

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

**METODOLOGIA DEA-OTS: UMA CONTRIBUIÇÃO**  
**PARA A SELEÇÃO ÓTIMA DE FERRAMENTAS NO**  
**TORNEAMENTO DO AÇO ABNT H13 ENDURECIDO**

**Paulo Henrique da Silva Campos**

**Itajubá, Maio de 2015**

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

**Paulo Henrique da Silva Campos**

**METODOLOGIA DEA-OTS: UMA CONTRIBUIÇÃO**  
**PARA A SELEÇÃO ÓTIMA DE FERRAMENTAS NO**  
**TORNEAMENTO DO AÇO ABNT H13 ENDURECIDO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito à obtenção do título de *Doutor em Ciências em Engenharia de Produção*.

Área de concentração: Qualidade e Produto

**Orientadores:**

Prof. João Roberto Ferreira, Dr. (Universidade Federal de Itajubá- Brasil)

Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr. (Universidade Federal de Itajubá- Brasil)

Prof. João Paulo Davim Tavares da Silva, Dr. (Universidade de Aveiro- Portugal)

**Mai de 2015**

**Itajubá**

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

**Paulo Henrique da Silva Campos**

**METODOLOGIA DEA-OTS: UMA CONTRIBUIÇÃO**  
**PARA A SELEÇÃO ÓTIMA DE FERRAMENTAS NO**  
**TORNEAMENTO DO AÇO ABNT H13 ENDURECIDO**

Tese aprovada por banca examinadora em 13 de Maio de 2015, conferindo ao autor o título de **Doutor em ciências em Engenharia de Produção.**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. João Roberto Ferreira (Orientador)

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (Co-orientador)

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi (UNIFEI)

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (UNIFEI)

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro (UNESP)

Prof. Dr. Messias Borges Silva (USP)

**Itajubá**

**2015**

# DEDICATÓRIA

*A todos os amigos que me incentivaram,  
em especial a minha esposa querida,  
Fabricia Helena.*

## AGRADECIMENTOS

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

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

À CAPES, pelo auxílio financeiro durante todo período de estudo, inclusive no exterior (Doutorado Sanduíche), onde tive a oportunidade de aprimorar meus conhecimentos.

Agradeço ao Dr. João Paulo Davim Tavares da Silva, (Universidade de Aveiro-Portugal) que foi o co-orientador durante 1 ano (2012 – 2013).

Agradeço a Universidade de Aveiro, onde realizei o trabalho experimental, pesquisas, relatórios, participando de aulas, palestras, congressos, capítulo de livro internacional e artigos escritos e publicados.

Aos professores e amigos João Roberto Ferreira, Anderson Paulo de Paiva, Pedro Paulo Balestrassi, Sebastião Carlos da Costa, pela orientação, pela paciência e pelas importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, em especial Luiz Gustavo Dias Lopes, Rogério Santana Peruchi, Paulo Roberto Maia, Michele de Santana Carmelossi, José Henrique de Freitas Gomes, Rafael de Carvalho Miranda.

À minha Esposa Fabricia Helena Rezeck de Biaso Silva Campos, pelo apoio, carinho, tolerância e compreensão.

Ao Engenheiro Antonio José Fonseca Festas do Laboratório de Tecnologia Mecânica da Universidade de Aveiro, em especial pela ajuda e dicas nas atividades de laboratório, sendo o responsável pelo acompanhamento nos experimentos realizados.

Ao Dr. Carlos Lauro da Universidade de Aveiro - Portugal, pela principal ajuda nos ensaios experimentais, principalmente com a instalação e programação dos aparelhos.

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

## EPÍGRAFE

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin.

## RESUMO

Esta tese apresenta a Metodologia DEA-OTS (*Data Envelopment Analysis for Optimal Tool Selection*) como uma alternativa para o processo de seleção ótima de ferramentas utilizadas no torneamento do aço ABNT H13 endurecido a 54 HRC. Aplicando-se a Análise Envoltória de Dados (DEA) aos resultados ótimos de múltiplas superfícies de respostas estabelecidas para cada característica de usinagem de sete opções de ferramentas, obteve-se um índice de qualidade das soluções multiobjetivo por proximidade em relação a alvos individuais. Para tanto, foram avaliadas as condições de usinagem de cinco ferramentas cerâmicas (CC6050, CC6050 WH, CC650 WG, CC650, CC 670) e duas ferramentas de PCBN (7025, 7025WG), empregando-se arranjos de superfície de resposta, sendo inicialmente avaliadas 11 características relativas ao seu desempenho, tais como: custo total de usinagem ( $K_p$ ), tempo total de usinagem ( $T_t$ ), tempo de corte ( $T_c$ ), vida da ferramenta ( $T$ ), temperatura de corte ( $T_p^\circ$ ), ruído do processo (RD), taxa de volume de cavaco removido (MRR), força de usinagem ( $F_r$ ), rugosidades ( $R_a$ ,  $R_t$ ) e energia específica de corte (EEC), a partir da variação controlada de velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Após modeladas, essas características foram otimizadas utilizando o método Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (WEQMM). Em uma terceira etapa, as condições ótimas obtidas para cada ferramenta foram comparadas usando o modelo DEA CCR-I (orientado a *Inputs*). Após a aplicação da metodologia, constatou-se que as ferramentas CBN 7025 *wiper*, CBN 7025 e CC 650 foram as mais eficientes. Experimentos de confirmação foram executados para demonstrar a aplicabilidade e precisão do método de otimização proposto. Os resultados obtidos e as análises demonstram-se satisfatórios, reiterando a viabilidade da metodologia proposta.

**Palavras-chave:** Torneamento; aço endurecido; Otimização, seleção de ferramentas; Análise Envoltória de Dados (DEA).

## ABSTRACT

This Thesis presents the DEA-OTS Methodology (Data Analysis Envelopment for Optimal Selection Tool) as an alternative to the process of optimal selection of cutting tools, used in the AISI H13 hardened steel turning to 54 HRC. In this research, was applied DEA to the optimal results of multiple response surface, established for each machining feature of seven tool options. There was thus obtained a quality index of multi-objective solutions for proximity to individual targets. We evaluated the machining conditions of five ceramic tools (CC6050, CC6050 WH, CC650 WG, CC650, CC 670) and two PCBN tools (7025, 7025WG). Response surface designs were used for 11 characteristics related to its machining performance: total cost of machining ( $K_p$ ), total machining time ( $T_i$ ), cutting time ( $T_c$ ), tool life ( $T$ ), cutting temperature ( $T_p^\circ$ ), process noise ratio (DR), volume of removed chip rate (RRM), machining force ( $F_r$ ), surface roughness ( $R_a$ ,  $R_t$ ) and specific cutting energy (EEC). As input variables were used the cutting speed, the feed rate and the machining depth of cut. After modeled, these characteristics were optimized using the WEQMM method. In a third step, the optimum conditions obtained for each tool were compared using the DEA CCR-I Model (oriented to *Inputs*). After the application of the methodology, it was found that the tools CBN wiper 7025, CBN 7025 and 650 CC were the most efficient. Confirmation studies were performed to demonstrate the applicability and accuracy of the proposed optimization method. The results and analysis show to be satisfactory, confirming the feasibility of the proposed methodology.

Keywords: Hard turning; Response Surface Methodology (RSM); Tools selection optimization; Data Envelopment Analysis (DEA).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Características das operações de torneamento duro e retificação .....	9
Figura 2.2 – Influência da dureza do aço nas componentes da força de usinagem ( $V_c = 120$ m/min, $f = 0,08$ mm/rev e $a_p = 0,2$ mm).....	10
Figura 2.3 – Comparação dos diversos materiais para ferramentas de corte.....	13
Figura 2.4 – Classificação de materiais de ferramentas cerâmicas.....	14
Figura 2.5 – Configuração do raio de ponta múltiplo ( <i>W – Wiper</i> ).....	21
Figura 2.6 – Componentes da força de usinagem no processo de torneamento longitudinal .....	26
Figura 2.7 – Distribuição de temperaturas e de calor durante o processo de torneamento .....	28
Figura 2.8 – Técnica de máscara (a) e pastilha de corte revestida (b).....	29
Figura 2.9 – Esquema dos termopares incorporado .....	29
Figura 2.10 – Regiões de deformação na formação do cavaco.....	31
Figura 2.11 – Principais tipos de desgaste de ferramentas .....	32
Figura 2.12 – Desgaste de flanco (a) e desgaste de entalhe (b) e (c) e (d) desgaste de cratera.....	33
Figura 2.13 – Detalhe do desgaste da ferramenta CBN no torneamento duro .....	35
Figura 2.14 – Mecanismos de desgaste em função da velocidade de corte $V_c$ : I -Adesão, II – Abrasão, III – Difusão, IV – Deformação plástica, V – Oxidação.....	36
Figura 2.15 – Desvio médio aritmético $R_a$ .....	37
Figura 2.16 – Altura das irregularidades dos 10 pontos “ $R_z$ ”.....	38
Figura 2.17 – Altura máxima das irregularidades “ $R_{max}$ ” e profundidade média “ $R_p$ ” .....	39
Figura 2.18 – Topografia da superfície: A) superfície gerada por torneamento duro e B) superfície gerada por retificação.....	40
Figura 2.19 – Camadas superficiais observada (a) e simulada (b).....	42
Figura 3.1 – Arranjo composto central para três fatores.....	47
Figura 3.2 – Interpretação geométrica dos componentes principais.....	50

Figura 3.3 – Desvantagens do Método de Somas Ponderadas .....	56
Figura 3.4 – Comparação entre NBI e o Método de Somas Ponderadas .....	56
Figura 3.5 – Método da Interseção Normal à Fronteira (NBI).....	58
Figura 3.6 – (a) Curva de um processo de produção (b) Alcance da fronteira de eficiência ...	64
Figura 4.1 – Torno CNC “MHP Kingsbury” utilizado nos ensaios .....	71
Figura 4.2 – Ferramentas utilizadas nos experimentos: CC6050, CC6050 WH, CC650 WG, CC650, CBN7025, CBN7025WH, CC 670 .....	72
Figura 4.3 – Sistema de fixação utilizado nos experimentos .....	73
Figura 4.4 – Porta-ferramenta utilizado nos experimentos.....	73
Figura 4.5 – Sistema de fixação do corpo-de-prova .....	74
Figura 4.6 – Desenho da geometria do corpo-de-prova.....	75
Figura 4.7 – Ciclo de tratamento térmico típico da têmpera e revenido do aço H13.....	77
Figura 4.8 – Posicionamento do rugosímetro para as medições.....	77
Figura 4.9 – Durômetro Ernst NR3 utilizado nos ensaios de dureza .....	78
Figura 4.10 – Equipamento utilizado na medição das forças de corte (a) Torno CNC “MHP Kingsbury”, (b) Dinamometro piezoelétrico Kistler 9121 e (c) Amplificador de carga Kistler 5019 (d) software, “Dynoware Software Data Acquisition” ..	79
Figura 4.11 – Colocação do porta ferramenta no dinamômetro piezoelétrico.....	80
Figura 4.12 – Acelerometro 3200B3(A), amplificador modelo 4120C (B) escolhido para aquisição das vibrações nas operações de usinagem.....	81
Figura 4.13 – Microscópio manual (A), Microscópio óptico Mitutoyo TM – 500 com carro micrométrico (B) e Suporte metálico (C) utilizado para avaliar o desgaste na ferramenta de corte.....	82
Figura 4.14 – Formas de desgaste típicas das ferramentas segundo ISO 3685.....	83
Figura 4.15 – Esquema do aparato experimental do método do termopar-ferramenta.....	84
Figura 5.1 – Modelo DEA CCR-I aplicado ao processo de torneamento.....	87
Figura 5.2 – Fluxo para a metodologia DEA-OTS.....	88
Figura 6.1 – CC 6050 ( <i>Wiper</i> ): (A) Superfície de folga e (B) Superfície de saída.....	99

Figura 6.2 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 6050 ( <i>Wiper</i> ).....	100
Figura 6.3 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	101
Figura 6.4 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).....	102
Figura 6.5 – CC 6050: A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.....	104
Figura 6.6 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 6050.....	106
Figura 6.7 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	106
Figura 6.8 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).....	107
Figura 6.9 – CC 650 ( <i>Wiper</i> ): A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.....	109
Figura 6.10 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 650 ( <i>Wiper</i> ).....	109
Figura 6.11 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	111
Figura 6.12 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).....	112
Figura 6.13 – CC 650: A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.....	113
Figura 6.14 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 650.....	115
Figura 6.15 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	115
Figura 6.16 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).....	116
Figura 6.17 – CC 670: A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.....	118
Figura 6.18 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	120
Figura 6.19 – Gráfico da superfície de resposta para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	121
Figura 6.20 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC670.....	121
Figura 6.21 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).....	122
Figura 6.22 – PCBN 7025 ( <i>Wiper</i> ): A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.....	123
Figura 6.23 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	125
Figura 6.24 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta PCBN 7025 ( <i>Wiper</i> ).....	126

Figura 6.25 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).....	126
Figura 6.26 – PCBN 7025: A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.....	128
Figura 6.27 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).....	130
Figura 6.28 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta PCBN 7025 .....	130
Figura 6.29 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).....	132
Figura 6.30 – Fronteira de Pareto para a ferramenta CC 6050 ( <i>Wiper</i> ).....	143
Figura 6.31 – Fronteira de Pareto para a ferramenta CC 650, CC 650 ( <i>Wiper</i> ), CC 6050, CC 670, CBN 7025, CBN 7025 ( <i>Wiper</i> ).....	145
Figura 6.32 – Valor de rugosidade experimento de confirmação ferramenta CBN 7025 <i>Wiper</i> .....	158

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Variáveis de controle e níveis de trabalho.....	71
Tabela 4.2 – Composição química em porcentagem de peso do aço ABNT H13.....	76
Tabela 6.1 – Parâmetros Codificados e Decodificados.....	98
Tabela 6.2 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 6050 Wiper.....	100
Tabela 6.3 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC6050 Wiper.....	103
Tabela 6.4 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 6050.....	105
Tabela 6.5 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC 6050.....	108
Tabela 6.6 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 650 <i>Wiper</i> .....	110
Tabela 6.7 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC 650 <i>Wiper</i> .....	113
Tabela 6.8 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 650.....	114
Tabela 6.9 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC 650.....	117
Tabela 6.10 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 670.....	119
Tabela 6.11 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC 670.....	123
Tabela 6.12 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CBN 7025 <i>Wiper</i> .....	124
Tabela 6.13 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CBN 7025 <i>Wiper</i> .....	127
Tabela 6.14 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CBN 7025.....	129
Tabela 6.15 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CBN 7025.....	132
Tabela 6.16 – Estrutura de correlação das respostas otimizadas.....	132
Tabela 6.17 – Média, Desvio-padrão e alvo das respostas individuais.....	135
Tabela 6.18 – Autovetores, Autovalores, Proporção de explicação e alvos dos PCs.....	136
Tabela 6.19 – EQMM dos Componentes Principais e o WEQMM.....	138
Tabela 6.20 – Otimização NBI -WEQMM de cada característica estudada no processos de torneamento do aço ABNT H13 para a ferramenta CC 6050 <i>Wiper</i> .....	140
Tabela 6.21 – Valores extremos e os valores de Entropia /EPG escalonados.....	142

Tabela 6.22 – Valores extremos da Fronteira de Pareto (0,10-0,90) e valor da máxima razão Entropia /EPG.....	144
Tabela 6.23 – Valores escalonados das respostas.....	146
Tabela 6.24 – Resultados da otimização de cada DMU.....	148
Tabela 6.25 – Valores da otimização individual e Global para a ferramenta CBN7025 ( <i>Wiper</i> ).....	150
Tabela 6.26 – Valores da otimização individual e Global para a ferramenta CBN7025.....	151
Tabela 6.27 – Valores da otimização individual e Global para a ferramenta CC650.....	152
Tabela 6.28 – Valores experimentais, otimização individual e Global das ferramentas CC 6050 ( <i>Wiper</i> ), CC 6050, CC650 ( <i>Wiper</i> ) e CC 670.....	153
Tabela 6.29 – Experimento de confirmação.....	156

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Propriedades de alguns dos materiais para ferramentas de corte .....	15
Quadro 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas de cerâmicas .....	16
Quadro 2.3 – Propriedades físicas do CBN .....	18
Quadro 2.4 – Material, dureza, ferramentas e parâmetros de usinagem utilizados no torneamento de materiais endurecidos .....	23
Quadro 3.1 – Características fundamentais das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos .....	44
Quadro 4.1 – Ferramentas utilizadas nos experimentos .....	71
Quadro 4.2 – Parâmetros e calibração Kistler usados no torneamento de aços endurecidos .....	80
Quadro 5.1 – Dados de tempo total do ciclo e cálculos de custo total .....	90
Quadro 6.1 – <i>Inputs</i> (minimização) e <i>Outputs</i> (maximização) .....	144

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP	Análise de Componentes Principais
APC*	Aresta postíça de corte
AG	Algoritmo Genético
ANOVA	Análise de Variância
AWS	<i>American Welding Society</i>
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central ou <i>Central Composite Design</i>
CCF	Arranjo Composto de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
CCR-O	Modelo DEA orientado a Outputs (CCR: Charnes, Cooper & Rods)
DEA	Análise Envoltória de Dados ( <i>Data Envelopment Analysis</i> )
DOE	Delineamento de Experimentos ( <i>Design of Experiments</i> )
EQMM	Erro Quadrático Médio Multivariado
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
NBI	Método Interseção Normal a Fronteira
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> ou Mínimos Quadrados Ordinários
PC	<i>Principal Component</i> ou Componente Principal
NADCA	<i>Nort American Die Casting Association</i>
EPG	Erro percentual global
HRC	Dureza Rockwell C

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$	Porcentagem de explicação do componente principal
$\Pi$	Produtório
$\eta$	Rendimento do processo
$\eta_s$	Rendimento do processo padronizado
$\Sigma$	Somatório
$\lambda_{PC}$	Autovalor do componente principal
$\lambda^*_{PC}$	Autovalor do componente principal das respostas ponderadas
$\zeta_y$	Alvo definido para a resposta
$\sigma_y$	Desvio-padrão experimental da resposta
$\mu_y$	Média experimental da resposta
$AD$	Coefficiente de Anderson-Darling
$c$	Coefficiente do auto vetor do componente principal
$e$	Peso atribuído para a resposta
$H$	Dureza
$PC$	Componente Principal
$PC^*$	Componente Principal das respostas ponderadas
$T_{PC}$	Alvo em termo do componente principal
$T^*_{PC}$	Alvo em termos do componente principal das respostas ponderadas
$x$	Variáveis independentes
$y$	Resposta de interesse
$Z(y   \zeta_y)$	Valor padronizado da resposta em relação ao alvo
$Z(y)$	Valor padronizado da resposta
$\alpha$	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
$\beta$	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
$\varepsilon$	Erro experimental
$u_r$	Peso associado a r-ésima saída
$v_i$	Peso associado a i-ésima entrada

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos do trabalho.....	4
1.2 Justificativa .....	5
1.3 Limitações.....	5
1.4 Contribuições Esperadas.....	6
1.5 Estrutura do trabalho.....	6
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>8</b>
2.1 Torneamento de Aços Endurecidos .....	8
2.2 Ferramentas de Corte .....	12
2.2.1 Ferramentas de corte à base de alumina.....	15
2.2.2 Ferramentas de corte à base de nitreto de silício.....	16
2.2.3 Ferramentas de nitreto de boro cúbico “CBN” .....	17
2.3 Geometria das ferramentas cerâmicas e PCBN .....	19
2.4 Parâmetros de usinagem .....	21
2.5 Forças de corte .....	24
2.6 Temperatura de corte .....	27
2.7 Formação do Cavaco .....	29
2.8 Desgaste e vida das ferramentas de corte .....	32
2.9 Integridade Superficial.....	36
2.9.1 Rugosidade.....	36
2.9.2 Topografia da superfície .....	39
2.9.3 Camada branca.....	41
2.9.4 Considerações Finais .....	42
<b>3 MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELAGEM DE PROCESSOS .....</b>	<b>43</b>
3.1 Projeto e Análise de Experimentos .....	43
3.2 Metodologia de Superfície de Resposta.....	45
3.3 Análise de Componentes Principais (ACP).....	48
3.4 Otimização de múltiplas respostas.....	51
3.4.1 Erro Quadrático Médio Multivariado .....	52
3.4.2 Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado .....	54
3.4.3 Método da Interseção Normal a Fronteira (NBI).....	55
3.5 Algoritmos de Otimização .....	59

3.5.1 Gradiente Reduzido Generalizado .....	59
3.6 Análise Envoltória de Dados (DEA) .....	61
3.6.1 Conceitos Básicos da Análise Envoltória de Dados (DEA).....	62
3.6.2 Modelo DEA com retornos constantes de escala (DEA CCR) .....	65
3.7 Considerações finais .....	67
<b>4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>69</b>
4.1 Método experimental .....	69
4.2 Planejamento dos experimentos.....	69
4.3 Procedimento experimental .....	70
4.3.1 Máquina-ferramenta.....	70
4.3.2 Ferramentas, porta-ferramentas e sistemas de fixação.....	71
4.3.3 Geometria do corpo de prova.....	75
4.3.4 Caracterização do material usinado .....	75
4.3.5 Medição das Rugosidades .....	77
4.3.6 Medição da Dureza do Material.....	78
4.3.7 Medição das Forças de Corte .....	79
4.3.8 Medição das Vibrações .....	80
4.3.9 Medição e Caracterização do Desgaste das Ferramentas.....	81
4.3.10 Medição da Temperatura .....	83
4.3.11 Considerações finais.....	85
<b>5 METODOLOGIA DEA - OTS.....</b>	<b>86</b>
5.1 Selecionar as Ferramentas que se deseja avaliar .....	88
5.2 Selecionar as variáveis de controle e definir seus níveis.....	89
5.3 Selecionar as características de interesse.....	89
5.4 Planejar e executar um DOE do tipo CCD para cada ferramenta.....	91
5.5 Realização dos Experimentos .....	91
5.6 Modelar cada característica de interesse para cada ferramenta .....	91
5.7 Avaliar correlação entre as respostas e executar a ACP.....	92
5.8 Aplicar o Método WEQMM.....	93
5.9 Otimização Baseada no método NBI-WEQMM .....	94
5.10 Selecionar os pontos da Fronteira que serão candidatas - Critério Entropia/EPG.....	94
5.11 Definir Inputs e Outputs para implementação do DEA .....	95
5.12 Definir pesos mínimos atribuídos aos inputs e outputs .....	95
5.13 Executar DEA e selecionar a ferramenta ótima.....	96
<b>6 APLICAÇÃO DO MODELO DEA - OTS.....</b>	<b>97</b>
6.1 Considerações iniciais e discussões sobre as etapas .....	97

6.2 Seleção das Ferramentas avaliadas .....	97
6.2.1 Ferramenta CC6050 ( <i>Wiper</i> ) .....	98
6.2.2 Ferramenta CC 6050.....	103
6.2.3 Ferramenta CC650 ( <i>Wiper</i> ) .....	108
6.2.4 Ferramenta CC650.....	112
6.2.5 Ferramenta CC670.....	117
6.2.6 Ferramenta PCBN 7025 ( <i>Wiper</i> ) .....	122
6.2.7 Ferramenta PCBN 7025.....	126
6.3 Seleção das variáveis de controle e definição de seus níveis .....	131
6.4 Seleção das respostas utilizadas nos experimentos.....	131
6.5 Planejamento do arranjo experimental .....	132
6.6 Realização dos Experimentos .....	132
6.7 Estimação do modelo matemático das respostas .....	132
6.8 Avaliação da interdependência entre as respostas e executar a ACP apenas para as respostas correlacionadas.....	133
6.9 Transformação WEQMM.....	135
6.10 Aplicação do método NBI-WEQMM.....	138
6.11 Resultados da Entropia/EPG.....	141
6.12 Definição dos <i>Inputs</i> e <i>Outputs</i> para implementação do DEA .....	143
6.13 Execução do DEA e escolha das DMUs para seleção da ferramenta ótima.....	143
6.14 Experimentos de confirmação .....	154
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>156</b>
7.1 Contribuições do trabalho.....	158
7.2 Sugestões para estudos futuros .....	158
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>159</b>
ANEXO A – Tabela com todas as respostas CC 6050 <i>Wiper</i> .....	176
ANEXO B - Ferramenta CC6050.....	183
ANEXO C - Ferramenta CC650 ( <i>Wiper</i> ) .....	186
ANEXO D - Ferramenta CC650.....	189
ANEXO E - Ferramenta CC670 .....	192
ANEXO F - Ferramenta PCBN 7025 ( <i>Wiper</i> ).....	195
ANEXO G - Ferramenta PCBN 7025.....	198
ANEXO H – Execução do DEA e seleção da ferramenta ótima para as 7 DMUs.....	201

ANEXO I – Correlação existente entre as respostas para cada ferramenta .....203

# 1 INTRODUÇÃO

O torneamento de materiais endurecidos vem sendo cada vez mais utilizado ao longo dos últimos anos, devido ao crescente aumento da demanda de produção e à necessidade de redução dos custos de fabricação, oriundos da exigência cada vez maior das novas tecnologias empregadas nos processos industriais. Convencionou-se chamar de torneamento duro a remoção de cavacos em materiais com dureza na faixa 45-65 HRC. Há poucos anos, materiais que necessitavam ser usinados em sua forma endurecida, o eram apenas pelo processo de retificação (DAVIM, 2011; CAMPOS et al. 2014).

Devido ao desenvolvimento de materiais para ferramentas de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, aliados ao surgimento de máquinas ferramentas de maiores rigidez e precisão dimensional em altas rotações, é possível a usinagem destes materiais pelo processo de torneamento. O estudo de alguns trabalhos acena com a possibilidade de obtenção de peças com qualidade semelhante às obtidas na retificação fina, utilizando-se, para isto, tornos de alta precisão, parâmetros otimizados de corte e geometrias especiais de ferramentas (DINIZ et al. 2014; CAMPOS et al. 2014).

Com o aprimoramento dos materiais de ferramentas dito “avançados” como o CBN e a cerâmica, concomitantemente com o avanço na manufatura de máquinas ferramentas mais rígidas, computadorizadas e com tolerância extremamente precisa, a operação de torneamento de aços endurecidos vem se tornando comum. Com a inovação das ferramentas de geometrias alisadoras (*wiper*), tornou-se possível atingir um acabamento de alta qualidade em operações de torneamento quando comparadas com ferramentas convencionais. Para alguns casos, o acabamento também pode se manter para avanços maiores do que os comuns, conduzindo a um aumento da produtividade (SANDVIK, 2010).

No estudo da vida de ferramentas e da rugosidade média das superfícies usinadas pelo processo de torneamento, há vários fatores de influência, como, por exemplo, a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de usinagem e a geometria da ferramenta de corte. Na análise convencional da influência destes fatores num processo de usinagem, geralmente é estudada a influência de cada um deles isoladamente, o que demanda um grande número de ensaios, elevado consumo de material e ferramentas, além da necessidade de utilização de muitas horas-máquina, o que em geral, torna os custos com a experimentação proibitivos (BOUACHA et al. 2010).

É neste contexto que se insere a metodologia de projeto de experimentos (DOE), uma estratégia que permite estabelecer um relacionamento funcional adequado entre a vida de

ferramenta ou a rugosidade da peça e parâmetros de corte, levando-se em consideração a variação simultânea dos fatores para construir modelos de previsão para as respostas de interesse. Essa abordagem de cunho estatístico consiste em planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma eficaz análise, o que resulta em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2005).

O experimento planejado é um teste ou uma série de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada do processo, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saída. As técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa, tais como, material, tempo de mão de obra, de máquinas e etc.

Segundo Paiva et al. (2007), as técnicas experimentais necessitam ser um pouco mais difundidas nas empresas brasileiras para que se obtenha mais conhecimento estatístico, que comumente os gerentes, funcionários e engenheiros enfrentam ao usar tais ferramentas. Quando as informações dos experimentos são analisadas estatisticamente, garante-se que o produto será projetado com robustez às variações decorrentes do próprio processo de fabricação. Ainda, a análise estatística é importante, porque uma pequena diferença entre as especificações técnicas de um produto ou nos níveis de ajustagem dos fatores de controle de um processo de fabricação pode significar o ganho ou perda de tempo de produção, ferramentas de usinagem e qualidade do produto, o que, conseqüentemente, converte-se em grandes ganhos ou perdas econômicas para a empresa.

O conceito de otimização, de acordo com Rao (2009), pode ser entendido como o ato de obter o melhor resultado sob dadas circunstâncias. Assim, nos mais diversos tipos de processos e operações de engenharia, engenheiros se deparam, em diferentes estágios de um ambiente industrial, com várias decisões relacionadas a aspectos tecnológicos ou gerenciais. O objetivo final pode ser traduzido tanto na minimização dos recursos necessários para uma determinada operação quanto na maximização dos resultados desejados. Portanto, desde que os recursos necessários ou os resultados desejados possam ser expressos como uma função de variáveis de decisão, entende-se a otimização como o processo de identificar as condições que proporcionem o valor máximo ou mínimo de uma função, a qual é denominada função objetivo. Levando em consideração os conceitos anteriores, visando aplicá-los no contexto da fabricação, a otimização dos processos de manufatura é então caracterizada como o ato de

ajustar adequadamente as variáveis envolvidas nos processos, seja em seu fluxo produtivo ou em suas máquinas envolvidas, de forma que este ajuste possibilite os melhores resultados para o produto fabricado (custo, acabamento, produtividade ou conformidade com as especificações do cliente).

Com o desenvolvimento das funções objetivo e equações de restrição, procede-se com a devida organização das mesmas, a fim de se compor a formulação do problema de otimização. Nesse contexto, diferentes técnicas e estratégias de programação matemática são apresentadas na literatura, as quais variam de acordo com a natureza e a complexidade dos problemas. Como alguns exemplos, Rao (2009) mostrou que, de acordo com o tipo das equações ou variáveis envolvidas, as seguintes técnicas podem ser utilizadas: programação linear, programação não-linear, programação geométrica, programação quadrática, programação inteira, programação estocástica. Outros casos incluem a função *desirability* (DERRINGER e SUICH, 1980), a otimização robusta através da minimização do erro quadrático médio (KÖKSOY, 2006; LIN e TU, 1995) e as métricas  $L_p$  (ARDAKANI e NOOROSSANA, 2008). Citam-se ainda o erro quadrático médio proposto por Govindaluri e Cho (2007), o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) de Paiva et al. (2009) e o critério global baseado em componentes principais (GOMES et al. 2012), que são estratégias que levam em consideração a estrutura de correlação existente entre múltiplas respostas. Vale destacar que, quando múltiplas respostas são consideradas e estas necessitam ser otimizadas com diferentes graus de importância, vários dos métodos apresentados anteriormente permitem que pesos sejam atribuídos para as funções objetivo. No entanto, o critério adotado para a alocação de pesos tradicionalmente leva em consideração a experiência e a sensibilidade do tomador de decisão, além da ponderação baseada em tentativas, que é um procedimento também utilizado.

A partir da formulação do problema de otimização, a identificação do ponto de ótimo é feita com o emprego de algoritmos de otimização nas equações do problema. Novamente, para esta tarefa, várias contribuições têm sido apresentadas por diferentes pesquisadores, com destaque principalmente para os métodos gradientes, como o algoritmo GRG - Gradiente Reduzido Generalizado (RAO, 2009), e os métodos evolucionários, como o Algoritmo Genético (BUSACCA et al. 2001). Após a identificação do ponto de ótimo, deve-se analisar os resultados e compará-los com o processo real, realizando, sempre que possível, testes de confirmação e validação estatística.

Aliados às técnicas de projeto de experimentos (DOE), bem como a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), neste trabalho, métodos de otimização multiobjetivo e a Análise Envoltória de Dados (DEA) serão aplicados. Após modeladas, as características de saída (ou resposta) do processo de torneamento serão otimizadas segundo um algoritmo multiobjetivo, tal como Método Interseção Normal a Fronteira (NBI). Para tratar a dependência entre as múltiplas funções objetivo empregar-se-á a Análise de Componentes Principais (ACP) que, além da neutralização dos efeitos de correlação sobre os coeficientes das funções objetivo, permitirá também a redução do número de funções. Ao se considerar que cada nova função objetivo não correlacionada mantém uma ligação com os alvos das funções objetivo originais, e que diferentes pesos podem ser escolhidos para as funções objetivo multivariadas, poderá ser empregado o método Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (WEQMM). As condições ótimas obtidas para cada ferramenta serão então comparadas usando a Análise Envoltória de Dados em modelos não paramétricos orientados a *inputs* (DEA CCR-I). Este algoritmo permitirá a construção de uma superfície de eficiência linear, por partes, envolvendo os dados em análise. Esse modelo trabalha com retornos constantes de escala, de modo que uma variação nos valores de insumos (*inputs*) produzirá uma variação proporcional nos produtos (*outputs*). A eficiência será, então, uma razão entre os produtos e os insumos ponderados. Para usá-la como medida da qualidade dos resultados de otimização, considerar-se-á como *inputs* as funções objetivo que devam ser minimizadas e como *outputs*, aquelas que se deseja maximizar. A eficiência calculada em tais relações para as funções objetivo de cada ferramenta permitirá a classificação dos resultados.

## 1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é “desenvolver e aplicar uma metodologia de otimização da seleção de ferramentas de corte para o torneamento do aço ABNT H13 endurecido comparando-se as condições ótimas de utilização de sete ferramentas disponíveis, todas ensaiadas nas mesmas condições experimentais”.

Utilizando uma combinação da Metodologia de Superfície de Resposta, Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), Método Interseção Normal a Fronteira (NBI), Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise Envoltória de Dados (DEA), esta metodologia, denominada Metodologia DEA-OTS (*Data Envelopment Analysis for Optimal Tool Selection*), confrontará o desempenho de sete ferramentas em três etapas distintas.

A primeira etapa da proposição envolve o estudo das condições de usinagem de cinco ferramentas cerâmicas e duas ferramentas de PCBN, com geometria convencional e alisadora. Para isto foram realizados ensaios experimentais projetados segundo arranjos de superfície de resposta do tipo CCD (*Central Composite Design*) para cada uma das sete ferramentas pré-selecionadas com os quais serão coletados os dados de várias características relativas ao seu desempenho, tais como custo total de usinagem ( $K_p$ ), tempo total de usinagem ( $T_t$ ), tempo de corte ( $T_c$ ), vida da ferramenta ( $T$ ), temperatura de corte ( $T_p^\circ$ ), ruído do processo (RD), taxa de volume de cavaco removido (MRR), força de usinagem ( $F_r$ ), rugosidades ( $R_a$ ,  $R_t$ ) e energia específica de corte de corte (EEC), a partir da variação controlada de velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem, cujos níveis e demais condições experimentais serão mantidos para os ensaios de todas as ferramentas. Na segunda etapa, após modeladas, estas características serão otimizadas segundo um algoritmo multiobjetivo, tal como NBI-PCA ou Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (WEQMM). Na terceira etapa, comparam-se as condições ótimas obtidas para cada ferramenta usando um algoritmo DEA CCR-I. Após esta fase vai ser possível escolher a ferramenta que mais atenda às condições ótimas globais de operação para o processo de torneamento do aço ABNT H13 endurecidos.

## 1.2 Justificativa

A principal justificativa para esta tese é a necessidade de uma metodologia de seleção de ferramentas para processos de torneamento que sejam capazes de comparar, distinguir e classificar opções disponíveis segundo seus desempenhos ótimos globais. Portanto, com esta tese, tenciona-se criar uma diretriz de tomada de decisão que seja viável, acessível e abrangente, no tocante ao aspecto sistêmico de seleção.

## 1.3 Delimitações

Esta tese limita-se às seguintes condições de contorno:

- a) Trata apenas de processos de usinagem por torneamento;
- b) Investiga apenas o torneamento do aço ABNT H13 endurecido, (54 HRC);
- c) Analisa apenas ferramentas cerâmicas e de PCBN;
- d) Utiliza apenas arranjos experimentais de Superfície de Resposta;
- e) Limita-se apenas à utilização do Método DEA orientado a *Outputs* (DEA CCR-O);

## 1.4 Contribuições Esperadas

a) Proposição de uma metodologia para seleção de ferramentas baseada em condições otimizadas de utilização;

b) Uso do DEA para seleção de ferramentas utilizadas na usinagem de aços endurecidos.

## 1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco diferentes capítulos, os quais estão descritos a seguir:

**Capítulo 1:** Introdução

**Capítulo 2:** Fundamentação teórica

É apresentada neste capítulo uma breve revisão da literatura recente sobre a usinagem dos aços endurecidos, ferramentas disponíveis no mercado. Revisa-se também neste capítulo a metodologia empregada no projeto de experimentos, evidenciando-se as vantagens obtidas com a utilização desta técnica escolhida para delinear este trabalho.

**Capítulo 3:** Apresenta os principais conceitos relacionados aos métodos de otimização multi-objetivo, aos métodos de múltiplas respostas existentes na literatura, às técnicas experimentais para a modelagem e análise de processos e aos algoritmos de otimização empregados são discutidos neste capítulo.

**Capítulo 4:** Experimentação

Neste capítulo serão descritos detalhadamente os métodos experimentais utilizados neste trabalho, as ferramentas de corte, o material utilizado para a usinagem, características da máquina, instrumentos, corpos de prova, condições de corte e procedimentos utilizados para execução da usinagem do aço endurecido.

**Capítulo 5:** Descreve os procedimentos da aplicação da modelagem, análise e otimização do processo de usinagem e, principalmente, para demonstrar a aplicabilidade do método proposto.

**Capítulo 6:** Apresenta e discute os resultados obtidos, com a modelagem e análise multi-objetivo do processo de usinagem.

**Capítulo 7:** Encerra o trabalho, apresentando as conclusões e as contribuições desta pesquisa, além das sugestões para estudos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Torneamento de Aços Endurecidos

A usinagem de aços endurecidos acima de 45 HRC usando ferramentas de corte pelo processo de torneamento tem sido desenvolvida para substituir o processo de retificação cilíndrica, o qual tem se mostrado mais lento e inflexível. O torneamento duro oferece uma vantagem muito grande de benefícios quando comparado ao tradicional processo de retificação (SHARMA, 2010). Existe uma demanda muito grande pela usinagem de aços endurecidos na fabricação de rolamentos, eixos de engrenagem, ferramentas de corte especiais, matrizes, moldes, etc., com o objetivo de melhorar a resistência ao desgaste destes componentes (FARIAS, 2009).

Componentes funcionais e de suporte em diversas aplicações industriais necessitam de elevada dureza para resistir às condições de trabalho, principalmente em relação à resistência ao desgaste. Após os processos para aumento da dureza do material, o componente é submetido às operações de acabamento para gerar a geometria final (GRZESIK, 2008).

Tradicionalmente, em geometrias de revolução, essas operações são realizadas por retificação, porém, com o desenvolvimento dos materiais ultraduros para as ferramentas de usinagem (cerâmica e PCBN) e máquinas-ferramenta com elevada rigidez e estabilidade dinâmica, as operações de acabamento em materiais endurecidos tornaram-se viáveis por torneamento (LAHIFF et al. 2007). É mostrado na Figura 2.1 uma comparação das características entre as operações de acabamento por retificação e torneamento duro.

Na comparação entre as operações de acabamento por torneamento e retificação apresentada na Figura 2.1, os pontos destacados próximos à periferia correspondem aos melhores resultados. O torneamento, além de possuir alta taxa de remoção de material, ser um processo mais flexível e possibilitar a usinagem de geometrias complexas, também demonstra maior compatibilidade ambiental devido à possibilidade de isenção de fluidos de corte.

A utilização de fluidos de corte ocasiona problemas com manuseio, armazenamento, saúde do operador e principalmente com o descarte. O menor dano na camada subsuperficial, gerada pelo torneamento em relação à retificação, está relacionado à menor área e tempo de contato da ferramenta com a peça. Além desses fatores descritos, em comparação à retificação, o torneamento é uma operação mais rápida, pois uma maior parcela da geometria

da peça pode ser usinada em uma única preparação de máquina (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).



Figura 2.1 – Características das operações de torneamento duro e retificação.

Fonte: Adaptado de Klocke et al. (2005).

A retificação possui vantagens, como: precisão de forma e dimensão, baixos valores de rugosidade e maior confiabilidade do processo, a qual é principalmente atribuída às repentinas avarias nas ferramentas utilizadas no torneamento. São mostrados na Figura 2.1 menores valores de tensões residuais plotadas pela retificação em relação ao torneamento. No entanto, as tensões residuais geradas pela operação de retificação são geralmente de tração, a qual é principalmente relacionada ao efeito térmico no processo de corte.

Já no torneamento, as tensões residuais geradas são geralmente compressivas devido às deformações plásticas e elásticas inerentes à formação do cavaco. As tensões residuais compressivas geradas pelo torneamento proporcionam maior vida aos componentes quando submetidos à fadiga mecânica (MACHADO et al. 2009; ABRÃO e ASPINWALL, 1996).

No sentido de facilitar a compreensão, Mohamed et al. (2012), Lahiff et al. (2007) afirmam que a usinagem de materiais endurecidos se caracteriza pela usinagem de material

com dureza superior a 45 HRC. A conclusão destes autores surgiu por meio da análise do comportamento do processo de torneamento de materiais endurecidos utilizando ferramentas de cerâmicas e de PCBN. É mostrado na Figura 2.2 o comportamento das componentes da força de usinagem no torneamento do aço AISI 52100 em diferentes níveis de dureza.

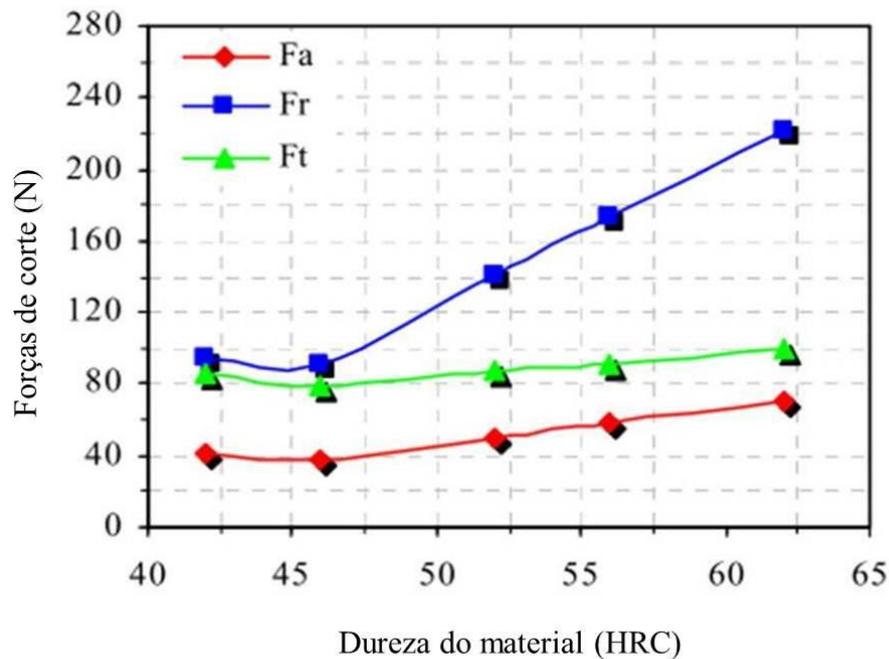


Figura 2.2 – Influência da dureza do aço em componentes da força para ( $V_c = 120$  m/min,  $f = 0,08$  mm/rev e  $a_p = 0,2$  mm).

Fonte: Mohamed et al. (2012).

Como apresentado na Figura 2.2, a dureza do material usinado influencia nas componentes da força de usinagem, a qual possui dois comportamentos distintos. O incremento na dureza do material usinado até um limite próximo a 50 HRC promove uma redução nas componentes da força de usinagem. Ainda nesses patamares, cavacos morfologicamente contínuos são observados. Esses fenômenos podem ser explicados pelo efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta. O incremento da dureza no material usinado promove o aumento da temperatura na região do corte, reduzindo a resistência ao cisalhamento do material. Outro fenômeno observado nessa condição é o aumento do ângulo de cisalhamento e a diminuição da espessura do cavaco, proporcionando a redução da área de contato na interface cavaco-ferramenta. Ambos os fatores contribuem para a redução das componentes da força de usinagem até um limite de dureza próximo a 50 HRC. Quando a dureza do material usinado é superior a 50 HRC, um súbito aumento nas componentes da

força de usinagem é observado e os cavacos passam a ser formados morfológicamente segmentados. Nessa condição, o incremento na dureza do material usinado eleva ainda mais a força de atrito, proporcionando o aumento das componentes da força de usinagem. Tais fenômenos estão relacionados ao comportamento tribológico na interface cavaco-ferramenta nos patamares de formação do cavaco segmentado (QIAN e HOSSAN, 2007).

Uma grande parcela da energia demandada na formação dos cavacos é transformada em energia térmica e distribuída em distintas regiões: na zona primária de cisalhamento; na interface cavaco e superfície de saída (zona secundária de cisalhamento); e na interface de contato da peça com a superfície de folga. Devido a essas distribuições, a temperatura gerada durante o corte influencia no comportamento tribológico da interface cavaco-ferramenta, tanto no material usinado, como na aresta de corte (TRENT e WRIGHT, 2000). A temperatura gerada na zona primária de cisalhamento é um fator positivo para a usinagem, pois promove a redução da resistência mecânica do material usinado, facilitando a deformação plástica para a formação do cavaco. Por outro lado, elevadas temperaturas geradas durante o corte, principalmente na zona secundária de cisalhamento e na presença da zona de fluxo, incentivam o aparecimento dos mecanismos de desgaste termicamente ativados, como a difusão. Esse efeito da temperatura é verificado na usinagem utilizando elevados valores de velocidade de corte (BOUACHA et al. 2010).

Para proporcionar a redução da resistência mecânica do material usinado e minimizar os efeitos dos mecanismos de desgaste termicamente ativados sobre as arestas de corte, Astakhov (2006) sugere determinar os parâmetros de usinagem para promover o ponto de ótima temperatura de corte ( $\theta_{opt}$ ). A temperatura é mensurada com o auxílio de um termopar na ferramenta, e a determinação do ponto de ótima temperatura de corte ( $\theta_{opt}$ ) é realizada por meio da combinação dos parâmetros de usinagem que promovem maior vida às ferramentas dentro do intervalo de máxima eficiência do processo. O ponto de ótima temperatura de corte ( $\theta_{opt}$ ) na usinagem proporciona as seguintes vantagens: mínimas taxas de desgaste nas arestas de corte, estabilização da força de usinagem e alta qualidade da superfície usinada. Vale ressaltar que o ponto de ótima temperatura de corte é influenciado por fatores como dureza do material usinado e sistemas de refrigeração.

Como descrito anteriormente, a estabilidade do processo no torneamento de materiais endurecidos é viabilizada pela rigidez do sistema de usinagem, a qual está principalmente relacionada à máquina-ferramenta e a geometria da ferramenta de corte. Por ser um processo de acabamento, a máquina-ferramenta deve possuir alta precisão para permitir o atendimento

às especificações de projeto dos componentes, além de elevada rigidez, estabilidade dinâmica e um sistema de fixação rígido do conjunto peça e ferramenta. Para aumentar a rigidez da ferramenta, o porta-ferramenta e a ferramenta devem proporcionar um ângulo de saída ( $\gamma$ ) negativo (geralmente entre  $-15^\circ$  a  $-30^\circ$ ), além de a microgeometria da aresta ser reforçada por chanfro, raio, ou ambos (KUNDRÁK et al. 2008).

Além de ser possível a utilização do torneamento de materiais endurecidos em diversas ligas de aços e ferros fundidos, esse processo pode ser realizado com o corte contínuo e interrompido. O corte contínuo é a característica de torneamento mais comum. Já o corte interrompido torna-se uma difícil característica de torneamento devido ao impacto exercido pelas interrupções sobre as ferramentas. Esses impactos podem acarretar falhas catastróficas nas arestas de corte, principalmente as construídas em materiais frágeis, como as cerâmicas e PCBN (OLIVEIRA et al. 2009).

## 2.2 Ferramentas de Corte

Os materiais utilizados na realização de ferramentas de corte por arranque de cavaco aplicadas à usinagem de materiais endurecidos devem conjugar uma elevada eficiência com o aumento da taxa de remoção do cavaco (SOUSA, 2001; PAMPUCH et al. 1995).

De acordo com Komandury (1994), os principais requisitos que devem possuir as ferramentas de corte para usinar materiais endurecidos são:

- elevada dureza a altas temperaturas;
- elevada resistência à compressão;
- boa estabilidade química a altas temperaturas.

As principais limitações das ferramentas de corte para usinar materiais endurecidos são as seguintes (DEGARMO et al. 1997):

- baixa resistência à deformação da aresta de corte;
- baixa tenacidade;
- risco de colapso prematuro e formação de fissuras.

Uma seleção incorreta das ferramentas de corte para usinar materiais endurecidos pode tornar-se a maior causa da quebra prematura destas ferramentas com o consequente inutilização da peça usinada (PAMPUCH et al. 1995).

A Figura 2.3 apresenta a aplicação dos diversos materiais para ferramentas de corte em função das suas propriedades mecânicas e dos parâmetros de corte (velocidade de corte e

avanço). O material da ferramenta ótimo deve ser o que maximize as referidas propriedades e parâmetros de corte.

