07	3,85	
		2	0,70	2,98	3,25	
		3	0,64	2,78	3,29	
	área 3	1	0,77	3,25	3,41	
		2	0,81	3,49	3,82	
		3	0,78	3,27	3,65	
média			0,70	3,09	3,54	
desvio padrão			0,07	0,21	0,27	

H13 vertical descendente						
Direção a _e		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,87	3,96	5,07	
		2	0,89	4,02	5,41	
		3	0,86	3,49	4,02	
	área 2	1	0,87	3,95	4,68	
2		0,92	4,37	5,21		
3		0,91	4,46	5,78		
área 3	1	0,93	4,07	5,30		
	2	0,95	4,54	5,40		
	3	0,97	4,19	5,61		
média			0,91	4,12	5,16	
desvio padrão			0,04	0,32	0,53	
Direção f		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,72	4,00	4,58	
		2	0,76	4,26	4,73	
		3	0,78	4,24	5,12	
	área 2	1	0,88	4,28	5,85	
		2	0,88	4,37	5,29	
		3	0,82	4,48	5,10	
	área 3	1	0,86	4,56	5,18	
		2	0,90	4,71	5,27	
		3	0,92	4,59	5,01	
	média			0,84	4,39	5,13
	desvio padrão			0,07	0,22	0,36
	H13 horizontal descendente					
Direção a _e		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,91	4,54	5,96	
		2	0,96	4,79	6,84	
		3	0,92	4,71	5,80	
	área 2	1	0,94	6,08	6,75	
		2	0,91	5,60	7,17	
		3	0,88	5,26	7,17	
	área 3	1	0,86	5,38	6,66	
		2	0,98	6,11	6,44	
		3	0,99	5,95	6,85	
média			0,93	5,38	6,63	
desvio padrão			0,04	0,60	0,48	
Direção f		Medição	R _a [μm]	R _z [μm]	R _{z1max} [μm]	
	área 1	1	0,73	3,49	4,19	
		2	0,77	3,55	3,91	
		3	0,73	3,41	3,84	
	área 2	1	0,74	3,22	3,78	
		2	0,68	3,05	3,44	
		3	0,77	3,44	4,54	
	área 3	1	0,67	3,33	4,00	
		2	0,81	3,76	5,23	
		3	0,76	3,30	3,52	
	média			0,74	3,39	4,05
	desvio padrão			0,04	0,20	0,55

APÊNDICE C – CÁLCULO DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

O cálculo de incerteza das medições de rugosidade foi baseado no documento Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição (JCGM 100:2008), o qual é uma tradução do documento *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:2008). O documento original foi elaborado por um grupo de trabalho conjunto formado por especialistas nomeados pelo Birô Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), pela Organização Internacional para a Normalização (ISO), e pela Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML). A tradução foi realizada pelo Grupo de Trabalho 1 do Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM/WG 1).

A seguir é realizada uma breve descrição dos elementos e fórmulas utilizados no cálculo de incerteza das medições de rugosidade.

Incerteza de medição

Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando.

Distribuição de probabilidade (de uma variável aleatória)

Função que determina a probabilidade de uma variável aleatória assumir qualquer valor dado ou pertencer a um dado conjunto de valores.

Divisor

Termo utilizado no cálculo da incerteza padrão. O valor do divisor depende da fonte de incerteza e da distribuição de probabilidade.

Incerteza padrão (u_{xi})

Incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio padrão. O valor é obtido a partir da equação (22):

$$u_{xi} = \frac{\text{valor de entrada}}{\text{divisor}} \quad (22)$$

Coefficiente de sensibilidade (c_i)

Quando as unidades das fontes de incerteza não são iguais, faz-se necessário determinar o grau de influência de cada unidade no resultado final, ou seja, deve-se determinar o coeficiente de sensibilidade de cada unidade envolvida. Esta conversão se dá através de derivadas parciais da equação de medição para cada variável.