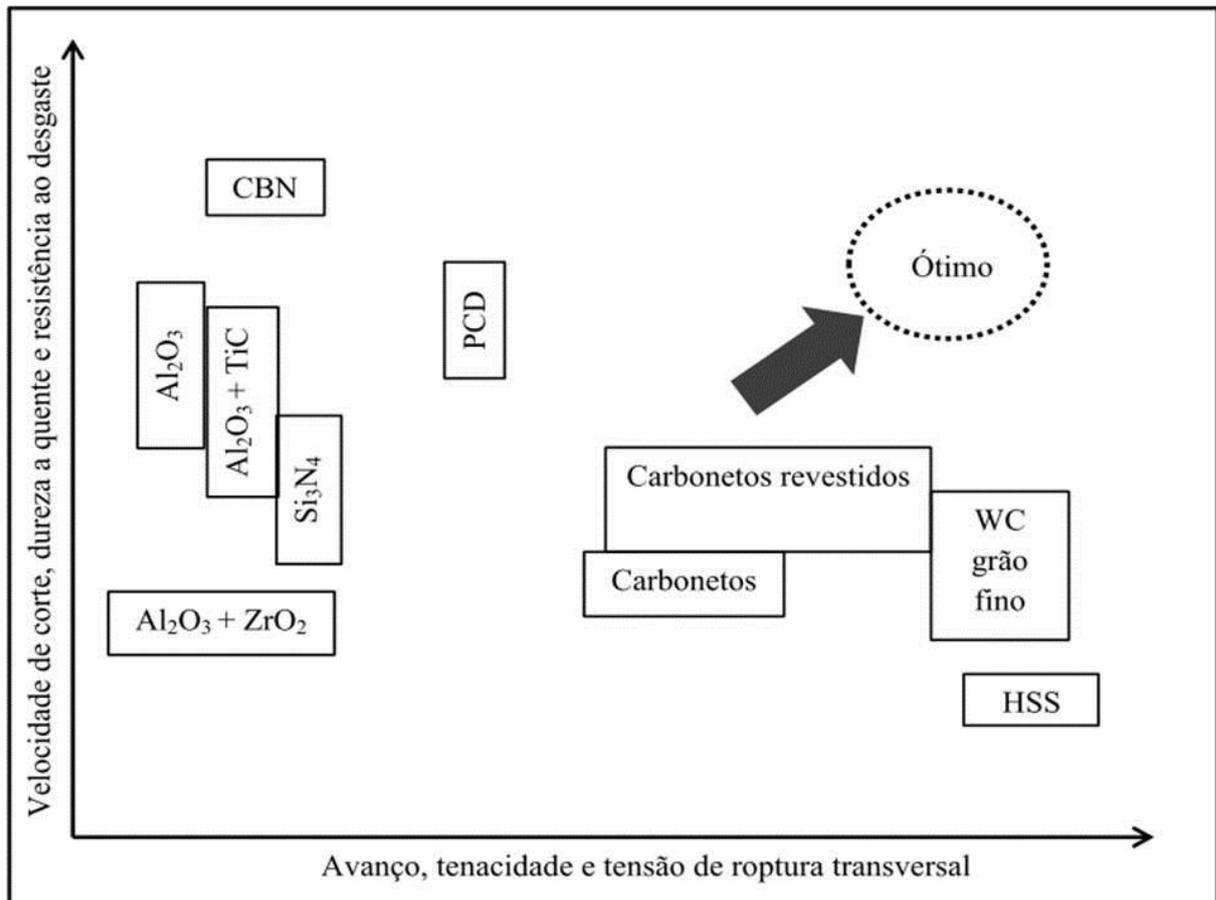


Figura 2.3 – Comparação dos diversos materiais para ferramentas de corte<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Cedido do site [www.wzl.rwth-aachen.de/en/](http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/) do Laboratory for Machine Tools and Production Engineering – Manufacturing Technology – Lecture 5 – Cutting Materials and Lubricants (Part 1).

Para a realização de uma operação de corte com arranque de cavaco é condição necessária que as ferramentas de corte resistam às condições trabalho impostas durante o processo de usinagem. Algumas das características que o material constituinte da ferramenta deve possuir para responder eficazmente ao processo de corte são: dureza a quente, tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade química. De um modo geral, o aumento de dureza da ferramenta de corte, melhora a resistência ao desgaste, mas condiciona a uma diminuição da tenacidade (KOMANDURY, 1994).

As cerâmicas são uma das classes de materiais para ferramentas de corte com elevado potencial para a realização de operações de acabamento com elevadas taxas de remoção de cavaco. São materiais de baixo custo e isentos de adição de materiais considerados estratégicos (BARTARYA et al. 2011).

É apresentado na Figura 2.4 um diagrama simplificado de algumas das classes de materiais de ferramentas cerâmicas.

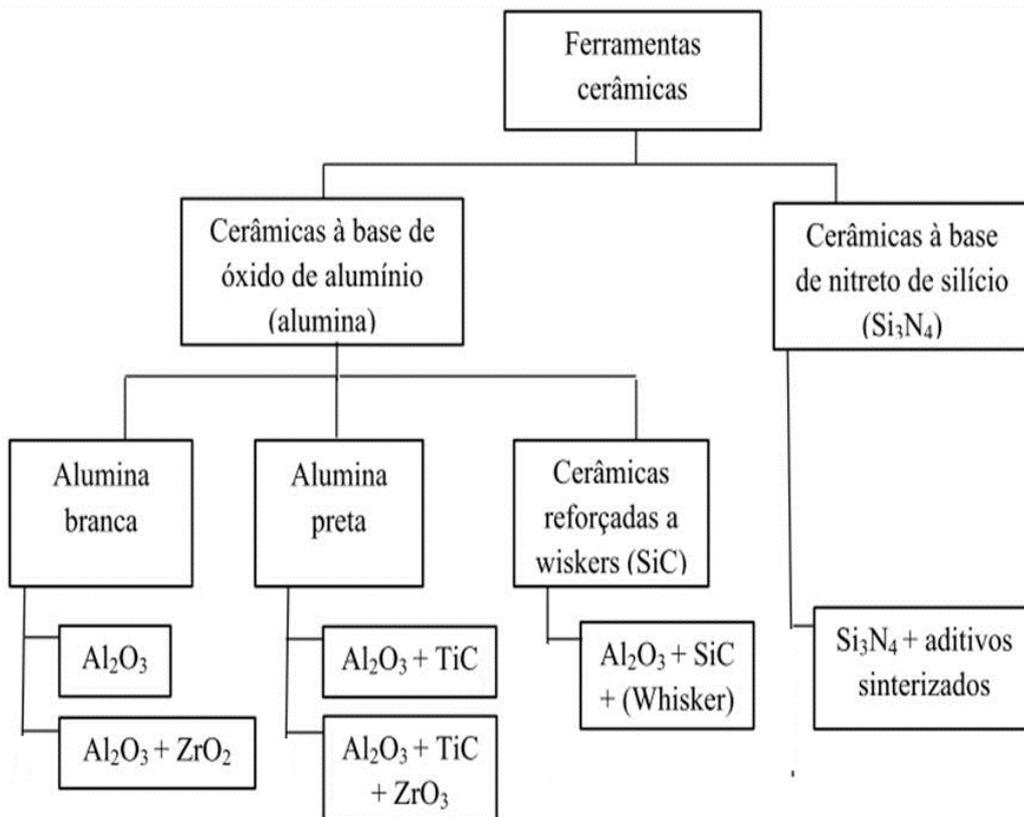


Figura 2.4 – Classificação de materiais de ferramentas cerâmicas<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Cedido do site [www.wzl.rwth-aachen.de/en/](http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/) do Laboratory for Machine Tools and Production Engineering – Manufacturing Technology – Lecture 5 – Cutting Materials and Lubricants (Part 2).

No torneamento de materiais endurecidos, a determinação da vida das ferramentas depende das especificações finais da peça usinada. Os principais parâmetros utilizados para definir o momento de substituição das ferramentas encontrados na literatura são: limite de desgaste de flanco ( $VB_{max}$ ) = 0,3 mm e rugosidade da peça usinada. Em operações de acabamento, geralmente adota-se o padrão de rugosidade N6, o qual corresponde a 0,8  $\mu$ m na

escala Ra (KUNDRÁK et al. 2008). No Quadro 2.1, podem ser observadas algumas das propriedades físicas, térmicas e mecânicas de alguns dos materiais cerâmicos e ultra-duros usados para ferramentas de corte.

Quadro 2.1 – Propriedades de alguns dos materiais para ferramentas de corte.

Elementos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC <sub>w</sub>	SIALON	PCBN
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,9	4,2	3,7	3,2	3,1
Dureza HV (20 °C)	1700	1900	2000	1600	4500
Tenacidade (J/m <sup>3</sup> )	5,0 a 8,0	3,5 a 4,5	4,5 a 8,0	4,5 a 6,0	10
Res. Ruptura (MPa)	700 a 900	600 a 850	550 a 750	700 a 900	.....
Cond. Térm. (W/m °C)	8	12	32	23	100
Exp. Térmica (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	8,5	8	.....	3,2	5

Fonte: WHITNEY E, 1994.

### 2.2.1 Ferramentas de corte à base de alumina

O óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) faz parte de uma das mais importantes classes de materiais de corte cerâmicos. Comparada com os carbonetos sinterizados, a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) apresenta elevada dureza a quente além de possuir boa estabilidade química, embora com uma notória redução da sua tenacidade (DEGARMO, 1997 e WHITNEY, 1994).

As ferramentas de corte à base de alumina podem ser divididas em dois grupos:

- óxidos cerâmicos que inclui a alumina pura ou a alumina branca com adição de óxidos cerâmicos como por exemplo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e zircônia (ZrO<sub>2</sub>);
- alumina e outros compostos cerâmicos como por exemplo alumina preta composta por 70% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 30% de carboneto de titânio -TiC ou com adição de outros compostos cerâmicos, tais como, nitreto de titânio - TiN ou carboneto de tântalo -TaC (WHITNEY, 1994).

A adição de ZrO<sub>2</sub> nas aluminas brancas confere uma melhor resistência à fratura comparativamente à alumina pura sem comprometer outras propriedades como a dureza e a resistência ao desgaste. As aluminas com adição aproximada de 15% de ZrO<sub>2</sub>, são denominadas de “ATZ’s” (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>). A adição de TiC ou TiN nas aluminas pretas melhora a dureza a quente e a resistência à abrasão comparativamente com as aluminas brancas (WHITNEY, 1994).

A aplicação de fibras de reforço de SiC dispostas na matriz de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  duplica a resistência à fratura comparativamente com as cerâmicas de alumina pura. Estas cerâmicas denominadas de alumina reforçada com whiskers ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC}_w$ ) são sobretudo recomendadas para a usinagem de ligas de níquel com aplicação na indústria aeronáutica, assim como na realização de operações com corte interrompido (KOMANDURY, 1994). É mostrado no Quadro 1.2 em termos comparativos algumas das propriedades das ferramentas de corte de alumina branca e alumina preta ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ) e cerâmicas à base de nitreto e do SIALON.

Quadro 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas de cerâmicas.

Propriedades		$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TIC}$	$\text{Si}_3\text{N}_4$	SIALON
<b>Densidade</b>	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,9	4,2	3,2	3,6
<b>Dureza</b>	<b>(HV)</b>	1700	1900	1600	1870
<b>Modulo de elasticidade</b>	<b>(GPa)</b>	5,0 a 8,0	3,5 a 4,5	300	335
<b>Condutibilidade térmica</b>	<b>(W/mk)</b>	700 a 900	600 a 850	19,4	53,5
<b>Expansão térmica</b>	<b>(10<sup>-6</sup>K<sup>-1</sup>)</b>	8	12	2,5	3,1

Fonte: WHITNEY E, 1994.

Em resumo, as aluminas brancas por possuírem baixa condutibilidade térmica e elevada expansão térmica torna estas cerâmicas mais susceptíveis ao choque térmico. As aluminas pretas devido à sua maior rigidez e boa resistência ao choque térmico permitem uma maior consistência da aresta de corte adequada ao acabamento médio e fino dos aços endurecidos (DAVIM(b), 1995).

### 2.2.2 Ferramentas de corte à base de nitreto de silício

O nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) é produzido por uma variedade de processos diferentes. A utilização de aditivos é geralmente usada como ajuda para a sua densificação. De um modo geral utiliza-se a sinterização a quente com benefícios ao nível das propriedades mecânicas. Devido à sua difusão química com o ferro, estas cerâmicas não são utilizadas na usinagem de aços, restringindo-se o seu uso aos ferros fundidos cinzentos e ligas de níquel.

A mistura de 50% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  incrementa em cerca de cinco vezes a resistência ao desgaste relativamente às ferramentas de corte constituídas exclusivamente de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (RIBEIRO, 2010; SOUZA, 2011; OLIVEIRA et al. 2003).

Os SIALONs são materiais à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  constituídos a partir da mistura de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ),  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , óxido de ytrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ). Devido à sua afinidade química, difundem-se rapidamente nos aços pelo que não são indicados para a usinagem destes materiais. Contudo mantêm elevada dureza a altas temperaturas o que os torna indicados para usinar as ligas de níquel em altas velocidades de corte.

### **2.2.3 Ferramentas de nitreto de boro cúbico “CBN”**

As ferramentas de corte constituídas por nitreto de boro cúbico (CBN) pertencem ao grupo dos materiais ultra-duros com aplicação na usinagem de materiais onde se exige uma elevada dureza a quente, assim como em aplicações em que as cerâmicas não oferecem a adequada tenacidade. O nitreto de boro existe na natureza na forma de uma estrutura cristalina hexagonal e através de aplicação de temperaturas que excedem os  $1000^\circ\text{C}$  e pressões de 5 a 7 GPa é transformada numa estrutura cúbica com dureza Knoop próxima do diamante na ordem de 4000 – 5000  $\text{HK}_{1,0}$  (NABHANI, 2001).

As ferramentas de corte de CBN são geralmente designadas em função do teor de CBN. As ferramentas de corte com elevado teor de CBN são geralmente obtidas por sinterização do CBN com adição de partículas de cobalto que para além de funcionar como aglomerante aumenta a resistência à fratura. As ferramentas de corte de baixo teor de CBN são normalmente sinterizadas com recurso a  $\text{TiC}$  e/ou  $\text{TiN}$ . As principais vantagens das ferramentas de corte de CBN residem na sua elevada dureza a quente, maior que as cerâmicas, boa estabilidade química com o ferro e boa resistência à fratura (POULACHON et al. 2003).

Na usinagem de materiais endurecidos, o aumento da temperatura causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, além de gerar o desgaste da ferramenta por abrasão, também acelera a ocorrência de outros fenômenos de desgaste entre a peça e a ferramenta, tais como a difusão e a oxidação. Sendo assim, alguns materiais são recomendados especificamente para aplicações em usinagem duras (STAKHNIV e DEVIN, 2011), dentre os quais se destacam os materiais cerâmicos e o nitreto cúbico de boro (CBN) para materiais ferrosos e o diamante policristalino (PCD), para materiais não ferrosos (VALDÉZ, 2008).

São diversos os tipos de CBN disponíveis no mercado. Em geral, cada fabricante apresenta diferentes soluções em materiais, quantidades de aglomerantes e diferentes tamanhos e distribuição de partículas. O CBN é um composto produzido artificialmente por

meio de altas temperaturas e alta pressão (DINIZ e OLIVEIRA, 2008). Propriedades Físicas do CBN estão descritas no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Propriedades Físicas do CBN.

<b>Propriedades Físicas do CBN</b>				
Material	Dureza HV	Tenacidade	Densidade	Tamanho do grão
CBN	2800 N/mm <sup>2</sup>	4,2 MPa.m <sup>1/2</sup>	4,3 g/cm <sup>3</sup>	2,5 μm

Fonte: VALDÉZ (2008).

De maneira geral podem ser divididos em duas categorias distintas, segundo suas características e aplicações (CHOU, EVANS e LIU (b), 2002) como segue:

#### **CBN-H para usinagem de desbaste**

O CBN-H possui maior concentração de nitreto cúbico de boro alto, entre 85 e 90% do volume, o que aumenta a ligação dos cristais e sua tenacidade. Também são constituídos de grãos com tamanhos que variam entre 3 a 6 (μm). Por esta razão são utilizados com frequência nas operações de desbaste com profundidade de usinagem (ap) entre 0,5 e 8 (mm). São recomendados em operações de torneamento onde existe corte interrompido pela maior tenacidade apresentada.

#### **CBN-L para usinagem de acabamento**

O CBN-L possui menor concentração de nitreto cúbico de boro, entre 50 e 60% do volume, com menor tenacidade e maior dureza. Também são constituídos de grãos com tamanhos que variam entre 0,5 a 1 (μm) e por este motivo utilizados com frequência nas operações de acabamento com profundidade de corte (ap) abaixo de 0,5 (mm). Apresentam menor condutividade térmica, facilitando assim, a remoção do cavaco; (CHOU, EVANS, e BRARASH, 2002). Aplicados principalmente em operações de usinagem onde há o corte contínuo de materiais.

O uso de ferramentas de CBN-H, ou seja, com alta concentração de nitreto cúbico de boro, garante a ferramenta uma maior tenacidade, como apresentado anteriormente. Tal característica física permite que a ferramenta tenha uma maior vida, por exemplo, durante um processo de corte interrompido; (DINIZ, GOMES, e BRAGINI, 2005).

## 2.3 Geometria das ferramentas cerâmicas e PCBN

A correta seleção da geometria da ferramenta possui importante papel no torneamento de materiais endurecidos. A ferramenta usualmente possui ângulo de saída negativo de forma a promover proteção na aresta de corte, condição típica para ferramentas cerâmica e PCBN. Vale ressaltar que no caso das ferramentas PCBN, somente uma pequena parte da pastilha é do material, e portanto ferramentas negativas proporcionam menor custo por usar ambos os lados (TRENT e WRIGHT, 2000).

Os insertos cerâmicos e de PCBN requerem alguns cuidados especiais quando da sua utilização, em virtude de possuírem baixa tenacidade quando comparados com o metal duro. O ângulo de saída necessita possuir valores negativos, pelo fato de esta geometria colocar a ponta da ferramenta sob a ação de forças de compressão, eliminando assim a formação de trincas devido à tração. Utiliza-se, quando possível, arestas de corte chanfradas (0,1 mm - 20° a 45°) a fim de direcionar os esforços de corte para o centro da ferramenta, reduzindo-se a possibilidade de quebra das arestas; (EZUGWU e WALLBANK, 2001).

Existem três formas básicas de preparação da aresta de corte: arredondamento, chanfro e chanfro com arredondamento. O tamanho do raio de arredondamento da aresta pode variar entre 25 µm (raio de aresta pequeno) até 180 µm (raio de aresta grande). Esta variação no raio de aresta está relacionada com a espessura média de corte. Recomenda-se que a espessura média seja pelo menos de duas a três vezes maior do que o raio de arredondamento da aresta (STEPHENSON, 2006).

O ângulo de folga deve ser grande o suficiente, para reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça, porém não deve ser exagerado a ponto de enfraquecer a aresta de corte. Sua importância se torna relevante quando o desgaste predominante da ferramenta ocorre na superfície de folga (EZUGWU e WALLBANK, 2001).

Sempre que possível, deve utilizar-se ângulos de ponta grandes e insertos de geometria quadrada ou redonda, objetivando-se aumentar a robustez da ferramenta (KONIG et al.1993). O ângulo de ponta, entretanto, depende do valor do ângulo de posição, tornando-o desta forma limitado pela geometria da peça.

Kurt e Seker (2005) também identificaram diferentes comportamentos na vida das ferramentas com a inclinação do ângulo de saída dos cavacos. O material usinado foi o aço AISI 52100 (classe B) com 60 HRC, utilizando ferramentas de PCBN. Os ângulos de saída testados foram: ( $\gamma$ ) = 0°, -10°, -20° e -30°. Os resultados mostraram que o aumento da inclinação do chanfro de proteção da aresta provoca o aumento da força de usinagem.

A melhor relação entre força de usinagem e vida da ferramenta foi encontrada com o ângulo de saída ( $\gamma$ ) =  $-20^\circ$ .

De acordo com o item anterior, as ferramentas de usinagem utilizadas no torneamento de materiais endurecidos possuem preferencialmente geometria de corte negativa com proteção da aresta de corte. Os resultados apresentados por Zhou et al. (2003) e por Kurt e Seker (2005) enfatizam que os ângulos que proporcionam maiores vidas as ferramentas são ( $\gamma$ ) =  $-15^\circ$  e  $-20^\circ$ , respectivamente.

Há várias maneiras de aumentar a produtividade na usinagem e uma das maneiras mais efetivas é dobrar a avanço usando ferramentas alisadoras. A geração de um bom acabamento superficial em peças torneadas está se tornando uma exigência para operações de semi-acabamento ou até mesmo no desbaste.

A tecnologia de pastilhas *Wiper* intercambiáveis oferece uma nova maneira de se obter desempenho de produção melhorado onde o importante é aumentar o valor do avanço. O acabamento superficial e a tolerância gerada são afetados por uma combinação de tamanho de raio de ponta, valor de avanço, estabilidade da usinagem, peça, fixação da ferramenta e condição da máquina. No torneamento convencional, o acabamento superficial deve estar diretamente relacionado com o avanço da ferramenta com o tamanho do raio de ponta. Um avanço grande gerará tempos de corte menores, mas acabamento superficial pior. Um grande raio de ponta gerará um melhor acabamento superficial e proporcionará maior resistência. Mas um raio de ponta excessivamente grande pode gerar tendências a vibrações, quebra de cavacos e menor vida da ferramenta devido à menor área de contato. Dessa forma, na prática o tamanho do raio da ponta da pastilha e o avanço podem ser limitado em uma operação.

Para alterar esse relacionamento - obter um melhor acabamento superficial com um avanço maior, foi desenvolvida a tecnologia *Wiper* para o raio de ponta de pastilhas intercambiáveis. Isso ocorreu principalmente na forma de uma combinação cuidadosamente composta de raios com algumas modificações de geometria de pastilha. O raio de ponta da ferramenta com geometria alisadora (*Wiper*) proporciona uma menor altura de perfil na aresta de corte da superfície gerada, o que tem um efeito de alisamento na superfície torneada. A ferramenta possui um quebra-cavacos adaptado, enquanto que a ferramenta de raio de ponta convencional possui uma geometria que limita as faixas de avanço antes do que em uma ferramenta com geometria alisadora. A capacidade de quebra-cavacos de uma ferramenta com geometria alisadora foi ajustada para estar de acordo com o raio de ponta modificado e uma maior capacidade de avanço. Dessa forma, o controle de cavacos amplia-se por novas áreas,

para além das limitações de dados de corte convencionais. Essa é uma das razões pela qual as ferramentas com geometria alisadora serem vistas atualmente, e com tanta frequência, como solucionadoras de problemas em operações de torneamento. Na Figura 2.5 observa-se a configuração do raio de ponta múltiplo (*W-Wiper*).

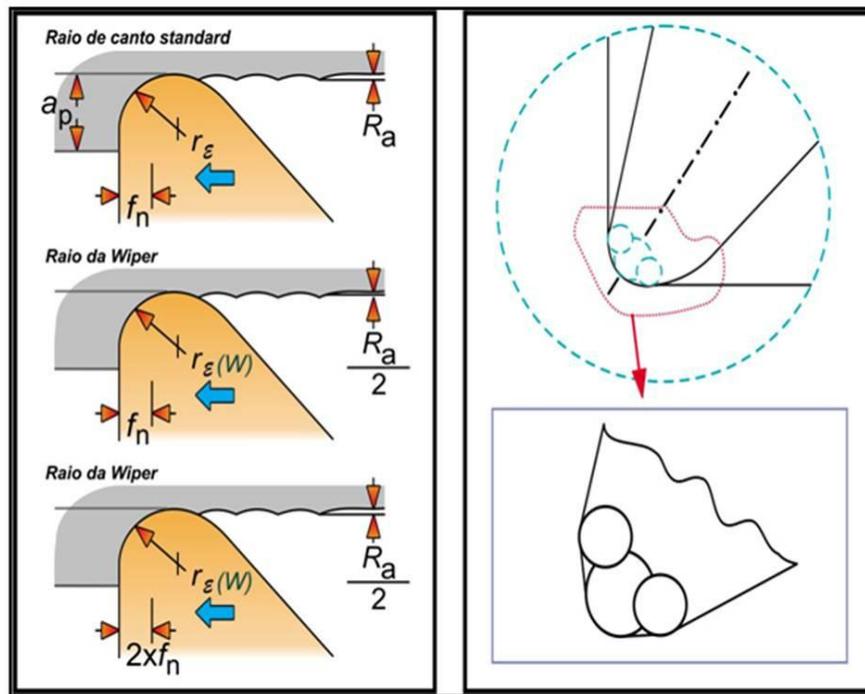


Figura 2.5 – Configuração do raio de ponta múltiplo (*W – Wiper*).

Fonte: Sandvik (2010).

Algumas ferramentas cerâmicas e de CBN apresentam uma geometria de raio de ponta múltiplo (*W-Wiper*) o que permite com o mesmo avanço melhorar o acabamento de superfície em cerca de duas vezes relativamente às ferramentas de raio de ponta simples ou em alternativa permitem duplicar o valor do avanço para o mesmo acabamento.

## 2.4 Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem no torneamento de materiais endurecidos são típicos de operações de acabamento, nas quais são utilizados baixos valores de profundidade de usinagem ( $a_p$ ), valores de avanço ( $f$ ) compatíveis com o padrão de acabamento desejado e níveis de velocidade de corte ( $V_c$ ) inferiores aos praticados em materiais não endurecidos. São apresentados no Quadro 2.4 diversas investigações que têm sido destacadas na literatura, refletindo o efeito de parâmetros de corte, velocidade de corte, avanço e profundidade de

usinagem sobre a rugosidade da peça, tensões residuais e desgaste da ferramenta e suas combinações em torneamento duro.

Lalwani et al. (2008) investigaram o efeito da velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem no torneamento duro do aço MDN250 (50 HRC) utilizando a ferramenta de cerâmica. Os resultados mostram que as forças e a rugosidade da peça não variam muito com a velocidade de corte experimental no intervalo de 55-93 m/min.

Bouacha et al. (2010) estudaram a aplicação da metodologia de superfície de resposta para descrever e otimizar o desempenho de ferramentas de CBN no torneamento do aço ABNT 52100 (64 HRC). Os fatores investigados foram velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Os resultados mostraram o quanto a rugosidade da peça é influenciada principalmente pelo avanço e velocidade de corte. Finalmente, a profundidade de usinagem máxima exibe influência sobre as forças de corte, em comparação com a velocidade de avanço.

Gaitonde et al. (2009) propuseram analisar os efeitos de parâmetros de processo velocidade de corte, avanço e tempo de usinagem em aspectos de usinabilidade tais como força de usinagem, força específica de corte, rugosidade da peça e desgaste da ferramenta, durante o torneamento do aço ABNT D2, usando ferramenta de cerâmica mista CC 650 WG. Os resultados mostraram que o avanço e a velocidade de corte influenciam fortemente a rugosidade da peça e a vida da ferramenta.

Bouacha et al. (2010) estudaram a aplicação da metodologia de superfície de resposta para descrever e otimizar o desempenho de ferramentas de CBN no torneamento do aço ABNT 52100 (64 HRC). Os fatores investigados foram velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Os resultados mostraram o quanto a rugosidade da peça é influenciada principalmente pelo avanço e velocidade de corte. Finalmente, a profundidade de usinagem máxima exibe influência sobre as forças de corte, em comparação com a velocidade de avanço.

Além das restrições nas aplicações das ferramentas cerâmicas, quando utilizadas, os valores de velocidade de corte ( $V_c$ ) são geralmente inferiores comparados às velocidades de corte praticadas nas ferramentas PCBN. No entanto, conforme a Tabela 2.5, no torneamento de materiais endurecidos, os valores de velocidade de corte praticados com maior frequência estão no intervalo de  $(V_c) = 100$  a  $200$  m/min. A profundidade de usinagem ( $a_p$ ) em operações de acabamento está diretamente relacionada ao material excedente deixado pelas operações de desbaste. Este material extra (sobrematerial) deve ser estipulado de forma que as

alterações sofridas pelo componente nos processos de endurecimento não inviabilizem as especificações finais do produto. Uma visão geral sobre os materiais de trabalho, no torneamento duro a partir de vários investigadores é apresentada no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Material, dureza, ferramentas e parâmetros de usinagem utilizados no torneamento de materiais endurecidos.

<b>Autor</b>	<b>Material/ HRC/Ferramenta</b>	<b>Parâmetro de corte</b>
Lalwani et al. 2008	MDN 250 /50/cerâmicas	<b>V<sub>c</sub></b> = (55, 74, 93 m/min); <b>f</b> = (0,04, 0,08, 0,12 mm/rev); <b>ap</b> = (0,1, 0,15, 0,2 mm).
Bouacha et al. 2010	AISI 52100/64/ CBN	<b>V<sub>c</sub></b> = (125, 176, 246 m/min); <b>f</b> = (0,08, 0,12, 0,16 mm/rev); <b>ap</b> = (0,15, 0,30, 0,45 mm).
Gaitonde et al. 2009	AISI D2/61/cerâmicas	<b>V<sub>c</sub></b> = (80, 115, 150 m/min); <b>f</b> = (0,05, 0,10, 0,15 mm/rev);
Yen et al. 2004	AISI 1020/54 cerâmicas	<b>V<sub>c</sub></b> = (300 m/min); <b>f</b> =(0,145mm/rev);
Bosheh, Mantivenga, 2006	AISI H13/54/ CBN	<b>V<sub>c</sub></b> = (96, 102 m/min); <b>f</b> = (0,2, 0,25 mm/rev); <b>ap</b> = (0,1 mm).
Sahin Y, 2008	AISI 52100/60/ cerâmicas, CBN	<b>V<sub>c</sub></b> = (100, 140, 196 m/min); <b>f</b> = (0,06, 0,084, 0,117 mm/rev); <b>ap</b> = ( 0,2 mm).
Attanasio et al. 2010	AISI 1045/55/P40	<b>V<sub>c</sub></b> = (200, 260 m/min); <b>f</b> = (0,1, 0,2 mm/rev); <b>ap</b> = (1,5 mm).
Bajic et al. 2012	42CrMo4/60/cerâmicas	<b>V<sub>c</sub></b> = (120, 140 m/min); <b>f</b> = (0,1, 0,2 mm/rev); <b>ap</b> = (1,0, 1,5 mm).
Yallesea et al. 2009	AISI 52100/60/ CBN 7020	<b>V<sub>c</sub></b> = (90, 180 m/min); <b>f</b> = (0,08, 0,2 mm/rev); <b>ap</b> = (0,2, 0,6 mm).

Fonte: Campos et al. (2014).

Deste modo, e de acordo com a Tabela 2.5, constatou-se que o intervalo de profundidade de corte praticado com maior frequência no torneamento de materiais endurecidos está entre  $(a_p) = 0,15 - 0,20$  mm.

O último parâmetro de usinagem de grande importância no torneamento é o avanço (f). Dentre os parâmetros descritos, o avanço é o que possui maior impacto no acabamento do componente usinado. Desta forma, o avanço (f) é estipulado em função do raio de ponta da ferramenta ( $r_\epsilon$ ) e do padrão de rugosidade desejado no componente usinado. É pertinente ressaltar que no Quadro 2.4 existem diversos parâmetros de usinagem diferentes dos intervalos descritos anteriormente.

## 2.5 Forças de corte

Quando da usinagem de materiais endurecidos, nota-se que as forças de corte não são necessariamente altas. Isto se deve a deformação plástica relativamente pequena do cavaco e também devido à pequena área de contato entre a ferramenta e o cavaco, o que reduz a força de atrito (NAKAYAMA et al. 1988).

Nota-se a concordância de vários autores, para o fato de que a força de usinagem tende a diminuir com o aumento da dureza do material e também com o aumento da velocidade de corte. Outros autores, entretanto, afirmam que as forças de corte são de 30 a 80% superiores às forças verificadas em durezas inferiores e que as mesmas diminuem com o aumento da velocidade de corte (BORDUI, 1988; ABRÃO et al. 1996). Porém, certamente, o aumento dos esforços de corte nestes materiais é menor que o aumento de sua dureza, quando comparado ao mesmo aço usinado antes do tratamento térmico de endurecimento.

A seguir, compara-se os resultados encontrados em alguns trabalhos, no tocante ao comportamento das forças de corte na usinagem de materiais endurecidos. Segundo Abrão et al.(1996), na usinagem do aço ABNT 52100 (62 HRC) com ferramentas de PCBN e cerâmica mista, verificou-se que durante a operação de acabamento, a força passiva (radial) foi maior que as outras componentes de força, fato este, devido ao menor ângulo de posição ( $\chi_r$ ) causado pelo pequeno valor da profundidade de usinagem em relação ao valor do raio de ponta da ferramenta. Na operação de desbaste, a componente tangencial (força de corte) foi um pouco superior. As forças de corte tiveram um ligeiro decréscimo com o aumento da velocidade de corte e aumentaram linearmente com o avanço e a profundidade de usinagem. A redução na força devido ao aumento da velocidade de corte foi minimizada pelo aumento do desgaste da ferramenta.

Nos trabalhos de Chao e Trigger (1995) e Matsumoto et al. (1988), verificou-se que as componentes da força de usinagem diminuem com o aumento da dureza do material a ser usinado, quando se utiliza ferramentas com ângulo de saída levemente negativo (0 a  $-5^\circ$ ), ao usinar-se aços com dureza variando entre 30 e 40 HRC. Uma vez que as temperaturas de corte foram maiores para os aços mais duros, uma explicação pode ser dada pelo fato das elevadas temperaturas na região de corte facilitarem o mesmo.

Para Nakayama et al. (1988), torneando-se um aço para rolamento em dois diferentes estados de tratamento térmico (recozido 23 HRC e temperado 62 HRC), observou-se que o valor da força de avanço foi superior ao da força de corte, nos dois casos, para um ângulo de saída variando de 0 a  $-6^\circ$ .

Costa (1993), observou para o torneamento dos aços ABNT 52100 e M2 no estado temperado, com ferramentas de CBN e cerâmica mista, que a força de corte e a força de avanço aumentaram com o aumento do avanço, enquanto a velocidade de corte não teve influência sobre as componentes da força de usinagem. Quanto ao efeito da dureza do material da peça, não se verificou nenhuma diferença acentuada, porém, isto é creditado a problemas ocorridos nos ensaios realizados. A potência de corte monitorada através da corrente do motor principal da máquina, apresentou uma variação muito pequena, provavelmente porque a deterioração da ferramenta foi muito pequena.

Para Chao e Trigger (1995), Matsumoto et al. (1987) e Nakayama et al. (1988) o valor da força de corte é superior ao da força de avanço, para aços com dureza variando entre 30 e 45 HRC, sendo as demais condições de corte constantes.

De acordo com a Figura 2.6, a força de corte ( $F_c$ ) é a componente da força de usinagem segundo a direção da velocidade de corte ( $V_c$ ). Por sua vez a força de avanço ( $F_a$ ) é a projeção da força de usinagem segundo a direção do avanço ( $V_a$ ). No torneamento longitudinal, quando o ângulo da direção de avanço  $\phi = 90^\circ$ , a força de corte compõe-se ortogonalmente com a força de avanço e tem a força ativa ( $F_t$ ) que é dada pela expressão:

$$F_t = \sqrt{F_a^2 + F_c^2} \quad (2.1)$$

A força de usinagem é a resultante da força ativa com a força de profundidade:

$$F_m = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_p^2} \quad (2.2)$$

sendo,  $F_m$  a força de usinagem e  $F_p$  a força de profundidade.

Considerando que a força de profundidade  $F_p$  é passiva, não produz trabalho, a potência de corte efetiva ( $P_{ec}$ ) durante o processo de torneamento pode ser dada pela expressão:

$$P_{ec} = F_c \times V_c + F_a \times V_a \quad (2.3)$$

sendo,  $F_c$  a força de corte,  $V_c$  a velocidade de corte,  $F_a$  a força de avanço e  $V_a$  a velocidade de avanço.

Considerando que o produto da força de avanço ( $F_a$ ) pela velocidade de avanço ( $V_a$ ), apresenta geralmente um valor muito pequeno, a potência efetiva de corte ( $P_{ec}$ ) é a potência de corte ( $P_c$ ) dada pela expressão (DAVIM, 1995) e (BOOTHROYD et al. 1989):

$$P_{ec} \cong P_c = F_c \times V_c \quad (2.4)$$

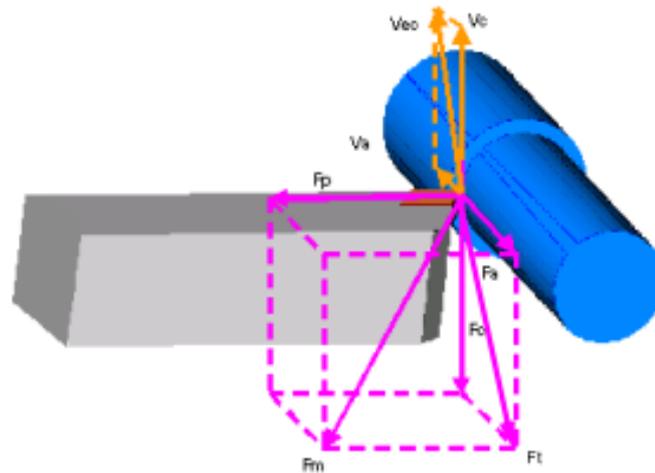


Figura 2.6 – Componentes da força de usinagem no processo de torneamento longitudinal.

Fonte: Matsumoto et al. (1988).

Por sua vez a pressão específica de corte ( $K_s$ ) é um fator importante no processo de usinagem dado pela expressão:

$$K_s = P_c / S \quad (2.5)$$

sendo  $S$  a secção do cavaco de corte em  $\text{mm}^2$ .

Segundo Chen (1997), forças de corte excessivas tendem a provocar alterações na integridade superficial., Ensaios realizados pelo mesmo autor, no torneamento do aço endurecido GB69988- 55 mostraram que , a força de corte é a maior das três componentes da força de usinagem, enquanto que no torneamento de aços endurecidos entre 45 a 55 HRC, a

força de profundidade apresenta os valores mais elevados e a força de avanço os valores mais baixos das três componentes de corte.

De acordo com Chen, (1997) o aumento da velocidade de corte ( $V_c$ ) tende a provocar uma diminuição dos valores da força de profundidade e da força de avanço até um valor limite a partir do qual se verifica uma inversão do processo. O aumento da profundidade de usinagem apresenta a influência mais significativa dos parâmetros de corte, no aumento das três componentes da força de usinagem. O desgaste da ferramenta não apresenta efeito significativo nas forças de corte e de avanço, notando-se contudo que um aumento do desgaste para valores de 0,18 mm incrementa o valor da força de profundidade na ordem de 90 a 150%.

Segundo Ozel et al. (2000); Davies et al. (2002) e Ikua et al. (2002) a flutuação verificada em cada uma das componentes das forças de usinagem é justificada pela fraca rigidez do equipamento, sistema de fixação da peça e segmentação do cavaco, verificados durante o processo de usinagem o que provoca a flutuação quase instantânea principalmente das forças de corte.

## **2.6 Temperatura de corte**

Em um processo de torneamento, a energia mecânica é convertida em calor por meio da deformação plástica do cavaco e do atrito entre a ferramenta e a peça. A difusão desse calor na interface cavaco-ferramenta-peça tem um papel fundamental no desempenho das ferramentas e, conseqüentemente, no processo de torneamento. A necessidade contínua do aumento das velocidades de corte em processos de usinagem de alto desempenho tem impulsionado pesquisas de novos materiais resistentes a altas temperaturas, assim como estudos de maximização da taxa de remoção de material. Além disso, a investigação dos campos térmicos durante o torneamento possibilita a análise e controle dos fatores que influenciam no uso, na vida e no desgaste das ferramentas. A dificuldade da obtenção da temperatura na interface cavaco-ferramenta, mesmo para condições de corte simples, requer, por sua vez, o desenvolvimento de uma técnica eficiente (LIU (a) et al. 2002).

Davies et al. (2002) utilizaram métodos de medição de temperatura e exibiram como eles podem ser aplicados para monitoramento de temperatura durante a remoção do material.

Korkut et al. (2011) utilizaram a Análise de Regressão (AR) e Redes Neurais Artificiais (RNA) para a predição de temperatura na interface ferramenta-cavaco verificando os valores

dos parâmetros de corte em usinagem. Os resultados definiram que a temperatura na interface ferramenta-cavaco pode ser utilizada para a previsão destes valores.

List et al. (2012) aplicaram o modelo de elementos finitos para prever a temperatura de corte da interface e sua dependência com o mecanismo de desgaste de cratera. Os parâmetros mecânicos e térmicos que influenciam a distribuição de temperatura na superfície de saída da ferramenta foram analisados. A figura 2.7 apresenta a distribuição de calor e das temperaturas durante o processo de torneamento.

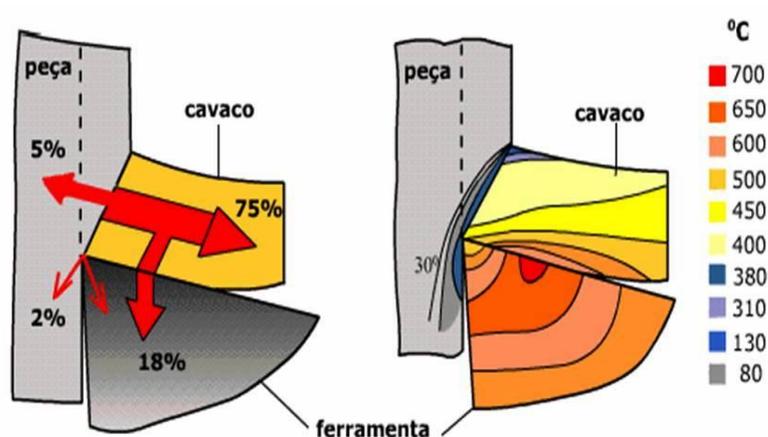


Figura 2.7 – Distribuição da temperatura e de calor durante o processo de torneamento.

Fonte: König et al. (1993).

Biermann et al. (2013) estudaram um sistema de monitoramento para obtenção das temperaturas em um processo de torneamento. Em contraste com as investigações realizadas até agora, esta pesquisa trata de um novo sistema de sensor de ferramenta para medição de temperatura. Para utilizar um termopar em ferramentas de corte, uma técnica de máscara foi recentemente desenvolvida (Figura 2.8).

Aneiro et al. (2008) estudaram alguns aspectos do processo de torneamento aplicado em aço endurecido usando ferramentas de metal duro com múltiplas camadas revestidas para altas velocidades de corte. Foram analisados a influência dos parâmetros de corte ( $V_c$ ,  $f$ , e  $a_p$ ) sobre a temperatura e o desgaste da ferramenta, as forças de corte e rugosidade da peça. Para avaliação do gradiente de temperatura, dois termopares foram inseridos: o primeiro a 0,2 milímetros, perto da ponta da ferramenta; e o segundo, no meio da ferramenta. Ambos foram utilizados para estimar o gradiente de temperatura para os ensaios de usinagem (apenas os furos para os termopares foram de 1,0 mm de diâmetro), como mostrado esquematicamente na Figura 2.9.

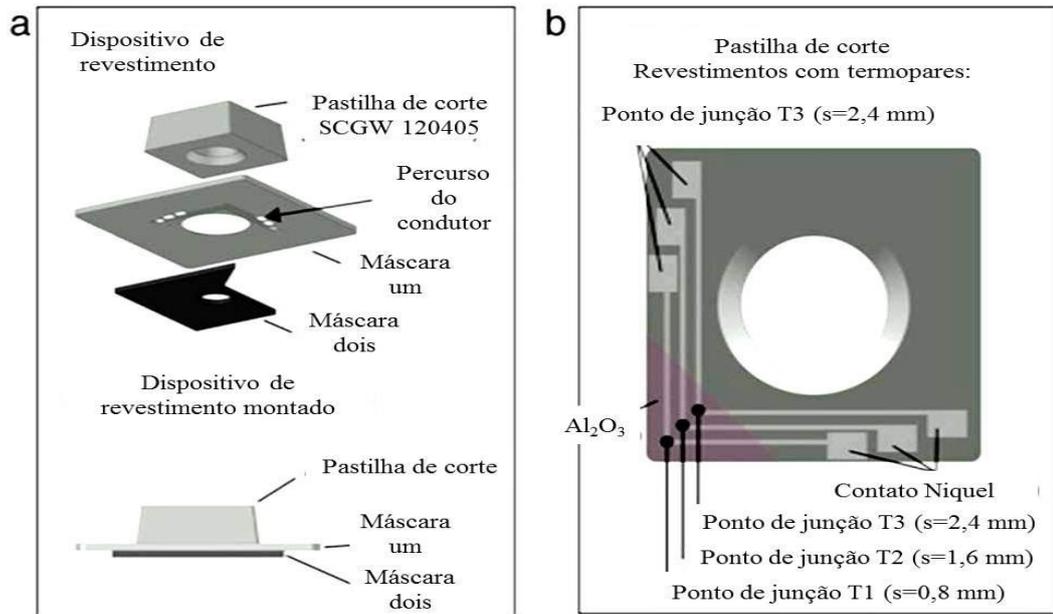


Figura 2.8 – (a) Técnica de máscara e (b) Pastilha de corte revestida.

Fonte: Biermann et al. (2013).

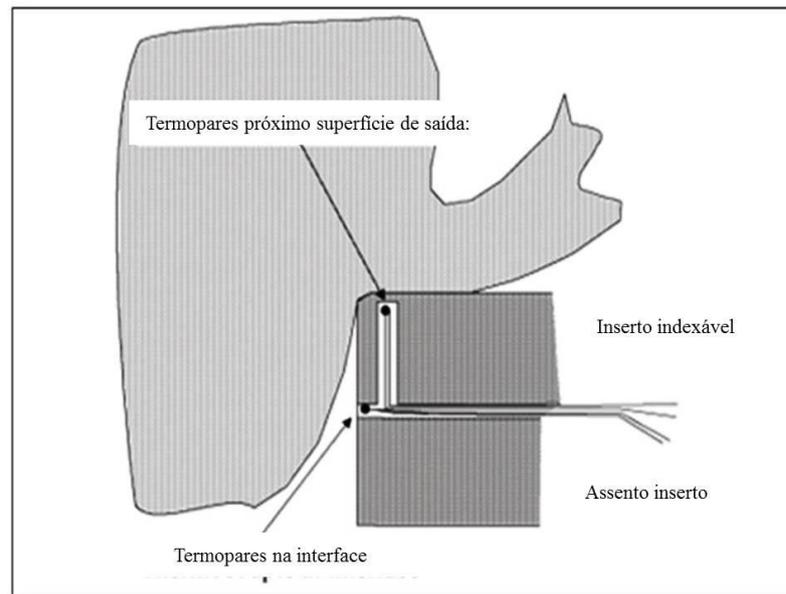


Figura 2.9 – Esquema dos termopares incorporado.

Fonte: Aneiro et al. (2008).

## 2.7 Formação do Cavaco

Os mecanismos de formação do cavaco no torneamento de materiais endurecidos são diferentes dos mecanismos de formação do cavaco na usinagem de materiais macios em que,

para velocidades de corte baixas, é normalmente observada a formação de cavaco em fita. A formação de cavaco em fita foi a base dos primeiros modelos Ernst Merchant (1941). Contudo muitas operações de usinagem produzem cavaco helicoidal, cavaco segmentado em arco e cavaco descontínuo ou fragmentado (BOOTHROUD et al. 1989).

As diversas formas de cavaco encontram-se normalizadas segundo a ISO 3685. Segundo Ernst Merchant (1941), na análise que efetuaram, o cavaco apresenta um comportamento de um corpo rígido mantido em equilíbrio pela ação das forças transmitidas ao longo do plano de corte e da interface ferramenta/material.

Podemos destacar Lee e Shaffer (2007), que aplicaram a teoria da plasticidade ao processo de corte ortogonal com arranque de cavaco, assumindo que o comportamento do material a usinar é totalmente plástico, omitindo-se a deformação elástica durante todo o processo de corte. São também negligenciados os comportamentos do material, o aumento da temperatura e o efeito de inércia na deformação sofrida durante o processo de corte. Segundo Boothroyd et al. (1989), as teorias de Ernst Merchant (1941) e Lee Shaffer (2007) assim como resultados experimentais, indicam que o atrito na superfície de saída é um dos fatores mais importantes no processo de corte de materiais, sendo desse modo necessário conhecer em detalhe a natureza das condições de atrito entre o cavaco e a ferramenta.

Nos modernos equipamentos CNC com a utilização de ciclos contínuos de trabalho, tornou-se pertinente a necessidade do controle dos mecanismos de formação do cavaco. De um modo geral, o volume ocupado pelo cavaco contínuo representa cerca de cinquenta vezes mais o volume do correspondente material antes da remoção do cavaco e cerca de dezessete vezes mais que a mesma quantidade de cavaco fragmentada em arco (BOOTHROUD et al. 1989).

O corte do material processa-se geralmente em duas fases. Numa primeira fase, a aresta de corte penetra no material, comprimindo-o contra a superfície de saída, verificando-se uma deformação plástica e um conseqüente aumento da espessura do cavaco. Com o aumento continuado do esforço de corte, verifica-se o escorregamento do material sem perda de coesão. Numa segunda fase, com a progressão da penetração da ferramenta de corte, verifica-se a separação e o escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída. A diferença entre a formação do cavaco longa e a fragmentada é derivada do modo como se propaga durante a segunda fase a segmentação do cavaco (DAVIM , 1995).

São exibidas na Figura 2.10 as regiões de deformação consideradas na formação do cavaco. Na formação do cavaco, a espessura do cavaco obtida  $e'$  é afetada pelas condições de atrito existentes na interface cavaco/superfície de saída.

O ângulo de corte pode ser relacionado com o ângulo de cisalhamento e com o grau de recalque, através da expressão:

$$\phi = \arctg \frac{\cos \gamma}{R_c - \sin \gamma} \quad (2.6)$$

sendo,  $\phi$  o ângulo de cisalhamento,  $\gamma$  é o ângulo de saída e  $R_c$  o grau de recalque (BOOTHROYD et al.1989).

O grau de recalque ( $R_c$ ) é determinado através da expressão,

$$R_c = \frac{e'}{e} \quad (2.7)$$

sendo,  $e'$  a espessura do cavaco obtida e  $e$  a espessura do cavaco teórica.

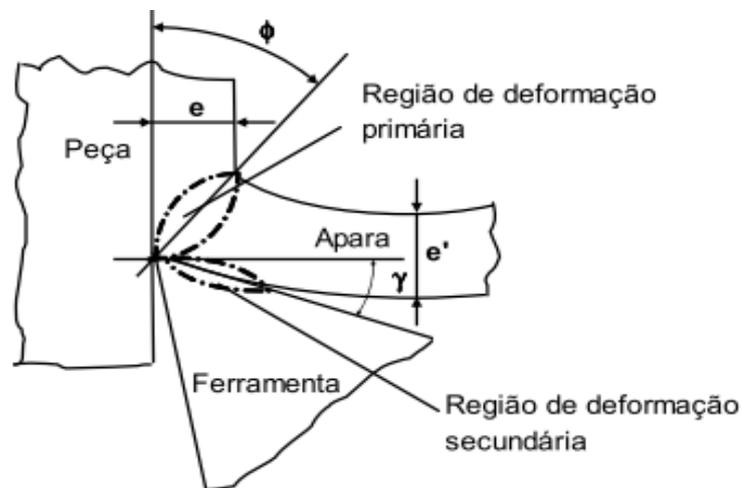


Figura 2.10 – Regiões de deformação na formação do cavaco.

Fonte: Davim (a) (1995).

Através das expressões (2.6) e (2.7), a espessura do cavaco obtida pode ser determinada em função do ângulo de cisalhamento e espessura do cavaco teórica.

A enorme dificuldade em caracterizar corretamente o processo de corte com arranque de cavaco deriva do elevado número de fatores em jogo, o que tem feito com que as investigações levadas a cabo nesse âmbito considerem o corte como sendo ortogonal, em que

a direção efetiva do corte é perpendicular à aresta de corte com o ângulo de posição ( $\chi$ ) = 90° e o ângulo de inclinação ( $\lambda$ ) = 0°.

Por sua vez, Brinksmeier et al. (2002) concluíram, num estudo experimental realizado na usinagem dos aços C15 e C45, que o ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ) aumenta em função do aumento da velocidade de corte, verificando-se conseqüentemente uma redução da espessura do cavaco. O aumento da velocidade de corte conduz a um aumento da segmentação do cavaco e uma redução das forças de usinagem, com a melhoria da qualidade superficial. Segundo Barry et al. (2001), o aumento da velocidade de corte e da dureza do material a usinar tem como resultado um aumento do dente de serra verificado na morfologia do cavaco no processo de usinagem de aços endurecidos.

## 2.8 Desgaste e vida das ferramentas de corte

Como já visto, a escolha adequada da ferramenta é importante para o sucesso do torneamento. Tal resultado pode ser resumido em produzir peças com qualidade que atendam aos requisitos do cliente, no menor custo e no menor tempo possível, o que, obviamente, também interfere no custo final do processo. De acordo com a Figura 2.11 os principais tipos de desgaste de ferramentas são:

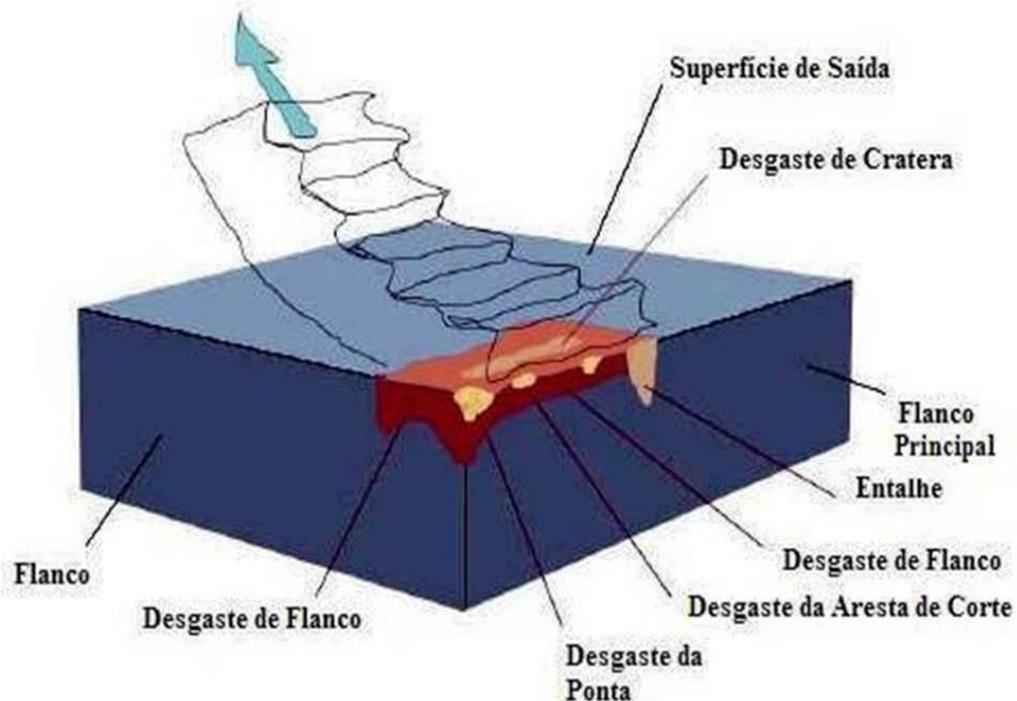


Figura 2.11– Principais tipos de desgaste de ferramentas.

Fonte: Sandvik (2010).

- **Desgaste de flanco**

É o desgaste mais comum observado no processo de torneamento e é causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça. Esse tipo de desgaste provoca alterações grandes de rugosidade da peça, bem como na tolerância dimensional e na circularidade da peça. O desgaste de flanco pode ser observado na Figura 2.12.

- **Desgaste de cratera**

Ocorre na superfície de saída da ferramenta e tal qual o desgaste de flanco, também é gerado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. Este tipo de desgaste pode ocasionar a quebra da ferramenta em casos extremos e pode ser observado na Figura 2.12. (d).

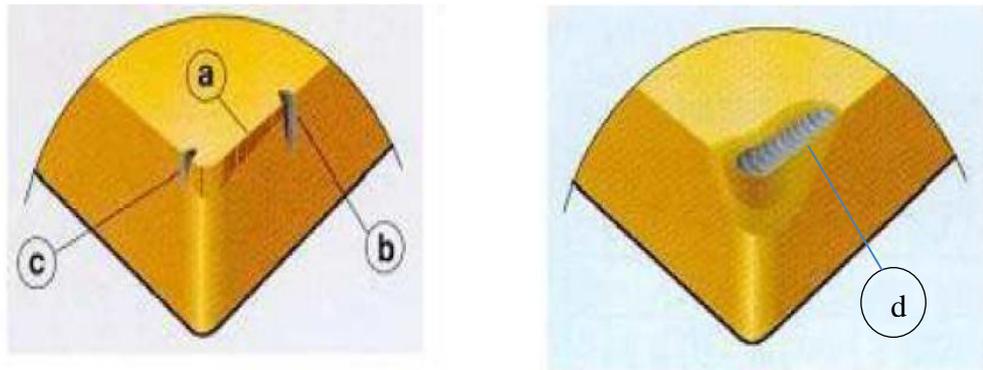


Figura 2.12 – Desgaste de flanco (a), desgaste de entalhe (b) e (c) e (d) desgaste de cratera.

Fonte: Sandvik (2010).

- **Desgaste de entalhe**

O desgaste de entalhe ocorre normalmente com o desgaste de flanco e é caracterizado por sulcos profundos na superfície de folga da ferramenta conforme Figura 2.12. (b e c) são provocados comumente pelo desgaste de oxidação e adesão.

Yallese et al. (2009) apresentam um estudo de torneamento do aço DIN 100Cr6 temperado a 60 HRC para aplicação em rolamentos utilizando ferramentas de CBN-L. O autor estuda as respostas para as variáveis de velocidade de corte (90 m/min e 180 m/min), avanço (0,2 mm e 0,6 mm) e profundidade de usinagem (0,08 mm/v e 0,2 mm/v).

Em especial nas ferramentas de CBN, há uma tendência de fratura súbita e isso tem limitado seu uso mais extenso. Durante a operação de torneamento duro, o aparecimento de lascamentos seguidos de quebras é normalmente um dos desafios na indústria metal-mecânica.

- **Adesão**

Devido às altas temperaturas geradas e elevadas cargas desenvolvidas durante a usinagem, ocorrem aderências entre a ferramenta, o cavaco e a peça que está sendo usinada. O desgaste por adesão pode ser reduzido pela fragilização do maior número possível de aderências, através do recobrimento, ou melhor, acabamento possível da superfície da ferramenta de corte ou ainda, se for o caso, pelo uso de fluido de corte com características lubrificantes (BAS, 2001 e DINIZ e NORITOMI, 2002).

- **Abrasão mecânica**

É uma das principais causas de desgaste das ferramentas de corte, sendo mais atuante no desgaste de flanco devido ao atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, mas também atua no desgaste de cratera (atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta). É influenciada pelas altas temperaturas que ocasionam a queda da dureza da ferramenta, e pelo nível de partículas duras do material usinado, partículas estas que geralmente são formadas por carbonetos, carbonitreto, silicatos e outros. Por isso, é importante a escolha de uma classe de ferramenta com excelente dureza a quente para usinagem de materiais com alto teor de partículas duras (BAS, 2001; DINIZ e NORITOMI, 2002; CUPINI e FERREIRA, 1993).

- **Difusão**

Consiste basicamente na transferência de átomos de um material para outro, nesse caso especificamente entre o cavaco e a ferramenta de corte. Este fenômeno é ativado pelas altas temperaturas alcançadas na interface cavaco-ferramenta e sua intensidade depende da afinidade química desses dois materiais. É o principal agente do desgaste de cratera sob altas velocidades de corte. Ao escolher uma determinada ferramenta deve-se verificar o grau de estabilidade química dela em relação ao material a ser usinado (DINIZ e NORITOMI, 2002 e KLIMENKO et al. 1992).

- **Oxidação**

A oxidação ocorre em altas temperaturas, quando o material da ferramenta de corte tem afinidade química com o oxigênio que está no ar ou na água contida no fluido de corte quando este é utilizado, propiciando assim reações químicas que formam óxidos de baixa resistência ao desgaste. É um dos causadores do desgaste de entalhe devido ao contato do ar nas

extremidades da interface cavaco-ferramenta. O que se pode fazer para amenizar tal situação é usar isolamentos inertes nas ferramentas de corte e/ou limitar a temperatura da interface, utilizando para isto fluido de corte e/ou diminuindo a velocidade de corte (BAS, 2001).

Segundo König et al. (1984), para o sucesso da usinagem de materiais endurecidos, é imprescindível o cumprimento de vários pré-requisitos, tais como:

- equipamentos de elevada rigidez e precisão;
- ferramentas de corte constituídas por materiais duros com relativa tenacidade;
- aresta de corte resistente por meio de um chanfro ou raio de concordância apropriado;
- porta-ferramenta com elevada rigidez;
- parâmetros de corte apropriados.

A perspectiva de Huang et al. (2007) à medida que ocorre o desgaste em ferramentas de CBN no processo de torneamento duro, demonstra os típicos problemas que podem surgir pela alta temperatura, principalmente para altas velocidades de corte conforme Figura 2.13.

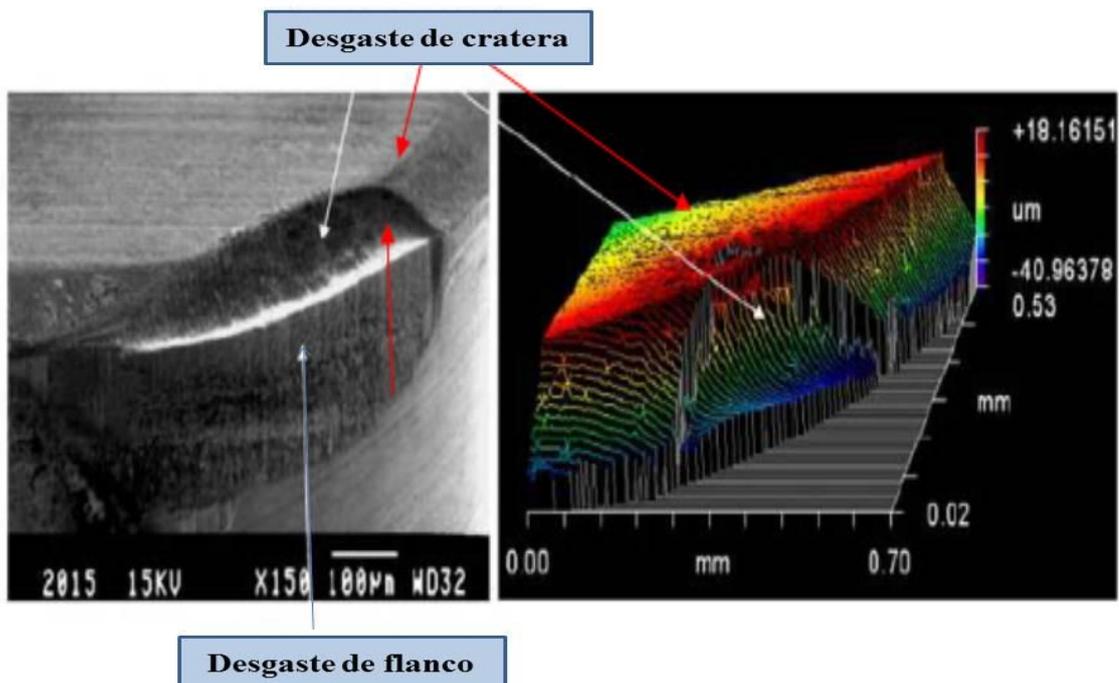


Figura 2.13 – Detalhe do desgaste da ferramenta CBN no torneamento duro.

Fonte: Huang et al. (2007).

É mostrado na figura 2.14 o grau de importância relativa dos principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte.

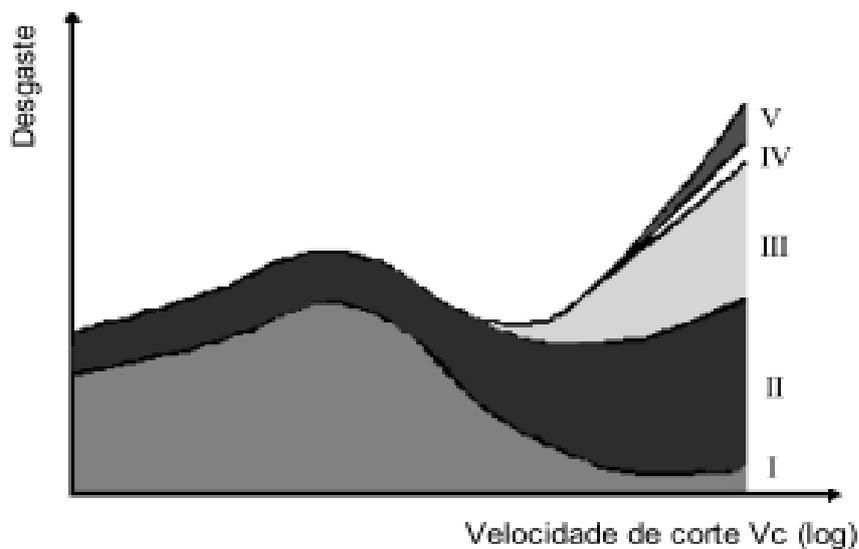


Figura 2.14 – Mecanismos de desgaste em função da velocidade de corte  $V_c$ : I – Adesão, II – Abrasão, III – Difusão, IV – Deformação plástica, V – Oxidação.

Fonte: König et al. (1984).

## 2.9 Integridade Superficial

Nesta seção, serão discutidos itens correspondentes à integridade das superfícies usinadas. O primeiro é referente ao acabamento superficial, no qual será tratada a rugosidade; e o segundo aborda as alterações microestruturais promovidas pela usinagem.

### 2.9.1 Rugosidade

A rugosidade da peça é caracterizada pela forma como é feita sua medição. No Brasil, foi adotado pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas o sistema da “Linha Média” (M). Esse é o sistema mais utilizado em todo o mundo. No sistema “M”, todas as grandezas de medição são definidas a partir de uma linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, linha esta que é a média entre os picos e reentrâncias de irregularidades. Os sistemas de medição baseados na linha média são divididos em três classes:

- Fundamentados na medida da profundidade da rugosidade;
- Fundamentados em medidas horizontais;
- Fundamentados em medidas proporcionais.

Serão vistos neste trabalho somente os sistemas fundamentados na medida da profundidade da rugosidade, por ser este o critério de medição de rugosidade dos corpos de

prova usinados neste trabalho. Este sistema está dividido em cinco parâmetros, os quais serão descritos a seguir.

- **Desvio médio aritmético (Ra)**

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. A Norma brasileira adota “Ra” como método de medição.

Onde:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (2.8)$$

É mostrado na Figura 2.15 como é feito o cálculo de Ra.

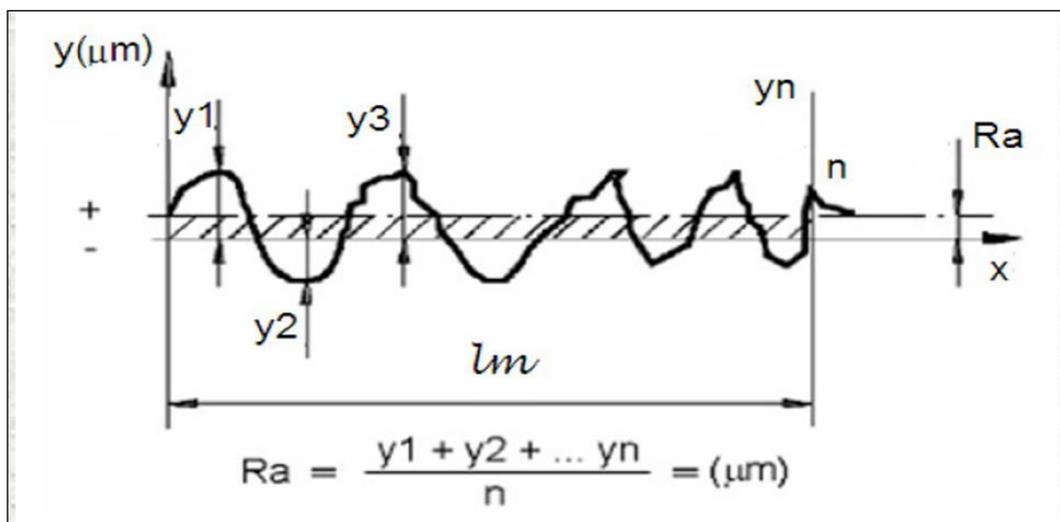


Figura 2.15 – Desvio médio aritmético Ra.

Fonte: Agostinho et al. (1995).

- **Desvio médio quadrático (Rq)**

Define-se como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. Seu valor é cerca de 11 % maior que o valor medido em Ra, pois a elevação ao quadrado amplifica o efeito das irregularidades. É calculado pela seguinte fórmula:

$$R_q = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}\right)} \quad (2.9)$$

- **Altura das irregularidades dos 10 pontos (Rz)**

É definida pela diferença entre o valor médio dos cinco maiores picos de irregularidades e as cinco maiores reentrâncias de irregularidades, medidas a partir de uma linha paralela a linha média e no comprimento de amostragem, conforme mostrado na Figura 2.16.

Onde:

$$R_Z = \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)}{5} - \frac{(r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5)}{5} \quad (2.10)$$

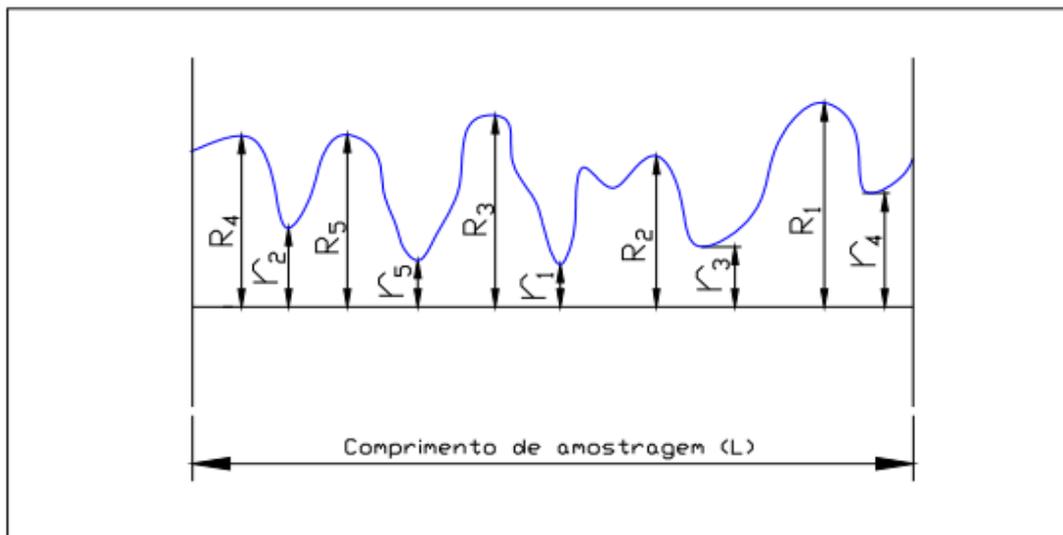


Figura 2.16 – Altura das irregularidades dos 10 pontos Rz.

Fonte: Agostinho et al. (1990).

- **Altura máxima das irregularidades (Rmax)**

Define-se como a distância entre o maior pico de irregularidade e a maior reentrância de irregularidade medida no comprimento de amostragem. Para tal medição são utilizados aparelhos traçadores de perfil. É mostrado na Figura 2.17 como é realizada a medição em Rmax.

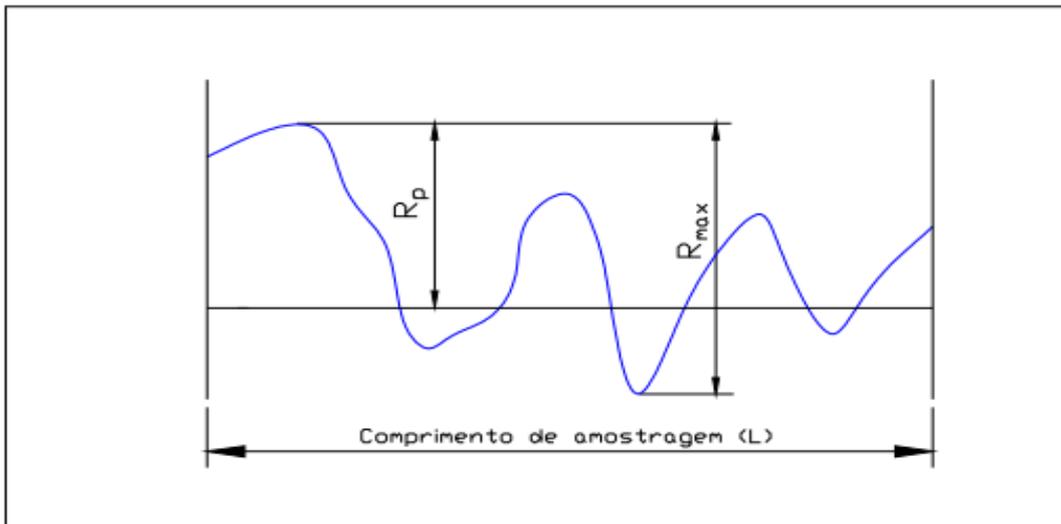


Figura 2.17 – Altura máxima das irregularidades “R max” e profundidade média  $R_p$ .

Fonte: Agostinho et al. (1990).

- **Profundidade média ( $R_p$ )**

É a ordenada do maior pico de irregularidade com a linha média, no comprimento de amostragem, conforme mostrado na Figura 2.18 (Agostinho, et. al. 1990). Em se tratando de torneamento de aços endurecidos, os dois principais fatores que influenciam na rugosidade da peça são o valor do raio de ponta da ferramenta “ $r_\epsilon$ ” e o avanço “ $f$ ” (Shaw, 1986). A fórmula citada por vários autores:  $R_{max} \text{ teórico} = f^2/8r_\epsilon$ , onde  $f$  é o avanço e  $r_\epsilon$  o raio de ponta da ferramenta de corte, significa o menor valor possível de  $R_{max}$  que se pode obter, cujo valor real (medido) é quase sempre maior e pode superar o valor teórico. Essa divergência entre o valor teórico e real se deve à rigidez do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação da peça (vibrações), deformação do cavaco e fluxo lateral do cavaco. Nem sempre o ganho que se tem quando é aumentado o raio de ponta da ferramenta de corte (contribuição geométrica) se traduz em um melhor acabamento superficial da peça, pois ao aumentar o valor do raio de ponta da ferramenta também se aumenta às vibrações de todo o sistema (DINIZ e NORITOMI, 2002; SATA, 1985).

## 2.9.2 Topografia da superfície

Os processos de usinagem por torneamento de materiais endurecidos e retificação são utilizados como operações de acabamento de superfícies, porém, apesar da capacidade de produzirem valores de rugosidade semelhantes, as superfícies produzidas por esses processos

possuem diferentes topografias. O torneamento produz uma superfície caracterizada, principalmente no início da vida da ferramenta, pela simetria e periódica variação dos picos e dos vales, chamada de perfil de rugosidade periódico, o qual está apresentado na Figura 2.18 (a).

Por outro lado, a retificação produz distribuições aleatórias dos picos e dos vales, chamadas de perfil de rugosidade aperiódico, conforme mostrado na Figura 2.18 (b). Essas topografias possuem diferentes comportamentos tribológicos, influenciando o comportamento das superfícies usinadas através de fenômenos físicos, como: atrito, desgaste, fadiga e características de vedações (WAIKAR e GUO, 2008).

Segundo Waikar e Guo (2008) o aspecto da topografia da superfície domina o comportamento das componentes em relação aos requisitos de integridade superficial, considerando que as características físicas da superfície usinada como tensões residuais, microdureza, e alterações microestruturais sejam idênticas.

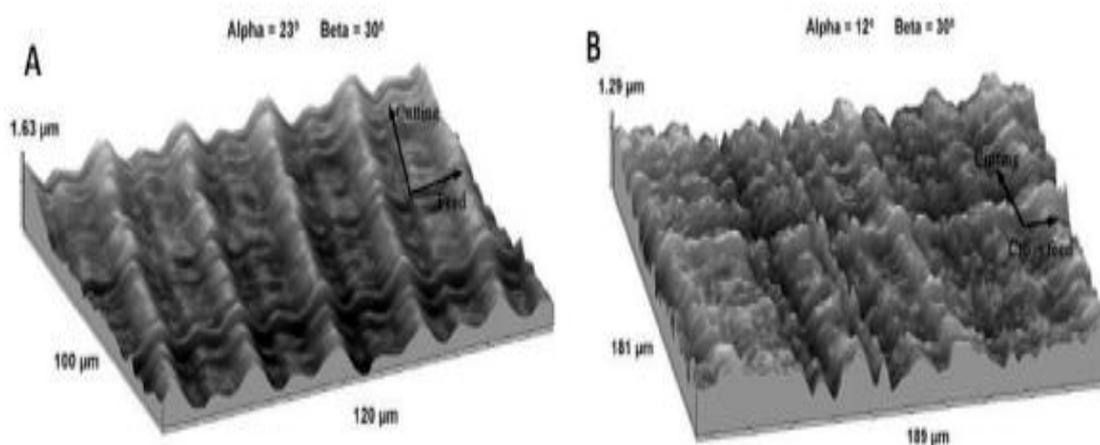


Figura 2.18 – Topografia da superfície: A) superfície gerada por torneamento duro e B) superfície gerada por retificação.

Fonte: Adaptado de Waikar e Guo (2008).

Abrão e Aspinwall (1996) compararam a resistência à fadiga mecânica de superfícies torneadas e retificadas do aço ABNT 52100 com 62 HRC. Os autores associaram os menores valores do parâmetro de rugosidade  $R_t$  à maior resistência à fadiga de superfícies nos componentes. Nas superfícies torneadas com ferramenta de PCBN, a média das rugosidades  $R_t$  foi igual a 1,94  $\mu\text{m}$ , com desvio padrão de 0,19  $\mu\text{m}$ , enquanto que nas superfícies retificadas a média da rugosidade  $R_t$  foi de 3,03  $\mu\text{m}$  com desvio padrão de 1,3  $\mu\text{m}$ . Os

autores ainda descreveram que os valores de rugosidade  $R_t$  e a topografia das superfícies torneadas foram mais uniformes comparadas as retificadas. Os maiores valores de rugosidade no parâmetro  $R_t$  das superfícies retificadas comparadas com às torneadas está relacionada à geometria das ferramentas de corte dos processos de usinagem em si.

A retificação é um processo de usinagem de geometria de corte não definida. Nos rebolos, os grãos abrasivos responsáveis pelo corte do material são distribuídos aleatoriamente no material aglomerante, resultando em uma topografia usinada conforme a mostrada na Figura 2.18 (B). No torneamento, a geometria de corte é definida, promovendo uma superfície usinada com características similares à mostrada na Figura 2.18 (A). A topografia gerada pela operação de retificação se torna mais propensa à nucleação e propagação de trincas, reduzindo a vida por fadiga mecânica dos componentes retificados comparado aos componentes torneados (SMITH et al. 2007; ABRÃO E ASPINWALL, 1996).

Este item aborda que apesar das superfícies usinadas por torneamento duro e retificação serem capazes de atingir os mesmos níveis de rugosidade (geralmente N5 e N6), as topografias geradas por estas operações são distintas, promovendo diferentes comportamentos físicos da superfície usinada. As principais vantagens das superfícies torneadas em relação às retificadas são: topografia da superfície usinada menos propensa a nucleação e a propagação de trincas e melhores propriedades para retenção de lubrificantes.

### **2.9.3 Camada branca**

Camadas brancas são alterações micro-estruturais observadas nas camadas superficiais de aços endurecidos. A camada superficial transformada apresenta uma dureza superior à do material de base e uma maior fragilidade. Ao microscópio óptico tem uma cor branca derivada da presença de martensita não revenida e austenita. Imediatamente abaixo da camada superficial transformada, aparece uma camada de cor escura constituída por martensita com um revenido realizado a uma temperatura elevada e, por conseguinte com uma dureza inferior ao da camada superficial transformada (CHOU et al. 1999; BARRY et al. 2001; e GOU et al. 2004).

Segundo Chou et al. (1999), a espessura da camada superficial transformada aumenta com a velocidade de corte e com o aumento do desgaste da ferramenta de corte. A profundidade de usinagem tem um efeito muito reduzido no aumento da espessura da camada superficial transformada.

Segundo Umbrello e Felice (2009), um estudo que previa a formação de camada branca durante a usinagem de aço endurecido AISI 52100 com uma dureza de 56, 62 e 66 HRC produziu excelentes resultados em termos de força de corte, temperatura de corte, morfologia do cavaco e camada branca. Umbrello et al. (2009) desenvolveram um estudo sobre a influência dos parâmetros de corte e dureza inicial sobre a formação de camada branca e escura durante a usinagem de aço ABNT 52100 com uma dureza de 53 HRC.

Os resultados experimentais e numéricos indicam que a camada branca aumentou com a velocidade de corte e velocidade de avanço. A camada escura, no entanto, diminuiu à medida que a velocidade de corte aumentou. De acordo com Attanasio et al. (2010), as camadas brancas e escuras estão normalmente associadas à tensão de tração e, conseqüentemente, à capacidade de reduzir a vida em fadiga de componentes usinados. Logicamente, cada camada tem suas próprias características estruturais. Uma superfície dura consiste geralmente em três camadas, como pode ser visto na figura 2.19: a camada branca (WL), a camada escura (DL) e o material.

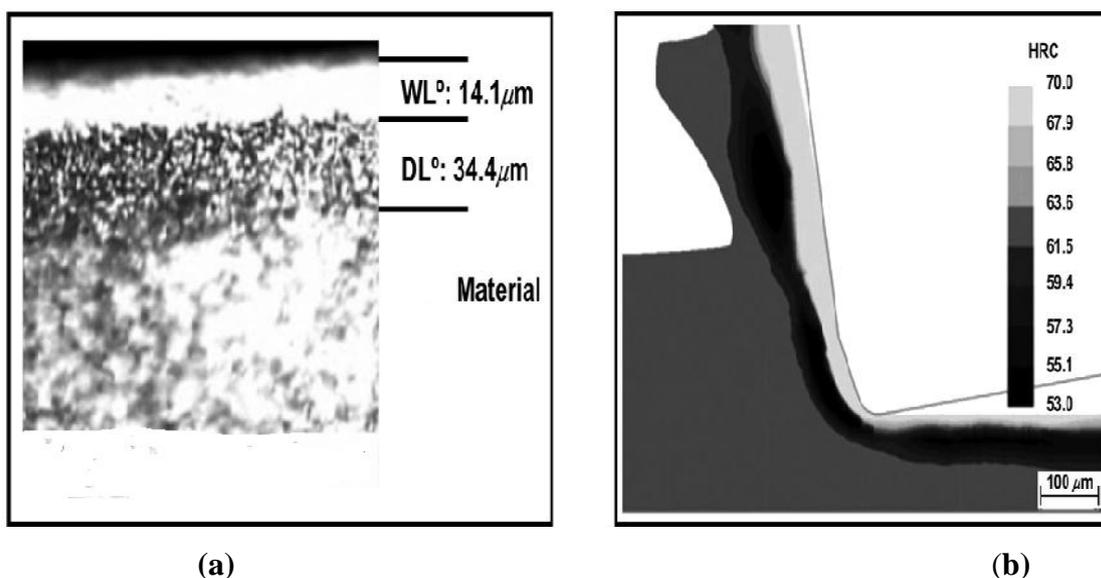


Figura 2.19 – Camada superficial observada (a) e simulada (b).

Fonte: Adaptado Umbrello (2010).

## 2.9.4 Considerações Finais

A seção anterior descreveu os fundamentos teóricos que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Na proposta apresentada neste trabalho, presume-se que uma solução de compromisso entre as variáveis de resposta do processo de torneamento do aço H13 endurecido possa ser obtida, combinando-se metodologias matemáticas e estatísticas.

## 3 MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA MODELAGEM DE PROCESSOS

### 3.1 Projeto e Análise de Experimentos

Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes em que mudanças propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema com o objetivo de observar e identificar a forma como as respostas desse sistema são afetadas em função das mudanças provocadas nas variáveis de entrada. Assim, a experimentação, segundo Montgomery (2005), se caracteriza como uma parte fundamental para o método científico na análise das diversas aplicações de engenharia.

O Projeto e Análise de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE), de acordo com o mesmo autor, é então definido como o processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Dessa forma, qualquer problema experimental deve ser sustentado por dois elementos: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos dados.

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

- Melhoria do rendimento dos processos;
- Redução de variabilidade e maior conformidade com especificações nominais;
- Redução do tempo de desenvolvimento de produtos ou processos;
- Redução de custos.

Os três princípios básicos do Projeto de Experimentos, segundo Montgomery (2005), são a aleatorização, a replicação e a blocagem. A aleatorização consiste na execução dos experimentos em ordem aleatória para que os efeitos desconhecidos dos fenômenos sejam distribuídos entre os fatores, aumentando a validade da investigação.

Dessa forma, o Quadro 3.1, apresentada por Nilo Júnior (2003), reúne as principais características relacionadas a cada uma dessas técnicas experimentais.

Quadro 3.1 – Características fundamentais das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos.

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

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003).

A replicação é a repetição de um mesmo teste várias vezes, criando uma variação para a variável de resposta utilizada para avaliação do erro experimental. A blocagem deve ser utilizada quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais. Esta técnica permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados.

Com relação aos projetos experimentais, tem-se que técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta.

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

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

### 3.2 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), segundo Montgomery (2005), é uma coleção de ferramentas matemáticas e estatísticas utilizada para a modelagem e análise de problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é a otimização desta resposta.

Para a maioria dos problemas, verifica-se que as relações entre a resposta e as variáveis independentes são desconhecidas. Assim, o primeiro passo consiste em encontrar uma aproximação adequada para representar a resposta de interesse em função das variáveis do processo. Geralmente, funções polinomiais são empregadas para a descrição de tais relações. Dessa forma, se a resposta for bem modelada por uma função linear, a relação aproximada pode ser representada pelo seguinte modelo de primeira ordem:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3.1)$$

onde:

$y$  – Resposta de interesse

$x_i$  – Variáveis independentes

$\beta_i$  – Coeficientes a serem estimados

$k$  – Número de variáveis independentes,  $\varepsilon$  – Erro experimental

Se o sistema apresentar curvatura, então um polinômio de maior grau deve ser usado, como o modelo de segunda ordem descrito pela Equação (3.2):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

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

Para a estimação dos coeficientes definidos pelos modelos das equações 3.1 e 3.2, o algoritmo tipicamente usado é o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*). Com isso, fica construída a função aproximada que relaciona a resposta de interesse com as variáveis do processo. Após a construção do modelo, a significância do mesmo é verificada através de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância). Este teste de significância é importante para avaliar se o modelo é estatisticamente significativo. Além disso, o ANOVA também permite verificar quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos. O ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que representa o percentual de variação na resposta que é explicada pelo modelo construído. Associado a este coeficiente, encontra-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2$  (adj.)), que considera o fato de que  $R^2$  tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Uma visão mais detalhada envolvendo o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, Análise de Variância e ajuste dos modelos pode ser observada em Paiva (2006), juntamente com outras análises importantes como a análise de resíduos e o teste de falta de ajuste (*Lack-of-fit*).

O arranjo experimental mais utilizado para a coleta de dados na Metodologia de Superfícies de Resposta é o arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*). Outro arranjo que também pode ser utilizado é o arranjo de Box-Behnken, porém pouco aplicado em comparação ao emprego do CCD.

Um arranjo composto central para  $k$  fatores é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ( $2^k$ ) ou fracionado ( $2^{k-p}$ ,  $p$  a fração desejada do experimento), um conjunto de pontos centrais ( $m$ ) e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados pontos axiais -  $2k$  (Figura 3.1). O número de pontos axiais em

um CCD é igual ao dobro do número de fatores e representam seus valores extremos. Em função da localização dos pontos axiais, o CCD pode ser circunscrito, inscrito ou de face centrada.

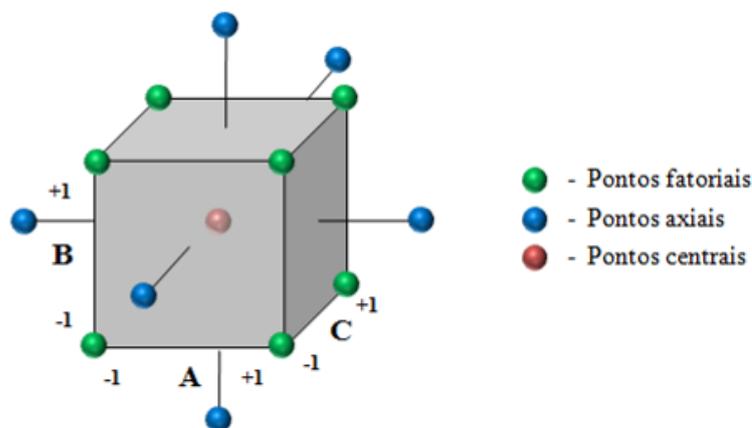


Figura 3.1 – Arranjo composto central para três fatores.

O arranjo composto circunscrito (CCC) corresponde ao CCD original. Nele, os pontos axiais estão a uma distância  $\alpha$  dos pontos centrais, baseado nas propriedades desejadas do projeto. Este arranjo requer cinco níveis para cada fator. O arranjo inscrito (CCI) é adequado para situações nas quais os limites especificados não podem ser extrapolados, quer por medida de segurança, quer por incapacidade física de realização. Neste caso, o CCI utiliza os níveis dos fatores como pontos axiais e cria um fatorial completo ou fracionado dentro desses limites. Um CCI requer cinco níveis. O arranjo de face centrada (CCF) caracteriza-se por dispor os pontos axiais sobre o centro de cada face do espaço fatorial, ou seja,  $\alpha = +1$  ou  $-1$ . Requer três níveis para cada fator.

Um CCC explora o maior espaço experimental possível, enquanto um CCI explora o menor. O valor de  $\alpha$  depende do número de experimentos da porção fatorial do CCD. Assim, segundo Box e Drapper (1987),  $\alpha = (2^k)^{1/4}$ , sendo  $k$  o número de fatores analisados.

Como uma das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta tem sido utilizada com frequência por vários pesquisadores, contribuindo para a otimização e para um melhor entendimento acerca dos fenômenos que caracterizam os mais diversos processos de fabricação. Sendo assim, casos de sucesso no emprego desta metodologia podem ser observados em NILO JÚNIOR (2003), CORREIA et al. (2005), PALANI e MURUGAN (2007), RODRIGUES et al. (2008).

### 3.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística multivariada amplamente utilizada para resumir em um número pequeno de combinações lineares os padrões comuns de variação entre as variáveis de interesse (Johnson e Wichern, 2002).

A existência de correlações entre as várias respostas de um conjunto exerce uma forte influência sobre as funções de transferência utilizadas. Como o modelo matemático é extremamente importante para a determinação do ponto de ótimo, a negligência da estrutura de correlação pode conduzir a pontos de ótimo inapropriados, fruto de uma inadequação do método dos mínimos quadrados ordinários (KHURI e CONLON, 1981; BRATCHELL, 1989).

Ao longo dos últimos anos, alguns pesquisadores têm se preocupado em tratar adequadamente este tipo de problema, considerando as estruturas de correlação entre as respostas anteriormente à construção dos modelos dos processos. Muitos destes têm utilizado a abordagem baseada na Análise de Componentes Principais (LIAO, 2005; FUNG e KANG, 2005; PAIVA et al. 2007; PAIVA et al. 2009).

Num processo normal, embora  $p$  componentes sejam necessários para se reproduzir a variabilidade total de um sistema de interesse, geralmente, a maior parte desta variabilidade pode ser representada por um pequeno número  $k$  de componentes principais. Isto significa que existe quase tanta informação em  $k$  componentes principais do que nas  $p$  variáveis originais.

A idéia geral da ACP é, portanto, que  $k$  componentes principais podem substituir, sem perda considerável de informação, as  $p$  variáveis originais. O conjunto original de dados, consistindo de  $n$  medições das  $p$  variáveis, é reduzido para um conjunto posterior formado por  $n$  medições de  $k$  componentes principais.

De acordo com Rencher (2002), a ACP geralmente revela relacionamentos que não seriam previamente identificados com o conjunto original, o que resulta em uma interpretação mais abrangente do fenômeno. Segundo Johnson e Wichern (2002), a análise de componentes principais serve como um passo intermediário na análise dos dados.

Suponha que  $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})$  sejam funções correlacionadas escritas a partir do vetor aleatório  $Y^T = [Y_1, Y_2, \dots, Y_p]$ . Assumindo que  $\Sigma$  seja a matriz de variância covariância associada a este vetor, então  $\Sigma$  pode ser fatorada em pares de autovalores-autovetores  $(\lambda_1, e_1), \dots, (\lambda_p, e_p)$ , onde  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ , de tal modo que a  $i$ -ésima combinação linear

seja  $PC_i = e_i^T Y = e_{1i}Y_1 + e_{2i}Y_2 + \dots + e_{pi}Y_p$  com  $i = 1, 2, \dots, p$ . O  $i$ -ésimo componente principal pode ser obtido a partir da maximização desta combinação linear, restrita ao fato de que a  $(i+1)$ -ésima combinação linear seja independente da anterior, ou seja, a covariância entre as duas combinações lineares seja nula. A Figura 3.2 apresenta a interpretação geométrica dos componentes principais. Nota-se que dois componentes consecutivos são retas ortogonais entre si.

Do ponto de vista da otimização multiobjetivo, a aplicação da ACP é extremamente vantajosa. Primeiro, porque permite a redução do número de funções objetivo, o que reduz drasticamente a complexidade do problema e, segundo, porque a utilização das combinações lineares elimina a influência da correlação sobre os regressores das funções objetivo. É por isto que esta técnica tem sido extensamente aplicada em problemas de MOP (*Multiobjective Programming*).

Geralmente, os parâmetros  $\Sigma$  e  $\rho$  são desconhecidos, o que conduz à utilização das matriz de correlação amostral  $R_{ij}$  e variância-covariância  $S_{ij}$  (Johnson e Wichern, 2002). Se as variáveis de interesse forem escritas no mesmo sistema de unidades ou se forem previamente padronizadas, a escolha mais comum para a extração dos componentes é a matriz  $S_{ij}$ ; caso contrário, deve-se utilizar a matriz de correlação  $R_{ij}$ . A matriz de variância-covariância pode ser escrita como:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1p} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{p1} & s_{p2} & \cdots & s_{pp} \end{bmatrix}, \text{ com } s_{ii} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad s_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j) \quad (3.3)$$

Portanto, cada elemento da matriz de correlação  $R_{ij}$  pode ser obtido como:

$$r_{(y_i, y_j)} = \frac{\text{Cov}(y_i, y_j)}{\sqrt{\text{Var}(y_i) \times \text{Var}(y_j)}} = \frac{\hat{e}_{ij} \sqrt{\hat{\lambda}_i}}{\sqrt{s_{ii}}} = \frac{s_{ij}}{\sqrt{s_{ii} \times s_{jj}}} \quad i, j = 1, 2, \dots, p \quad (3.4)$$

No caso das superfícies de resposta, o  $p$ -ésimo componente principal também poderá ser escrito em função dos parâmetros de entrada do arranjo, gerando modelos quadráticos para estes escores. Há vários trabalhos que mostram que as superfícies de resposta de componentes

principais representam adequadamente o conjunto original de funções objetivo correlacionadas (Bratchel, 1989; Paiva et al. 2007; 2012).

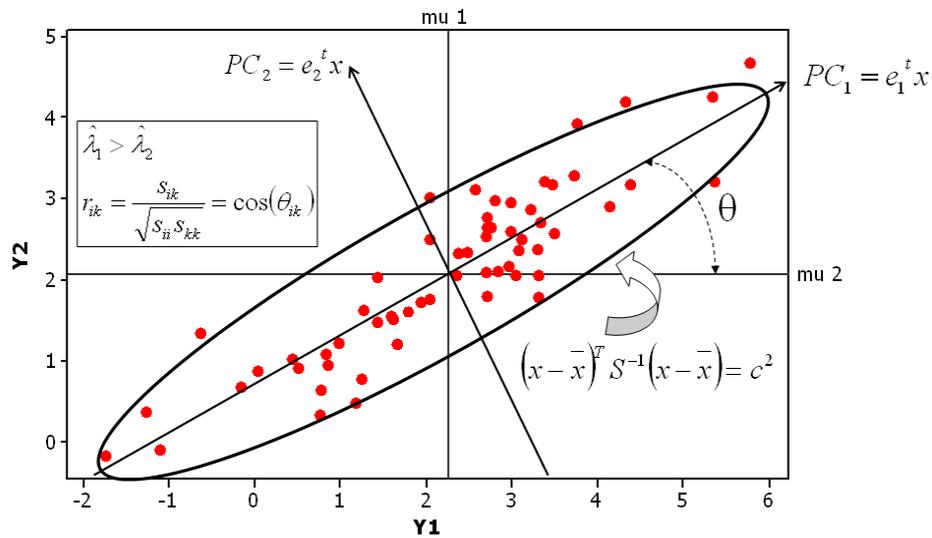


Figura 3.2 – Interpretação geométrica dos componentes principais.

Considerando-se os autovetores extraídos das matrizes  $R_{ij}$  ou  $S_{ij}$ , o escore do p-ésimo componente principal pode ser calculado como:

$$PC_k = \mathbf{Z}^T \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \left( \frac{x_{11} - \bar{x}_1}{\sqrt{S_{11}}} \right) & \left( \frac{x_{21} - \bar{x}_2}{\sqrt{S_{22}}} \right) & \dots & \left( \frac{x_{p1} - \bar{x}_p}{\sqrt{S_{pp}}} \right) \\ \left( \frac{x_{12} - \bar{x}_1}{\sqrt{S_{11}}} \right) & \left( \frac{x_{22} - \bar{x}_2}{\sqrt{S_{22}}} \right) & \dots & \left( \frac{x_{p2} - \bar{x}_p}{\sqrt{S_{pp}}} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left( \frac{x_{1n} - \bar{x}_1}{\sqrt{S_{11}}} \right) & \left( \frac{x_{2n} - \bar{x}_2}{\sqrt{S_{22}}} \right) & \dots & \left( \frac{x_{pn} - \bar{x}_p}{\sqrt{S_{pp}}} \right) \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{1p} & e_{2p} & \dots & e_{pp} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

A ACP tem sido muito utilizada em trabalhos de engenharia. Lopes (2001), por exemplo, desenvolveu sua tese de doutorado através da criação de uma metodologia multivariada para determinar a confiabilidade e o tempo médio de falha de um produto, cujos componentes tenham seus tempos de vida correlacionados. Para isto, utilizou-se da análise de componentes principais. Numa aplicação apresentada em sua tese, a adoção da ACP permitiu a redução de um grande número de variáveis (80 peças originais) para um grupo de apenas

três variáveis (componentes principais), optando-se, posteriormente, pela utilização de apenas um componente. Observou-se que a diferença entre a confiabilidade do primeiro componente principal e a média das confiabilidades das peças originais para três percentis foi de 0,2%.

Mingoti (2001) estudou o aperfeiçoamento do Diagrama de Pareto para aplicações em variáveis linearmente dependentes. Através da análise de componentes principais os resultados conflitantes do processo foram desfeitos.

Murphy (2004) apresentou um estudo sobre controle de qualidade multivariado utilizando os componentes principais da função perda escalonada.

Yacoub e MacGregor (2004) utilizaram o algoritmo de ACP para otimizar um processo químico com dez variáveis de resposta altamente correlacionadas e sete variáveis de entrada. Após a aplicação do método multivariado, apenas 3 componentes principais foram suficientes para representar o conjunto original. Como as variáveis independentes foram padronizadas, aplicou-se apropriadamente um método de regressão por PLS.