Quando a fonte de incerteza tem a mesma unidade do resultado final, o coeficiente de sensibilidade é igual a 1.

Contribuição para a incerteza u_i

A contribuição individual de cada fonte de incerteza u_i é encontrada multiplicando-se o valor da incerteza padrão (u_{xi}) pelo respectivo coeficiente de sensibilidade (c_i), equação (23):

$$u_i = u_{xi} \cdot c_i \quad (23)$$

Incerteza padrão combinada (u_c)

Incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas, equação (24):

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (24)$$

Fator de abrangência (k)

Fator numérico utilizado como um multiplicador da incerteza padrão combinada, de modo a obter uma incerteza expandida.

Incerteza expandida (U)

Quantidade que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que podem ser

razoavelmente atribuídos ao mensurando. O valor da incerteza expandida é obtido a partir da equação (25):

$$U = u_c \cdot k \quad (25)$$

Grau de liberdade (v_i)

Em geral, o número de termos em uma soma menos o número de restrições sobre os termos da soma.

Grau de liberdade efetivo (v_{eff})

Representa o grau de liberdade do conjunto de fontes de incertezas envolvidas. É determinado a partir dos graus de liberdade de cada fonte e da equação (26):

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (26)$$

Esse valor é utilizado para determinar o fator de abrangência k , utilizando uma tabela de distribuição t de *Student*.

Na tabela C.1 é apresentado um exemplo da estruturação utilizada nos cálculos de incerteza das medições de rugosidade, para uma das condições experimentais.

Tabela C.1 – Exemplo do cálculo de incerteza de medição de rugosidade

Fonte de incerteza	Unidade	Valor de entrada	Distribuição de probabilidade	Divisor	Incerteza padrão u_{xi}	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição para a incerteza u_i	v_i
resolução do rugosímetro	μm	0,0050	retangular	raiz(3)	0,00289	1	0,00289	∞
erro do padrão de calibração	μm	-0,0210	retangular	raiz(3)	-0,01212	1	-0,01212	∞
instabilidade do padrão	μm	0,0168	t-student	raiz(n)	0,00376	1	0,00376	19
desvio padrão experimental	μm	0,0350	t-student	raiz(n)	0,01167	1	0,01167	8
			incerteza padrão combinada $u_c =$		0,01748	$v_{eff} =$		40,15
			95% de confiança $\rightarrow K =$		2,02	média =		0,940
			incerteza expandida $U =$		0,035	$U \% =$		3,8%

Fonte: O autor

Neste trabalho, o cálculo da incerteza das medições de rugosidade foi realizado utilizando-se os valores de rugosidade média R_a . Na tabela C.2 são listados os resultados de incerteza expandida encontrados para cada uma das condições experimentais.

Tabela C.2 – Incerteza expandida das medições de rugosidade

Condição	Direção de medição	Incerteza expandida U	$U\%$
P20 vertical ascendente	a_e	0,035	3,8%
	f_z	0,035	4,3%
P20 horizontal ascendente	a_e	0,043	6,2%
	f_z	0,055	6,0%
P20 vertical descendente	a_e	0,037	3,9%
	f_z	0,046	5,0%
P20 horizontal descendente	a_e	0,051	6,8%
	f_z	0,040	4,4%
H13 vertical ascendente	a_e	0,044	6,4%
	f_z	0,041	4,6%
H13 horizontal ascendente	a_e	0,038	6,8%
	f_z	0,058	8,2%
H13 vertical descendente	a_e	0,037	4,1%
	f_z	0,057	6,8%
H13 horizontal descendente	a_e	0,040	4,3%
	f_z	0,041	5,5%

Fonte: O autor

APÊNDICE D – CÁLCULO DO NÍVEL DE CONFIANÇA AMOSTRAL

O cálculo do nível de confiança amostral foi realizado utilizando-se a equação (27), obtida em Montgomery (2001):

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (27)$$

onde:

n é o número de indivíduos da amostra;

$Z_{\alpha/2}$ é o valor crítico que corresponde ao grau de confiança (tabela de distribuição normal);

σ é o desvio padrão da variável analisada; e

E é a margem de erro ou erro máximo de estimativa.