Um das questões importantes relacionadas à ACP é a identificação do número correto de componentes que devem substituir as variáveis originais. Segundo o critério de Kaiser (Jackson, 1993; Guttman, 1954), quando se utiliza a matriz de correlação na análise de Componentes Principais, apenas os componentes principais que apresentarem autovalores maiores do que 1,0 devem ser mantidos para representar a variação total. Entretanto, devido à variação ocorrida na amostragem, aproximadamente metade dos autovalores excederão à unidade. Apesar de ser muito criticado por isto (Jackson, 1993), este é o critério mais popular de seleção de componentes principais. Aliado ao critério de Kaiser, Johnson e Wichern (2009) recomendam que se mantenha uma quantidade de componentes cuja variação explicada acumulada seja de no mínimo 80%.

### **3.4 Otimização de múltiplas respostas**

Encontrar uma condição ótima para operação de um processo que o viabilize ou produza resultados com consideráveis melhorias, é o objetivo fundamental da metodologia de superfície de resposta. E, para alcançar tais resultados, diversos algoritmos de modelagem são utilizados para estabelecer funções de transferência entre os dados e as variáveis de controle experimentais, viabilizando a determinação do ponto de ótimo.

A seguir, serão apresentadas algumas características dos métodos de otimização de múltiplas respostas, e alguns dos algoritmos utilizados na sua resolução.

### 3.4.1 Erro Quadrático Médio Multivariado

A otimização dos processos de fabricação geralmente considera um grande número de características, sendo algumas desejáveis e outras exigíveis. Assim, o desafio dos métodos de otimização consiste em proporcionar um equacionamento matemático capaz de determinar soluções que atendam a todas, ou à maioria dessas características. Essas preocupações têm feito com que os métodos tradicionais utilizassem duas estratégias: (a) a priorização das funções objetivo e b) a aglutinação das funções objetivo (BUSACCA et al. 2001; OZEL e KARPAT, 2005).

Na priorização, o que ocorre é a eleição de uma resposta mais importante em relação às demais. Dessa forma, essa característica é escolhida como função objetivo, enquanto que as demais são alocadas como restrições. O atendimento de todas as restrições faz com que a resposta ótima conduza a soluções que atendam a todos os objetivos. A estratégia de aglutinação faz com que as diversas funções objetivo sejam combinadas em uma única função, que passa a ser tratada como a função objetivo de otimização global do processo. A otimização desta função global garante que as características individuais sejam também otimizadas. Dentro desta abordagem, métodos como o *desirability* e os índices de capacidade  $C_p$ ,  $C_{pk}$  e  $C_{pm}$  podem ser citados como exemplos.

Os métodos tradicionais têm sido bastante úteis para a otimização e melhoria do desempenho dos mais diversos processos e operações, sejam eles univariados ou multivariados. No entanto, para o caso da otimização de problemas multivariados, ou seja, problemas em que se deseja a otimização de múltiplas respostas, os métodos tradicionais não consideram a estrutura de correlação existente entre as respostas (Paiva, 2012). De acordo com Paiva (2008), a existência de correlações entre as várias respostas de interesse exerce uma forte influência sobre as funções de transferência utilizadas para representar as características de qualidade. Considerando que o modelo matemático é de grande importância para a determinação do ponto de ótimo, a negligência da estrutura de correlação pode conduzir a pontos de ótimo inapropriados (KHURI e CONLON, 1981; BRATCHELL, 1989). Esta necessidade vem fazendo com que vários pesquisadores, ao longo dos últimos anos, se preocupassem em oferecer um tratamento mais adequado para este tipo de problema.

Nesse contexto, Paiva (2008) desenvolveu o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), que é uma ferramenta que combina as técnicas do Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e Análise de Componentes Principais (ACP) para a otimização de problemas multivariados considerando a

estrutura de correlação existente entre as respostas. A Análise de Componentes Principais, conforme apresentado por Paiva (2006), é uma técnica estatística multivariada que se dedica à explicação da estrutura de variância-covariância existente entre um conjunto de dados, utilizando combinações lineares das variáveis originais. Seus principais objetivos se resumem à redução da dimensionalidade e à interpretação dos dados. A otimização pelo EQMM é obtida a partir da seguinte formulação matemática:

$$\text{Minimizar } EQMM = \left[ \prod_{i=1}^n (PC_i - T_{PC_i})^2 + \lambda_{PC_i} \right]^{1/n} \quad (3.6)$$

$$\text{Sujeito a: } \mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \rho^2 \quad (3.7)$$

onde:  $EQMM$  – Erro Quadrático Médio Multivariado;  $n$  – Número de componentes principais utilizados;  $PC_i$  – Modelos de superfície de resposta desenvolvidos para os escores dos componentes principais;  $T_{PC_i}$  – Alvos em termos dos componentes principais;  $\lambda_{PC_i}$  – Autovalores dos componentes principais;  $\mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \rho^2$  – Restrição do espaço experimental para regiões esféricas (no caso de se utilizar um arranjo CCD),  $\rho = \alpha$ .

Os alvos em termos dos componentes principais são calculados a partir de uma combinação linear entre os autovetores dos componentes principais e os valores padronizados das respostas em relação aos seus alvos. É apresentado o procedimento pelas Equações 3.8 e 3.9:

$$T_{PC} = \sum_{j=1}^k c_j \cdot Z(y_j | \zeta_{y_j}) \quad (3.8)$$

onde:  $T_{PC}$  – Alvo em termos do componente principal;  $k$  – Número de respostas consideradas;  $c_j$  – Coeficientes dos autovetores do componente principal;  $Z(y_j | \zeta_{y_j})$  – Valores padronizados (unificação dos dados) das respostas em relação aos alvos, calculados por:

$$Z(y_j | \zeta_{y_j}) = \frac{\zeta_{y_j} - \mu_{y_j}}{\sigma_{y_j}} \quad (3.9)$$

sendo:  $\zeta_{y_j}$  – Alvos definidos para as respostas;  $\mu_{y_j}$  – Média experimental das respostas;  $\sigma_{y_j}$  – desvio-padrão experimental das respostas.

Para a resolução da formulação definida pelas Equações 3.5 e 3.6 algoritmos de busca como o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o Algoritmo Genético (AG) podem ser utilizados.

### 3.4.2 Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado

A proposta do EQMM tem como principal vantagem o fato desta ferramenta tratar da otimização de múltiplas respostas minimizando o efeito da correlação entre elas, uma vez que os componentes principais se caracterizam como representações não correlacionadas das respostas originais correlacionadas. Para isso, o método se desenvolve por meio de uma combinação entre os conceitos da Análise de Componentes Principais, Metodologia de Superfície de Resposta e função *EQM*, tal como discutido no item anterior. A hipótese avaliada neste procedimento é que a minimização das distâncias entre cada componente principal e seus respectivos valores alvos podem levar a uma solução de compromisso que atinge todos os cinco alvos das respostas correlacionadas. Adotando-se estes aspectos e o critério de minimização, um sistema de otimização não linear pôde ser desenvolvido, em termos do erro quadrático médio multivariado, utilizando-se, adicionalmente, uma restrição esférica para os níveis dos fatores.

No entanto, a formulação EQMM se propõe à otimização das múltiplas respostas correlacionadas atribuindo a elas o mesmo grau de importância, de forma que, se além de correlacionadas, as múltiplas respostas apresentarem também pesos diferentes, o método não é capaz de atribuir as ponderações desejadas. Portanto, a otimização de múltiplas respostas correlacionadas apresentando pesos diferentes é obtida pelo método EQMM<sub>P</sub> através da seguinte formulação:

$$\text{Min } EQMM_P = \sum_{i=1}^r \left[ \frac{v_i}{v_T} \cdot EQMM_{P_i} \right] = \sum_{i=1}^r \left\{ \frac{v_i}{v_T} \cdot \left[ (PC_i^*(\mathbf{x}) - \zeta_{PC_i}^*)^2 + \lambda_i^* \right] \right\}, \quad r \leq m \quad (3.10)$$

$$s. a.: g_j(\mathbf{x}) \leq 0$$

onde:

$EQMM_{P_i}$  – EQMM<sub>P</sub> para o *i*-ésimo componente principal

*r* – Número de componentes principais necessários

*m* – Número de respostas otimizadas

$v_i$  – Grau de explicação do *i*-ésimo componente principal, tal que  $\sum_{i=1}^r v_i = v_T$

$PC_i^*(\mathbf{x})$  – Modelo de superfície de resposta para o  $i$ -ésimo componente principal obtido com as respostas ponderadas

$\zeta_{PC_i}^*$  – Alvo calculado para o  $i$ -ésimo componente principal obtido com as respostas ponderadas

$\lambda_i^*$  – Autovalor para o  $i$ -ésimo componente principal obtido com as respostas ponderadas

$g_j(\mathbf{x}) \leq 0$  – Restrições

Uma vez gerado o sistema de equações para a otimização multivariada, o mesmo foi devidamente implementado em uma planilha do Microsoft Excel, e o algoritmo GRG Solver, disponível neste pacote, foi utilizado para se chegar à solução do problema.

### 3.4.3 Método da Interseção Normal a Fronteira (NBI)

Geralmente, todo produto ou processo apresenta múltiplas características de qualidade que devem ser atendidas. Desse modo, para alcançar a otimização das mesmas é muito comum se empregar uma função de aglutinação baseada em somas ponderadas.

O método das somas ponderadas é um operador de aglutinação, onde são estabelecidos pesos para as funções de interesse, ou seja, este método é capaz de estabelecer um grau de importância para cada função. Esta abordagem é interessante, pois isto permite aos conhecedores do processo uma maior interação com as entradas e saídas, de acordo com as suas necessidades práticas.

As somas ponderadas são amplamente utilizadas para gerar soluções de compromisso (*trade-off*) em problemas multiobjetivo e formam, via de regra, um conjunto de soluções viável e não dominadas conhecidas como “Fronteira de Pareto”. Entretanto, se o conjunto de soluções de Pareto for não convexo, a fronteira passa a ser não convexa e descontínua, formando clusters de soluções Pareto-ótimas em regiões de grande curvatura, porém, descontínuas no espaço de solução (Figura 3.3), o que é típico de problemas mal condicionados. É importante destacar que um vetor de decisão  $\mathbf{x}^* \in S$  é Pareto-ótimo se nenhum outro vetor  $\mathbf{x} \in S$  existir de maneira que  $f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^*)$ , para todo  $i = 1, 2, \dots, k$ .

Como tal, as somas ponderadas dificilmente detectarão soluções nas regiões não-convexas da Fronteira ou em fronteiras não-convexas (descontínuas) que, eventualmente, podem existir (Figura 2.25). Além disso, este método também não é capaz de gerar uma fronteira uniformemente espaçada, mesmo que a distribuição dos pesos seja uniforme (SHUKLA e DEB, 2007; VAHIDINASAB e JADID, 2010).

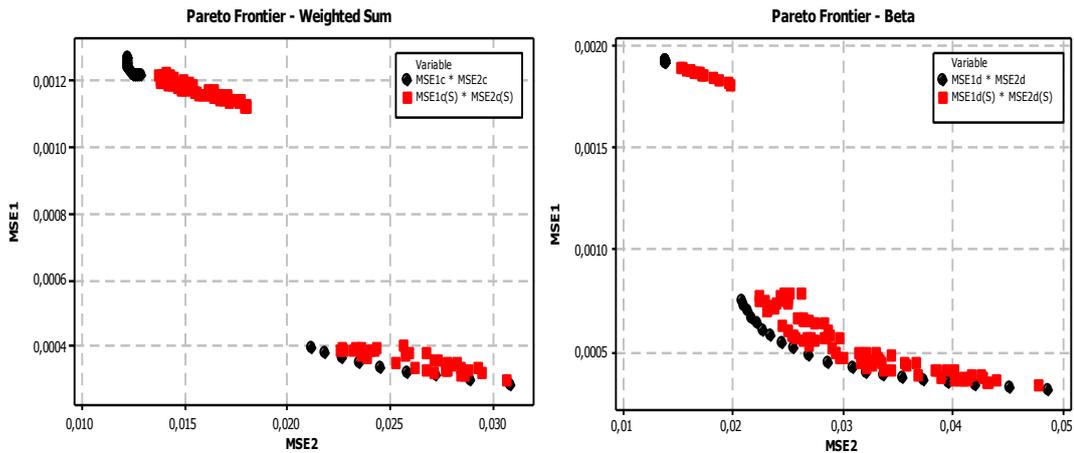


Figura 3.3 – Desvantagens do Método de Somas Ponderadas.

Fonte: Paiva et al. 2014.

Para contornar as desvantagens inerentes ao método das somas ponderadas, Das e Dennis (1998) propuseram o método da Interseção Normal à Fronteira (NBI, do inglês *Normal Boundary Intersection*), mostrando ser possível a construção de fronteiras contínuas e uniformemente distribuídas, independentemente da distribuição dos pesos ou das escalas relativas entre as diversas funções objetivo (Figura 3.4).

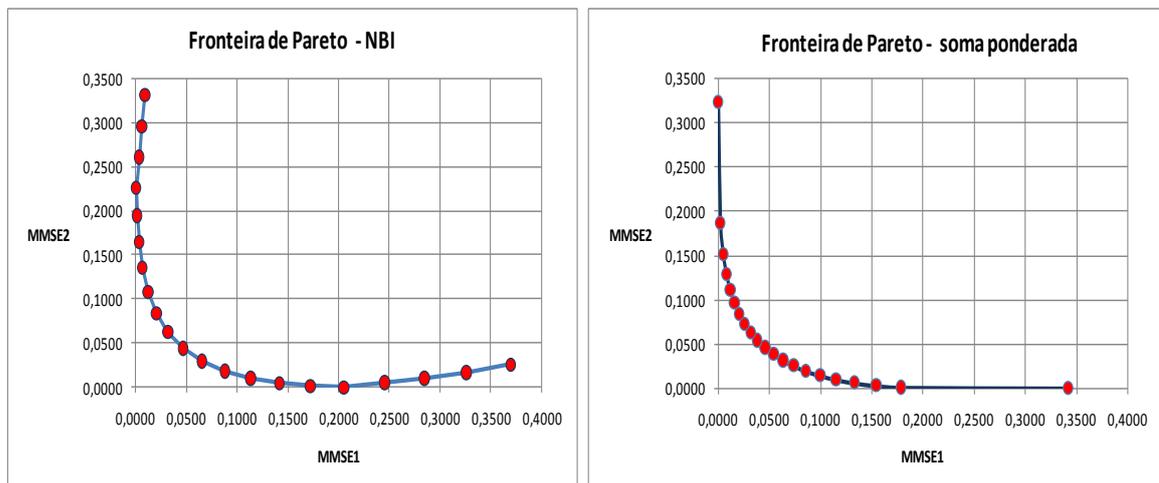


Figura 3.4 – Comparação entre NBI e o Método de Somas Ponderadas.

Fonte: Paiva et al. 2012.

O primeiro passo a ser executado no método NBI compreende o cálculo dos elementos da matriz *Payoff*  $\Phi$ , que representa os valores ótimos das múltiplas funções objetivo minimizados de modo individual. O vetor de solução que minimiza individualmente a  $i$ -ésima

função objetivo  $f_i(x)$  é representado por  $x_i^*$ , de sorte que o valor mínimo de  $f_i(x)$  neste ponto seja  $f_i^*(x_i^*)$ . Quando se substitui o ponto de ótimo individual  $x_i^*$  obtido na otimização de função objetivo nas demais funções, tem-se  $f_i(x_i^*)$  que é, portanto, um valor não-ótimo dessa função. Repetindo-se este algoritmo para todas as funções, pode-se representar a matriz *Payoff* como:

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(x_1^*) & \cdots & f_1(x_i^*) & \cdots & f_1(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_i(x_1^*) & \cdots & f_i^*(x_i^*) & \cdots & f_i^*(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_m(x_1^*) & \cdots & f_m(x_i^*) & \cdots & f_m^*(x_m^*) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Cada linha de  $\Phi$  é composta valores mínimos e máximos de  $f_i(x)$ . No método NBI, estes valores podem ser usados para normalizar as funções objetivo, principalmente quando as mesmas são representadas por escalas ou unidades diferentes. De maneira semelhante, escrevendo o conjunto de ótimos individuais em um vetor, tem-se  $f^U = [f_1^*(x_1^*) \dots, f_i^*(x_i^*) \dots, f_m^*(x_m^*)]^T$ . Este vetor é denominado Ponto de Utopia. Do mesmo modo, agrupando-se os valores máximos (não-ótimos) de cada função objetivo tem-se  $f^N = [f_1^N \dots, f_i^N \dots, f_m^N]^T$ . Este vetor é denominado de Pontos Nadir (JIA e IERAPETRITOU, 2007; UTYUZHNIKOV et al. 2009). Usando estes dois conjuntos de pontos extremos, a normalização das funções objetivo pode ser obtida como:

$$\bar{f}(x) = \frac{f_i(x) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U} \quad i = 1, \dots, m \quad (3.11)$$

Esta normalização conduz, conseqüentemente, à normalização da matriz Payoff,  $\bar{\Phi}$ . De acordo com Vahidinasab e Jadid (2010), as combinações convexas de cada linha da matriz Payoff,  $\bar{\Phi}$  formam a “Envoltória Convexa de Mínimos Individuais” ou CHIM (*Convex Hull of Individual Minima*), ou ainda, a Linha de Utopia (UTYUZHNIKOV et al. 2009).

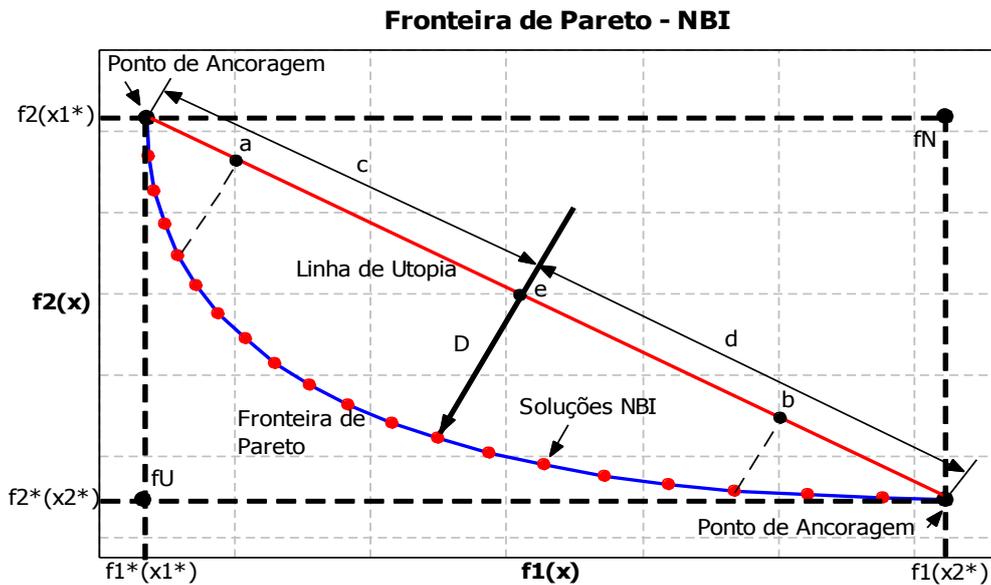


Figura 3.5 – Método da Interseção Normal à Fronteira (NBI).

Fonte: Paiva et al. 2012.

Ressalta-se que uma distribuição igualmente espaçada de pontos ao longo da linha de utopia não garante uma distribuição uniforme de pontos na fronteira de Pareto. Os pontos de ancoragem representam as soluções individuais de duas funções  $f_i^*(x_i^*)$  (JIA e IERAPETRITOU, 2007; UTUZHNIKOV et al. 2009). É mostrado na Figura 3.6 como o método NBI funciona. Os pontos a, b e e são calculados a partir da matriz payoff escalonada,  $\bar{\Phi}_{w_i}$ . Considerando um conjunto de valores convexos para os pesos,  $w$ , tem-se que  $\Phi_w$  representará um ponto na linha de utopia. Fazendo  $\hat{n}$  denotar um vetor unitário normal à linha de utopia nos pontos  $\Phi_w$  na direção da origem; então,  $\Phi_w + D\hat{n}$ , com  $D \in \mathbb{R}$ , representará o conjunto de pontos naquela normal (JIA e IERAPETRITOU, 2007; SHUKLA e DEB, 2007). O ponto de interseção desta normal com a fronteira da região viável que for mais próximo da origem corresponderá à maximização da distância entre a linha de utopia e a Fronteira de Pareto. Desse modo, o método NBI pode ser escrito como um problema de programação não-linear restrita, tal que:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max}_{(x,t)} \quad D \\
 & \text{sujeito a : } \bar{\Phi}_w + D\hat{n} = \bar{F}(\mathbf{x}) \\
 & \quad \mathbf{x} \in \Omega
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

O problema de otimização representado pelo sistema de equações 3.12 pode ser resolvido iterativamente para diferentes valores de  $w$ , o que cria, por conseguinte, uma Fronteira de Pareto igualmente espaçada. Uma escolha comum proposta por Jia e Ierapetritou (2007) é fazer  $w_n = 1 - \sum_{i=1} w_i$ . Por uma questão de simplificação, o parâmetro conceitual  $D$  pode ser algebricamente eliminado da Equação 3.13, dado que ele está tanto na função objetivo quanto nas restrições de igualdade. Para o caso bidimensional, esta expressão simplificada pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \bar{f}_1(\mathbf{x}) \\
 & \text{sujeito a: } \bar{f}_1(\mathbf{x}) - \bar{f}_2(\mathbf{x}) + 2w - 1 = 0 \\
 & \quad g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \\
 & \quad 0 \leq w \leq 1
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Onde:  $\bar{f}_1(\mathbf{x})$  e  $\bar{f}_2(\mathbf{x})$  representam duas funções objetivo escalonadas (normalizadas).

Neste projeto de pesquisa, deseja-se mostrar como o método NBI pode ser útil também para a geração de fronteiras uniformemente distribuídas para o caso de múltiplos duais correlacionados. Ressalta-se que  $\bar{f}_1(\mathbf{x})$  e  $\bar{f}_2(\mathbf{x})$  poderiam ser, respectivamente, uma equação de média e outra de variância, ou como se detalhará mais adiante, funções multivariadas EQMM (Paiva et al. 2009; Gomes et al. 2013) representativas de um bloco de médias e de um bloco de variâncias, respectivamente.

## 3.5 Algoritmos de Otimização

### 3.5.1 Gradiente Reduzido Generalizado

Para resolver problemas de otimização Não-Lineares (*Nonlinear Problem* – NLP), diversos métodos são conhecidos. De acordo com K oksoy e Doganaksoy (2003), o algoritmo denominado Gradiente Reduzido Generalizado (*Generalized Reduced Gradient* – GRG)   o que apresenta maior robustez, visto que   apropriado para resolu o de uma vasta variedade de problemas, e com maior eficiência entre os métodos de otimiza o de restri es não lineares disponíveis. Este será o método adotado no presente trabalho.

O método GRG   conhecido como um método *primal* (K KSOY, 2007), e frequentemente chamado de método da dire o viável, apresentando, segundo Luenberger e Ye (2008), três significantes vantagens: (i) se o processo termina antes da confirma o do ótimo, o último ponto encontrado   viável devido ao fato de que cada ponto gerado no

processo de pesquisa é viável e provavelmente próximo do ótimo; (ii) se o método gera uma sequência convergente, o ponto limite garante, pelo menos, um mínimo local; (iii) a maioria dos métodos primais são geralmente absolutos, não dependendo de uma estrutura especial, tais como a convexidade.

O método atinge uma base teórica geral, e assegura resultados empíricos para solução de problemas não lineares em geral. Como característica essencial, o método também apresenta uma adequada convergência global, principalmente quando inicializado suficientemente próximo à solução (LASDON et al. 1978). A expressão “gradiente reduzido” vem da substituição das restrições na função objetivo, diminuindo, então, o número de variáveis e, conseqüentemente, reduzindo o número de gradientes presentes (NASH e SOFER, 1996). Uma forma geral para a programação não linear pode ser descrito como sugerido por (LASDON et al.1978).

A Equação 2.24 representa um problema não linear.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && f(\mathbf{x}) \\
 & \text{Sujeito a:} && g_i(\mathbf{x})=0, \quad i=1,\dots,m \\
 & && l_j \leq x_j \leq u_j, \quad j=1,\dots,n
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Onde:  $\mathbf{x}$  é um vetor de  $n$  variáveis de processo  $(x_1, \dots, x_n)$ ,  $f$  é a função objetivo, e  $g_i$  são as restrições. Os  $l_j$  e  $u_j$  representam, respectivamente, os limites inferiores e superiores do processo. O modelo geral do método GRG é baseado na conversão das restrições do problema para uma irrestrrição, usando substituição direta (LASDON et al.1978). Neste caso, o vetor da variável de processo  $\mathbf{x}$  pode ser particionado em dois subvetores  $\mathbf{x} = (\mathbf{x}^B, \mathbf{x}^N)^T$ , onde  $\mathbf{x}^B$  é o  $m$  vetor das variáveis básicas (dependentes) e  $\mathbf{x}^N$  é o  $n-m$  vetor das variáveis não básicas (independentes). Reescrevendo o problema de NLP, a maneira reduzida poderia ser descrita como (LASDON et al. 1978; CHEN e FAN, 2002):

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^B(\mathbf{x}^N), \mathbf{x}^N) \\
 & \text{Sujeito a:} && l_N \leq x^N \leq u_N
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

onde  $l_N$  e  $u_N$  são os vetores dos limites para  $\mathbf{x}^N$ .

Iniciando-se com um ponto viável  $\mathbf{x}^k$ , o algoritmo GRG tenta encontrar uma direção de movimento para otimizar a função objetivo. A direção do movimento pode ser obtida pelo gradiente reduzido através da Equação 3.16, tal que:

$$\mathbf{r}^k(\mathbf{x}_N) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f^k}{\partial \mathbf{x}_N^k} \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \frac{\partial f^k}{\partial \mathbf{x}_B^k} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial g^k}{\partial \mathbf{x}_B^k} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial g^k}{\partial \mathbf{x}_N^k} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

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

### 3.6 Análise Envoltória de Dados (DEA)

Para Liu et al. (2013), a Análise Envoltória de Dados ou *Data Envelopment Analysis* (DEA) é um método não-paramétrico de medição de eficiência produtiva, para operações com múltiplos insumos e múltiplos produtos. Não exige, dessa forma, a determinação de relações funcionais entre produtos e insumos, e não se restringe a medidas únicas entre eles (FERREIRA e GOMES, 2012).

Segundo Ferreira e Gomes (2012), a DEA teve seus primórdios na Teoria da Produção Microeconômica, fomentada a partir do século XIX, com a obra *Der Isolierte Staat* do alemão Johann-Heinrich Von Thünen. Essa obra foi uma das primeiras a formular a Teoria da Produtividade Marginal. Outros trabalhos, que se seguiram a este, tentaram precisar conceitos e medidas do melhor uso dos fatores de produção (máquinas, pessoas, equipamentos matérias-primas, energia, etc.).

Na década de 50, o trabalho de Farrel (1957) influenciou de forma significativa a proposição da DEA. Farrel (1957) desenvolveu métodos mais robustos para avaliar a produtividade, por meio dos conceitos de análise de atividades. Segundo o autor, tentativas de avaliar a produtividade resultavam em medidas extremamente restritivas, uma vez que não conseguiam combinar múltiplos insumos em um único medidor de eficiência.

Segundo Saurin et al. (2013), o propósito do trabalho de Farrel (1957) era desenvolver uma métrica de eficiência capaz de levar em consideração todos os insumos de uma empresa, e mostrar como isto poderia ser realizado na prática, por meio de uma função de produção.

Com base no trabalho de Farrel (1957) e em suas limitações, a DEA é proposta no final da década de 70, na tese de doutorado de Rhodes (1978). Orientado pelo professor William W. Cooper, o trabalho buscou desenvolver um método para comparar a eficiência de escolas públicas para alunos carentes, que participavam do programa Follow Through, comparando escolas que participavam desse programa com escolas que não participavam (COOPER, SEIFORD e TONE, 2007). Segundo Ferreira e Gomes (2012), o objetivo deste trabalho era estimar a eficiência técnica relativa entre as escolas, levando em consideração vários insumos e produtos, sem que houvesse a necessidade de convertê-los em um padrão e sem estabelecer ponderações arbitrárias. Dessa forma, a busca de uma conceituação precisa de medidas de eficiência econômica levou ao desenvolvimento da DEA, publicada no trabalho de CHARNES et al. (1978).

Segundo Cook e Seiford (2009), a DEA consiste em uma metodologia não-paramétrica para mensuração comparativa da eficiência de Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Units* - DMUs). Outro fato que merece destaque é a possibilidade de existir incomensurabilidade (diferentes unidades de medida) entre os elementos das matrizes de entradas e saídas, o que é contornado com o uso da DEA. Assim, a DEA fornece uma metodologia que permite identificar as DMUs que sejam referências (*benchmarking*) para as demais analisadas, formando uma fronteira de eficiência.

### 3.6.1 Conceitos Básicos da Análise Envoltória de Dados (DEA)

Para Mariano et al. (2006), um dos primeiros conceitos a serem discutidos para uma correta compreensão da DEA diz respeito às organizações analisadas para o cálculo de eficiência, denominada, segundo Cook e Seiford (2009), de Unidades Tomadoras de Decisão ou *Decision Making Units* (DMUs).

Para Cooper et al. (2007), uma DMU é considerada como a entidade responsável pela conversão de insumos em produtos, cujos desempenhos são avaliados. Em aplicações gerenciais, uma DMU pode incluir bancos, lojas de departamentos, supermercados, fabricantes de automóveis, hospitais, escolas, bibliotecas, entre outros.

Para Mariano et al. (2006), uma das formas para avaliar o desempenho de uma DMU é relacionar os insumos e produtos de cada DMU analisada. Cooper et al. (2007) relacionam insumos e produtos por meio da seguinte equação (3.17):

$$Produtividade = \frac{Outputs}{Inputs} \quad (3.17)$$

Para Ferreira e Gomes (2012), a produtividade está relacionada à forma de utilização de recursos para realizar a produção. Esse conceito sugere que o insumo esteja sendo utilizado da melhor maneira possível. Segundo esses autores, para a DEA, a utilização de insumos, além do necessário, é denominada folga.

Para Cooper et al. (2007), a utilização de abordagens clássicas de medidas de produtividades é limitada, quando múltiplos *inputs* e *outputs* devem ser levados em consideração.

Outro importante conceito, diz respeito à eficiência. Para Mariano et al. (2006), a eficiência de uma DMU é definida como a divisão entre um indicador de desempenho e o seu correspondente máximo. Com base nisso, a eficiência de uma DMU pode ser calculada como sendo Equação 3.18:

$$Eficiência = \frac{P}{P_{max}} \quad (3.18)$$

Sendo: P = Produtividade atual da DMU; P<sub>max</sub> = Produtividade máxima que pode ser alcançada por essa DMU.

Para Mariano et al. (2006), a eficiência sempre estará entre 0 e 1. A partir deste conceito, é possível calcular a eficiência absoluta e a eficiência relativa. Na eficiência absoluta, o valor de P<sub>max</sub> é um valor teórico e inatingível, enquanto que na eficiência relativa, P<sub>max</sub> é a produtividade da DMU mais eficiente. Caso a eficiência seja igual a 1, a DMU é eficiente; caso ela seja menor que 1, essa DMU é ineficiente.

Soares de Mello et al. (2005) exemplificam graficamente os conceitos da produtividade e da eficiência por meio da Figura 3.6 (a). Na figura, o eixo X representa os Recursos ou Insumos, enquanto o eixo Y representa a Produção. A curva S (em preto) é denominada Fronteira de Eficiência, e representa o valor máximo produzido para um dado valor de insumo. A região situada abaixo da curva S é chamada de Conjunto Viável de Produção.

Os autores destacam que as unidades C e B são eficientes, uma vez que ambas se encontram na fronteira de eficiência. No entanto, a unidade C é mais produtiva, visto que o coeficiente angular da reta OC (em azul) é maior que o coeficiente angular da reta OB (em verde). Nesse sentido, a unidade A, situada abaixo da fronteira de eficiência, não é nem produtiva, nem eficiente.

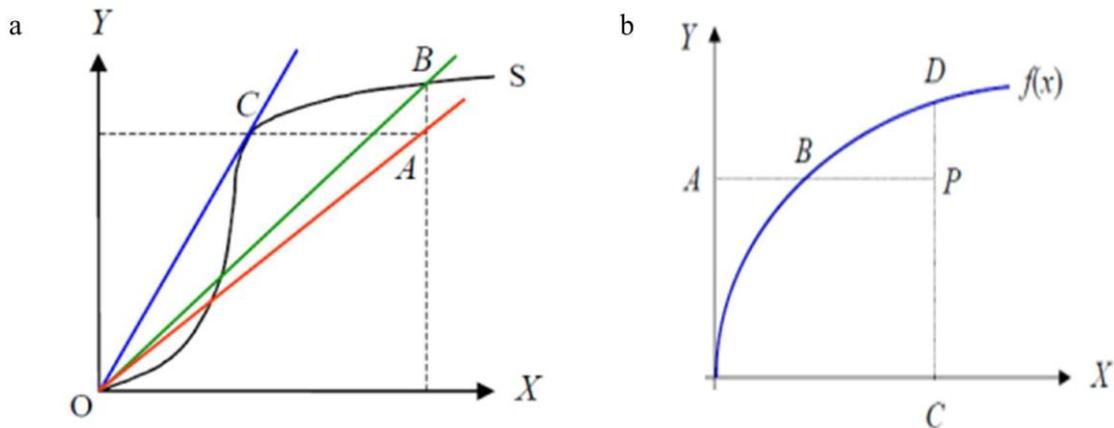


Figura 3.6 (a) – Curva de um processo de produção. (b) Alcance da fronteira de eficiência.

Fonte: Soares de Mello et al. (2005).

Para Soares de Mello et al. (2005) existem duas formas de uma DMU não eficiente se tornar eficiente. A primeira é denominada de orientação a *inputs*, na qual reduzem-se os recursos, mantendo-se constantes os produtos. A segunda forma é denominada de orientação a *outputs*, na qual se mantêm constantes os recursos, enquanto se aumenta a produção. Os autores exemplificam as orientações a *inputs* e *outputs* por meio da Figura 3.6 (b).

Considerando a DMU  $P$ , situada abaixo da fronteira de eficiência definida por  $f(x)$  (em azul), esta precisa se deslocar até  $B$ , reduzindo recursos para ser tornar eficiente (orientação a *inputs*), ou se deslocar até  $D$ , aumentando a produção e mantendo constante os recursos (orientação a *outputs*).

Cooper et al. (2007) chamam atenção para uma terceira orientação, que combina ambas as orientações apresentadas por Soares de Mello et al. (2005), que pode ser representada pelos modelos Aditivos (*Additive models*) ou baseados em folgas (*Slack Based Measure*). Estes modelos buscam estabelecer um acordo entre as duas perspectivas, em que ao mesmo tempo em que se busca reduzir insumos, busca-se aumentar os produtos (SANTOS et al. 2011).

Para Santos (2010), a DEA calcula a eficiência relativa de um conjunto de DMUs a partir da fronteira de eficiência obtida para este conjunto. Dessa forma, o que guiará a escolha do modelo matemático DEA mais apropriado se dá em função do formato da fronteira de eficiência e do retorno de escala considerado.

Existem dois modelos DEA que se destacam na literatura: os modelos DEA CCR e BCC (ANGULO-MEZA et al. 2007). O modelo DEA CCR é assim denominado em referência ao trabalho pioneiro de Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e admite retornos constantes de escala, por isso também é denominado de DEA CRS (*constant returns to scale*).

### 3.6.2 Modelo DEA com retornos constantes de escala (DEA CCR)

Para Soares de Mello et al. (2005), o modelo DEA CCR (CHARNES et al. 1978), é um modelo não paramétrico, que constrói uma superfície de eficiência linear, por partes, envolvendo os dados em análise. Este modelo trabalha com retornos constantes de escala, ou seja, uma variação nos valores de insumos (*inputs*) produzirá uma variação proporcional nos produtos (*outputs*).

Na DEA, a eficiência relativa de uma DMU é igual a razão da soma ponderada dos outputs e a soma ponderada dos inputs, sendo que os pesos de ambos são selecionados de forma a maximizar a eficiência da DMU, que está sendo analisada. Neste modelo, deve-se atender a restrição de que o conjunto de pesos para cada DMU deve ser também possível para todas as outras, de forma que as DMUs não apresentem eficiência superior a 1 (CHARNE et al. 1978).

Desta forma, os pesos para as variáveis de entrada e saída do modelo podem ser obtidos a partir da solução do modelo de Programação Fracionária, dado pelas Equações (3.19) - (3.22):

$$w_o = \max \frac{\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{i0}} \quad (3.19)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.20)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s. \quad (3.21)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.22)$$

sendo que  $w_o$  é a eficiência relativa da DMU que está sendo analisada, conhecida por  $DMU_0$ ;  $y_{r0}$  e  $x_{i0}$  são os dados de saídas e entradas para a  $DMU_0$ ;  $j$  o índice da DMU,  $j=1, \dots, n$ ;  $r$  é o índice das saídas, com  $r = 1, \dots, s$ ;  $i$  é o índice das entradas,  $i = 1, \dots, m$ ;  $y_{rj}$  é o valor da  $r$ -ésima

saída para a  $j$ -ésima DMU;  $x_{ij}$  é o valor da  $i$ -ésima entrada para a  $j$ -ésima DMU;  $u_r$  é o peso associado a  $r$ -ésima saída;  $v_i$  é o peso associado a  $i$ -ésima entrada.

Caso  $w_o$  seja igual a 1 ( $w_o=1$ ), a DMU 0 é considerada eficiente, quando comparada às demais unidades consideradas no modelo; se  $w_o$  for menor que 1 ( $w_o<1$ ), então esta DMU é considerada ineficiente (CHARNES et al. 1978). O modelo expresso pelas Equações (2.36) - (2.39) não é linear, podendo ter múltiplas soluções, porém, este pode ser linearizado gerando o modelo DEA CCR (CHARNES et al. 1978). Este modelo é conhecido como modelos dos multiplicadores com orientação ao *input*, dado pelas Equações (3.23) - (3.27).

$$\max w_o = \sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{r0} \quad (3.23)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (3.24)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad j=1,2,\dots,n \quad (3.25)$$

$$u_r \geq 0, \quad r=1,2,\dots,s \quad (3.26)$$

$$v_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m \quad (3.27)$$

Charnes et al. (1978) apresentam a formulação dual do problema de programação linear como o problema do envelope, este modelo é representado pelas Equações (3.28) - (3.31). Este modelo é conhecido como modelo do envelope com orientação ao *input*.

$$\text{Min } h_0 \quad (3.28)$$

Sujeito a:

$$h_0 x_{i0} - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.29)$$

$$- y_{r0} + \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq 0, r = 1, 2, \dots, s \quad (3.30)$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.31)$$

sendo  $h_0$  o coeficiente de utilização dos recursos, medida pela qual busca-se a eficiência igual a  $1/h$ ;  $\lambda_j$  a contribuição da  $DMU_j$  na formação do alvo da  $DMU_0$ , também chamado de coeficiente de importância relativa para a  $DMU_0$ , sendo o alvo definido como a coordenada de valores de *outputs* que as unidades ineficientes passariam a ter ao atingir a fronteira eficiente. Os demais índices são análogos aos índices do modelo descrito pelas equações (3.28) - (3.31). Para Soares de Mello et al. (2005), a função objetivo representa a eficiência, que é o valor que deve ser multiplicado por todos os *inputs*, de forma a obter valores que coloquem a  $DMU$  na fronteira eficiente, ou seja, provoca decréscimo no valor dos *inputs*. O primeiro conjunto de restrições garante que essa redução em cada um dos *inputs*, não ultrapasse a fronteira definida pelas  $DMUs$  eficientes. O segundo grupo de restrições garante que a redução nos *inputs* não altere o nível atual dos *outputs* da  $DMU$ . Enquanto, no modelo dos multiplicadores, os pesos são as variáveis de decisões, no modelo do envelope são  $h_0$  e  $\lambda_j$ 's.

### 3.7 Considerações finais

As seções anteriores descreveram os fundamentos teóricos que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Dessa forma, a partir das definições dos problemas de otimização multi-objetivo, principalmente no caso do Erro Quadrático Médio Multivariado, Análise de Componentes Principais, Interseção Normal a Fronteira e Análise Envoltória de Dados foram contextualizados frente ao desafio de determinar a combinação de pesos que garante a solução Pareto-ótima mais viável.

Para os métodos estatísticos baseados no Projeto e Análise de Experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta se mostram como técnicas importantes para a modelagem e análise das funções objetivo desenvolvidas para as múltiplas respostas, visto

que estas relações matemáticas não são conhecidas para a maioria dos processos industriais. A inserção dos algoritmos de otimização neste contexto ocorre na etapa de identificação das soluções ótimas para as respostas e para os pesos, após os mesmos serem modelados pelas técnicas estatísticas enumeradas e programados matematicamente segundo o EQMM e WEQMM.

## 4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 Método experimental

Para a realização da parte prática desta pesquisa, o presente trabalho utilizou-se da experimentação, uma vez que a otimização do objeto de estudo se baseou em funções objetivo determinadas a partir de dados coletados por experimentos. A estratégia adotada foi desenvolvida através de um método experimental que combinou a Metodologia de Superfície de Resposta, Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), Método Interseção Normal a Fronteira (NBI), Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise Envoltória de Dados (DEA). Os experimentos desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Usinagem do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro em Aveiro-Portugal.

Este capítulo descreve as condições em que os ensaios foram realizados, a máquina-ferramenta, as ferramentas, os porta-ferramentas e sistema de fixação, a geometria do corpo-de-prova, as características do material usinado, o método de análise do desgaste das ferramentas e rugosidade da peça, temperatura de corte, vibração, bem como o desenvolvimento do planejamento experimental.

### 4.2 Planejamento dos experimentos

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

As variáveis de controle adotadas para esse procedimento foram velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ). Essas variáveis são reconhecidamente as mais importantes, uma vez que influenciam fortemente o processo de torneamento, principalmente o acabamento superficial da peça e o desgaste da ferramenta.

O sequenciamento dos experimentos foi planejado seguindo de um arranjo composto central (CCD), criado para três parâmetros em dois níveis ( $2^k = 2^3 = 8$ ), seis pontos axiais ( $2k = 6$ ) e cinco pontos centrais ( $cp = 5$ ), o que resultou em 19 experimentos. Para a especificação dos níveis dos parâmetros, levou-se em consideração a análise das pesquisas anteriores relacionadas a este processo (Quadro 2.3), informações de catálogo de ferramentas (Sandvik) e a realização de testes preliminares. Assim, após a análise da literatura, os limites de cada

variável foram pré-fixados e testes preliminares foram realizados para verificar o comportamento do processo nas condições extremas. Ao final dos testes, os níveis dos parâmetros foram fixados, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Variáveis de controle e níveis de trabalho.

Variáveis de Controle	Símbolo	Níveis de trabalho				
		-1.682	-1	0	1	1.682
Velocidade de Corte (m/min)	Vc	57,39	100	150	225	267,61
Avanço de Corte (mm/v)	f	0,06	0,10	0,15	0,225	0,27
Profundidade de usinagem (mm)	ap	0,09	0,15	0,225	0,33	0,39

As respostas analisadas incluíram o custo total de usinagem ( $K_p$ ), tempo total de usinagem ( $T_t$ ), tempo de corte ( $T_c$ ), vida da ferramenta ( $T$ ), temperatura de corte ( $T_p^\circ$ ), ruído do processo (RD), taxa de volume de cavaco removido (MRR), força de usinagem ( $F_r$ ), rugosidades ( $R_a$ ,  $R_t$ ) e energia específica de corte (EEC).

### 4.3 Procedimento experimental

#### 4.3.1 Máquina-ferramenta

Devido à constante evolução dos materiais para ferramentas, também caracterizadas pela elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, aliados ao surgimento de máquinas ferramentas mais rígidas e precisas é possível obter nestes novos processos de torneamento (desbaste) peças com qualidade semelhante às obtidas no processo de retificação (acabamento), com rugosidades da ordem de 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$ , utilizou-se para isto, um torno CNC de alta precisão, parâmetros otimizados de corte e geometrias especiais de ferramentas.

Os experimentos foram realizados em um Centro de Torneamento MHP Kingsbury, na Universidade de Aveiro, cujos detalhes do aponto experimental são mostrados na Figura 4.1. Os principais dados da máquina-ferramenta são: motor do eixo-árvore com 18 kW de potência, faixa de rotação entre 4 e 4500 rpm, torre porta-ferramentas com 12 posições, diâmetro da placa de 200 mm. A placa possui acionamento hidráulico com pressão máxima de 23 kgf/cm<sup>2</sup>, suporte de ferramentas externo seção 20 x 20 mm e comando numérico GE Fanuc, um contraponto com diâmetro de 70 mm também ativado por ação hidráulica. Os cursos nos eixos X e Z são respectivamente 200 mm e 550 mm.

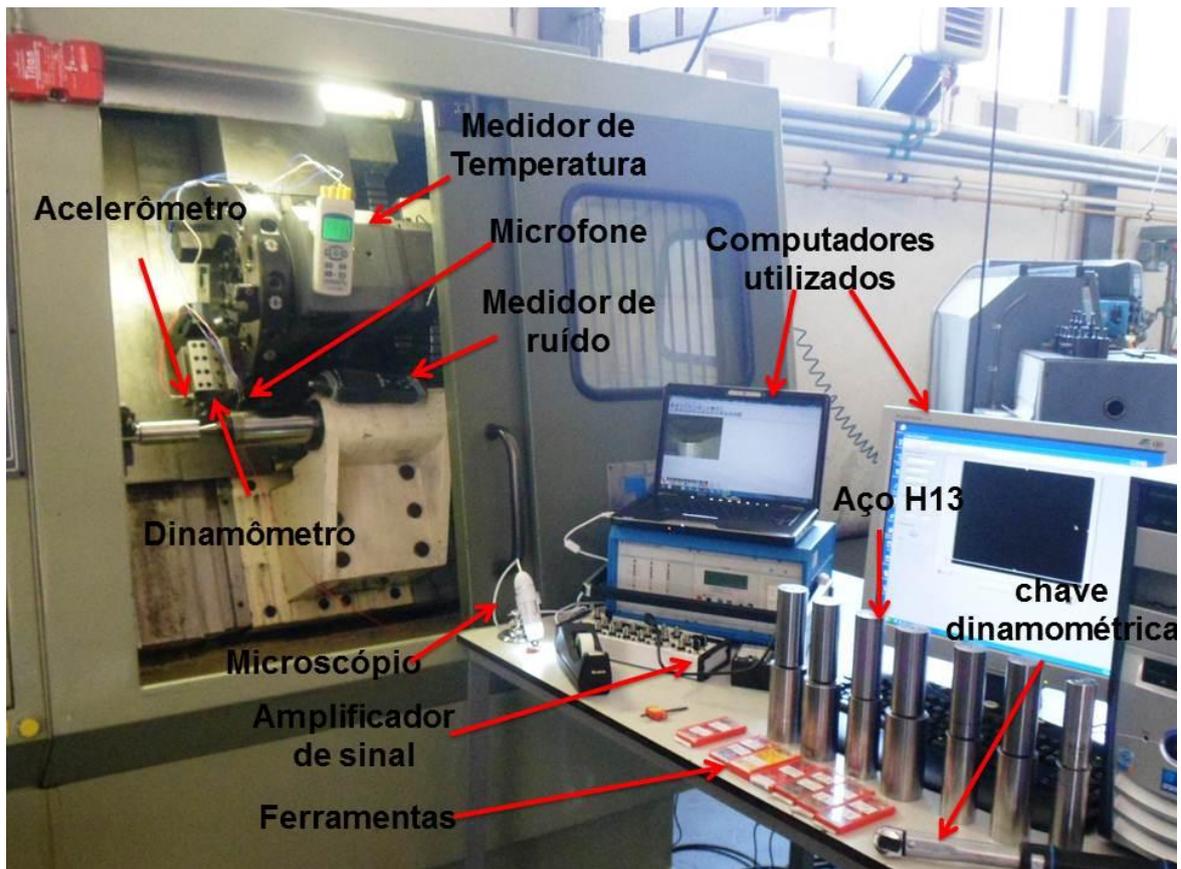


Figura 4.1 – Torno CNC “MHP Kingsbury” e aparelhos utilizados nos ensaios.

#### 4.3.2 Ferramentas, porta-ferramentas e sistemas de fixação

Os ensaios foram realizados com ferramentas e porta-ferramentas fornecidos pela empresa Sandvik Coromant. Foram utilizadas ferramentas cerâmicas e de PCBN:

Quadro 4.1 – Ferramentas utilizadas nos experimentos.

	Insertos Sandvik Coromant	
Cerâmicos	Geometria ISO	Composição
CC6050	CNGA120408 S01525	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Tic/TiN com cobertura TiN
CC 6050 ( <i>Wiper</i> )	CNGA120408 S01525WH	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Tic/TiN com cobertura TiN
CC 650	CNGA120408 T01020	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Ti [22,5% C, 7,5% N]
CC 650 ( <i>Wiper</i> )	CNGA120408 T01020WG	70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Ti [22,5% C, 7,5% N]
CC 670	CNGN 120408 T01020	80% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 20% SiC <sub>w</sub>
<b>PCBN</b>	<b>Norma ISO</b>	<b>Composição</b>
CB 7025	CNGA 120408 S01030A	CBN com cobertura TiC
CB 7025 ( <i>Wiper</i> )	CNGA 120408 S01030 AWG	CBN com cobertura TiC

É mostrado na Figura 4.2 todas as ferramentas utilizadas nos experimentos com aço endurecido ABNT H13.



Figura 4.2 – Ferramentas utilizadas nos experimentos: CC6050, CC6050 WH, CC650 WG, CC650, PCBN7025, PCBN7025WG, CC 670.

A seleção de um porta-ferramentas está ligado à seleção da pastilha. Essa escolha é influenciada pelas direções de avanço, tamanho dos cortes, peça e acessibilidade exigida na máquina. Os tipos de porta-ferramentas são definidos pelo ângulo de posição, formato e tamanho da pastilha a utilizar.

Para garantir estabilidade durante o torneamento, deve ser escolhido o maior tamanho possível de porta-ferramenta apropriado para a aplicação. Isso permite a proporção ferramenta-balanço mais vantajosa e a base mais rígida para a ferramenta. Na Figura 4.3 é mostrado o sistema de fixação do porta-ferramenta utilizado nos experimentos.

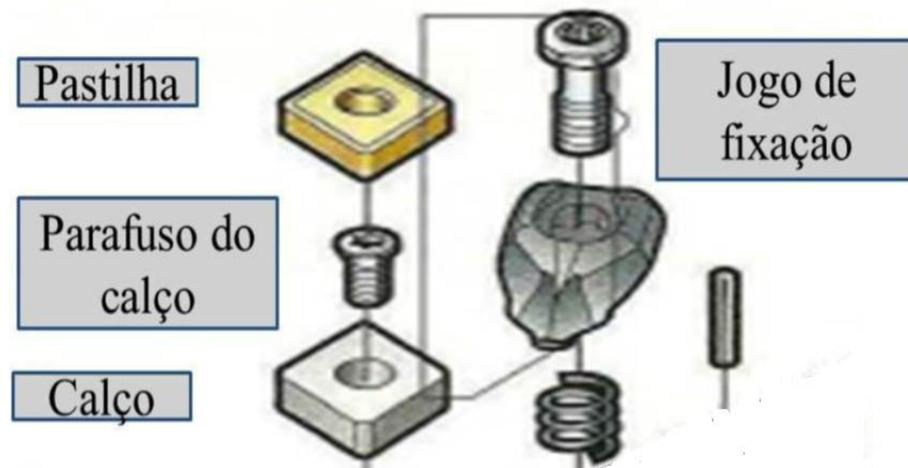


Figura 4.3 – Sistema de fixação utilizado nos experimentos.

Estas ferramentas foram montadas em um suporte de torneamento externo (código ISO DCLNL – 2020K – 12). Com o objetivo de promover elevada rigidez da fixação, o inserto foi fixado no suporte através de grampo e pino, conforme mostrado na Figura 4.4.

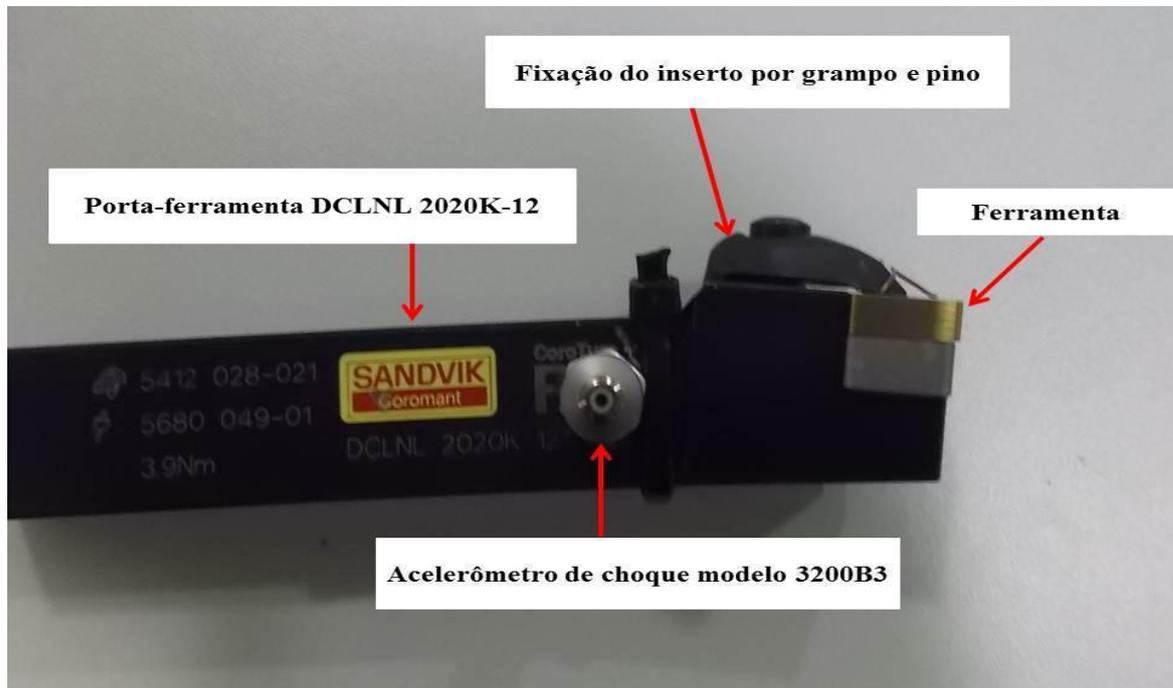


Figura 4.4 – Porta-ferramenta utilizado nos experimentos.

A decisão de utilizar ferramentas cerâmicas e de PCBN neste trabalho foi baseada nas informações descritas nos itens anteriores, nos quais diversos autores demonstraram o desempenho superior das ferramentas de PCBN em relação às ferramentas cerâmicas, principalmente em materiais com alta fração volumétrica de carbonetos na microestrutura.

Por outro lado, a decisão de utilizar diferentes classes de ferramentas cerâmicas e de PCBN está baseada nos estudos realizados por Diniz e Oliveira (2008) na usinagem do aço AISI 4340, por Chou et al. (2002) na usinagem do aço AISI 52100, e por Chou e Evans (1999) na usinagem do aço AISI M50. Essa abordagem está relacionada ao comportamento distinto das classes de ferramentas cerâmicas e de PCBN, na usinagem de diferentes ligas de aços endurecidos, principalmente do ponto de vista dos mecanismos de desgaste.

Com o objetivo de elevar a rigidez e a estabilidade dinâmica do sistema de fixação do corpo de prova, imprescindível na usinagem de materiais endurecidos, foram utilizadas castanhas que permitiram uma grande área de contato entre sistema de fixação (castanha) e corpo de prova. Estas castanhas permitem o dobro da área de contato com a peça quando comparada às castanhas convencionais, e conseqüentemente, aumentam a rigidez do sistema de fixação através do sistema de aperto (bucha e contraponto), como se observa na Figura 4.5.

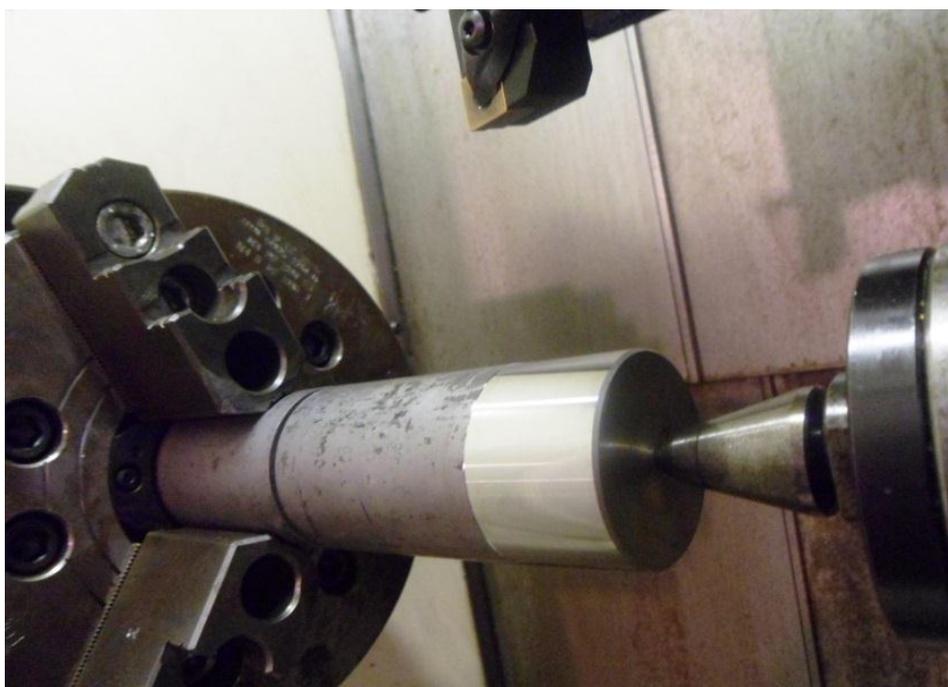


Figura 4.5 – Sistema de fixação do corpo-de-prova.

Durante os experimentos, o corpo de prova era retirado da máquina para executar as medições da rugosidade. Com o objetivo de minimizar as fontes de variabilidade no reposicionamento na castanha, o batimento radial do corpo de prova era analisado com um relógio apalpador da marca Mitutoyo – modelo 513-404E com resolução de 0,01

mm, montado em um suporte magnético com coluna articulada da marca Mitutoyo modelo7019B.

### 4.3.3 Geometria do corpo de prova

Foram utilizadas geometrias de corpos-de-prova que proporcionam condições de corte contínuo. O corte contínuo é a característica de torneamento mais comum, pois as ferramentas de cerâmicas e de PCBN, extremamente frágeis aos impactos, podem sofrer quebras ou microlascamentos das arestas de corte (OLIVEIRA et al., 2009; TRENT e WRIGHT, 2000).

A adoção da geometria do corpo de prova, mostrada na Figura 4.6, possibilita elevada rigidez aos experimentos, pois, conforme mostrado no sistema de fixação da Figura 3.5, o comprimento em balanço do corpo-de-prova se torna pequeno. Essa rigidez do sistema de fixação evita que o fenômeno das vibrações promova irregularidade dimensional, avarias nas arestas de corte e ainda imperfeições na superfície usinada.

Com o objetivo de minimizar os choques na entrada e saída da ferramenta, foram confeccionados chanfros no diâmetro externo do corpo de prova (dimensão de  $1 \times 45^\circ$ ).

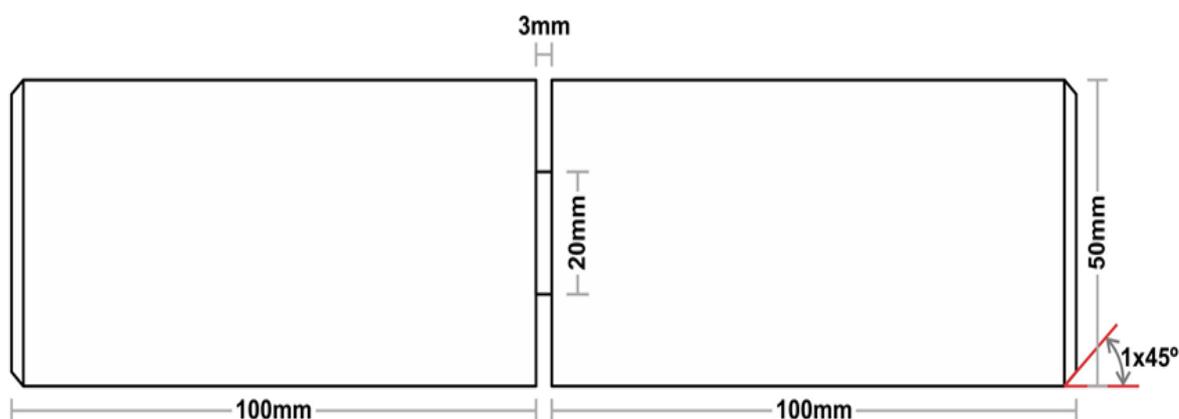


Figura 4.6 – Desenho da geometria do corpo de prova.

### 4.3.4 Caracterização do material usinado

Tendo em consideração o âmbito deste trabalho, o material ensaiado foi o aço denominado ABNT H13. São utilizados para a fabricação de matrizes para fundição sob pressão, moldes, extrusão a quente e forjamento a quente. Possuem cromo, molibdênio ou tungstênio como elemento de liga principal. Esses aços possuem uma boa resistência ao amolecimento pelo calor devido ao seu médio teor de cromo e a adição de elementos de liga

como molibdênio, tungstênio e vanádio que são formadores de carbonetos de maior dureza e estabilidade térmica (OLIVEIRA et al., 2009).

O aço classificado como ABNT H13 possui composição química descrita na Tabela 4.2 de acordo com as especificações da *North American Die Casting Association*, NADCA, o que lhe confere propriedades de: boa temperabilidade, grande resistência ao amolecimento pelo calor, boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, excelente resistência a fadiga térmica, ou seja, resistência a choques térmicos devidos a aquecimentos e resfriamentos contínuos, fazendo com que o surgimento de trincas térmicas seja reduzido.

Tabela 4.2 – Composição Química em porcentagem de peso do Aço ABNT H13.

Elemento	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
% em peso	0,37 - 0,42	0,20 - 0,50	0,80 - 1,20	5,00 - 5,50	0,80 - 1,20	1,20 - 1,75

A forma comercial utilizada nos ensaios corresponde à peça de 53 mm de diâmetro, obtido pelo processo de laminação, fornecido no seu estado recozido com uma dureza aproximada de 230 HB. Posteriormente, foi seccionado e usinado de forma a promover condições para a realização dos ensaios.

Conforme se observa na Figura 4.6, os corpos de provas permitiram a realização de torneamento cilíndrico exterior com comprimento de 100 mm. Após a preparação dos corpos de provas, estes foram submetidos a tratamento térmico de têmpera e revenido. A Figura 4.7 apresenta o ciclo de tratamento térmico de endurecimento por meio da têmpera e revenido, aplicado em atmosfera controlada ao aço ABNT H13. A têmpera foi realizada em banhos de sais fundidos com a utilização de vácuo em duas etapas: na primeira etapa foi efetuado um pré-aquecimento a 700 °C e, em seguida, a temperatura foi elevada até atingir a austenização (1040 °C), mantida durante trinta minutos. A segunda etapa consistiu no arrefecimento em imersão em óleo. Após efetuada a têmpera, foi realizado o revenido para a estabilização estrutural, em que os corpos de prova foram aquecidos lenta e uniformemente até se atingir a temperatura de revenido (510 °C), mantida durante duas horas. Posteriormente, foi efetuado o arrefecimento ao ar. De acordo com o relatório apresentado pela empresa executora, o aço ABNT H13 apresenta, após tratamento, uma dureza na ordem dos 54 HRC verificada posteriormente por meio de ensaios de dureza.

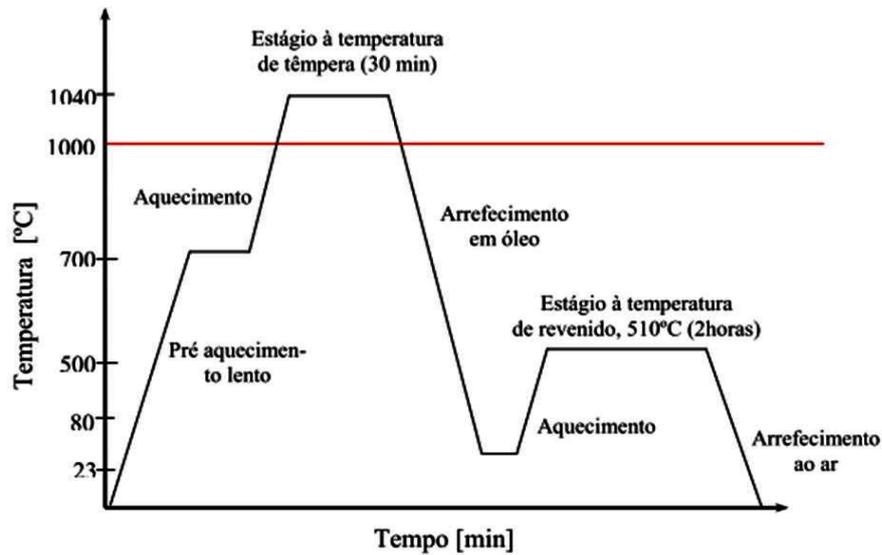


Figura 4.7 – Ciclo de tratamento térmico típico da têmpera e revenido do aço ABNT H13.

### 4.3.5 Medição das Rugosidades

A caracterização das superfícies torneadas foi efetuada através da técnica mais comum de análise da microgeometria das superfícies, denominada por rugosimetria. As superfícies torneadas foram caracterizadas utilizando parâmetros de amplitude, tendo sido escolhidas como parâmetros as rugosidades ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ,  $R_y$ ,  $R_q$ ). Os valores dos parâmetros de rugosidade de acordo com a norma ISO 4287/1 foram obtidos através do rugosímetro de agulha Hommeltester-T 1000, conforme se observa na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Posicionamento do rugosímetro para as medições.

Whitehouse (2003) descreve que a avaliação da rugosidade em uma superfície pode ser realizada por meio de diversos parâmetros. No entanto, para a avaliação de superfícies torneadas, Rech e Moisan (2003) e Thiele e Melkote (1999) sugerem utilizar um parâmetro de rugosidade que represente a amplitude média do perfil da rugosidade (Ra) em conjunto com um parâmetro que detecte características isoladas da superfície usinada, como o Rz. A avaliação da superfície usinada foi realizada por meio dos parâmetros Ra e Rz.

Em cada corpo de prova (leia-se superfície torneada) foram efetuadas três medidas ao longo da superfície, sendo considerado o valor final de cada parâmetro (Ra, Rt, Rz, Ry, Rq) a média das respectivas medidas.

#### 4.3.6 Medição da Dureza do Material

A avaliação da dureza do aço endurecido ABNT H13 foi efetuada recorrendo a um durômetro Ernst NR3, como se observa na Figura 4.9. Foi escolhido aleatoriamente um corpo de prova, após os ensaios, no qual foi seccionado na zona de aperto a 15 mm da extremidade. Posteriormente, foram efetuadas cinco indentações na face com uma distância entre centros adjacentes de 5 mm. Os corpos de prova apresentaram um valor médio de dureza de 54 HRC usando o procedimento da norma NP141:1990, na zona usinada.

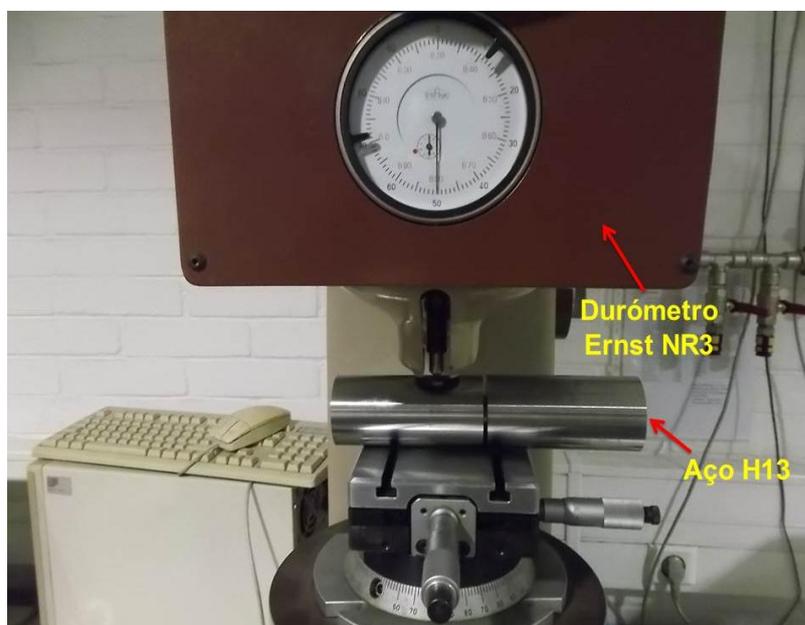


Figura 4.9 – Durômetro Ernst NR3 utilizado nos ensaios de dureza.

### 4.3.7 Medição das Forças de Corte

A medição e a aquisição das forças de corte geradas no processo de torneamento, nomeadamente a força de avanço ( $F_a$ ), a força de corte ( $F_c$ ) e a força de profundidade ( $F_p$ ), foram efetuadas através do dinamômetro piezoelétrico Kistler 9121, amplificador de carga Kistler 5019 e do seu respectivo sistema de aquisição de dados “Dynoware Software Data Acquisition”, conforme se observa na Figura 4.10. A taxa de aquisição de dados foi de 20 Hz com um tempo de medição variável, sendo este tempo função dos parâmetros processuais utilizados durante o ensaio, já que o comprimento de corte em cada passagem era fixo.

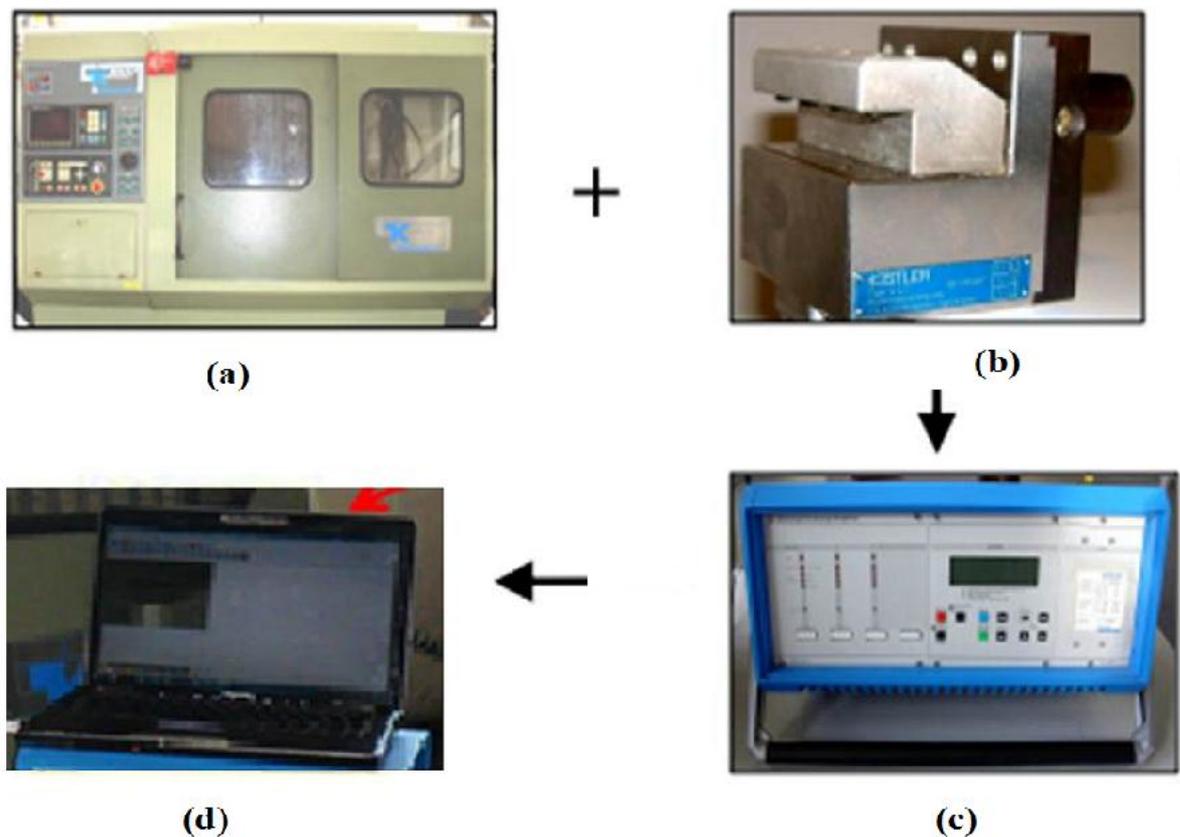


Figura 4.10 – Equipamento utilizado na medição das forças de corte. (a) Torno CNC “MHP Kingsbury”; (b) Dinamômetro piezoelétrico Kistler 9121; (c) Amplificador de carga Kistler 5019 e (d) Software “*Dynoware Software Data Acquisition*”.

No Quadro 4.2 apresentam-se os parâmetros de calibração (dinamômetro piezoelétrico e amplificador de carga) usados no torneamento de aços endurecidos.

Quadro 4.2 – Parâmetros de calibração *Kistler* usados no torneamento de aços endurecidos.

Força	Sensibilidade do Transdutor [pC/N]	Gama de calibração [kN]	Linearidade [% FSO]	Filtro (Low Pass) [Hz]	Constante de Tempo
<b>Avanço</b>	-7,93	0....3	0,3	100	Long
<b>Corte</b>	-3,87	0....6	0,3	100	Long
<b>Profundidade</b>	-7,81	0....3	0,3	100	Long

A aquisição de dados foi efetuada, em tempo real, através do dinamômetro com interface RS232 para a carga amplificadora que por sua vez conectado ao PC, utilizando o *software Dynoware Kistler*, sendo aquisitados os dados em formato Excel, para posterior tratamento. O porta ferramentas foi colocado e posicionado a 38 mm da face do dinamômetro piezoelétrico através de quatro parafusos de acordo com o manual *Kistler*, Figura 4.11. O aperto dos parafusos foi efetuado através de uma chave dinamométrica aplicando uma carga de 10N.



Figura 4.11 – Colocação do porta ferramenta no dinamômetro piezoelétrico.

#### 4.3.8 Medição das Vibrações

A utilização do equipamento como o acelerômetro (Figura 4.12), Modelo 3200B3, *Dytran Instruments*, teve como objetivo estudar os problemas existentes nas superfícies usinadas, dado que com o monitoramento e a aquisição das vibrações existentes poder-se-á analisar e solucionar problemas resultante da falta desta informação.

A aquisição foi realizada usando um acelerômetro de choque da Dytran® modelo 3200B e um Condicionador de sinal Dytran® modelo 4102C. Para realizar a interface com computador, foi usado bloco de conexões da National Instrument® modelo BNC-2120 e uma

placa I/O da National Instrument® modelo PCI 643. Para fazer a aquisição, foi utilizado o software LabVIEW®. Para determinar a taxa de aquisição, foi considerada a maior rotação que poderia ser utilizada, 3000 rpm's, e aplicado o Teorema de Nyquist, que afirma que deve ser aplicada uma taxa pelo menos 10 vezes maior. Assim, utilizou-se uma taxa de aquisição de 1 kHz. Para a qualificação do sinal (retirado do ruído) foi aplicada a transformada de Wavelet, usando o software MATLAB, com o mesmo nível em todas as aquisições.

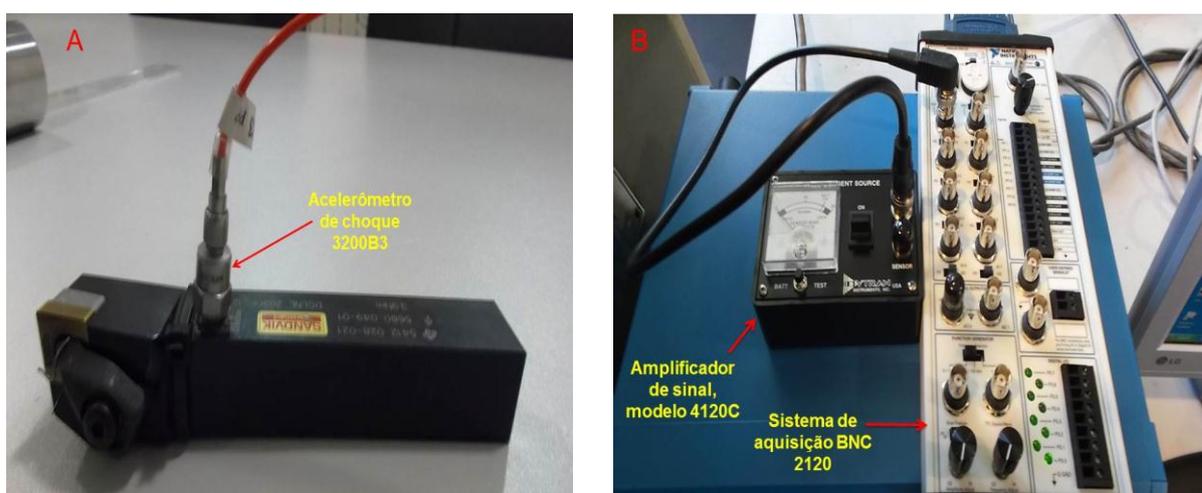


Figura 4.12 – Acelerômetro de choque 3200B3 (A), amplificador modelo 4120C (B) escolhido para aquisição das vibrações nas operações de usinagem.

#### 4.3.9 Medição e Caracterização do Desgaste das Ferramentas

A metodologia adotada na quantificação do desgaste é descrita em seguida. A ferramenta de corte foi posicionada num suporte metálico (Figura 4.13 - C). Efetuou-se o posicionamento inicial no vértice (aresta ou raio de ponta) da ferramenta de corte através do carro micrométrico. Movendo o mesmo carro no sentido positivo/negativo para a zona limite de desgaste (posição final) foi efetuada a medição do desgaste em milímetros através de um micrômetro digital. A caracterização da vida e dos mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte cerâmicas foi realizada por intermédio de microscopia eletrônica de varredura (SEM - *Scanning Electron Microscopy*) e por um microscópio digital manual (Figura 4.13 - A).

Foi utilizado o microscópio Hitachi S-4100 Field Emission com resolução de 15 Å e ampliação 20-300.000X, instalado no Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro. O SEM permite efetuar o varrimento da superfície da amostra através de um feixe eletrônico finamente focado. O brilho em cada ponto da imagem obtida é modulado num monitor de visualização pelo sinal emitido pela amostra.

A avaliação do desgaste das ferramentas de corte (pastilhas) foi efetuada através do Microscópio Óptico Mitutoyo TM – 500, com uma ampliação de 30X e uma resolução de 1  $\mu\text{m}$ , conforme se observa na Figura 4.13 - B). Atendendo ao valor da profundidade utilizada, o parâmetro de medição do desgaste escolhido foi o VB (de acordo com a norma ISO 3685).

No final de cada passagem, o desgaste foi medido sobre a superfície de folga (VB), da ferramenta de corte em questão. Valor admissível estabelecido, de acordo com a norma ISO 3685, até a substituição da ferramenta de corte, foi  $\text{VB} = 0,30 \text{ mm}$ .

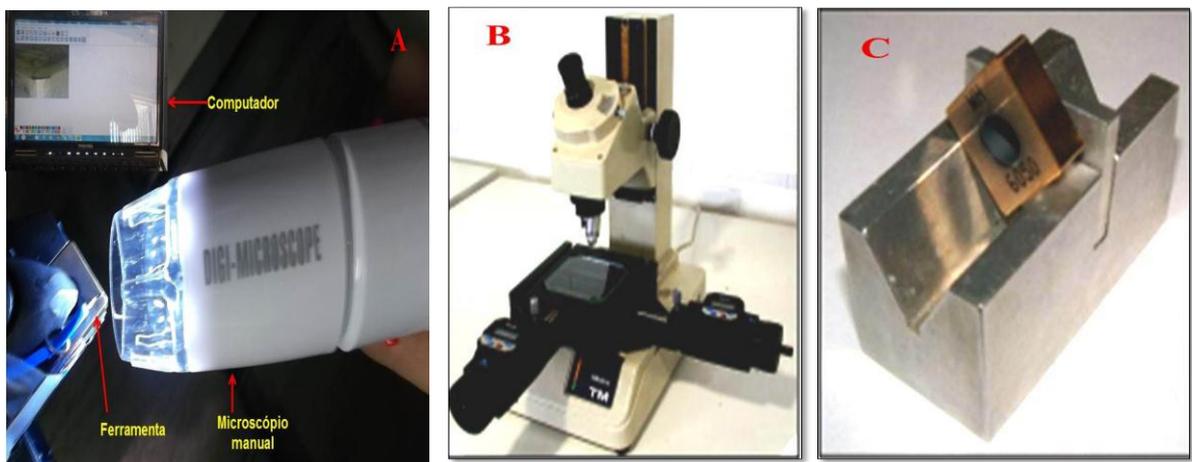


Figura 4.13 – Microscópio manual (A), Microscópio óptico Mitutoyo TM – 500 com carro micrométrico (B) e Suporte metálico (C).

É observado na Figura 4.14, o desgaste na superfície de folga e desgaste de cratera na superfície de folga, não são regulares ao longo de todo o comprimento. Na superfície de folga, verifica-se que o desgaste é geralmente maior nas extremidades da zona de corte b. O desgaste junto ao raio de ponta (zona C) tende a ser mais severo que na região central devido ao fluxo de material nesta zona. Na extremidade oposta (zona N), formam-se geralmente entalhes (VN) devido ao material usinado ter tendência a endurecer mais que nas zonas B e C. O desgaste na região central da superfície de saída (zona B) é aproximadamente uniforme, no entanto para acautelar as possíveis variações que possam existir é determinado através do desgaste médio (VB) ou do desgaste máximo ( $\text{Vb}_{\text{max}}$ ), ambos determinados sobre a superfície de folga. Na superfície de saída é determinado através da profundidade máxima da cratera de desgaste (KT) e pelas distâncias KB e KM (Boothroyd & Knight (b) 1989).

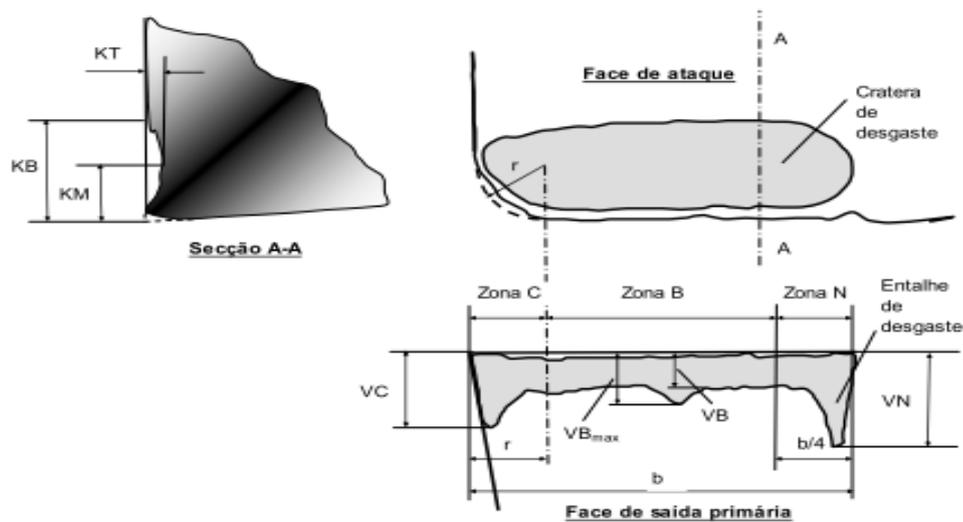


Figura 4.14 – Formas de desgaste típicas das ferramentas segundo ISO 3685.

Fonte: Boothroyd & Knight (a) (1989).

### 4.3.10 Medição da Temperatura

#### 4.3.10.1 Termopar ferramenta

A fim de avaliar as temperaturas resultantes nas zonas de corte, foram desenvolvidas várias técnicas ao longo dos últimos 70 anos. A maior parte dessas técnicas é usada para medir a temperatura da ferramenta de corte. Um gradiente de temperatura existe ao longo do contato da ferramenta com o termopar (BYRNE, 1987).

Essa técnica experimental considera o efeito termopar na interface da ferramenta. O termopar utilizado nos experimentos são formados por fios de Platina com 13% de Ródio, como termoelemento positivo, e Platina pura, como termoelemento negativo. É adequado para medição contínua desde 0 °C até 1480 °C, e até 1760 °C por curtos períodos. A variação de temperatura, que é devida ao calor gerado na região de contato entre esses dois materiais durante o processo de usinagem, é então obtida por meio da conversão do sinal elétrico medido.

A técnica, apesar de simples, possui uma série de particularidades que devem ser levadas em conta durante sua utilização e montagem. Dentre elas, podemos citar:

- O termopar foi fixado no porta ferramenta possibilitando o contato direto com a ferramenta.
- O termopar deve ser sempre formado por materiais condutores de eletricidade;
- A temperatura medida sempre representa uma média das temperaturas que ocorrem na região de corte;

- O contato do termopar com o cavaco não é estável.

A aplicação dessa metodologia para a obtenção da temperatura na ferramenta de corte no processo de torneamento pode ser encontrada nos trabalhos de ARNDT e BROWN (1966), STEPHENSON (1991), STEPHENSON e ALI (1992), STEPHENSON et al. (1993), LESHOCK e SHIN (1997)).

Na Figura. 4.15 apresenta-se um esquema do aparato experimental do método do termopar ferramenta.



Figura. 4.15 – Esquema do aparato experimental termopar ferramenta.

#### **4.3.11 Considerações finais**

Para uma devida otimização do processo de usinagem, a especificação do planejamento experimental utilizado é visto como algo fundamental para que o problema de pesquisa seja estruturado de maneira organizada. Sendo assim, com a descrição do método experimental, caracterizou-se um processo com múltiplas variáveis de entrada (multivariado) e múltiplas respostas (multi-objetivo), definindo a aplicação prática em um contexto condizente ao deste trabalho. Em relação ao método experimental, foi importante para a obtenção de dados experimentais confiáveis e para a organização do processo de análise das informações coletadas. Com isso, foram apresentados os procedimentos empregados para o planejamento e execução dos experimentos de usinagem e também para o registro das respostas, que, juntos, compuseram a primeira fase do método experimental, caracterizada pela MSR.

Para obtenção das soluções apresentadas nos capítulos posteriores, serão empregados os softwares Minitab 16, para tratamento e análise estatísticos dos dados, Microsoft Excel, para a construção das planilhas de otimização e MS Solver®, para a efetiva otimização dos dados, utilizando o algoritmo GRG.

## 5 METODOLOGIA DEA - OTS

O objetivo principal desta tese é desenvolver uma metodologia de otimização para a seleção de ferramentas de corte para o processo de torneamento do aço endurecido ABNT H13 baseada na comparação das opções disponíveis de ferramentas nas condições ótimas de operação. Estas condições limites não são, via de regra, conhecidas *à priori*, o que dificulta as comparações entre as ferramentas em um mesmo nível de referência. Portanto, faz-se necessário estudar o comportamento das ferramentas disponíveis a partir de uma experimentação planejada. Neste ponto, faz-se necessário o bom conhecimento das variáveis de processo envolvidas e os fenômenos físicos associados. Nisto consiste a primeira fase da metodologia proposta: o estudo de parâmetros e níveis do processo de usinagem do aço ABNT H13 conduzido por arranjos experimentais para cada opção tecnológica disponível.

Após a modelagem das características críticas de desempenho de cada opção – aqui definidas *inputs* (minimização) por custo total de usinagem ( $K_p$ ), rugosidade ( $R_a$ ), ruído do processo ( $RD$ ), força de usinagem ( $Fr$ ), e definidas como *outputs* (maximização) vida da ferramenta ( $T$ ) e energia específica de corte ( $EEC$ ) – encontram-se as unidades de tomada de decisão ( $DMU$ 's – do inglês, *Decision Making Units*) por meio da otimização multiobjetivo das superfícies de respostas usadas para o estudo do comportamento de cada ferramenta. A segunda fase da metodologia então consistirá na obtenção das  $DMU$ 's a partir da otimização das superfícies de resposta por critérios multiobjetivos.

Uma vez que as condições ótimas de processo para cada ferramenta candidata sejam estabelecidas, faz-se a comparação entre as mesmas relativizando suas eficiências pelo critério da Análise Envoltória de Dados (DEA). Este algoritmo de programação linear permite que as eficiências das  $DMU$ 's sejam comparadas, permitindo a construção de uma fronteira eficiente entre elas.

O modelo DEA mais comum é o CCR, que pode ser orientado no sentido das variáveis de entrada (*Inputs*) ou de saída (*Outputs*). Supondo que *Inputs* e *Outputs* possam ser ponderados, respectivamente, por pesos iguais a  $u$  e  $v$ , então a eficiência poderá ser calculada como a razão entre Saídas ponderadas e Entradas ponderadas. Este é o método conhecido como CCR-O, ou, “CCR orientado a *Outputs*”. Isto acontece porque uma das maneiras de maximizar a eficiência é aumentando os produtos (Saídas/*Outputs*). De maneira análoga, pode obter uma eficiência maior das  $DMU$ 's minimizando os recursos necessários (*Inputs*). Neste caso, o modelo DEA é chamado de CCR-I, ou “CCR orientado a *Inputs*”. Este modelo pode

ser apresentado de forma esquemática como mostrado na Figura 5.1, tendo como fatores controláveis,  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  e como fatores de ruído, desgaste da ferramenta e dureza do material os quais não serão considerados neste trabalho.

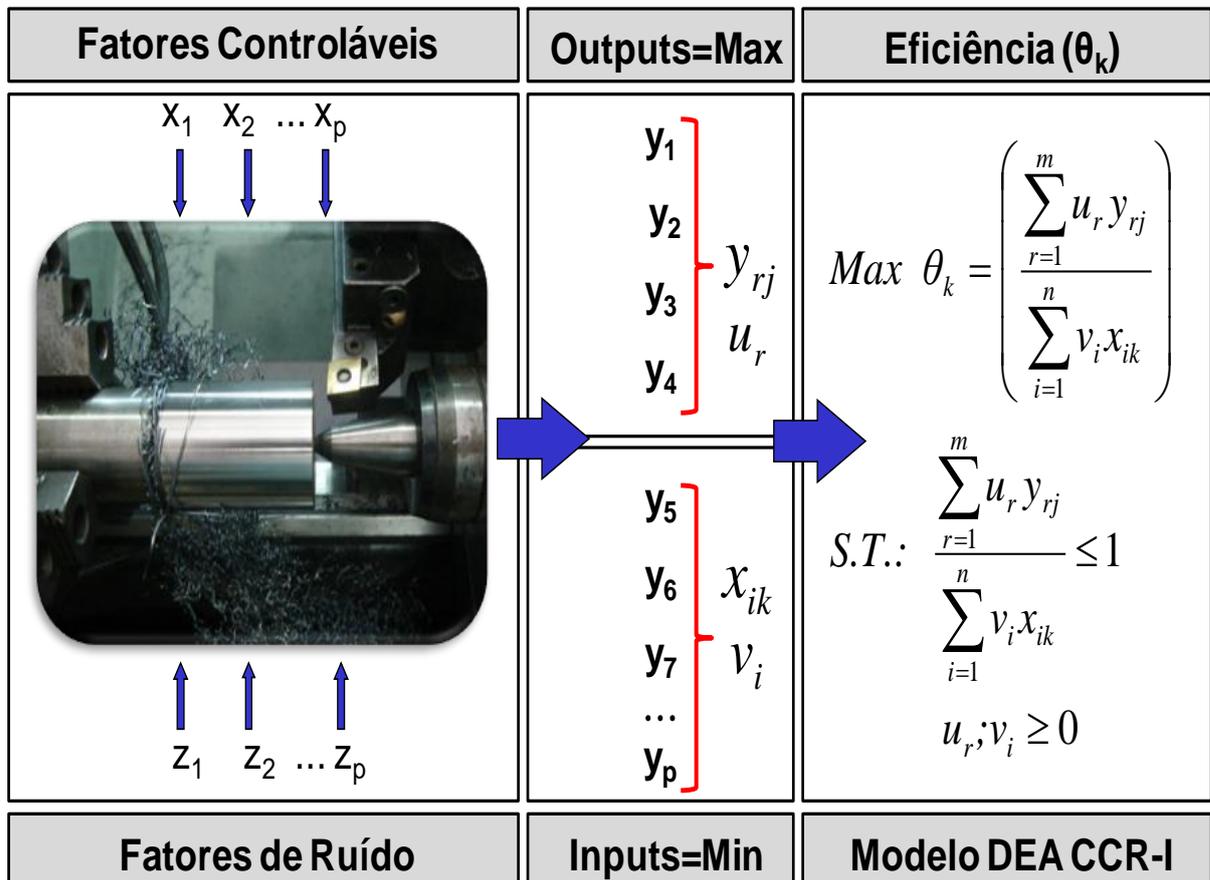


Figura 5.1 – Modelo DEA CCR-I aplicado ao processo de torneamento.

Com base nos argumentos expostos anteriormente, a metodologia DEA-OTS pode ser conduzida seguindo-se as etapas de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 5.2.

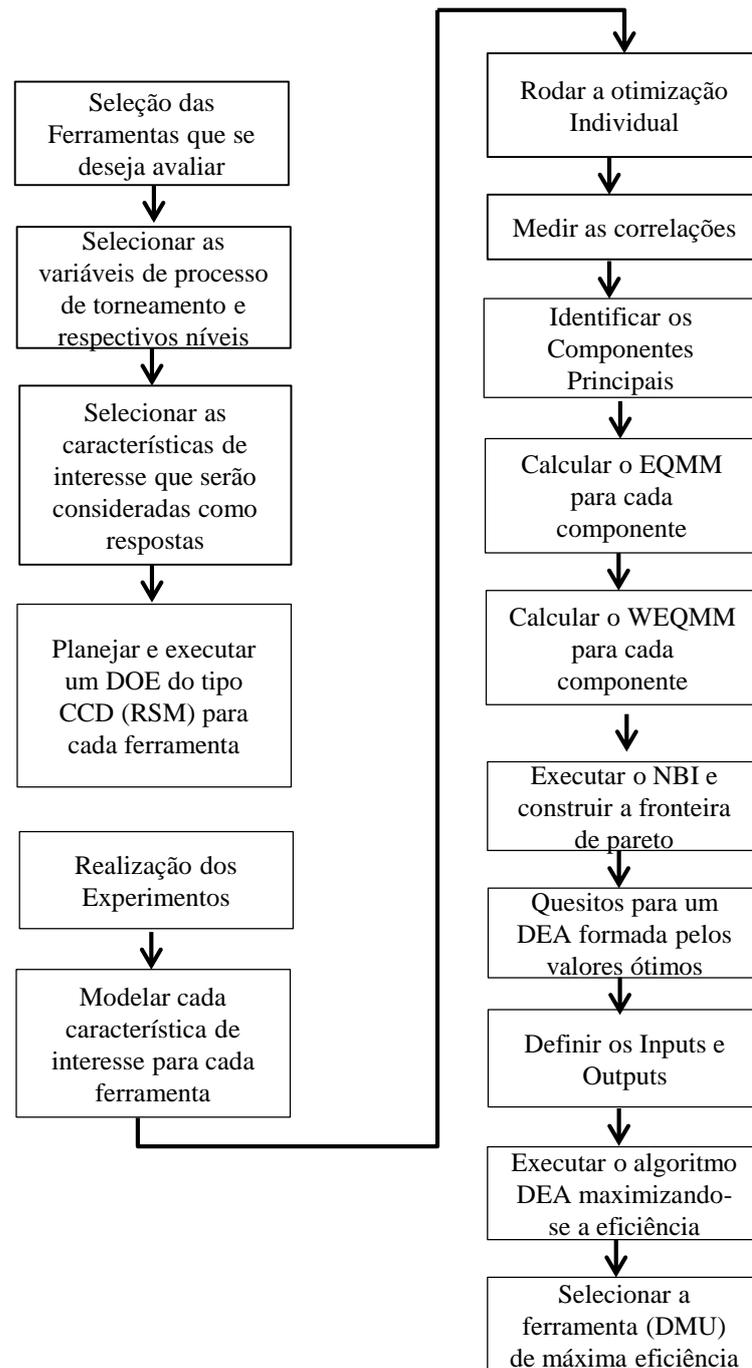


Figura 5.2 – Fluxo da metodologia DEA-OTS.

### 5.1 Selecionar as Ferramentas que se deseja avaliar

A seleção das ferramentas utilizadas neste trabalho foi realizada após uma cuidadosa revisão da literatura. Foram escolhidas 5 (cinco) ferramentas cerâmicas e 2 (duas) ferramentas PCBN. Estas ferramentas são apresentadas no Quadro 4.1.

## 5.2 Selecionar as variáveis de controle e definir seus níveis

As variáveis de controle adotadas para esse procedimento de acordo com a Tabela 4.1 foram velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ). Essas variáveis são reconhecidamente as mais importantes, uma vez que influenciam fortemente o processo de torneamento, principalmente o acabamento superficial da peça e o desgaste da ferramenta. Os valores adotados para os parâmetros foram: velocidade de corte (100 - 225 m/min), avanço (0,10 - 0,225 mm/rev) e profundidade de usinagem (0,15 - 0,33 mm). Os fatores sofrem variações em seus valores e essas variações são chamadas de níveis. O nível pode ser associado a pontos em uma escala numérica para um fator quantitativo ou uma opção específica de um fator qualitativo incluído no experimento. Durante a seleção dos níveis, alguns erros podem ser cometidos como a seleção de níveis muito próximos ou muito distantes entre si. Chamamos esses níveis de “baixo” e “alto” e são indicados por “-1” e “+1” respectivamente.

## 5.3 Selecionar as características de interesse

Foram selecionadas 6 (seis) respostas do total de 11 (onze) respostas medidas experimentalmente (custo total de usinagem ( $K_p$ ), tempo total de usinagem ( $T_t$ ), tempo de corte ( $T_c$ ), vida da ferramenta ( $T$ ), temperatura de corte ( $T_p^\circ$ ), ruído do processo ( $RD$ ), taxa de volume de cavaco removido ( $MRR$ ), força de usinagem ( $F_r$ ), rugosidades ( $R_a$ ,  $R_t$ ) e energia específica de corte ( $EEC$ ). Para cada uma das sete ferramentas pré-selecionadas, utilizou-se efetivamente o custo total de usinagem ( $K_p$ ), vida da ferramenta ( $T$ ), ruído do processo ( $RD$ ), força de usinagem ( $F_r$ ), rugosidade ( $R_a$ ) e energia específica de corte ( $EEC$ ), a partir da variação controlada de velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem.

O desgaste de flanco foi medido para diferentes inserções em relação ao tempo de corte e para diferentes combinações de parâmetros de corte. Foi encontrado o processo clássico de desgaste da ferramenta que se seguiu com o aumento dos parâmetros de corte, principalmente a velocidade de corte.

O fim da vida da ferramenta ( $T$ ), em minutos, foi então obtido multiplicando-se o número total de passes pelo tempo de corte ( $T_c$ ), em cada passe, tal que:

$$T_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad [\text{min}] \quad (5.1)$$

com:

$l_f$ - Comprimento da peça:100 mm,  $d$ - Diâmetro da peça: 49 milímetros;

$f$  - Avanço [mm /rev],  $V_c$  - Velocidade de corte [m /min].