O nível de confiança amostral dos experimentos realizados neste trabalho foi calculado a partir dos resultados de rugosidade média R_a . Como margem de erro E foram empregados os valores obtidos no cálculo de incerteza expandida, apêndice C.

Na tabela D.1 são listados os valores empregados nos cálculos e os resultados obtidos de confiança amostral, para cada uma das condições experimentais.

Tabela D.1 – Nível de confiança amostral

Condição	Direção de medição	n	σ	E	$Z_{\alpha/2}$	Nível de confiança amostral
P20 vertical ascendente	a_e	9	0,0350	0,035	3,03	99,8%
	f_z	9	0,0346	0,035	3,04	99,8%
P20 horizontal ascendente	a_e	9	0,0485	0,043	2,67	99,2%
	f_z	9	0,0656	0,055	2,50	98,7%
P20 vertical descendente	a_e	9	0,0377	0,037	2,93	99,7%
	f_z	9	0,0529	0,046	2,60	99,1%
P20 horizontal descendente	a_e	9	0,0607	0,051	2,53	98,9%
	f_z	9	0,0431	0,040	2,77	99,4%
H13 vertical ascendente	a_e	9	0,0505	0,044	2,64	99,2%
	f_z	9	0,0448	0,041	2,74	99,4%
H13 horizontal ascendente	a_e	9	0,0406	0,038	2,84	99,6%
	f_z	9	0,0700	0,058	2,47	98,7%
H13 vertical descendente	a_e	9	0,0383	0,037	2,90	99,6%
	f_z	9	0,0691	0,057	2,48	98,7%
H13 horizontal descendente	a_e	9	0,0438	0,040	2,76	99,4%
	f_z	9	0,0444	0,041	2,74	99,4%

Fonte: O autor

ANEXO A – RELATÓRIO DE ENSAIO DE DUREZA



Relatório de Ensaio
LAMEC - (FG 205 rev 01)
Laboratório de Ensaios Mecânicos de Caxias do Sul
Telefone/Fax: (54) 3218.2168



Cliente:	Tiago Vacaro	Nº	0519/12
Endereço:	Universidade de Caxias do Sul		
Cidade:	Caxias do Sul – RS		
Natureza do trabalho:	ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL C	Data do ensaio:	09/07/12
		Temperatura:	18 °C
Identificação do cliente:			Fl: 1/1
02 amostras de aço; identificadas por: P20 e H13.			

Procedimento

- A amostra foi posicionada com a superfície perpendicular ao penetrador, procedendo-se o ensaio segundo procedimento interno PE 002 rev 04, em atendimento a norma NBR NM ISO 6508-1:2009.

Equipamento utilizado:

Durômetro Rockwell, marca: Testor – TS, Calibração: IPT, Certificado: 113792-101 e 113793-101, validade: 06/12/2013;

Rastreabilidade com padrões UKAS, nº 120816, 137330 e 137328.

A incerteza expandida de medição relatada “U” é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos [Veff] corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 [1999]. Os valores de k e Veff estão apresentados na tabela de resultados.

RESULTADOS:

Identificação nº	Leituras em HRC					Média HRC	U máx. (%)	k	Conversão
	01	02	03	04	05				
P20	37,9	36,9	37,9	37,9	36,9	37,5	3,9	2,00	-
H13	54,6	53,6	53,6	53,6	55,6	54,2	3,0	2,04	-

Observações:

- Os resultados têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo autorizada reprodução parcial deste documento.
- O critério de amostragem adotado foi determinado pelo cliente sobre o qual assume a responsabilidade.

Eng. Albano Luiz Weber
Sign. Aut. CREA RS65914-D