O tempo total do ciclo (Tt) e o custo total (Kp) foram calculados pelas expressões, 5.2; 5.3; 5.4; 5.5 e dados de tempo conforme Quadro 5.1.

$$Tt = Tc + t_1 + t_2 \quad [\text{min}] \quad (5.2)$$

$$Kp = \left[ \frac{t_1}{60} - \frac{1}{Z} \right] \cdot (S_h + S_m) + \frac{Tc}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{Tc}{T} \cdot \left[ \left( \frac{K_{th}}{N_{th}} + \frac{K_i}{N_i} \right) + \frac{t_i}{60} \cdot (S_h + S_m) \right] \quad [\text{US\$}] \quad (5.3)$$

com:

$T$ - Vida da ferramenta [min]

$Tc$  - tempo de corte [min]

$$t_1 - \text{Tempo improdutivo, calculado pela fórmula: } t_1 = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_i}{Z} \quad [\text{min}] \quad (5.4)$$

$$t_2 - \text{Mudança de tempo da ferramenta, calculado pela fórmula: } t_2 = \frac{Tc}{T} \cdot t_i \quad [\text{min}] \quad (5.5)$$

Depois que todas as respostas foram coletadas, estas foram montadas para compor a matriz experimental usado como fonte de dados para a modelagem e otimização do processo para cada ferramenta.

Quadro 5.1 - Dados de tempo total do ciclo e cálculos de custo total

Descrição	Símbolo	Unidade	Valor
Tempo Secundário	$t_s$	min	0.5
Tempo de aproximação e retirada da ferramenta	$t_a$	min	0.1
Tempo Set-up	$t_p$	min	60
Tempo de mudança do inserto	$t_i$	min	1
Tamanho do lote	$Z$	unidade	1.000
Custo máquina e trabalho	$S_m + S_h$	US\$	50
Preço porta ferramenta	$K_{th}$	US\$	125
Preço inserto	$K_i$	US\$	-
Vida média das arestas	$N_{th}$	arestas	1.000
Número de arestas de corte	$N_i$	arestas	4

## 5.4 Planejar e executar um DOE do tipo CCD para cada ferramenta

O sequenciamento dos experimentos foi planejado seguindo um arranjo composto central (CCD), criado para três parâmetros em dois níveis ( $2^k = 2^3 = 8$ ), seis pontos axiais ( $2k = 6$ ) e cinco pontos centrais ( $cp = 5$ ), o que resultou em 19 experimentos. Para a especificação dos níveis dos parâmetros, levou-se em consideração a análise da literatura relacionada com este processo, item 2.4, (Quadro 2.4), informações de catálogo de ferramentas (Sandvik) e a realização de testes preliminares. Ao final dos testes, os níveis dos parâmetros foram fixados, como descrito na Tabela 4.1.

## 5.5 Realização dos Experimentos

A execução dos experimentos foi realizada aleatoriamente seguindo o procedimento experimental descrito no item 4.3. Para todos os experimentos, manteve-se o mesmo diâmetro da peça usinada, mesmos equipamentos e setups. Antes de se iniciar a etapa de modelagem, todos os resultados foram checados com os valores descritos na literatura, bem como uma análise para detecção de outliers foi realizada.

## 5.6 Modelar cada característica de interesse para cada ferramenta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) foi utilizada para a modelagem e a otimização de cada característica de interesse. Assim, o primeiro passo consistiu em encontrar uma aproximação adequada para representar as respostas de interesse em função das variáveis do processo. Primeiramente, analisou-se a porção fatorial e os pontos centrais para se verificar a hipótese de curvatura. Como o sistema apresentou curvatura significativa, foram incluídos os pontos axiais, que permitiram a estimação do modelo de segunda ordem, como descrito pela Equação (3.2).

Após a construção do modelo, a significância do mesmo foi verificada por meio de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância). O ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação ( $R^2_{adj}$ ) das respostas (T, Kp, Ra, Fr, RD, EEC). O  $R^2_{adj}$  representa a variação de Y que pode ser explicada pela variação do vetor de variáveis de entrada X (Vc, f, ap) seguindo o modelo quadrático completo.

Após a definição dos modelos matemáticos que representam as variáveis de resposta do processo, inicia-se a etapa de otimização. Essa etapa tem como objetivo determinar quais são os valores que as variáveis de controle devem assumir de modo que os valores alvos das variáveis de resposta sejam atingidos, com mínima variação, independente da condição de

ruído a que o processo é submetido. A primeira atividade da etapa de otimização foi denominada otimização individual das variáveis de resposta. Nessa atividade, buscou-se para cada modelo matemático seu respectivo ponto ótimo, dentro dos limites de espaço experimental, porém, sem influência das demais variáveis de resposta. Os valores obtidos como pontos ótimos para cada modelo matemático foram utilizados como alvos das variáveis de resposta durante a atividade seguinte, na qual se executa a otimização simultânea.

A otimização individual foi realizada para obter uma solução ótima de cada função, o que pode representar os eventuais conflitos entre os objetivos.

### **5.7 Avaliar correlação entre as respostas e executar a ACP**

Um novo método baseado na redução de dimensionalidade do conjunto de respostas foi utilizado, no qual se considerou a decomposição da matriz de correlação das respostas utilizando-se a Análise de Componentes Principais (ACP). Sobre a variável latente originada da transformação – ou Escore de Componente Principal, aplicou-se uma ANOVA. Para Chiao e Hamada (2001), assim como Ch'ng et al. (2005a e 2005b), a análise univariada de um sistema de múltiplas respostas não é uma alternativa viável quando as múltiplas respostas estão correlacionadas; uma análise individual neste caso pode conduzir a níveis conflitantes para os fatores importantes, uma vez que um nível escolhido pode otimizar uma resposta em detrimento das outras. Além disso, quando a correlação entre as respostas é ignorada, a solução encontrada pode-se afastar consideravelmente da solução que otimiza simultaneamente todas as respostas.

Do ponto de vista da otimização multiobjetivo, a aplicação da ACP pode ser extremamente vantajosa. Primeiro, porque permite a redução do número de funções objetivo e, segundo, porque a utilização das combinações lineares tem a capacidade de eliminar as influências das correlações sobre os coeficientes das funções objetivo.

Inicialmente, utilizando-se o software Minitab, analisou-se a correlação entre as respostas, aplicando-se posteriormente a Análise de Componentes Principais. Sobre os escores destes componentes, ajustou-se um modelo quadrático completo para cada componente que atendesse ao critério de Kaiser, ou seja, para aqueles cujo autovalor fosse maior do que 1 com explicação acumulada da estrutura de variância-covariância superior a 80%. Por fim, foi feito o cálculo dos alvos das respostas originais e a sua transformação para a escala de componentes principais, conforme descreve o item 3.3 desta tese, com as Equações 3.3 e 3.4 e 3.5.

## 5.8 Aplicar o Método WEQMM

O método WEQMM é um aprimoramento do método EQMM, no qual podem ser introduzidos pesos para as componentes. O método se inicia com a Análise de Componentes Principais convertendo o conjunto original de respostas correlacionadas em novas variáveis não correlacionadas (componentes principais), segundo o que descreve a Equação 3.10 no item 3.6. Os pesos adotados são os autovalores de cada componente.

$$u_r; v_i \geq \left[ \varphi \sum_{r=1}^m \sum_{i=1}^s (u_r + v_i) \right] \varphi = \min[w_1, \Psi_i] \quad (5.6)$$

Onde:

$u_r; v_i$  são os pesos de *Inputs* e *Outputs* e  $\varphi$  é o menor valor entre os pesos associados as variáveis originais e aos componentes.

A Análise de Componentes Principais pela matriz de correlação é realizada quando se usa WPCA, onde cada variável original recebe uma fração igual da ponderação inicial para o componente. Onde  $w_1$  é o peso atribuído a variável rugosidade Ra e  $\Psi_i$  são os pesos associados às variáveis originais incluídas na análise de Componentes Principais.

O peso  $w_2$  é atribuído aos Componentes Principais ( $PC_j$ ) ponderados ( $WPC$ ) para cada Componente Principal pelo percentual de explicação de cada componente, que é obtido através dos autovalores, pela seguinte expressão:

$$\Theta_j = w_2 A_j \quad (5.7)$$

Onde  $A_j$  é o percentual de explicação da  $j$ -ésima componente principal. Em seguida, a ponderação  $\Theta_j$  de cada componente principal pode ser distribuída para cada variável original através de seu percentual de explicação obtido pelos seus respectivos autovetores absolutos (em módulo). A matriz de pesos  $\Phi_{p \times \xi}$  para  $p$  variáveis originais e  $\xi$  componentes principais é

obtida por:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{1\xi} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \dots & \Phi_{2\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{p1} & \Phi_{p2} & \dots & \Phi_{p\xi} \end{bmatrix} = \left[ \Theta_1 \frac{|e_{i1}|}{\sum_{j=1}^{\xi} |e_{j1}|} \quad \Theta_2 \frac{|e_{i2}|}{\sum_{j=1}^{\xi} |e_{j2}|} \quad \dots \quad \Theta_{\xi} \frac{|e_{i\xi}|}{\sum_{j=1}^{\xi} |e_{j\xi}|} \right] \quad (5.8)$$

Esta é uma matriz de peso para  $p$  variáveis originais e  $\xi$  Componentes Principais.

A ponderação que cada componente recebe pode ser distribuída para cada variável original através do percentual de explicação obtidos pelos seus respectivos autovetores absolutos.

Finalmente, os pesos  $\Psi_i$  associados às variáveis originais incluídas no vetor WPC podem ser obtidas por:

$$\Psi_i = \sum_{j=1}^{\xi} \Phi_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, p \quad (5.9)$$

## 5.9 Otimização Baseada no método NBI-WEQMM

Ao se realizar a análise de correlações, deve-se observar se existem respostas no conjunto de objetivos que sejam independentes. Tais respostas devem formar um novo grupo e serem analisadas em contraposição àquelas correlacionadas. O conjunto de respostas correlacionadas é reduzido ao índice WEQMM. Como se formam dois grupos antagônicos, emprega-se o método NBI já descrito anteriormente para se construir a fronteira do índice WEQMM em função das respostas independentes. Nisto consiste o método NBI – WEQMM. Suspeita-se de que o método NBI tradicional não apresente bom desempenho na presença de funções objetivo correlacionadas.

O método é aplicado considerando-se combinações convexas de pesos para cada função não correlacionada  $R_a$  ( $w_1$ ) e para WEQMM ( $w_2$ ). A solução deste problema de otimização conduzirá a diversas soluções ótimas, todas elas adequadas dependendo das prioridades do decisor. Deste modo, traçando-se um paralelo com a análise envoltória de dados, percebe-se que cada ponto da fronteira pode ser considerada como uma tomada de decisão. Assim, o passo seguinte do método DEA-OTS é a aplicação de um modelo CCR aos valores ótimos obtidos com o método NBI-WEQMM para cada ferramenta de interesse.

## 5.10 Selecionar os pontos da Fronteira que serão candidatas - Critério Entropia/EPG

O EPG quantifica o afastamento dos resultados ótimos individuais em relação aos resultados ótimos globais. Quanto menor o valor do EPG, melhor será o método multiobjetivo empregado.

$$f1(n) = - \sum_{i=1}^k w_i \ln(w_i) \quad (5.10)$$

A entropia quantifica como a distribuição dos pesos entre as funções objetivo influencia o resultado da otimização multiobjetivo. Quanto maior a entropia, maior a diversificação de pesos. A aplicação do critério de entropia auxilia os métodos de otimização a encontrarem soluções viáveis sem a alocação de pesos nulos para alguma resposta. Esta situação ilustra o caso no qual o método de otimização multiobjetivo, ao identificar uma grande dificuldade em otimizar simultaneamente dada resposta, a exclui da otimização.

Para se considerar simultaneamente a entropia e o EPG, pode-se adotar a razão Entropia/EPG que quando maximizada conduz a máxima entropia com o mínimo EPG.

### 5.11 Definir Inputs e Outputs para implementação do DEA

O método DEA-OTS sugere que sejam considerados como *Outputs* funções objetivos que devam ser maximizadas e, como *Inputs*, funções que devam ser minimizadas. No caso das ferramentas utilizadas nesta tese definiu-se que os *Inputs* seriam as respostas de minimização (Kp, Ra, Fr, RD) e para os *Outputs* foram as respostas de maximização (T e EEC).

### 5.12 Definir pesos mínimos atribuídos aos inputs e outputs

A variáveis de decisão dos modelos DEA são os pesos atribuídos a *Outputs* e *Inputs*. Contudo, no caso de tais *Outputs* e *Inputs* serem funções objetivos seria razoável que estes pesos não fossem nulos, dado que tal situação implicaria na desconsideração de uma dada função objetivo no problema. Para tanto, o método DEA-OTS estabelece que os pesos não podem ser inferiores ao menor peso atribuído para cada combinação convexa da Fronteira de Pareto.

O número de subproblemas de programação linear que devem ser resolvidos em relação a seleção das ferramentas será igual ao numero de pontos da Fronteira multiplicado pelo numero de ferramentas desejadas. Por exemplo, utilizando-se um espaçamento de 10% entre os pesos da fronteira, obtem-se 7 soluções. Considerando-se 7 ferramentas, o modelo envolveria 49 subproblemas. Na presente tese, serão considerados apenas 3 pontos da fronteira para 7 ferramentas, totalizando 21 DMUs.

### **5.13 Executar DEA e selecionar a ferramenta ótima**

Após a execução dos 21 subproblemas escritos anteriormente, cria-se um ranqueamento das DMUs em função de sua eficiência. As mais eficientes constituirão a melhor escolha.

## 6 APLICAÇÃO DO MODELO DEA - OTS

### 6.1 Considerações iniciais e discussões sobre as etapas

Com base nas explicações descritas no capítulo anterior, serão apresentados os resultados e discussões da aplicação do Modelo DEA-OTS, as etapas que o concluíram e quais foram as ferramentas mais eficientes no torneamento do aço H13 endurecido com ferramentas cerâmicas e de PCBN.

### 6.2 Seleção das Ferramentas avaliadas

As ferramentas de corte utilizadas nesta pesquisa, exatamente no torneamento do aço H13 endurecido, possui algumas propriedades especiais em relação às ferramentas de corte convencionais. Dentre essas propriedades especiais, as mais importantes são: alta dureza à temperatura ambiente e à quente (temperatura aproximada de 800 °C) e alta resistência à ruptura transversal (maior que 390 N/mm<sup>2</sup>); alta tenacidade à fratura ( $K_{IC} > 5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) e alta resistência à compressão; alta resistência ao choque térmico; alta resistência a reações químicas.

Durante a revisão da literatura, constatou-se que, dentre os materiais existentes, os que apresentam todas essas propriedades, portanto, indicados para o torneamento de aços endurecidos são os materiais cerâmicos e o PCBN.

Para evitar que ocorresse o colapso total das ferramentas utilizadas foi fundamental estipular limites para o desgaste de flanco, isto é, quando o desgaste atingisse o valor de  $VB = 0,3$  (mm). A partir do momento que as ferramentas atingiram este desgaste, deram-se início as medições das respostas desejadas. A partir deste contexto foi iniciada uma discussão sobre os desgastes ocorridos em cada ferramenta, suas consequências e resultados encontrados.

Primeiramente, foi realizado um teste experimental nas condições mínimas e máximas dos parâmetros utilizados. Foi verificado que não houve nenhuma fratura nas ferramentas testadas. Após o final dos 19 experimentos realizados nas 7 ferramentas, também se verificou que não houve fratura nem ruptura nas ferramentas, comprovando alta resistência ao choque térmico e alta resistência a reações químicas diante dos valores dos parâmetros adotados nesta pesquisa.

Os valores de todos os parâmetros utilizados nesta pesquisa se encontram na Tabela 6.1,

Tabela 6.1 – Parâmetros Codificados e Decodificados.

Experimentos	Parâmetros (Codificados)			Parâmetros (Decodificados)		
	Vc	f	ap	Vc	f	ap
	m/min	mm/rev	mm	m/min	mm/rev	mm
1	-1	-1	-1	100,00	0,10	0,15
2	+1	-1	-1	225,00	0,10	0,15
3	-1	+1	-1	100,00	0,22	0,15
4	+1	+1	-1	225,00	0,22	0,15
5	-1	-1	+1	100,00	0,10	0,33
6	+1	-1	+1	225,00	0,10	0,33
7	-1	+1	+1	100,00	0,22	0,33
8	+1	+1	+1	225,00	0,22	0,33
9	-1.682	0	0	57,39	0,16	0,24
10	+1.682	0	0	267,61	0,16	0,24
11	0	-1.682	0	162,50	0,05	0,24
12	0	+1.682	0	162,50	0,26	0,24
13	0	0	-1.628	162,50	0,16	0,09
14	0	0	+1.682	162,50	0,16	0,39
15	0	0	0	162,50	0,16	0,24
16	0	0	0	162,50	0,16	0,24
17	0	0	0	162,50	0,16	0,24
18	0	0	0	162,50	0,16	0,24
19	0	0	0	162,50	0,16	0,24

Será apresentado a seguir as discussões sobre as 7 ferramentas, gráficos, tabelas e resultados obtidos.

### 6.2.1 Ferramenta CC6050 (*Wiper*)

Para a ferramenta CC 6050 (*Wiper*) os principais tipos de desgaste apresentados pela Figura 6.1 (A) e (B) foi o desgaste de flanco e desgaste de cratera. O desgaste de flanco se deu pelo motivo de ser o mais comum observado no processo de torneamento e foi causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça. No caso desta ferramenta, este tipo de desgaste não provocou grandes alterações na rugosidade da peça.

O desgaste de cratera ocorreu na superfície de saída da ferramenta e foi gerado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco, como pode ser observado na Figura 6.1 (B).

É mostrado na Figura 6.1 (A) a superfície de folga e a Figura 6.2 (B) a superfície de saída e na Tabela 6.2 os resultados das respostas obtidas.

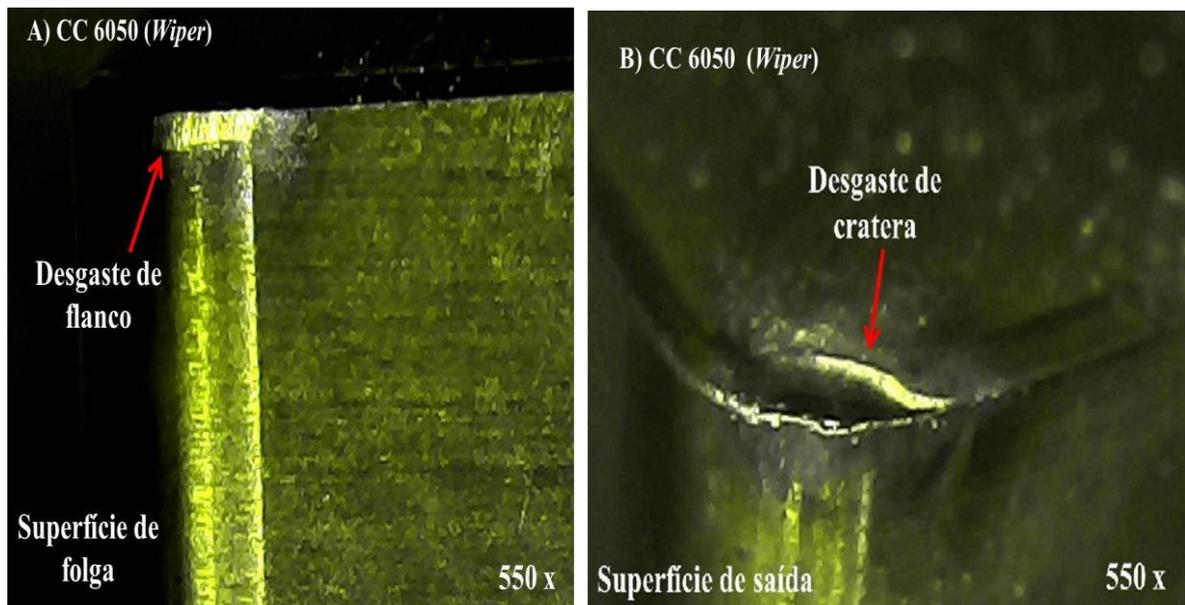


Figura 6.1 (A) – CC 6050 (*Wiper*): Superfície de folga e (B) Superfície de saída.

Verifica-se na Tabela 6.2, experimentos de números 2 e 4, que o menor valor de rugosidade foi de  $0,11 \text{ } (\mu\text{m})$  para os parâmetros:  $V_c = 225 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,10 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,15 \text{ (mm)}$  e o maior valor de rugosidade foi de  $0,72 \text{ } (\mu\text{m})$  para os parâmetros:  $V_c = 225 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,22 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,15 \text{ (mm)}$ . Observa-se que para o menor avanço, alcançou a menor rugosidade e vice-versa.

Fazendo uma comparação entre os valores dos avanços utilizados para a ferramenta *Wiper* e para a ferramenta convencional, verifica-se que a ferramenta *Wiper* alcançou valores de rugosidades bem menores do que a ferramenta convencional, isto é, utilizou-se do mesmo tipo de cobertura ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN-TiN}$ ) e com repetidos valores dos parâmetros.

Verifica-se ainda nos experimentos 2 e 4, realizando uma comparação com os valores da Tabela 6.2 e com a Tabela 6.3, verifica-se que as rugosidades apresentadas para os parâmetros do experimento 2, obtiveram rugosidades de  $0,11 \text{ } (\mu\text{m})$  para a ferramenta *Wiper* e  $0,64 \text{ } (\mu\text{m})$  ferramenta convencional e para o experimento 4, rugosidades de  $0,72 \text{ } (\mu\text{m})$  *Wiper* e de  $1,09 \text{ } (\mu\text{m})$  convencional. Verifica-se que os menores valores de rugosidades, utilizando os mesmos parâmetros de corte, foram obtidos pela ferramenta *Wiper*.

A Tabela 6.2 apresenta as respostas para os 19 experimentos realizados, em que se faz uma comparação entre os valores dos parâmetros adotados com as respostas obtidas.

Tabela 6.2 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 6050 Wiper

Experimento	T (min)	Tc (min)	Tt (min)	Kp (U\$)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	MRR ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	Fr (N)	Tp° (°C)	RD (dB)	EEC ( $\text{cm}^3/\text{N.min}$ )
1	62,00	1,57	2,32	2,55	0,13	1,18	1,50	340,22	502,82	64,39	0,00
2	33,00	0,69	1,41	1,58	0,11	1,09	3,38	236,49	653,54	83,26	0,01
3	52,00	0,69	1,47	2,04	0,41	2,82	3,38	432,59	473,86	74,92	0,00
4	30,50	0,31	1,03	1,32	0,72	3,52	7,59	240,32	633,72	83,54	0,03
5	63,00	1,57	2,39	3,17	0,34	2,44	3,30	451,47	475,23	68,88	0,01
6	30,00	0,69	1,45	1,85	0,09	0,66	7,43	244,18	569,33	85,65	0,03
7	52,00	0,69	1,53	2,49	0,08	0,72	7,43	459,39	539,5	69,49	0,01
8	28,50	0,31	1,02	1,17	0,42	2,23	16,71	246,31	609,3	88,72	0,06
9	59,00	1,68	2,52	3,35	0,22	1,74	2,24	485,87	429,43	73,75	0,00
10	24,50	0,36	1,07	1,23	0,29	1,42	10,44	224,48	528,32	95,44	0,04
11	39,00	1,68	2,46	2,87	0,13	1,18	2,24	319,28	498,24	83,15	0,01
12	40,25	0,36	1,10	1,51	0,49	2,60	10,44	358,85	540,93	85,53	0,02
13	51,00	0,59	1,31	1,51	0,22	1,48	2,34	330,98	558,77	80,27	0,01
14	47,50	0,59	1,37	1,98	0,12	0,92	10,33	359,24	565,83	85,85	0,02
15	43,50	0,59	1,37	1,99	0,47	0,98	6,34	336,52	497,34	83,26	0,01
16	43,00	0,59	1,37	1,96	0,49	0,97	6,34	335,28	485,32	85,32	0,01
17	44,50	0,59	1,37	2,01	0,49	0,96	6,34	334,92	495,73	82,58	0,01
18	44,00	0,59	1,37	1,96	0,48	0,98	6,34	337,83	497,44	87,72	0,01
19	45,00	0,59	1,37	1,95	0,47	0,97	6,34	334,78	506,15	84,45	0,01

É mostrado na Figura 6.2 a representação da superfície usinada para as condições estudadas no fim da vida da ferramenta.

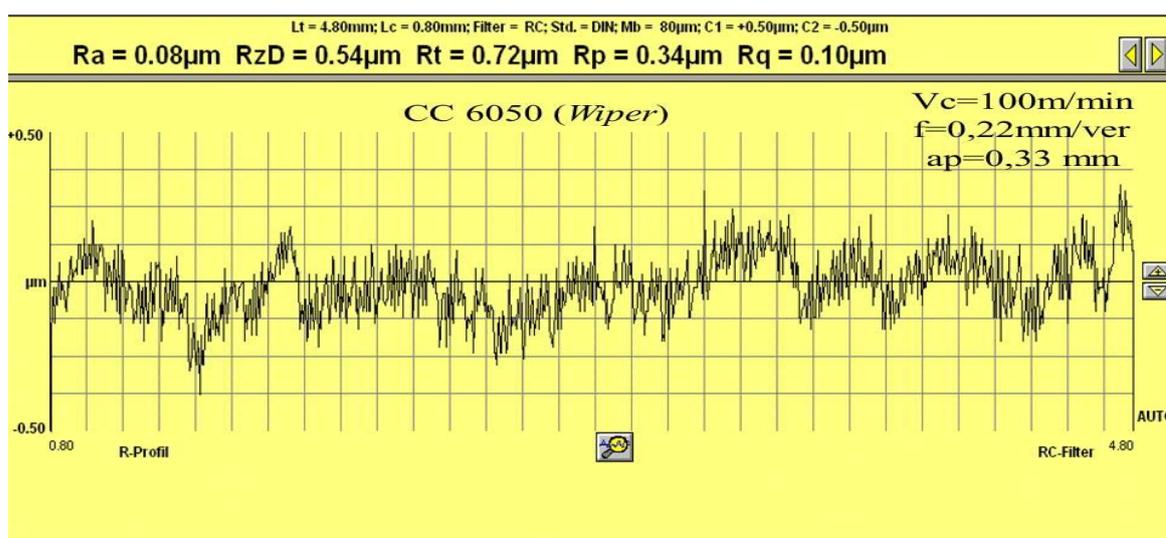


Figura 6.2 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 6050 (Wiper).

A Figura 6.3 apresenta os efeitos principais para a rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

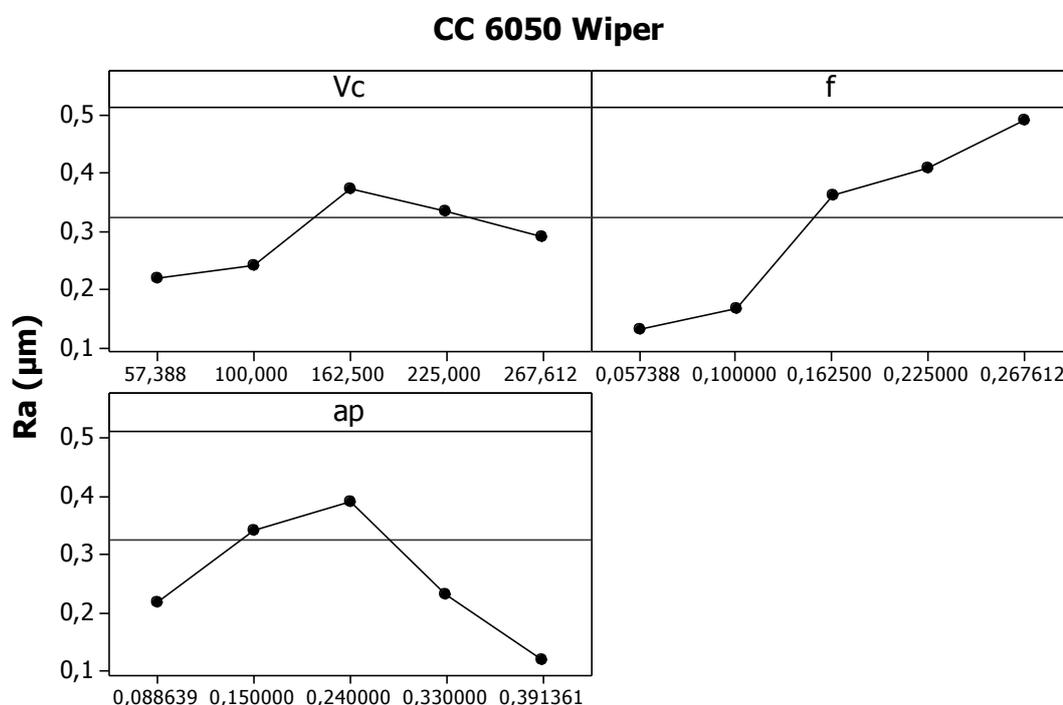


Figura 6.3 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores, sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 6.3. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem (f). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, as interações  $V_c \times V_c$ ,  $a_p \times a_p$ ,  $V_c \times f$  e  $f \times a_p$  que são apresentadas na Tabela 6.3.

A Tabela 6.2 apresenta também as respostas de tempo de corte, tempo total e custo de cada ferramenta que apresentou valores calculados para cada experimento, valores tais que são de fundamental importância na análise financeira. Taxa de remoção de material foi importante para analisar a produtividade, rugosidade Ra foi importante para analisar a qualidade superficial da peça. As temperaturas nas imediações da aresta de corte tem influência direta nos mecanismos de desgaste.

A resposta força foi importante na avaliação das condições da ferramenta como resultado das variações dos níveis de atrito entre a superfície de folga e a peça. O ruído aponta distorções que às vezes não são detectadas pelo operador e prevê uma falta de ajuste na fixação da peça ou mesmo de uma ferramenta. A EEC tem relação com a taxa de remoção de material e a força e é uma importante análise de produtividade.

A vida da ferramenta é um dos itens mais importantes a ser avaliado em um experimento, pois sofre interferência de muitos fatores e é decisiva na obtenção de outras respostas. Observou-se na Tabela 6.2, experimento 5,  $V_c = 100$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,33$  (mm), obteve vida da ferramenta de 63 (min) e no experimento 6,  $V_c = 225$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,33$  (mm), obteve vida da ferramenta de 30 (min). Verifica-se que os valores de  $f$  e  $a_p$  permanecem iguais nos dois experimentos, mas existe uma mudança na  $V_c$ , isto é, a  $V_c$  do experimento 5 é duas vezes menor do que a  $V_c$  do experimento 6 e obteve duas vezes mais vida. Temos que a vida da ferramenta sofre influência da velocidade de corte, isto é, quanto menor a velocidade, maior é a vida e vice-versa. Repete-se para os experimentos 9 e 10, 7 e 8 da Tabela 6.2.

A Figura 6.4 apresenta os efeitos principais para a vida da ferramenta  $T$  (min) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

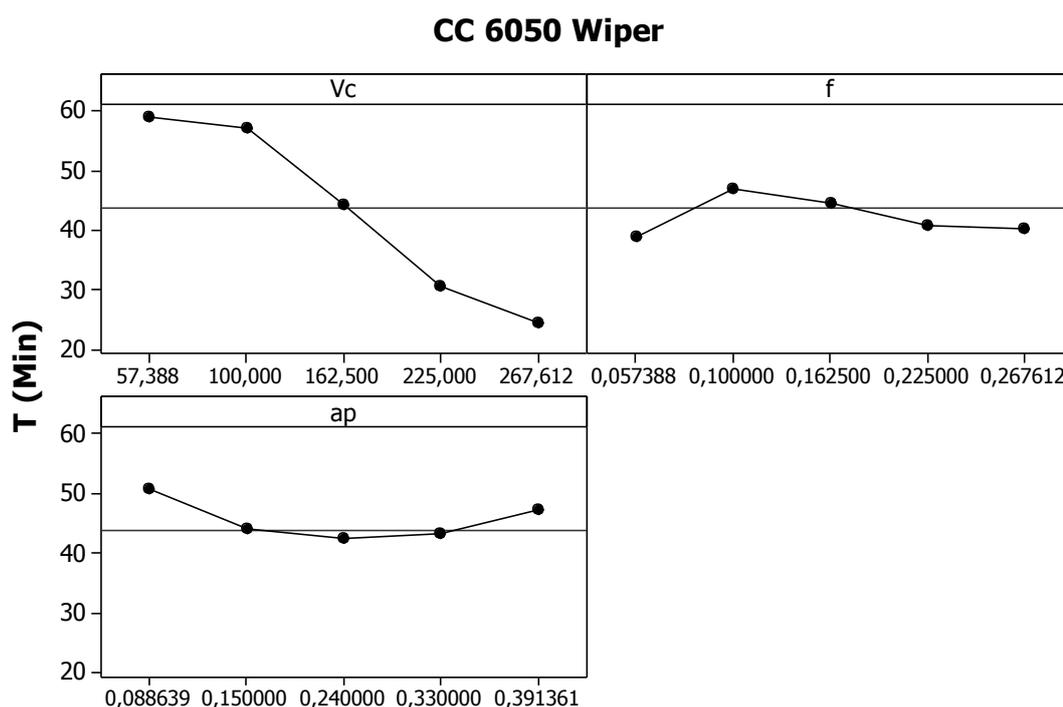


Figura 6.4 – Gráfico dos efeitos principais para  $T$  (min).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos no comportamento da vida da ferramenta, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos na Figura 6.4. Observa-se que o elemento que exerce maior influência na vida da ferramenta é a  $V_c$ . Em primeiro lugar, nota-se o fator velocidade de corte como sendo o elemento que, por uma

variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, além da interação entre  $ap \times ap$ .

A Tabela 6.3 apresenta os resultados dos modelos das respostas com seus respectivos ajustes representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$  adj).

Tabela 6.3 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC6050 Wiper.

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>43,98</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,97</b>	<b>0,47</b>	<b>0,96</b>	<b>6,33</b>	<b>336,47</b>	<b>495,02</b>	<b>84,92</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,08</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,57</b>	0,03	-0,00	<b>2,43</b>	<b>-84,64</b>	<b>46,92</b>	<b>7,32</b>	<b>0,01</b>
f	-1,67	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,32</b>	<b>0,11</b>	<b>0,44</b>	<b>2,43</b>	12,65	9,31	1,35	<b>0,00</b>
ap	-0,72	0,00	0,01	<b>0,14</b>	-0,04	-0,26	<b>2,37</b>	14,59	-4,29	1,17	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,71	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,09	<b>-0,06</b>	0,26	0,00	3,47	1,36	-1,43	<b>0,00</b>
f x f	-1,46	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,06	-0,04	<b>0,37</b>	0,00	-2,22	15,76	-1,52	0,00
ap x ap	<b>1,93</b>	-0,01	-0,02	-0,09	<b>-0,09</b>	0,12	-0,00	-0,08	<b>30,86</b>	-1,97	0,00
Vc x f	2,12	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,0	<b>0,11</b>	<b>0,53</b>	<b>0,93</b>	-11,79	-1,89	-0,97	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,75	-0,00	-0,01	-0,11	-0,02	-0,08	<b>0,91</b>	-15,54	-18,33	1,06	<b>0,00</b>
f x ap	-0,00	-0,00	-0,00	-0,07	<b>-0,10</b>	<b>-0,55</b>	<b>0,91</b>	-10,76	19,12	-0,89	<b>0,00</b>
R <sup>2</sup> adj.	93,17%	96,96%	96,93%	96,76%	92,24%	79,68%	99,24%	95,45%	73,88%	64,85%	97,65%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value < 5%)

Após a construção do modelo, a significância estatística do mesmo deve ser verificada através de um procedimento de ANOVA (Análise de Variância), que, além da sua significância como um todo, permite também verificar quais entre os termos do modelo são significativos e quais podem ser negligenciados. O ajuste é representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que representa o percentual dos dados observados na resposta que o modelo matemático consegue explicar. Associado a este coeficiente, encontra-se o  $R^2$  ajustado ( $R^2(adj.)$ ), que é uma medida alternativa ao coeficiente de determinação. O  $R^2$  ajustado penaliza a inclusão de regressores pouco explicativos, combatendo a tendência de superestimação da variação atual nos dados, feita pelo  $R^2$ , quando um maior número de variáveis é inserido.

## 6.2.2 Ferramenta CC 6050

Para a ferramenta CC 6050 os principais tipos de desgaste apresentados pela Figura 6.5 (A) e (B) foi desgaste de flanco e desgaste de cratera. O desgaste de flanco se deu pelo motivo de ser o mais comum observado no processo de torneamento e foi causado pelo atrito entre a

ferramenta e a peça e o desgaste de cratera ocorreu na superfície de saída da ferramenta e foi gerado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco.

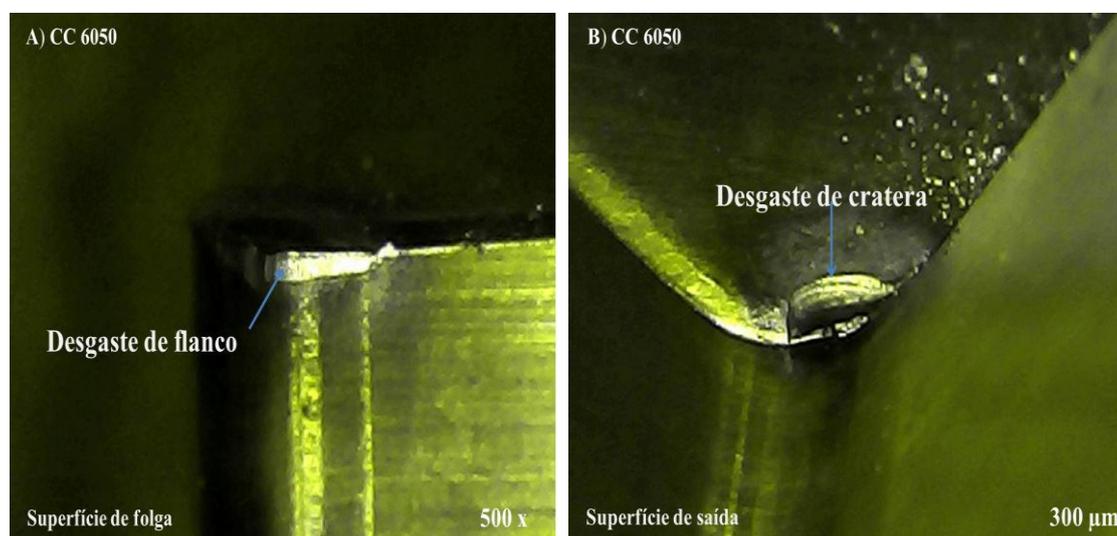


Figura 6.5 – CC 6050: A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.

No caso desta ferramenta, este tipo de desgaste provocou algumas alterações nos valores encontrados de rugosidade da peça em comparação com a ferramenta discutida anteriormente CC6050 *Wiper*. Estes valores podem ser conferidos na Tabela 6.4.

Nos experimentos 10 e 11, o maior valor de rugosidade foi de 1,97 ( $\mu\text{m}$ ) para uma  $V_c = 267$  (m/min),  $f = 0,16$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) e o menor valor foi de 0,32 ( $\mu\text{m}$ ) com uma  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm). Comparando os resultados observa-se que o menor avanço, obteve a menor rugosidade da peça.

Outro exemplo pode ser mostrado entre os experimentos 11 e 12 na Tabela 6.4. Com  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), os valores das rugosidades do experimento 11, são de 0,32 ( $\mu\text{m}$ ) e os valores do experimento 12, com  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,26$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) são de 1,35 ( $\mu\text{m}$ ). Verifica-se que o avanço tem influência sobre a rugosidade, mantendo os mesmos valores de  $V_c$  e  $a_p$  e o menor valor de avanço, obteve o menor valor de rugosidade da peça.

A Tabela 6.4 apresenta as respostas para os 19 experimentos realizados, em que se faz uma comparação entre os valores dos parâmetros adotados com as respostas obtidas.

Tabela 6.4 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 6050.

<i>Experimento</i>	<i>T</i> (min)	<i>Tc</i> (min)	<i>Tt</i> (min)	<i>Kp</i> (U\$)	<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>MRR</i> ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	<i>Fr</i> (N)	<i>Tp°</i> (°C)	<i>RD</i> (dB)	<i>EEC</i> ( $\text{cm}^3/\text{N.min}$ )
1	57,00	1,57	2,32	2,46	0,62	3,00	1,50	339,38	506,55	71,22	0,00
2	29,50	0,69	1,41	1,52	0,64	3,00	3,38	235,38	641,23	90,32	0,01
3	48,25	0,69	1,47	1,92	0,98	7,26	3,38	430,76	484,34	84,97	0,01
4	26,50	0,31	1,03	1,25	1,09	7,42	7,59	239,76	637,86	94,49	0,03
5	58,50	1,57	2,39	3,01	0,65	3,02	3,30	449,37	496,28	76,39	0,01
6	26,00	0,69	1,45	1,76	0,72	2,84	7,43	242,35	572,32	92,49	0,03
7	49,00	0,69	1,53	2,33	1,33	6,78	7,43	452,34	502,56	83,82	0,01
8	26,50	0,31	1,02	1,12	1,39	8,28	16,71	244,86	603,33	91,49	0,06
9	56,00	1,68	2,52	3,18	1,12	4,86	2,24	486,43	439,78	83,77	0,00
10	22,50	0,36	1,07	1,18	1,97	4,62	10,44	221,23	537,86	88,22	0,04
11	37,00	1,68	2,46	2,76	0,32	2,18	2,24	320,87	508,97	85,77	0,01
12	38,25	0,36	1,10	1,43	1,35	7,44	10,44	355,37	541,98	85,49	0,02
13	50,00	0,59	1,31	1,45	0,87	4,56	2,34	331,38	567,99	86,43	0,00
14	46,00	0,59	1,37	1,87	0,95	4,16	10,33	357,54	579,76	84,87	0,02
15	42,00	0,59	1,37	1,87	1,14	7,43	6,34	340,38	509,88	86,52	0,01
16	41,50	0,59	1,37	1,85	1,13	7,44	6,34	333,27	485,64	84,75	0,01
17	42,50	0,59	1,37	1,89	1,12	7,45	6,34	336,29	482,65	85,59	0,01
18	41,00	0,59	1,37	1,85	1,14	7,44	6,34	335,37	490,85	84,42	0,01
19	42,25	0,59	1,37	1,83	1,13	7,46	6,34	332,27	493,23	85,17	0,01

É mostrado na Figura 6.6 a representação da superfície usinada para as condições estudadas no fim da vida da ferramenta.

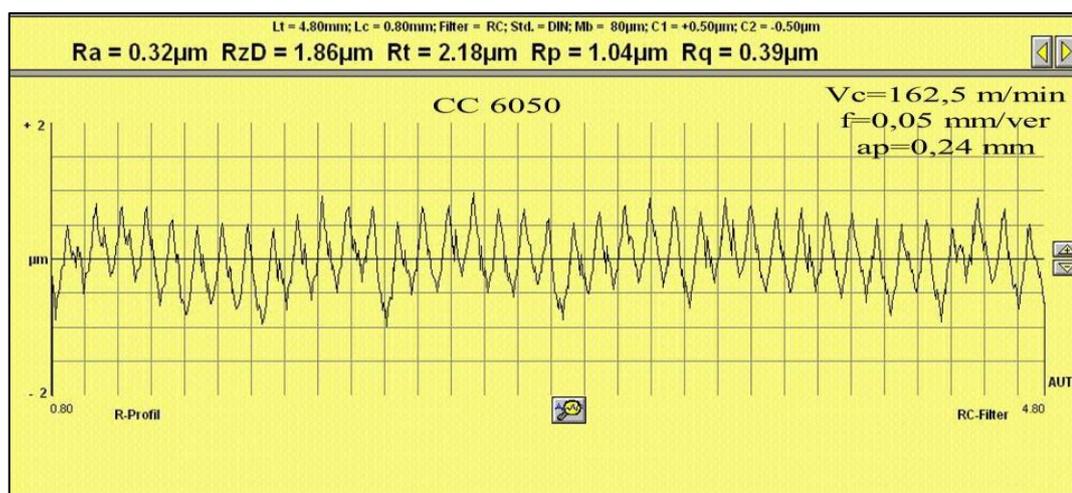


Figura 6.6 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 6050.

A Figura 6.7 apresenta os efeitos principais para a rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

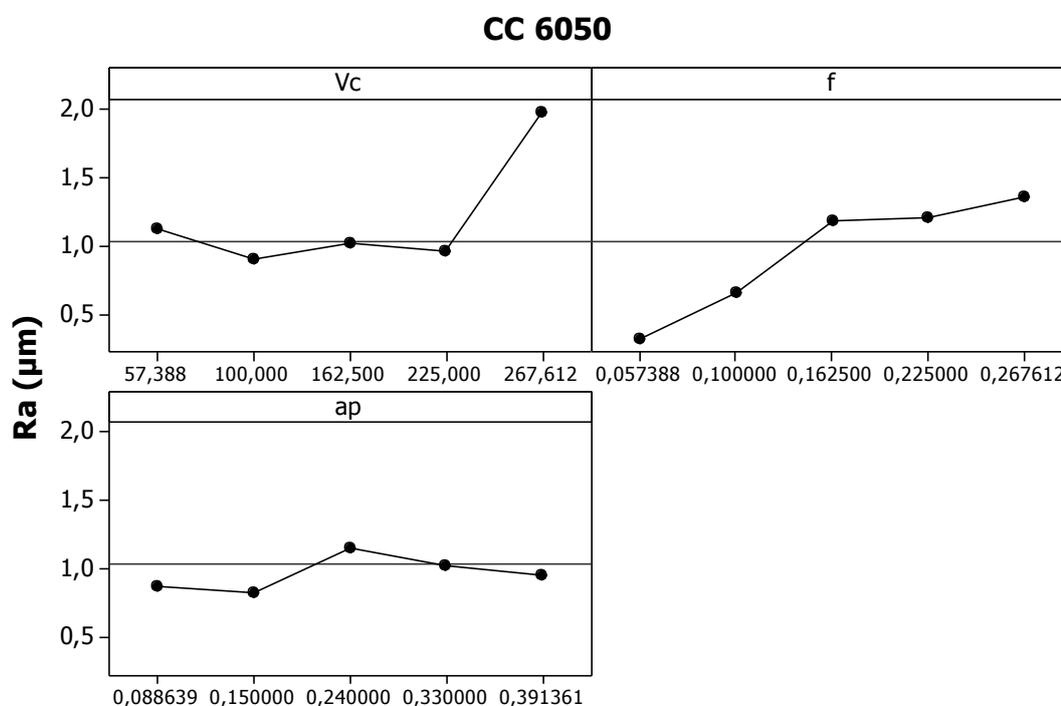


Figura 6.7 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores, sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 6.7. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem (f).

A representação gráfica dos resultados apresenta que a velocidade de corte foi o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta, sendo apresentado na Tabela 6.8.

Observa-se na Tabela 6.4, os valores da vida da ferramenta no experimento 5,  $V_c = 100$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,33$  (mm), obteve vida da ferramenta de 58,5 min e no experimento 6,  $V_c = 225$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,33$  (mm), obteve uma vida da ferramenta de 26 min.

Verifica-se que os valores de f e  $a_p$  permanecem iguais nos dois experimentos, mas existe uma mudança na  $V_c$ , isto é, a  $V_c$  do experimento 5 é duas vezes menor do que a  $V_c$  do experimento 6 e obteve duas vezes mais vida da ferramenta. Observa-se que a vida da ferramenta sofre influência da velocidade de corte, isto é, quanto menor a velocidade, maior é a vida e vice-versa. Verifica-se os experimentos 7 e 8 ( $V_c = 100$  e  $225$  m/min) e 9 e 10 ( $V_c = 57$  e  $267$  m/min, pontos axiais), que a  $V_c$  é o fator que tem maior influência na vida da ferramenta.

A Figura 6.8 apresenta os efeitos principais para a vida da ferramenta T (min) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

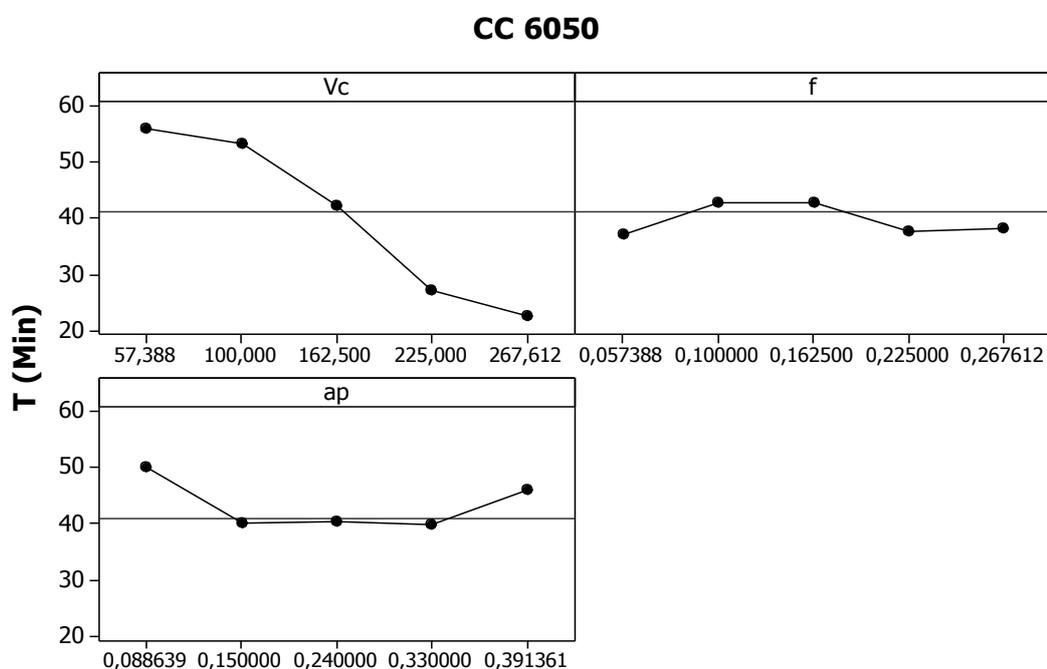


Figura 6.8 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).

A Tabela 6.5 apresenta os resultados dos modelos das respostas com seus respectivos ajustes representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ adj). Verifica-se que os ajustes do ruído  $R^2$  adj. 48,00% se deu pelo fato de interferências elétricas e mecânicas.

Tabela 6.5 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC 6050

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>41,90</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,86</b>	<b>1,13</b>	<b>7,41</b>	<b>6,33</b>	<b>336,17</b>	<b>491,52</b>	<b>85,29</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-11,75</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,54</b>	0,12	0,07	<b>2,43</b>	<b>-84,61</b>	<b>46,12</b>	<b>4,38</b>	<b>0,01</b>
f	-1,36	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,31</b>	<b>0,28</b>	<b>1,99</b>	<b>2,43</b>	11,66	4,92	1,74	<b>0,01</b>
ap	-0,58	0,00	0,01	<b>0,12</b>	0,06	-0,03	<b>2,37</b>	13,74	-5,54	0,04	<b>0,01</b>
Vc x Vc	-1,22	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,10	0,11	<b>-0,78</b>	0,00	2,89	3,81	0,21	<b>0,00</b>
f x f	-1,80	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,07	-0,14	<b>-0,82</b>	0,00	-2,66	16,77	0,09	0,00
ap x ap	1,86	-0,01	-0,02	-0,08	-0,11	<b>-0,92</b>	-0,00	-0,42	<b>33,89</b>	0,09	0,00
Vc x f	<b>1,96</b>	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,03	0,01	0,23	<b>0,93</b>	-10,93	5,44	-2,25	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,71	-0,00	-0,01	-0,10	<b>-0,00</b>	0,14	<b>0,91</b>	-14,93	-13,92	-0,60	<b>0,00</b>
f x ap	<b>0,34</b>	-0,00	-0,00	-0,06	0,06	0,06	<b>0,91</b>	-11,28	7,85	-1,43	<b>0,00</b>
$R^2$ adj.	93,11%	96,96%	96,93%	96,78%	77,23%	91,01%	99,24%	95,29%	78,24%	48,00%	97,46%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value < 5%).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos no comportamento da vida da ferramenta, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos na Figura 6.8. Observa-se que o elemento que exerce maior influência na vida da ferramenta é a  $V_c$ . Em primeiro lugar, nota-se o fator velocidade de corte como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, seguidos da interação entre  $V_{cxf}$  e  $f_{xap}$ .

### 6.2.3 Ferramenta CC650 (*Wiper*)

Para a ferramenta CC 650 (*Wiper*) os principais tipos de desgaste apresentados pela Figura 6.9 (A) e (B) foi de flanco e de cratera. O desgaste de flanco se deu pelo motivo de ser o mais comum observado no processo de torneamento e foi causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça e o desgaste de cratera ocorreu na superfície de saída da ferramenta e foi gerado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco.



Figura 6.9 – CC 650 (*Wiper*): A) Superfície de folga e B) Superfície de saída.

A análise dos experimentos 10 e 11, apresenta o maior valor de rugosidade de  $1,16 \text{ } (\mu\text{m})$  para uma  $V_c = 267 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,16 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,24 \text{ (mm)}$  e o menor valor de  $0,31 \text{ } (\mu\text{m})$ , para  $V_c = 162,5 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,05 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,24 \text{ (mm)}$ . Comparando os resultados observa-se que para o menor avanço, obteve a menor rugosidade da peça.

Outro exemplo pode ser mostrado entre os experimentos 11 e 12 na Tabela 6.4. Para  $V_c = 162,5 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,05 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,24 \text{ (mm)}$ , os valores das rugosidades do experimento 11, é de  $0,31 \text{ } (\mu\text{m})$  e os valores do experimento 12, para  $V_c = 162,5 \text{ (m/min)}$ ,  $f =$

0,26 (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) é de  $1,25$  ( $\mu\text{m}$ ). Verifica-se que o avanço tem influência sobre a rugosidade, pois mantendo os mesmos valores de  $V_c$  e  $a_p$  para o menor valor de avanço, se obtém o menor valor de rugosidade da peça.

A Tabela 6.6 apresenta as respostas para os 19 experimentos realizados, em que se faz uma comparação entre os valores dos parâmetros adotados com as respostas obtidas.

Tabela 6.6 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 650 Wiper

<i>Experimento</i>	<i>T</i> (min)	<i>Tc</i> (min)	<i>Tt</i> (min)	<i>Kp</i> (U\$)	<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>MRR</i> ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	<i>Fr</i> (N)	<i>Tp°</i> (°C)	<i>RD</i> (dB)	<i>EEC</i> ( $\text{cm}^3/\text{N.min}$ )
1	61,00	1,57	2,32	2,42	0,45	2,78	1,50	344,23	485,67	70,43	0,00
2	32,25	0,69	1,41	1,49	0,54	3,63	3,38	240,57	648,77	92,44	0,01
3	50,50	0,69	1,47	1,87	0,98	4,58	3,38	438,47	465,48	85,67	0,01
4	30,00	0,31	1,03	1,22	1,22	5,15	7,59	246,54	632,87	97,55	0,03
5	62,25	1,57	2,39	2,93	0,55	3,64	3,30	448,59	476,53	78,75	0,00
6	28,50	0,69	1,45	1,72	0,62	3,76	7,43	248,68	551,23	96,87	0,03
7	50,50	0,69	1,53	2,24	0,93	4,78	7,43	461,43	486,72	80,53	0,01
8	27,50	0,31	1,02	1,10	0,89	4,18	16,71	250,93	582,54	94,68	0,06
9	58,00	1,68	2,52	3,09	0,67	3,85	2,24	493,54	420,86	85,62	0,00
10	23,50	0,36	1,07	1,15	1,16	4,92	10,44	228,39	521,23	91,69	0,04
11	37,50	1,68	2,46	2,70	0,31	1,87	2,24	330,49	493,64	88,66	0,01
12	40,00	0,36	1,10	1,39	1,25	5,22	10,44	365,23	532,86	87,37	0,02
13	49,50	0,59	1,31	1,42	0,91	4,56	2,34	335,93	549,87	88,32	0,00
14	46,00	0,59	1,37	1,81	0,72	3,10	10,33	369,38	560,98	86,86	0,02
15	42,00	0,59	1,37	1,81	0,31	1,64	6,34	341,43	493,75	88,77	0,01
16	42,50	0,59	1,37	1,79	0,32	1,87	6,34	338,76	463,65	86,64	0,01
17	41,50	0,59	1,37	1,83	0,35	1,89	6,34	339,28	467,83	87,91	0,01
18	42,00	0,59	1,37	1,79	0,32	1,86	6,34	340,55	461,45	86,82	0,01
19	43,00	0,59	1,37	1,77	0,34	1,87	6,34	337,23	465,66	86,81	0,01

É mostrado na Figura 6.10 a representação da superfície usinada para as condições estudadas no fim da vida da ferramenta.

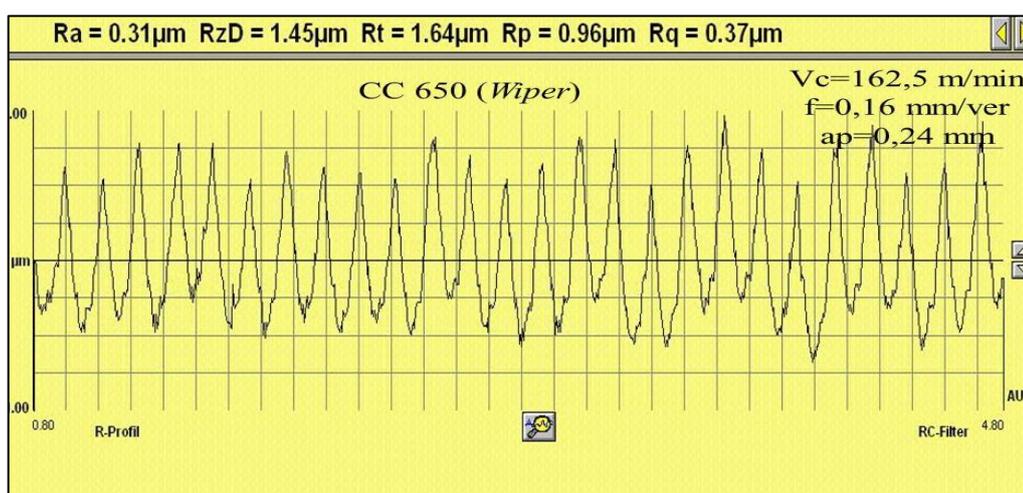


Figura 6.10 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 650 (Wiper).

A Figura 6.11 apresenta os efeitos principais para a rugosidade  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

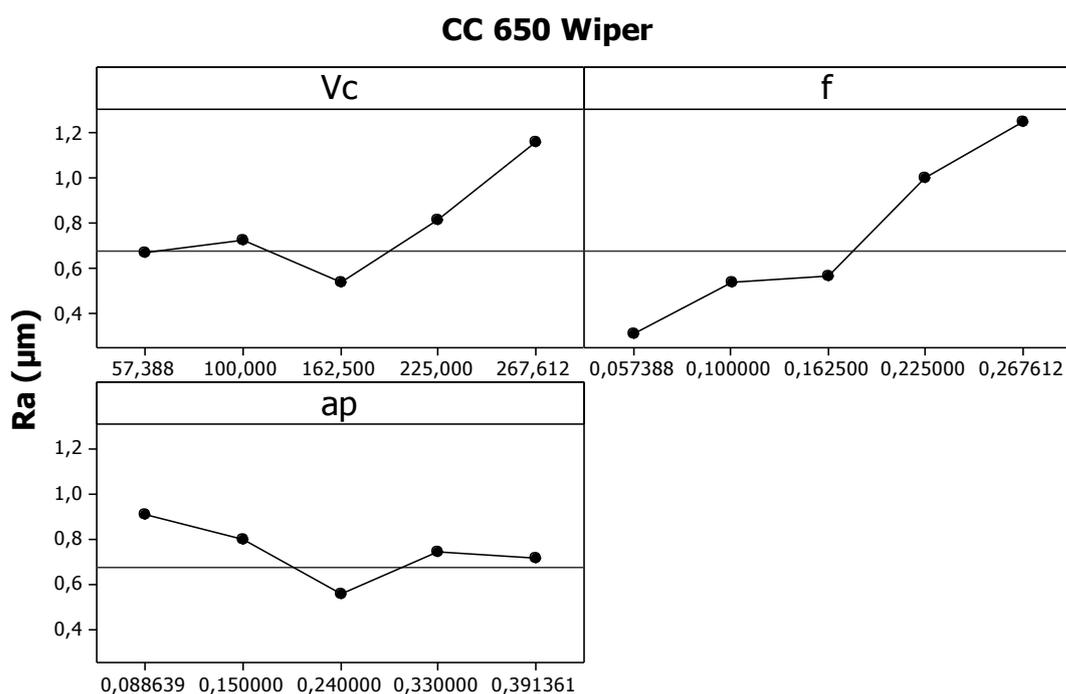


Figura 6.11 – Gráfico dos efeitos principais para  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 6.11. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem ( $f$ ). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, a

interação dupla entre a  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$ , porém com um nível de significância inferior ao nível de significância do avanço de usinagem.

A representação gráfica dos resultados apresenta que  $V_c$  foi o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta, sendo apresentado na Tabela 6.7.

Foram gerados na Tabela 6.6, os valores da vida da ferramenta, experimento 5 e 6,  $V_c = 100$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,33$  (mm), obteve vida da ferramenta de 58,5 min e no experimento 6, para  $V_c = 225$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,33$  (mm), obteve uma vida da ferramenta de 28,5 min.

Verifica-se que os valores de  $f$  e  $a_p$  permanecem iguais nos dois experimentos, mas existe uma mudança na  $V_c$ , isto é, a  $V_c$  do experimento 5 é duas vezes menor do que a  $V_c$  do experimento 6 e obteve duas vezes mais vida da ferramenta. Observa-se que a vida da ferramenta sofre influência da velocidade de corte, isto é, quanto menor a velocidade, maior é a vida e vice-versa.

Verifica-se também nos experimentos 7 e 8 ( $V_c = 100$  e  $225$  m/min) e 9 e 10 ( $V_c = 57$  e  $267$  m/min, pontos axiais), valores de vida maiores para as menores velocidades e pode-se verificar que a  $V_c$  é o fator que tem maior influência na vida da ferramenta e a profundidade não tem influência significativa na vida, conforme Tabela 6.7.

A Figura 6.12 apresenta os efeitos principais para a vida da ferramenta  $T$  (min) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

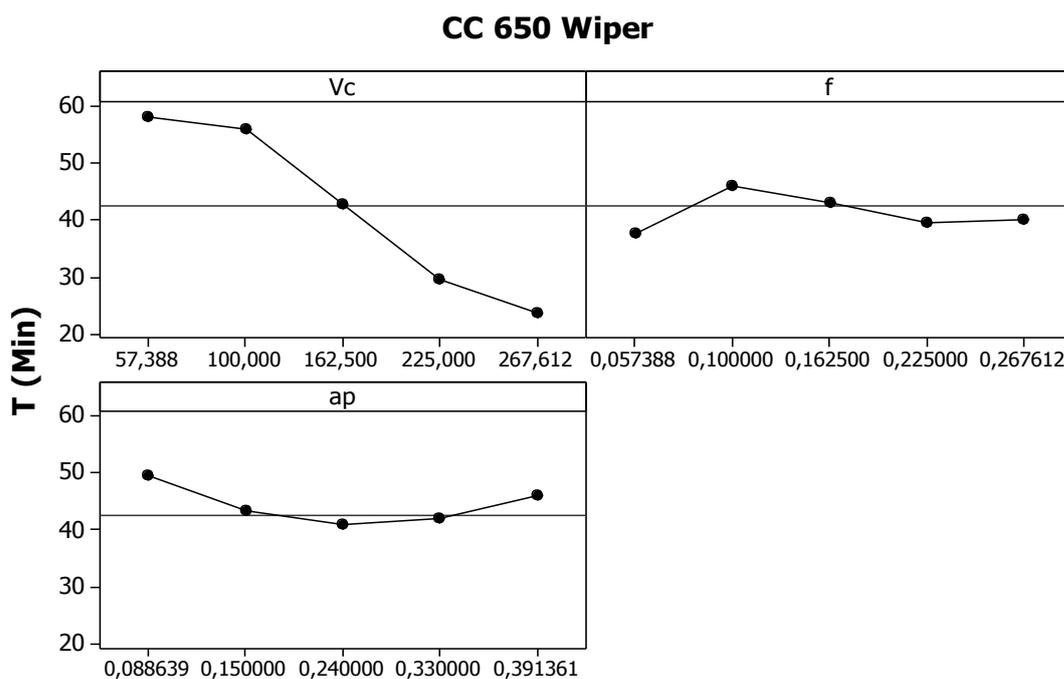


Figura 6.12 – Gráfico dos efeitos principais para  $T$  (min).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos no comportamento da vida da ferramenta, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos na Figura 6.12. Observa-se que o elemento que exerce maior influência na vida da ferramenta é a Vc. Em primeiro lugar, nota-se o fator velocidade de corte como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, mostrando que as interações não tiveram influência, de acordo com Tabela 6.5.

A Tabela 6.7 apresenta os resultados dos modelos das respostas com seus respectivos ajustes representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$  adj).

Tabela 6.7 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC650 Wiper

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>42,18</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,80</b>	<b>0,33</b>	<b>1,87</b>	<b>6,33</b>	<b>340,21</b>	<b>469,48</b>	<b>87,42</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,01</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,52</b>	0,08	0,20	<b>2,43</b>	<b>-84,34</b>	<b>49,04</b>	<b>5,59</b>	<b>0,01</b>
f	-1,55	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,31</b>	<b>0,25</b>	<b>0,76</b>	<b>2,43</b>	12,72	5,22	1,30	<b>0,01</b>
ap	-0,79	0,00	0,01	<b>0,12</b>	-0,03	-0,16	<b>2,37</b>	14,35	-8,57	0,16	<b>0,01</b>
Vc x Vc	-0,43	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	<b>0,18</b>	<b>0,89</b>	0,00	3,39	5,61	0,23	<b>0,00</b>
f x f	-1,13	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,07	<b>0,13</b>	<b>0,59</b>	0,00	-1,24	20,54	0,00	0,00
ap x ap	2,04	-0,01	-0,02	-0,07	<b>0,15</b>	<b>0,69</b>	-0,00	0,45	<b>35,45</b>	-0,14	-0,00
Vc x f	2,37	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,04	0,00	-0,12	<b>0,93</b>	-12,35	3,17	-1,76	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,93	-0,00	-0,01	-0,09	-0,03	-0,23	<b>0,91</b>	-14,35	-19,99	-0,20	<b>0,00</b>
f x ap	-0,00	-0,00	-0,01	-0,06	-0,07	-0,22	<b>0,91</b>	-10,63	9,69	-2,59	0,00
$R^2$ adj.	92,49%	96,96%	96,93%	96,77%	91,53%	90,57%	99,24%	95,31%	75,71%	49,18%	97,25%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value < 5%)

## 6.2.4 Ferramenta CC650

Para a ferramenta CC 6050 os principais tipos de desgaste apresentados pela Figura 6.13 (A) e (B) foi desgaste de flanco e cratera.

As arestas de corte foram fragilizadas devido à alteração da geometria da ferramenta em função do intenso desgaste de cratera. Ainda referente à Figura 6.13 (B), verifica-se que a progressão do desgaste de cratera alterou a geometria da superfície de saída de cavacos, reduzindo a resistência da aresta de corte, conseqüentemente favorecendo o surgimento de microlascamentos. Desta forma, uma das causas para o microlascamento pode ter sido a fragilidade da aresta depois da cratera formada. As severas marcas abrasivas no flanco da ferramenta influenciaram a rugosidade da peça usinada, mesmo sendo a região secundária de

corte, a qual aparenta possuir sulcos, a região da ferramenta com maior parcela na formação da rugosidade.

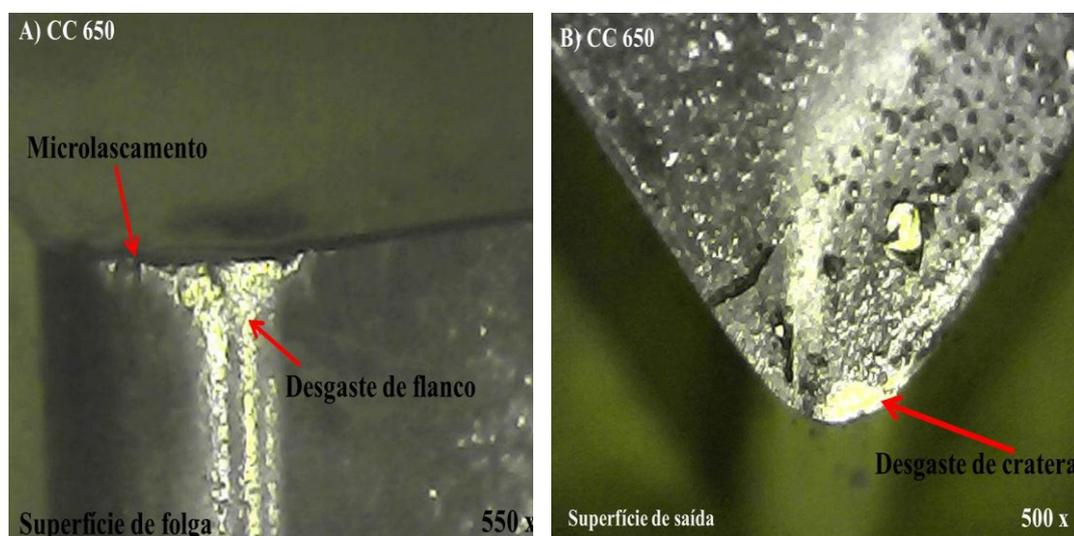


Figura 6.13 – CC 650 : A) Superfície de folga e B) Superfície de saída

A análise dos experimentos 10 e 11, apresenta o maior valor de rugosidade de  $0,65 \text{ } (\mu\text{m})$  para uma  $V_c = 267 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,16 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,24 \text{ (mm)}$  e o menor valor de  $0,26 \text{ } (\mu\text{m})$ , para  $V_c = 162,5 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,05 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,24 \text{ (mm)}$ . Comparando os resultados observa-se que para o menor avanço, obteve a menor rugosidade da peça.

Outro exemplo pode ser verificado entre os experimentos 11 e 12. Para  $V_c = 162,5 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,05 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,24 \text{ (mm)}$ , os valores das rugosidades do experimento 11, é de  $0,26 \text{ } (\mu\text{m})$  e os valores do experimento 12, para  $V_c = 162,5 \text{ (m/min)}$ ,  $f = 0,26 \text{ (mm/rev)}$  e  $a_p = 0,24 \text{ (mm)}$  é de  $1,63 \text{ } (\mu\text{m})$ . Verifica-se que o avanço tem influência sobre a rugosidade, pois mantendo os mesmos valores de  $V_c$  e  $a_p$  para o menor valor de avanço, se obtém o menor valor de rugosidade da peça.

Tabela 6.8 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 650

<i>Experimento</i>	<i>T</i> (min)	<i>Tc</i> (min)	<i>Tt</i> (min)	<i>Kp</i> (US)	<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>MRR</i> ( $\text{cm}^3$ /min)	<i>Fr</i> (N)	<i>Tp°</i> (°C)	<i>RD</i> (dB)	<i>EEC</i> ( $\text{cm}^3$ / N.min)
1	59,00	1,57	2,32	2,35	0,23	1,32	1,50	346,23	481,32	69,55	0,00
2	31,25	0,69	1,41	1,44	0,40	2,26	3,38	234,27	644,76	94,83	0,01
3	48,50	0,69	1,47	1,78	1,62	6,08	3,38	442,14	461,76	83,57	0,01
4	26,00	0,31	1,03	1,17	1,72	6,10	7,59	250,48	628,92	95,39	0,03
5	58,00	1,57	2,39	2,80	0,32	2,24	3,30	452,12	472,75	77,82	0,01
6	26,25	0,69	1,45	1,64	0,24	1,78	7,43	251,23	547,19	97,18	0,03
7	48,50	0,69	1,53	2,12	1,74	6,20	7,43	464,28	482,64	79,13	0,01
8	26,00	0,31	1,02	1,06	1,67	6,52	16,71	254,24	577,93	95,37	0,06
9	56,50	1,68	2,52	2,96	0,72	4,02	2,24	495,47	417,49	83,28	0,00
10	21,50	0,36	1,07	1,11	0,65	3,18	10,44	230,77	518,99	93,37	0,04
11	36,00	1,68	2,46	2,61	0,26	1,96	2,24	335,28	487,95	86,83	0,00
12	38,50	0,36	1,10	1,32	1,63	6,65	10,44	368,34	528,96	85,58	0,02
13	47,25	0,59	1,31	1,37	0,96	3,70	2,34	337,13	545,98	86,93	0,00
14	45,00	0,59	1,37	1,72	0,92	4,38	10,33	371,15	554,66	85,35	0,02
15	40,50	0,59	1,37	1,72	0,82	4,42	6,34	343,43	487,93	88,92	0,01
16	41,00	0,59	1,37	1,70	0,83	4,43	6,34	340,49	490,77	85,17	0,01
17	42,00	0,59	1,37	1,74	0,81	4,44	6,34	341,78	488,65	86,38	0,01
18	41,50	0,59	1,37	1,70	0,82	4,42	6,34	342,28	492,33	85,22	0,01
19	42,00	0,59	1,37	1,69	0,83	4,43	6,34	339,76	489,85	87,72	0,01

É mostrado na Figura 6.14 a representação da superfície usinada para as condições estudadas no fim da vida da ferramenta.

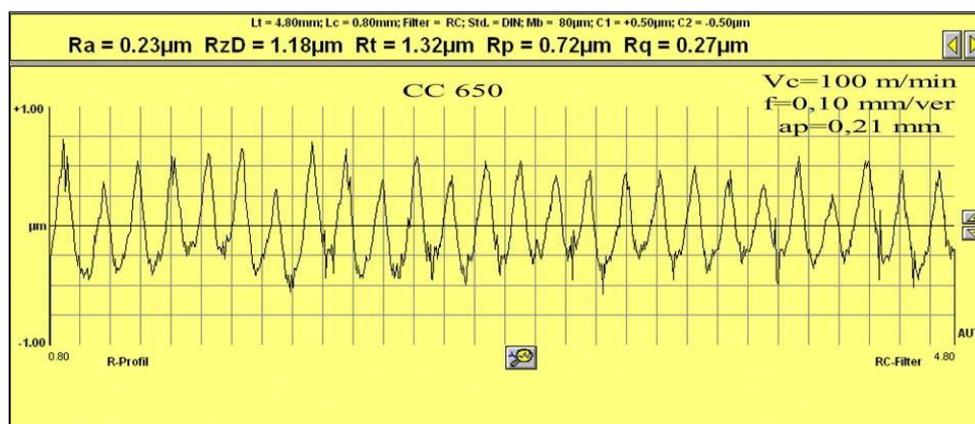


Figura 6.14 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC

650

A Figura 6.15 apresenta os efeitos principais para a rugosidade  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

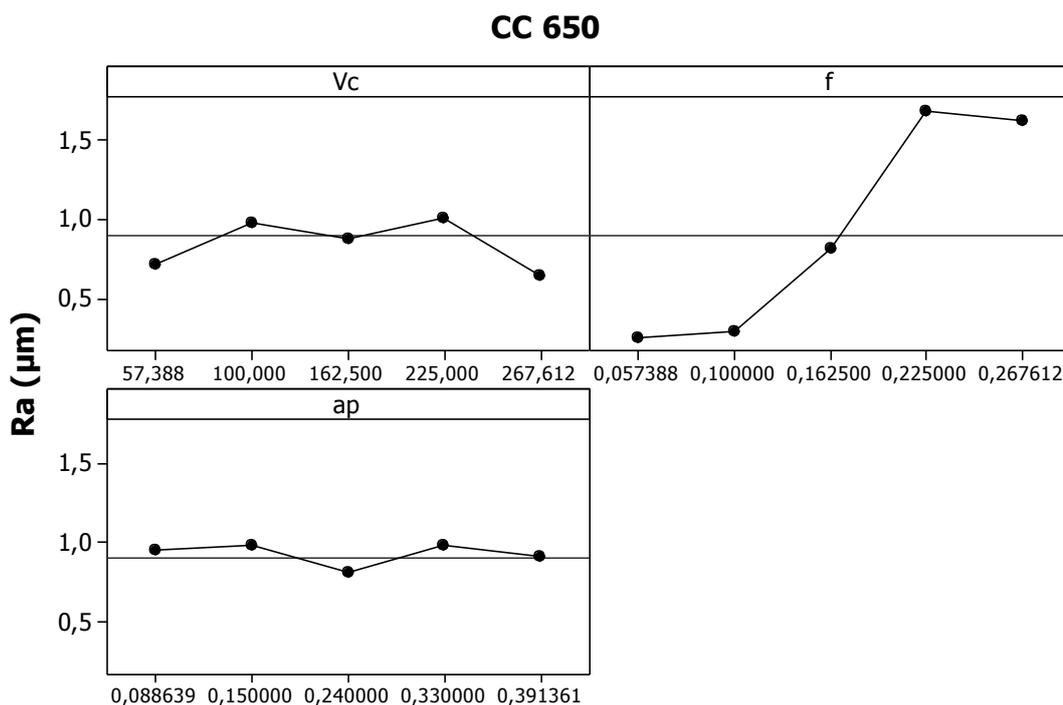


Figura 6.15 – Gráfico dos efeitos principais para Ra (µm).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 6.15. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem (f).

A representação gráfica dos resultados apresenta que a Vc foi o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta, sendo apresentado na Tabela 6.8.

Foram apresentados na Tabela 6.8, os valores da vida da ferramenta, experimento 11,  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve vida da ferramenta de 36 min e no experimento 12, para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,26$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve uma vida da ferramenta de 38,5 min, verifica-se que os valores de f e  $a_p$  são diferentes nos dois experimentos e a Vc se mantêm igual. Verifica-se que os resultados obtidos para os experimentos, foram praticamente iguais e mesmo alterando os valores de avanço, este não teve influência significativa na vida da ferramenta. Verifica-se também nos experimentos 7 e 8 ( $V_c = 100$  e  $225$  m/min) e 9 e 10 ( $V_c = 57$  e  $267$  m/min, pontos axiais), valores de vida maiores para as menores velocidades e verifica-se que a Vc é o fator que tem maior influência na vida da ferramenta.

A Figura 6.16 apresenta os efeitos principais para a vida da ferramenta T (min) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

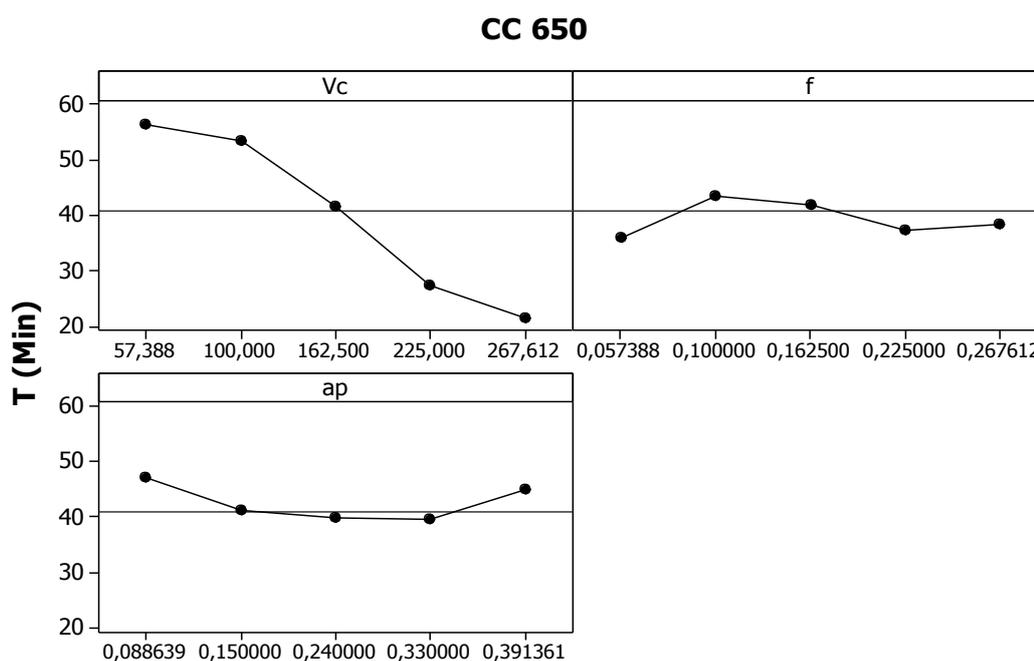


Figura 6.16 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).

A Tabela 6.8 apresenta os resultados dos modelos das respostas com seus respectivos ajustes representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$  adj).

Tabela 6.8 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC650

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>41,41</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,71</b>	<b>0,81</b>	<b>4,42</b>	<b>6,33</b>	<b>342,33</b>	<b>488,86</b>	<b>86,69</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-11,96</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,50</b>	0,00	-0,06	<b>2,43</b>	<b>-84,91</b>	<b>49,13</b>	<b>6,56</b>	<b>0,01</b>
f	-1,55	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,31</b>	<b>0,57</b>	<b>1,82</b>	<b>2,43</b>	13,39	5,43	0,87	<b>0,00</b>
ap	-0,71	0,00	0,01	<b>0,10</b>	-0,00	0,13	<b>2,37</b>	15,08	-8,90	0,25	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,91	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	-0,01	-0,26	0,00	3,28	-1,90	0,51	<b>0,00</b>
f x f	-1,53	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,07	0,07	-0,01	0,00	-0,71	12,31	-0,23	0,00
ap x ap	1,60	-0,01	-0,02	-0,07	0,07	-0,10	-0,00	0,10	27,11	-0,25	-0,00
Vc x f	1,81	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,04	-0,00	<b>0,017</b>	<b>0,93</b>	-11,10	3,07	-2,07	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,50	-0,00	-0,01	-0,08	-0,05	-0,10	<b>0,91</b>	-13,41	-20,10	-0,18	<b>0,00</b>
f x ap	0,75	-0,00	-0,00	-0,05	0,01	0,04	<b>0,91</b>	-12,11	9,50	-1,88	<b>0,00</b>
$R^2$ adj.	92,84%	96,96%	96,93%	96,79%	86,60%	89,96%	99,24%	95,13%	73,81%	60,03%	97,26%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos no comportamento da vida da ferramenta, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos na Figura 6.16. Observa-se que o elemento que exerce maior influência na vida da ferramenta é a Vc. Em primeiro lugar, nota-se o fator velocidade de corte como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, mostrando que as interações não tiveram influência de acordo com Tabela 6.8.

### 6.2.5 Ferramenta CC670

Para a ferramenta CC 670 os principais tipos de desgaste apresentados pela Figura 6.17 (A) e (B) foi desgaste de flanco, cratera e entalhe. O desgaste de flanco se deu pelo motivo de ser o mais comum observado no processo de torneamento e foi causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça, o desgaste de cratera ocorreu na superfície de saída da ferramenta e foi gerado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco e o desgaste de entalhe ocorreu na região de contato ferramenta/peça. É mostrado na Figura 6.17 (A) a ponta da ferramenta e na Figura 6.17 (B) a superfície de folga com as marcas abrasivas do desgaste de flanco e do desgaste de entalhe..

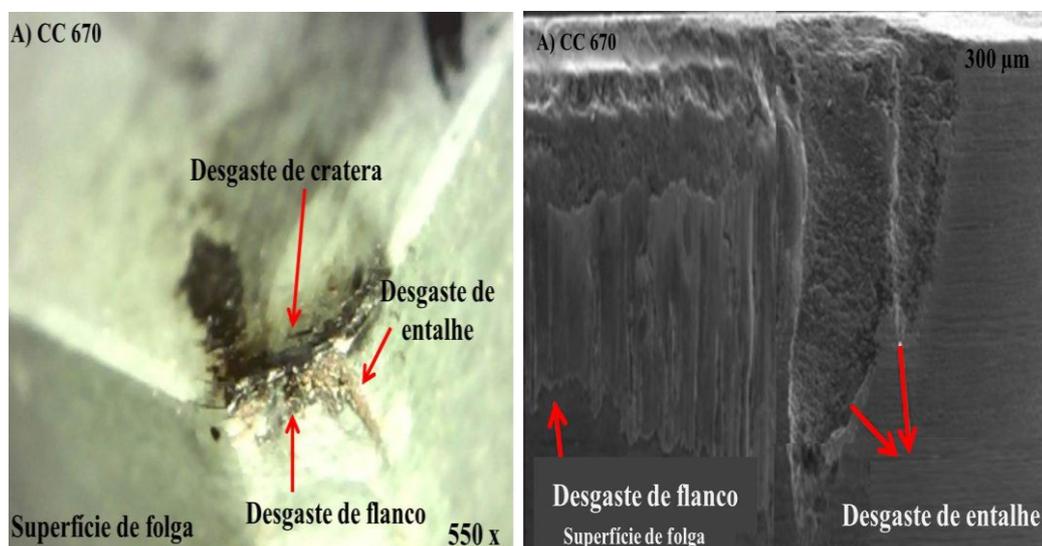


Figura 6.17 – CC 670: A) Superfície de folga e B) Superfície de saída

A análise dos experimentos realizadas apresentou valores de rugosidades e de vida da ferramenta comparados com as das ferramentas anteriores. Mas analisando quais foram os fatores que tiveram maior influência na rugosidade.

Por exemplo, os experimentos de número 1 e 17, para  $V_c = 100$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,15$  (mm) apresenta valor de rugosidade de  $0,14$  ( $\mu m$ ), para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,16$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) também apresenta valor de rugosidade de  $0,14$  ( $\mu m$ ).

Como o avanço tem influência significativa sobre a rugosidade, verifica-se que nestes experimentos, com avanços diferentes, a rugosidade apresentou o mesmo valor de  $0,14$  ( $\mu m$ ) para ambos.

A Figura 6.18, aparentemente apresenta pontos da  $V_c$  e  $a_p$  em um intervalo de valores que podem ter contribuído para uma possível influência nos valores da rugosidade. Pois quando são analisados os modelos quadráticos completos, Tabela 6.11, temos as interações  $f \times f$ ,  $V_c \times f$  e  $f \times a_p$  como termos significativos.

Tabela 6.10 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta CC 670

<i>Experimento</i>	<i>T</i> (min)	<i>T<sub>c</sub></i> (min)	<i>T<sub>t</sub></i> (min)	<i>K<sub>p</sub></i> (U\$)	<i>R<sub>a</sub></i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>R<sub>t</sub></i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>MRR</i> ( $\text{cm}^3$ /min)	<i>Fr</i> (N)	<i>T<sub>p</sub></i> <sup>o</sup> (°C)	<i>RD</i> (dB)	<i>EEC</i> ( $\text{cm}^3$ / N.min)
1	59,50	1,57	2,32	2,99	0,14	1,18	1,50	137,92	446,50	68,48	0,01
2	35,50	0,69	1,41	1,87	0,13	1,09	3,38	129,22	619,27	93,19	0,02
3	50,50	0,69	1,47	2,60	0,52	2,82	3,38	198,86	437,64	78,36	0,01
4	31,00	0,31	1,03	1,65	0,71	3,52	7,59	182,79	603,51	93,75	0,04
5	60,00	1,57	2,39	3,97	0,33	2,44	3,30	207,89	447,46	73,83	0,01
6	29,50	0,69	1,45	2,31	0,11	0,66	7,43	191,19	524,35	94,29	0,03
7	50,50	0,69	1,53	3,33	0,10	1,14	7,43	317,90	459,86	77,83	0,02
8	29,50	0,31	1,02	1,41	0,54	2,23	16,71	298,73	559,19	96,36	0,05
9	59,00	1,68	2,52	4,20	0,22	1,74	2,24	397,71	393,57	82,22	0,00
10	28,00	0,36	1,07	1,48	0,29	1,42	10,44	222,56	495,14	97,45	0,04
11	38,00	1,68	2,46	3,44	0,13	1,18	2,24	152,65	463,29	84,28	0,01
12	40,00	0,36	1,10	1,94	0,49	2,60	10,44	163,46	503,23	86,63	0,06
13	49,25	0,59	1,31	1,81	0,22	1,48	2,34	198,17	522,56	87,78	0,01
14	48,00	0,59	1,37	2,56	0,12	0,92	10,33	221,96	524,28	86,85	0,04
15	44,50	0,59	1,37	2,57	0,13	0,98	6,34	218,75	466,52	87,57	0,02
16	44,00	0,59	1,37	2,54	0,15	0,97	6,34	219,93	398,94	84,87	0,02
17	45,00	0,59	1,37	2,61	0,14	0,96	6,34	216,86	436,86	86,38	0,02
18	45,50	0,59	1,37	2,53	0,14	0,98	6,34	217,59	458,69	83,56	0,02
19	44,50	0,59	1,37	2,50	0,13	0,97	6,34	218,15	463,28	86,19	0,02

A Figura 6.18 apresenta os efeitos principais para a rugosidade  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores e suas respectivas interações, sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 6.15. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem ( $f$ ). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, as interações com um nível de significância mínimo ao nível de

significância do avanço de usinagem. A representação gráfica dos resultados apresenta que o avanço foi o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta, de acordo com a Tabela 6.11.

A Figura 6.18 apresenta os efeitos principais para a rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem de 0,24 mm.

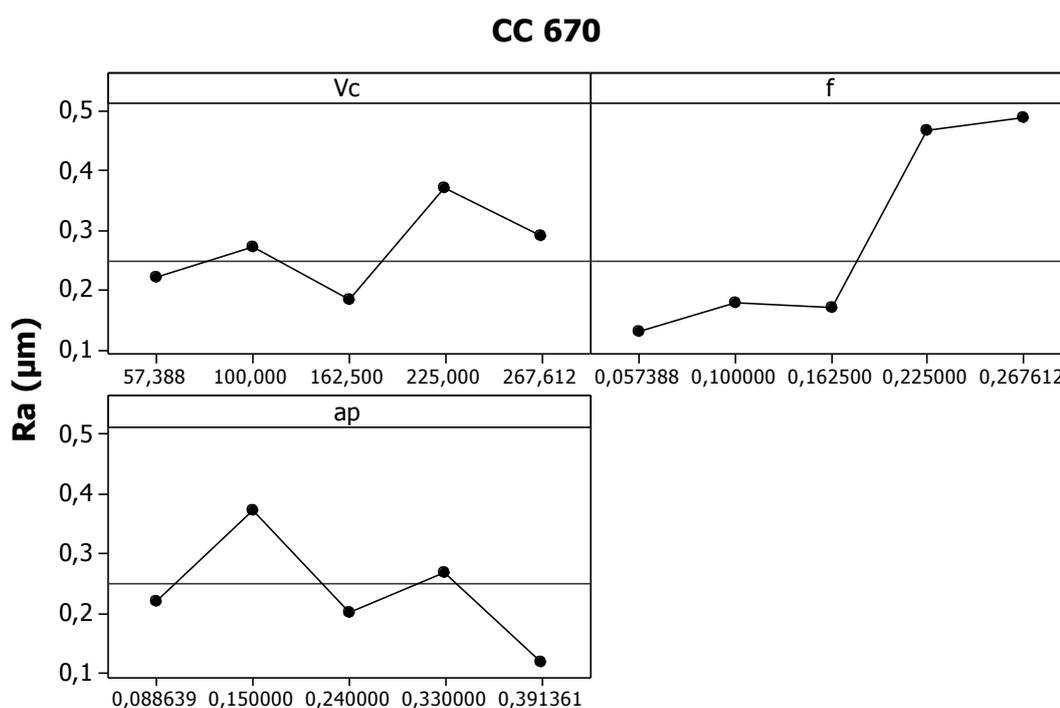


Figura 6.18 – Gráfico dos efeitos principais para Ra ( $\mu\text{m}$ ).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores e suas respectivas interações, sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 6.18. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem (f). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, a interação dupla entre a Vcxf, fxf e apxf, porém com um nível de significância inferior ao nível de significância do avanço de usinagem. A representação gráfica dos resultados apresenta que o avanço foi o parâmetro de maior influência na rugosidade, sendo apresentado na Tabela 6.11.

A Figura 6.19 apresenta a superfície de resposta para a rugosidade média em função da velocidade de corte, do avanço e profundidade de corte. A análise do gráfico, evidencia o fato de que, o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média da superfície usinada é o avanço de corte (f).

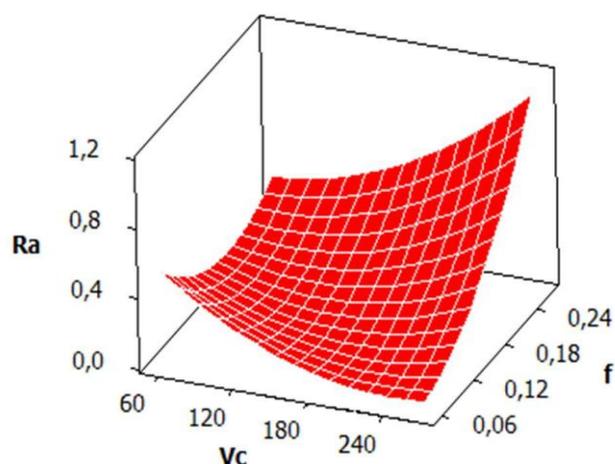


Figura 6.19 – Gráfico da superfície de resposta para Ra ( $\mu\text{m}$ ).

A Figura 6.20 apresenta a representação da superfície usinada para as condições estudadas no fim da vida da ferramenta.

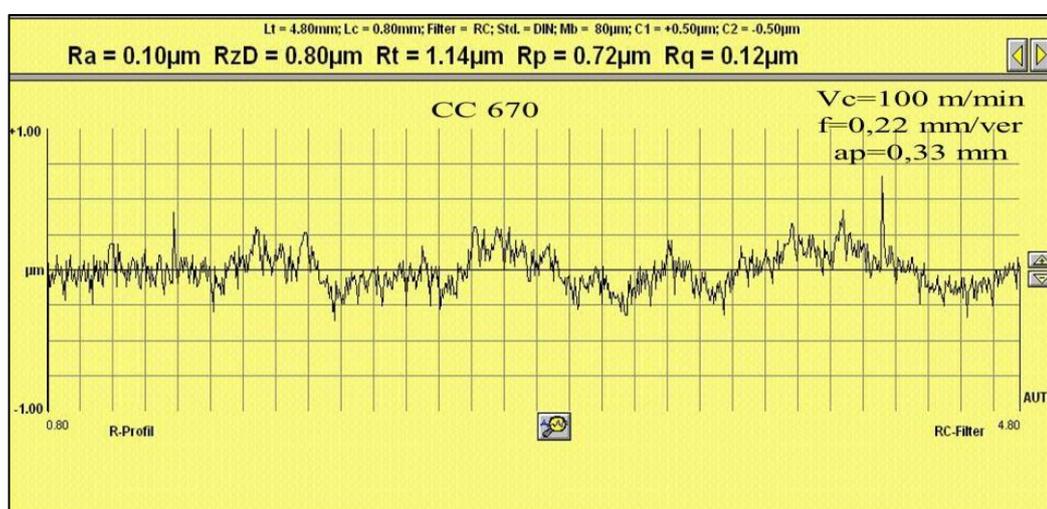


Figura 6.20 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta CC 670

Foram apresentados na Tabela 6.9, os valores da vida da ferramenta, experimento 11, para uma  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve vida da ferramenta de 38 min e no experimento 12, para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,26$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve uma vida da ferramenta de 40 min.

Verifica-se que os valores de  $f$  e  $a_p$  são diferentes nos dois experimentos e a  $V_c$  se mantém igual. Os resultados obtidos para os experimentos foram praticamente iguais e mesmo alterando os valores de avanço não apresenta influência significativa na vida da

ferramenta. Verifica-se também nos experimentos 7 e 8 ( $V_c = 100$  e  $225$  m/min) e 9 e 10 ( $V_c = 57$  e  $267$  m/min, pontos axiais), valores de vida maiores para as menores velocidades. Pode-se concluir que a  $V_c$  é o fator que tem maior influência na vida da ferramenta.

A Figura 6.21 apresenta os efeitos principais para a vida da ferramenta  $T$  (min) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos no comportamento da vida da ferramenta, podem ser obtidas avaliando-se os resultados dispostos na Figura 6.21. Observa-se que os elementos que exercem maior influência na vida da ferramenta é a  $V_c$ . Em primeiro lugar, nota-se o fator velocidade de corte como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, mostrando que as interações não tiveram influência de acordo com Tabela 6.11.

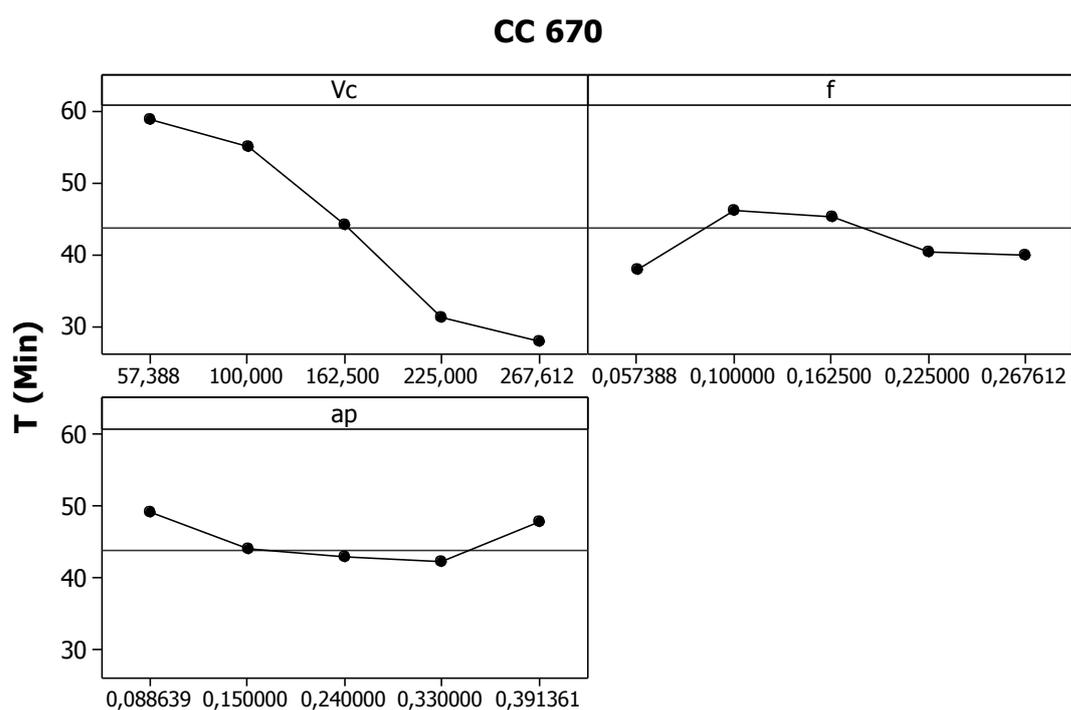


Figura 6.21 – Gráfico dos efeitos principais para  $T$  (min).

A Tabela 6.11 apresenta os resultados dos modelos das respostas com seus respectivos ajustes representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$ adj).

Tabela 6.11 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC670

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>44,71</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>2,55</b>	<b>0,13</b>	<b>0,96</b>	<b>6,33</b>	<b>218,97</b>	<b>443,84</b>	<b>85,83</b>	<b>0,02</b>
Vc	<b>-10,77</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,74</b>	0,03	-0,00	<b>2,43</b>	-26,00	<b>50,20</b>	<b>7,66</b>	<b>0,01</b>
f	-1,43	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,34</b>	<b>0,12</b>	<b>0,44</b>	<b>2,4</b>	25,64	6,57	1,49	<b>0,00</b>
ap	-0,66	0,00	0,01	<b>0,23</b>	-0,04	-0,26	<b>2,37</b>	29,79	-8,28	0,51	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,50	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,09	0,05	0,26	0,00	28,54	5,40	0,78	-0,00
f x f	-2,10	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,03	<b>0,07</b>	<b>0,37</b>	0,00	-25,22	19,16	-0,75	0,00
ap x ap	1,30	-0,01	-0,02	-0,14	0,02	0,12	-0,00	-6,84	<b>33,36</b>	-0,10	-0,00
Vc x f	1,75	<b>0,1</b>	<b>0,11</b>	-0,01	<b>0,10</b>	<b>0,53</b>	<b>0,93</b>	-1,23	1,94	-1,40	0,00
Vc x ap	-1,00	-0,00	-0,01	<b>-0,18</b>	0,00	-0,08	<b>0,91</b>	-1,38	-20,30	-0,13	0,00
f x ap	0,50	-0,00	-0,00	-0,11	<b>-0,09</b>	<b>-0,55</b>	<b>0,91</b>	12,88	8,98	-0,54	0,00
R <sup>2</sup> adj.	92,42%	96,96%	96,93%	96,68%	82,59%	79,68%	99,24%	52,14%	69,69%	69,90%	82,79%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value< 5%).

### 6.2.6 Ferramenta PCBN 7025 (*Wiper*)

Para a ferramenta PCBN 7025 (*Wiper*) os principais tipos de desgaste apresentados pela Figura 6.22 (A) e (B) foi o desgaste de flanco e cratera.

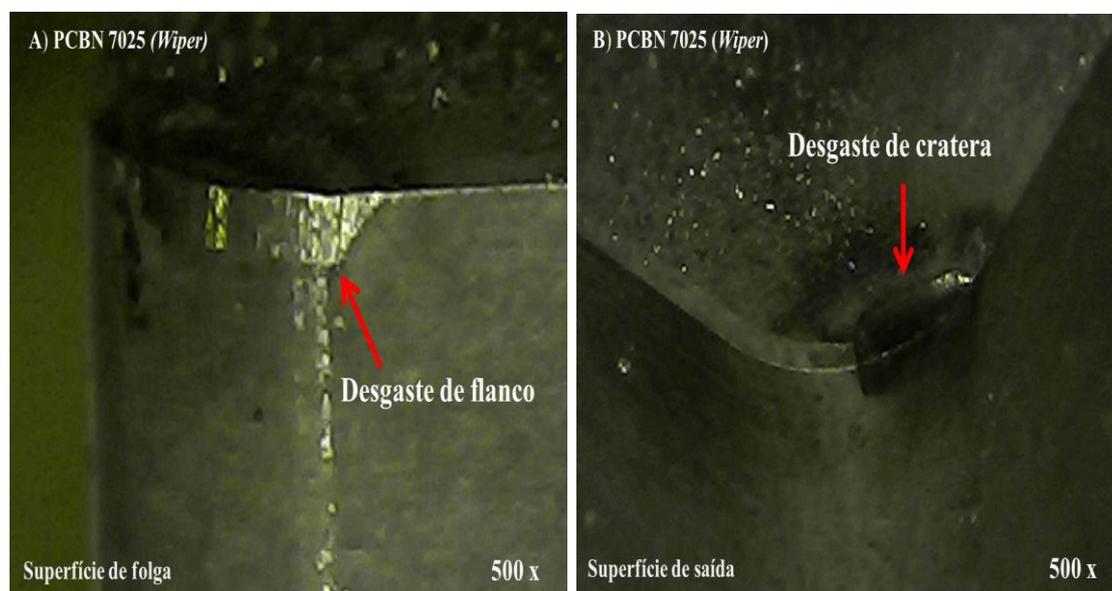


Figura 6.22 – PCBN 7025 (*Wiper*): A) Superfície de folga e B) Superfície de saída

Comparando os desgastes das ferramentas, a ferramenta PCBN 7025 (*Wiper*) obteve pequenos valores de rugosidade. A rugosidade da peça usinada ao final da vida da ferramenta PCBN 7025 (*Wiper*) teve valores comparativos ao da retificação.

A análise dos experimentos 10 e 11 respectivamente, apresenta valor de rugosidade de 0,15 ( $\mu\text{m}$ ) para uma  $V_c = 267$  (m/min),  $f = 0,16$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) e valor de 0,12 ( $\mu\text{m}$ ), para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm). Comparando os resultados observa-se que o menor avanço, obteve a menor rugosidade da peça.

Tabela 6.12 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta PCBN 7025 *Wiper*

<i>Experimento</i>	<i>T</i> (min)	<i>Tc</i> (min)	<i>Tt</i> (min)	<i>Kp</i> (U\$)	<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>MRR</i> ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	<i>Fr</i> (N)	<i>Tp°</i> (°C)	<i>RD</i> (dB)	<i>EEC</i> ( $\text{cm}^3/\text{N.min}$ )
1	70,00	1,57	2,32	7,00	0,13	1,08	1,50	342,44	496,80	65,50	0,00
2	35,00	0,69	1,41	4,57	0,09	0,76	3,38	238,62	659,2	88,30	0,01
3	57,00	0,69	1,47	7,75	0,52	3,17	3,38	434,35	477,65	70,87	0,00
4	32,50	0,31	1,03	4,70	0,26	1,34	7,59	243,65	643,56	89,87	0,03
5	67,00	1,57	2,39	11,30	0,14	1,20	3,30	446,41	487,43	66,76	0,00
6	33,00	0,69	1,45	6,47	0,12	1,36	7,43	246,74	564,32	89,90	0,03
7	55,00	0,69	1,53	10,94	0,48	2,30	7,43	454,53	499,80	72,54	0,01
8	31,50	0,31	1,02	3,65	0,45	2,40	16,71	248,45	599,10	90,50	0,06
9	63,00	1,68	2,52	11,99	0,29	2,04	2,24	497,71	433,55	78,49	0,00
10	28,25	0,36	1,07	3,80	0,15	1,08	10,44	226,56	535,10	98,79	0,04
11	42,50	1,68	2,46	8,67	0,12	0,66	2,24	325,65	503,22	81,34	0,00
12	44,50	0,36	1,10	5,79	0,54	2,36	10,44	362,56	543,28	83,46	0,02
13	54,50	0,59	1,31	4,59	0,15	1,12	2,34	332,67	562,54	82,31	0,00
14	51,50	0,59	1,37	7,88	0,15	1,96	10,33	365,98	574,29	83,57	0,02
15	46,50	0,59	1,37	7,92	0,15	1,08	6,34	338,75	506,54	84,56	0,01
16	45,50	0,59	1,37	7,77	0,16	1,08	6,34	336,93	478,98	83,45	0,01
17	47,50	0,59	1,37	8,09	0,14	1,07	6,34	337,77	576,89	85,36	0,01
18	47,00	0,59	1,37	7,75	0,17	1,07	6,34	335,69	498,65	84,66	0,01
19	46,50	0,59	1,37	7,72	0,16	1,09	6,34	339,13	503,21	86,78	0,01

Outro exemplo pode ser mostrado entre os experimentos 11 e 12 na Tabela 6.12,  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), com valores de rugosidades de 0,12 ( $\mu\text{m}$ ) e para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,26$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) é de 0,54 ( $\mu\text{m}$ ).

Verifica-se que o avanço tem influência sobre a rugosidade, pois mantendo os mesmos valores de  $V_c$  e  $a_p$  para o menor valor de avanço, se obtém o menor valor de rugosidade da peça.

A Figura 6.23 apresenta os efeitos principais para a rugosidade  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem. Conforme resultados

mostrados na Tabela 6.13. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem (f). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, a interação dupla fxf, porém com um nível de significância inferior ao nível de significância do avanço de usinagem.

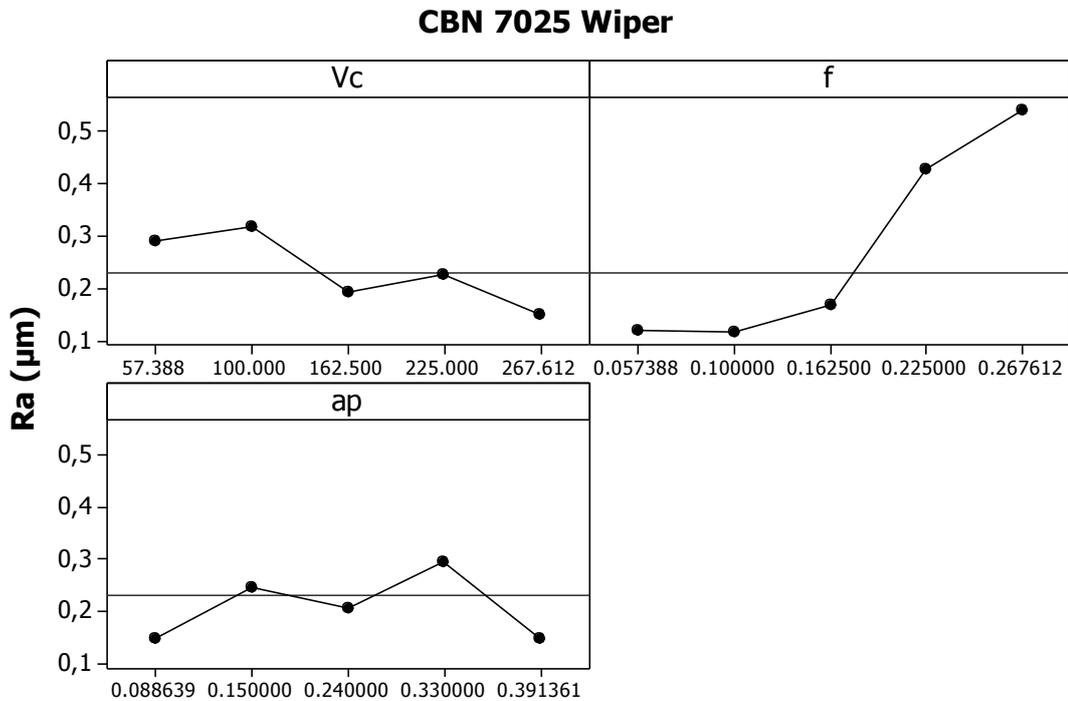


Figura 6.23 – Gráfico dos efeitos principais para Ra (µm).

É mostrado na Figura 6.24 a representação da superfície usinada para as condições estudadas no fim da vida da ferramenta.

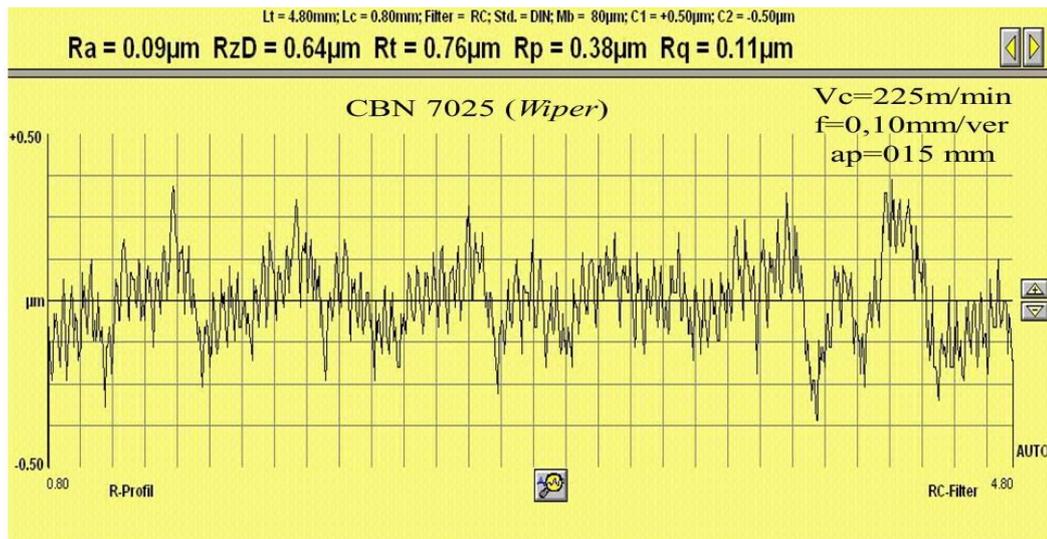


Figura 6.24 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta PCBN 7025 (Wiper)

Foram apresentados na Tabela 6.12, os valores da vida da ferramenta, experimento 11, para uma  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve vida da ferramenta de 42,5 min e no experimento 12, para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,26$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve vida da ferramenta de 44,5 min.

A Figura 6.25 apresenta os efeitos principais para a vida da ferramenta T (min) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

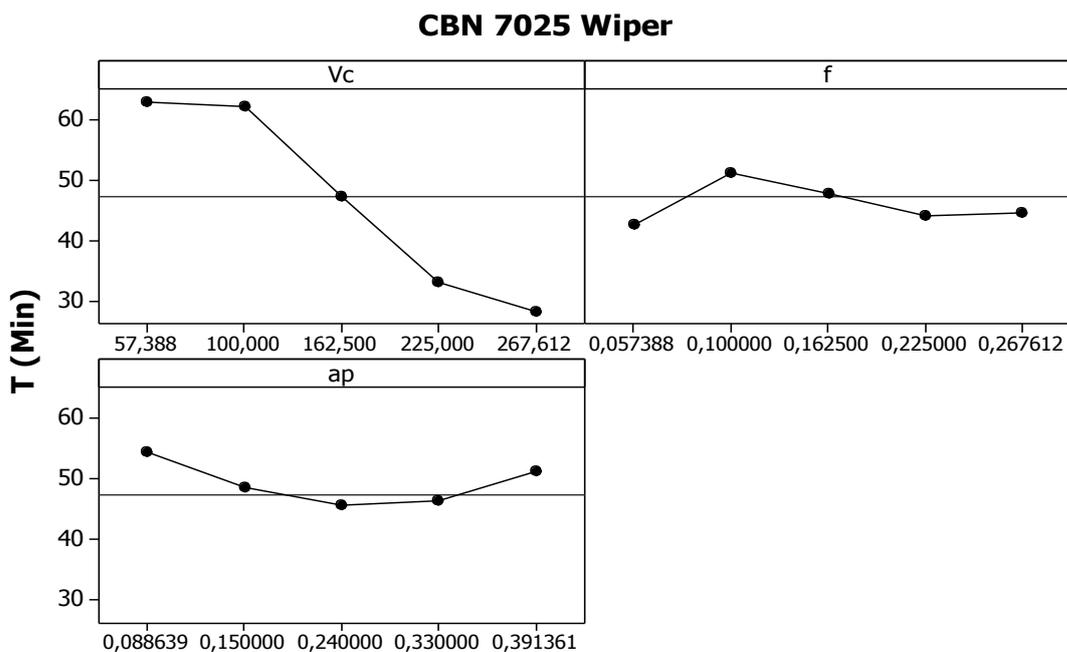


Figura 6.25 – Gráfico dos efeitos principais para T (min).

Verifica-se que os valores de  $f$  e  $ap$  são diferentes nos dois experimentos e a  $V_c$  se mantém igual. Verifica-se que os resultados obtidos para os experimentos foram praticamente iguais e, mesmo alterando os valores de avanço, não teve influência significativa na vida da ferramenta. Nos experimentos 7 e 8 ( $V_c = 100$  e  $225$  m/min) e 9 e 10 ( $V_c = 57$  e  $267$  m/min, pontos axiais), valores de vida maiores para as menores velocidades. Pode-se concluir que a  $V_c$  é o fator que tem maior influência na vida da ferramenta.

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos e suas interações no comportamento da vida da ferramenta, pode ser obtida avaliando-se os resultados dispostos na Figura 6.25. Observa-se que os elementos que exercem maior influência na vida da ferramenta é a  $V_c$ . Em primeiro lugar, nota-se o fator velocidade de corte como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, mostrando que as interações não tiveram influência de acordo com Tabela 6.13.

A Tabela 6.13 apresenta os resultados dos modelos das respostas com seus respectivos ajustes representado através do coeficiente de determinação ( $R^2$  adj).

Tabela 6.13 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CBN 7025 Wiper

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	46,59	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>7,85</b>	0,15	1,07	<b>6,33</b>	<b>338,46</b>	<b>511,79</b>	<b>85,12</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,84</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-2,29</b>	<b>-0,04</b>	-0,25	<b>2,43</b>	<b>-84,66</b>	<b>49,44</b>	<b>9,43</b>	<b>0,01</b>
f	-1,87	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,52</b>	<b>0,14</b>	<b>0,56</b>	<b>2,43</b>	12,36	5,83	1,23	<b>0,00</b>
ap	-0,95	0,00	0,01	<b>1,01</b>	0,01	0,17	<b>2,37</b>	14,13	-7,82	0,53	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,30	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,00	0,02	0,19	0,00	4,21	-4,24	-0,81	<b>0,00</b>
f x f	-1,05	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	-0,22	<b>0,06</b>	0,18	0,00	-2,15	9,51	-1,78	0,00
ap x ap	2,30	-0,01	-0,02	<b>-0,57</b>	0,00	0,19	-0,00	-0,31	25,48	-1,59	0,00
Vc x f	2,62	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	<b>-0,38</b>	-0,02	-0,19	<b>0,93</b>	-11,66	3,24	-1,12	<b>0,00</b>
Vc x ap	0,25	-0,00	-0,01	<b>-0,83</b>	0,03	0,30	<b>0,91</b>	-13,90	-19,01	-0,08	<b>0,00</b>
f x ap	0,25	-0,00	-0,00	<b>-0,50</b>	0,01	-0,07	<b>0,91</b>	-10,88	10,24	-0,07	0,00
$R^2$ adj.	90,56%	96,96%	96,93%	96,62%	92,92%	90,35%	99,24%	95,33%	57,51%	74,77%	97,20%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos (P-Value < 5%)

## 6.2.7 Ferramenta PCBN 7025

Para a ferramenta PCBN 7025 os principais tipos de desgaste apresentados pela Figura 6.26 (A) e (B) foi desgaste de de flanco.

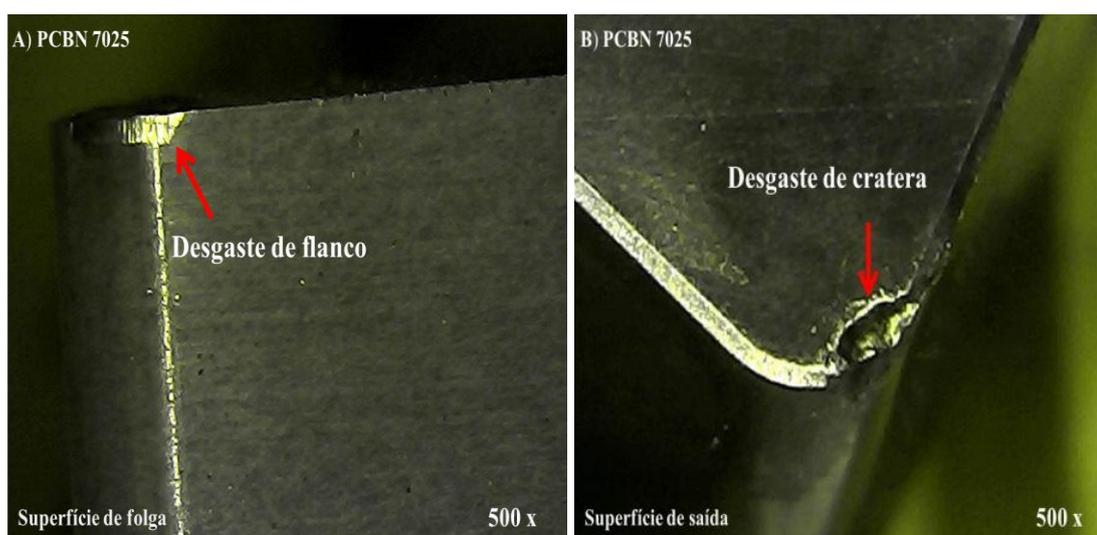


Figura 6.26 – PCBN 7025: A) Superfície de folga e B) Superfície de saída

As arestas de corte foram fragilizadas devido a alteração da geometria da ferramenta em função do intenso desgaste de cratera. A rugosidade da peça usinada ao final da vida da ferramenta PCBN 7025 atingiu elevados valores, bem acima dos obtidos pelo processo de retificação.

A análise dos experimentos 10 e 11 na Tabela 6.14, respectivamente, apresenta o maior valor de rugosidade de  $1,17 (\mu m)$  para  $V_c = 267$  (m/min),  $f = 0,16$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) e o menor valor de  $0,31 (\mu m)$ , para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm). Comparando os resultados observa-se que o menor avanço, obteve a menor rugosidade da peça, mesmo com velocidades de corte diferentes.

Outro exemplo pode ser apresentado entre os experimentos 11 e 12. Para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), os valores das rugosidades do experimento 11, é de  $0,31 (\mu m)$  e os valores do experimento 12, para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,26$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm) é de  $2,14 (\mu m)$ . Verifica-se que o avanço tem influência sobre a rugosidade, pois mantendo os mesmos valores de  $V_c$  e  $a_p$  para o menor valor de avanço, se obtém o menor valor de rugosidade da peça.

Verifica-se que o avanço de  $0,05$  (mm/rev) alcançou baixas rugosidades e acima destes valores as rugosidades foram superiores a  $0,7 (\mu m)$ . Verifica-se que os parâmetros adotados para esta ferramenta não foram adequados para obtenção de baixa rugosidade, em comparação com as outras ferramentas.

A Figura 6.27 apresenta os efeitos principais para a rugosidade  $R_a (\mu m)$  em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

Tabela 6.14 – Respostas da matriz experimental (CCD) ferramenta PCBN 7025

<i>Experimento</i>	<i>T</i> (min)	<i>Tc</i> (min)	<i>Tt</i> (min)	<i>Kp</i> (U\$)	<i>Ra</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>Rt</i> ( $\mu\text{m}$ )	<i>MRR</i> ( $\text{cm}^3$ /min)	<i>Fr</i> (N)	<i>Tp°</i> (°C)	<i>RD</i> (dB)	<i>EEC</i> ( $\text{cm}^3$ / N.min)
1	66,00	1,57	2,32	3,66	0,62	3,00	1,50	346,87	465,55	67,35	0,00
2	33,00	0,69	1,41	2,33	0,64	3,00	3,38	242,23	627,18	89,50	0,01
3	54,00	0,69	1,47	3,47	2,14	7,26	3,38	438,69	443,28	74,49	0,00
4	30,00	0,31	1,03	2,17	2,15	7,42	7,59	247,78	611,33	90,93	0,03
5	63,00	1,57	2,39	5,20	0,65	3,02	3,30	460,97	446,29	68,57	0,00
6	31,50	0,69	1,45	3,01	0,62	2,84	7,43	244,27	538,57	91,87	0,03
7	53,00	0,69	1,53	4,61	1,93	6,78	7,43	458,47	467,49	74,77	0,01
8	31,50	0,31	1,02	1,79	2,39	8,28	16,71	251,65	568,82	92,29	0,06
9	60,50	1,68	2,52	5,51	0,67	2,90	2,24	498,39	402,38	79,83	0,00
10	25,50	0,36	1,07	1,87	1,17	4,62	10,44	229,99	504,39	99,27	0,04
11	40,00	1,68	2,46	4,32	0,31	1,84	2,24	330,76	462,39	83,52	0,00
12	41,50	0,36	1,10	2,58	2,14	7,44	10,44	365,33	502,77	85,87	0,02
13	51,50	0,59	1,30	2,28	1,20	4,56	2,34	336,28	523,72	84,59	0,00
14	48,50	0,59	1,37	3,46	0,70	3,10	10,33	368,76	545,49	85,66	0,02
15	43,50	0,59	1,37	3,47	0,81	3,94	6,34	343,84	475,67	86,49	0,01
16	44,50	0,59	1,37	3,42	0,82	3,15	6,34	342,92	437,34	83,91	0,01
17	42,50	0,59	1,37	3,53	0,83	3,32	6,34	341,33	537,92	84,77	0,01
18	43,25	0,59	1,37	3,41	0,81	3,96	6,34	340,28	458,48	85,84	0,01
19	44,00	0,59	1,37	3,36	0,83	3,82	6,34	343,76	447,38	86,59	0,01

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos fatores, sobre os valores da rugosidade média é fornecida pela Figura 6.27. Pode-se observar que o fator que maior influência exerce nos valores da rugosidade média é o avanço de usinagem ( $f$ ). Segue-se a este fator, considerando-se o nível de significância sobre os valores da rugosidade média, a interação dupla  $fxf$ , porém com um nível de significância inferior ao nível de significância do avanço de usinagem. A representação gráfica dos resultados apresenta que o avanço foi o parâmetro de maior influência na vida da ferramenta, sendo apresentado na Tabela 6.15.

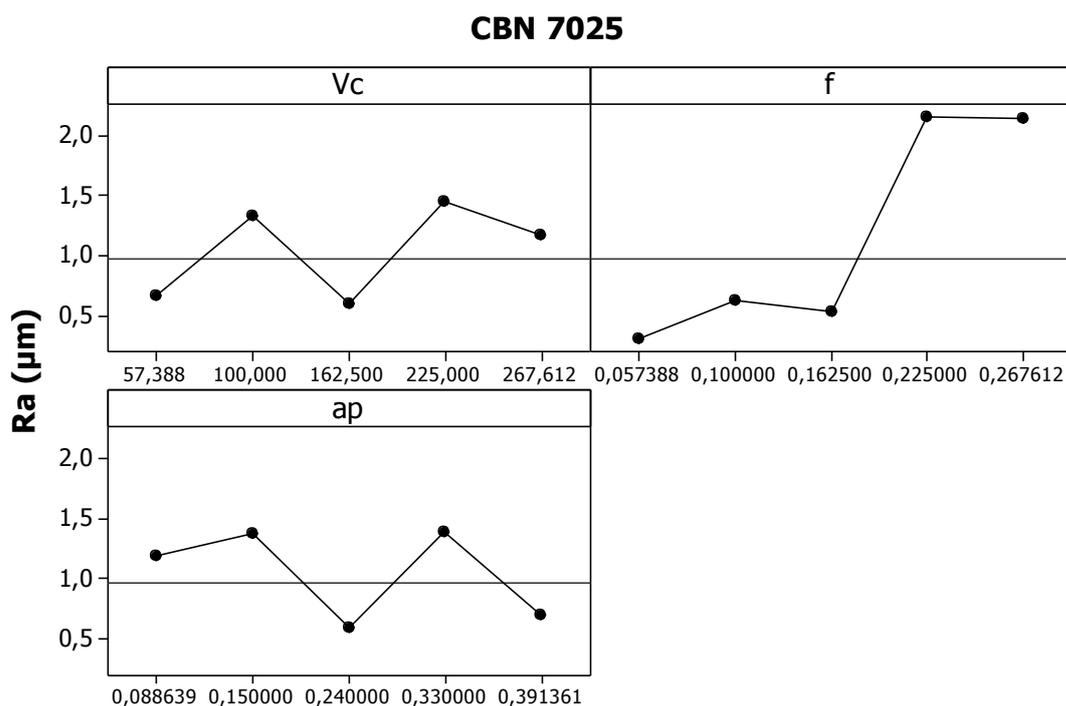


Figura 6.27 – Gráfico dos efeitos principais para Ra (µm).

É mostrado na Figura 6.28 a representação da superfície usinada para as condições estudadas no fim da vida da ferramenta.

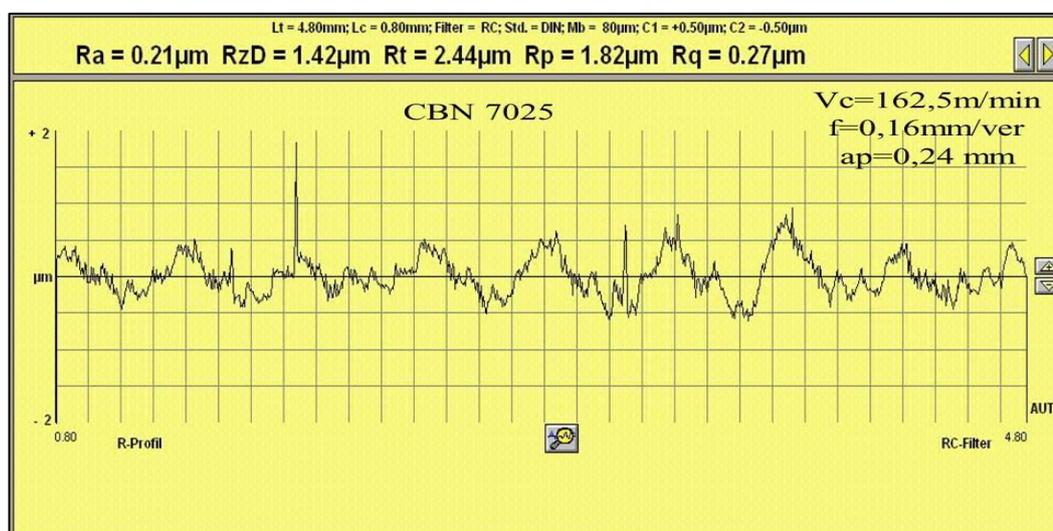


Figura 6.28 – Representação da superfície usinada no fim da vida da ferramenta PCBN 7025.

Foram apresentados na Tabela 6.14, os valores da vida da ferramenta, experimento 11, para uma  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve vida da ferramenta de 40,0 min e no experimento 12, para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,26$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), obteve vida da ferramenta de 41,5 min, verifica-se que os valores de  $f$  e  $a_p$  são

diferentes nos dois experimentos e a  $V_c$  se mantém igual. Verifica-se que os resultados obtidos para os experimentos, foram praticamente iguais e mesmo alterando os valores de avanço, este não teve influência significativa na vida da ferramenta.

Verifica-se também nos experimentos 7 e 8 ( $V_c = 100$  e  $225$  m/min) e 9 e 10 ( $V_c = 57$  e  $267$  m/min, pontos axiais), valores de vida maiores para as menores velocidades e então verifica-se que a  $V_c$  é o fator que tem maior influência na vida da ferramenta.

A Figura 6.29 apresenta os efeitos principais para a vida da ferramenta  $T$  (min) em função da velocidade de corte e do avanço para uma profundidade de usinagem.

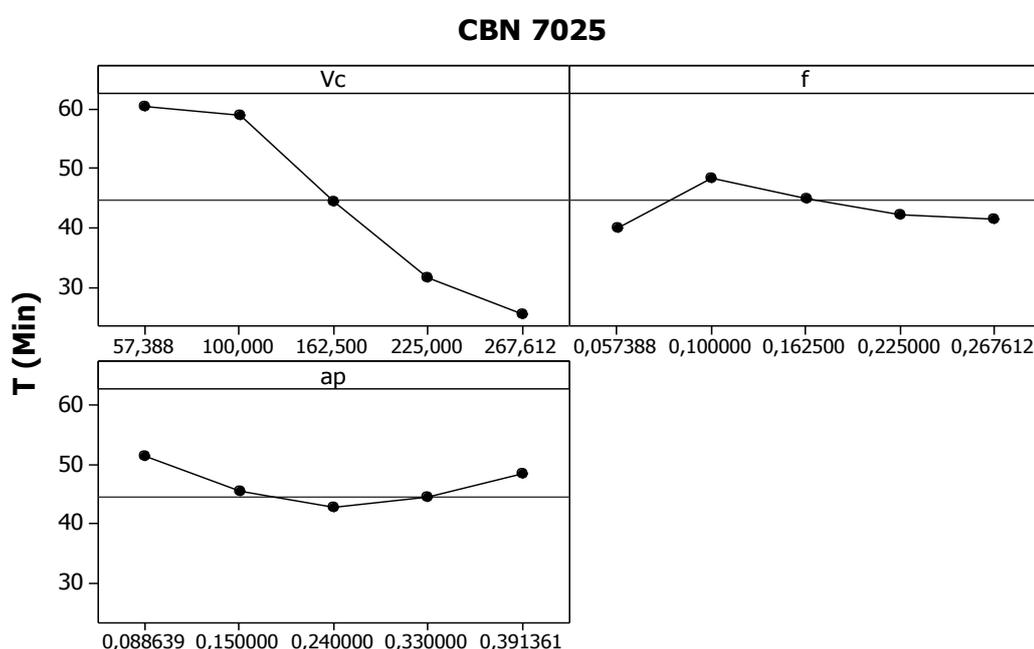


Figura 6.29 – Gráfico dos efeitos principais para  $T$  (min).

Uma análise mais precisa acerca da influência de cada um dos efeitos no comportamento da vida da ferramenta, podem ser obtidas avaliando-se os resultados dispostos na Figura 6.29. Observa-se que o elemento que exerce maior influência na vida da ferramenta é a  $V_c$ . Em primeiro lugar, nota-se o fator velocidade de corte como sendo o elemento que, por uma variação em seu nível, provoca maior influência na vida da ferramenta, mostrando que as interações não tiveram influência de acordo com Tabela 6.15. A Tabela 6.15 apresenta os resultados dos modelos das respostas e ajustes ( $R^2_{adj}$ ).

Tabela 6.15 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CBN 7025 Wiper

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	46,59	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>7,85</b>	0,15	1,07	<b>6,33</b>	<b>338,46</b>	<b>511,79</b>	<b>85,12</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,84</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-2,29</b>	<b>-0,04</b>	-0,25	<b>2,43</b>	<b>-84,66</b>	<b>49,44</b>	<b>9,43</b>	<b>0,01</b>
f	-1,87	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,52</b>	<b>0,14</b>	<b>0,56</b>	<b>2,43</b>	12,36	5,83	1,23	<b>0,00</b>
ap	-0,95	0,00	0,01	<b>1,01</b>	0,01	0,17	<b>2,37</b>	14,13	-7,82	0,53	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,30	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,00	0,02	0,19	0,00	4,21	-4,24	-0,81	<b>0,00</b>
f x f	-1,05	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	-0,22	<b>0,06</b>	0,18	0,00	-2,15	9,51	-1,78	0,00
ap x ap	2,30	-0,01	-0,02	<b>-0,57</b>	0,00	0,19	-0,00	-0,31	25,48	-1,59	0,00
Vc x f	2,62	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	<b>-0,38</b>	-0,02	-0,19	<b>0,93</b>	-11,66	3,24	-1,12	<b>0,00</b>
Vc x ap	0,25	-0,00	-0,01	<b>-0,83</b>	0,03	0,30	<b>0,91</b>	-13,90	-19,01	-0,08	<b>0,00</b>
f x ap	0,25	-0,00	-0,00	<b>-0,50</b>	0,01	-0,07	<b>0,91</b>	-10,88	10,24	-0,07	0,00
R <sup>2</sup> adj.	90,56%	96,96%	96,93%	96,62%	92,92%	90,35%	99,24%	95,33%	57,51%	74,77%	97,20%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value< 5%)

### 6.3 Seleção das variáveis de controle e definição de seus níveis

As variáveis e os valores de Vc, f e ap foram selecionadas de acordo com o catálogo do fabricante Sandvik-Coromant (2012). Como descrito na Tabela 4.1 no item 4.2.

As variáveis escolhidas são as mais utilizadas na usinagem e os valores propostos permitem que todas as ferramentas obtenham as respostas nas mesmas condições.

Tabela 4.1 – Variáveis de controle e níveis de trabalho.

Variáveis de Controle	Símbolo	Níveis de trabalho				
		<b>-1.682</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1.682</b>
<b>Velocidade de Corte (m/min)</b>	Vc	57,39	100	150	225	267,61
<b>Avanço de Corte (mm/rev)</b>	f	0,06	0,10	0,15	0,225	0,27
<b>Profundidade de corte (mm)</b>	ap	0,09	0,15	0,225	0,33	0,39

### 6.4 Seleção das respostas utilizadas nos experimentos

Para que fossem escolhidas quais seriam as respostas, foi necessário utilizar de equipamentos específicos na obtenção das mesmas. No capítulo 4, é possível identificar os aparelhos utilizados e no item 5.3 esta descrita quais foram às respostas definidas para a realização dos experimentos. Para a aplicação dos métodos foram escolhidas somente 6 (seis) respostas das 11 (onze) respostas medidas e calculadas.

## 6.5 Planejamento do arranjo experimental

Conforme planejamento do arranjo experimental descrito no item 5.4 do capítulo 5, a Tabela 6.8 apresenta os parâmetros com valores codificados e decodificados. As variáveis de controle adotadas e os valores adotados para os parâmetros foram: velocidade de corte (100 - 225 - m/min), avanço de corte (0,10 - 0,225 - mm/rev) e profundidade de usinagem (0,15 - 0,33 - mm). O sequenciamento dos experimentos foi planejado com oito pontos fatoriais, seis pontos axiais e cinco pontos centrais, o que resultou em 19 experimentos de acordo com Tabela 6.1.

## 6.6 Realização dos Experimentos

Conforme planejamento do arranjo experimental descrito no item 5.4 do capítulo 5, a Tabela 6.8 apresenta os parâmetros com valores codificados e decodificados. Para a medição das respostas foi necessário a instalação dos aparelhos de acordo com a Figura 4.1, item 3.41. Inicialmente foi realizado testes com os mínimos e máximos valores de  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$ , para verificar se a ferramenta iria suportar as condições impostas. Realizado a fase anterior foi possível dar início aos 19 experimentos e monitorar os aparelhos e fazer as medições.

## 6.7 Estimação do modelo matemático das respostas

O objetivo fundamental da metodologia de superfície de resposta é encontrar uma condição ótima de operação para um processo. Partindo-se dos resultados dos experimentos de usinagem, a segunda fase da metodologia de superfície de resposta, determinam-se as funções objetivo para cada uma das respostas consideradas pelo objeto de estudo, seguido por uma análise dos efeitos dos parâmetros do processo sobre estas respostas. A análise mais detalhada da operação de usinagem é relevante para uma visualização dos conflitos de interesse existente entre as variáveis do processo, justificando, assim, o emprego de técnicas multi-objetivo para a sua otimização.

Os modelos apresentaram ajustes acima de 90% para cinco respostas, e menor que 70% para o ruído de acordo com as Tabelas dos modelos. Este ajuste se deve ao fato que alguns ruídos externos, tipo elétrico e mecânico interferiram no processo. Para a temperatura obteve um ajuste abaixo de 73,88%. Este ajuste foi encontrado pelo fato das medições terem sido realizadas por termopares. O contato entre termopar e ferramenta foi prejudicado pela saída do cavaco, impossibilitando uma medida mais real por um período de tempo de contato maior.

## 6.8 Avaliação da interdependência entre as respostas e executar a ACP apenas para as respostas correlacionadas

Quando se faz a otimização sem o efeito da correlação podemos encontrar resultados que não são reais. Considerando o efeito da correlação entre as respostas e uma das maneiras de se fazer isto é utilizar a ACP, que transforma as variáveis originais em componentes e a modelagem e otimização será feita para o componente. Este artifício de ACP é usado para reduzir a dimensionalidade dos dados. De acordo com a Tabela 6.16 podemos perceber que a rugosidade *Ra* não possui correlação significativa com as demais respostas que são correlacionadas entre si. Por este motivo será utilizado *Ra* separadamente e para o grupo das outras respostas será utilizado a ACP. A Tabela 6.16 apresenta, então, a estrutura de correlação entre as respostas definidas como funções objetivo da ferramenta CC 6050 (Wiper), identificando um conjunto de dados moderadamente correlacionado e estatisticamente significativo. No geral, caracterizou-se as respostas otimizadas como moderadamente correlacionadas em função de serem observados, num mesmo conjunto, pares fortemente correlacionados ( $|\text{coeficiente de Pearson}| > 0,70$ ), pares moderadamente correlacionados ( $0,60 < |\text{coeficiente de Pearson}| < 0,70$ ) e pares não correlacionados ( $|\text{coeficiente de Pearson}| < 0,40$ ). A correlação se mostrou estatisticamente significativa para os pares cujo *p-value* foi inferior a 5% de significância, conforme indicado na Tabela 6.16 pelos dados em negrito.

Tabela 6.16 – Estrutura de correlação das respostas otimizadas.

	<i>Ra</i>	<i>T</i>	<i>Kp</i>	<i>Fr</i>	<i>RD</i>
<i>T</i>	-0,204*				
	0,402**				
<i>Kp</i>	-0,366	<b>0,756</b>			
	0,124	<b>0,000</b>			
<i>Fr</i>	-0,129	<b>0,861</b>	<b>0,759</b>		
	0,600	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>		
<i>RD</i>	0,310	<b>-0,846</b>	<b>-0,705</b>	<b>-0,698</b>	
	0,196	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	
<i>EEC</i>	0,261	<b>-0,752</b>	<b>-0,693</b>	<b>-0,609</b>	<b>0,678</b>
	0,281	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	<b>0,006</b>	<b>0,001</b>

\*Valores das células: coeficiente de Pearson

\*\**p-value*

Os alvos em termos dos Componentes Principais foram calculados a partir de uma combinação linear entre os autovetores destes Componentes Principais e os valores padronizados das respostas em relação aos seus alvos.

O alvo para o componente principal ( $\zeta_{PC}$ ) é calculado com base no seguinte conceito: de acordo com Johnson e Wichern (2007), o escore para o  $i$ -ésimo componente é o somatório do produto dos valores padronizados  $Z(\bullet)$  das respostas originais  $Y_j$  pelos seus respectivos autovetores  $e_j$ . Neste caso, a variável padronizada normal é calculada levando em consideração a média, tal como  $Z(Y_j | \mu_{Y_j})$ . Dessa forma, utilizando um raciocínio análogo para o caso dos alvos das respostas originais ( $T_{Y_j}$ ), o alvo para o componente principal pode ser calculado como:

$$\zeta_{PC} = e^T \left[ Z(Y_j | T_{Y_j}) \right] = \sum_{j=1}^m e_j \cdot \left[ Z(Y_j | T_{Y_j}) \right] \quad (6.1)$$

onde:

$$Z(Y_j | T_{Y_j}) = (T_{Y_j} - \mu_{Y_j}) \cdot (\sigma_{Y_j})^{-1}$$

$\mu_{Y_j}$  – Média da  $j$ -ésima resposta;  $\sigma_{Y_j}$  – Desvio-padrão da  $j$ -ésima resposta

Após a identificação da correlação entre as respostas, foi realizado a análise de Componentes Principais, extraído os escores de  $PC$  das respostas originais com os respectivos autovalores e autovetores. A Tabela 6.17 apresenta o resultado, média, desvio-padrão e alvo das respostas individuais e a Tabela 6.18 apresenta o resultado dos autovetores, autovalores, proporção de explicação e alvos dos PCs.

Tabela 6.17 – Média, Desvio-padrão e alvo das respostas individuais

	<b>T</b>	<b>Kp</b>	<b>Fr</b>	<b>RD</b>	<b>EEC</b>
<b>Média</b>	43,802	2,029	337,316	81,377	0,0208
<b>Desvio-padrão</b>	11,204	0,619	78,059	7,731	0,015
<b>Alvo</b>	69,54	3,264	205,899	65,784	0,007
<b>Padronizado</b>	2,30	1,99	-1,68	-2,02	-0,87

Para que a modelagem e a otimização seja feita para os Componentes Principais, devem-se analisar os autovalores e os autovetores da matriz de correlação das respostas conjuntas. Primeiramente, observa-se que apenas o primeiro componente principal é capaz de

explicar 80,98% da estrutura de variância-covariância do conjunto de respostas. Como o segundo autovalor é muito pequeno (0,404), a modelagem de PC1 deve ser suficiente para explicar o processo.

Tabela 6.18 – Autovetores, Autovalores, Proporção de explicação e alvos dos PCs

	PC1'	PC2'	PC3'	PC4'	PC5'
	0,478881	0,125083	0,256048	-0,280475	0,78153
	0,442824	0,080097	-0,628164	0,618301	0,143537
<b>Autovetores</b>	0,446145	0,574270	-0,177254	-0,464024	-0,473739
	-0,445627	0,029500	-0,691334	-0,463303	0,328561
	-0,420652	0,804538	0,174601	0,330254	0,190304
	PC1'	PC2'	PC3'	PC4'	PC5'
<b>Autovalores</b>	3,94938	0,40425	0,32251	0,24613	0,07771
<b>Proporção de explicação</b>	80,98%	8,01%	5,32%	4,15%	1,54%
<b>Alvos PCs</b>	2,50	-1,28	0,88	2,01	2,08

## 6.9 Transformação WEQMM

O método EQMM inicia com a Análise de Componentes Principais convertendo o conjunto original de respostas correlacionadas em novas variáveis não correlacionadas (Componentes Principais). Em seguida, os escores dos componentes principais, através da metodologia de superfície de resposta, são utilizados para o desenvolvimento de modelos matemáticos de segunda ordem para cada componente. Finalmente, considerando a função  $EQM$ , a média estimada  $\hat{y}(\mathbf{x})$  é substituída pelo modelo do Componente Principal  $PC(\mathbf{x})$ , a variância  $\hat{\sigma}^2(\mathbf{x})$  é substituída pelo autovalor  $\lambda$  e o alvo  $T$  é transformado no alvo para o componente principal  $\zeta_{PC}$ . Com isso, a função Erro Quadrático Médio Multivariado ( $EQMM$ ) fica definida através da expressão:

$$EQMM = [PC(\mathbf{x}) - \zeta_{PC}]^2 + \lambda \quad (6.2)$$

Na equação acima,  $PC(\mathbf{x})$  é um polinômio de segunda ordem desenvolvido como função das variáveis de decisão.

Finalmente, chega-se à formulação para o EQMM ponderado, propondo-se que a otimização de múltiplas respostas correlacionadas considerando níveis de importância diferentes entre as respostas seja realizada a partir do seguinte equacionamento:

$$\text{Minimizar } EQMM_P = \prod_{i=1}^k \left[ \left( CP_i^*(\gamma) - \theta_{CP_i}^*(\gamma) \right)^2 + \lambda_{CP_i(\gamma)}^* \right] \quad (6.3)$$

Sujeito a :  $\mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \rho^2$

Onde:

$EQMM_P$  – Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado;

$k$  – Número de componentes principais utilizados;

$CP_i^*(\gamma)$  – Modelos de superfície de resposta desenvolvidos para os escores dos componentes principais das respostas ponderadas;

$\theta_{CP_i}^*(\gamma)$  – Alvos em termos dos componentes principais das respostas ponderadas;

$\lambda_{CP_i(\gamma)}^*$  – Autovalores dos componentes principais das respostas ponderadas;

$x^T x \leq \rho^2$  – Restrição do espaço experimental para regiões esféricas (no caso de se utilizar um arranjo CCD),  $\rho = \alpha$ .

No método EQMM, a otimização é obtida pela minimização da Equação (6.2), o que significa que o componente principal tende a atingir o alvo estabelecido com o mínimo de variância. Como temos mais de um componente, então é necessário, que o EQMM utiliza-se da seguinte formulação apresentada no item 3.5 das Equações (3.6 e 3.7) e, através desta formulação encontramos os (EQMM1 – EQMM5).

No entanto, a formulação EQMM se propõe à otimização das múltiplas respostas correlacionadas, atribuindo a elas o mesmo grau de importância, de forma que, se além de correlacionadas, as múltiplas respostas apresentarem também pesos diferentes, o método não é capaz de atribuir às ponderações desejadas. Conseqüentemente, para tais situações, a otimização das respostas mais importantes pode ficar prejudicada em favor da otimização das respostas menos importantes, em função de serem consideradas com o mesmo peso.

Esta circunstância tornou possível o desenvolvimento do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado ( $EQMM_P$ ) no item 3.6, da Equação 3.10, pelo fato da função  $EQMM_P$  ser escrita em termos dos componentes principais, que são definidos como combinações lineares das respostas originais.

A Tabela 6.19 apresenta os valores do EQMM de cada um dos 5 Componentes Principais e o WEQMM.

Tabela 6.19 – EQMM dos Componentes Principais e o WEQMM

EQMM1	EQMM2	EQMM3	EQMM4	EQMM5	WEQMM
0,80	0,52	0,18	1,72	2,57	0,81
15,15	0,08	0,53	3,43	5,27	12,26
1,50	1,84	0,31	7,27	6,27	1,81
21,34	0,86	0,17	2,99	5,45	17,17
1,53	3,22	0,84	2,47	3,35	1,70
18,77	0,92	1,24	1,87	4,82	15,15
0,88	4,29	0,25	3,51	7,15	1,34
36,03	7,44	0,15	2,06	3,60	29,23
1,45	3,60	2,96	3,41	4,43	1,86
37,26	2,35	1,56	3,88	3,96	29,97
4,57	0,36	4,52	1,82	4,71	4,10
12,08	3,28	0,65	6,98	5,15	10,27
5,51	0,39	0,11	8,40	3,40	4,85
8,10	3,60	1,30	5,78	2,76	7,10
7,53	1,45	1,13	4,88	4,10	6,44
8,37	1,40	1,52	5,46	3,89	7,15
7,09	1,47	1,00	4,65	3,86	6,07
8,80	1,47	2,04	6,39	3,31	7,56
7,79	1,47	1,18	5,51	3,49	6,68

Isto ocorre porque a atribuição de pesos diretamente na função objetivo não significa que as respostas estão sendo ponderadas. Sendo assim, o EQMM<sub>P</sub> propõe que a ponderação das respostas seja feita depois da realização da Análise de Componentes Principais. Para a solução da formulação do item 3.6, da Equação 3.10, o problema de otimização também foi programado no *Microsoft Excel*®, versão 2010, e no caso do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado, o algoritmo empregado para a identificação do ponto de ótimo foi o Algoritmo Genético, como já comentado.

## 6.10 Aplicação do método NBI-WEQMM

Desse modo, o método NBI pode ser escrito como um problema de programação não-linear restrita, tal que as equações e condições estabelecidas na seção 3.7 sejam seguidas.

$$\begin{aligned} \text{Max}_{(\mathbf{x}, t)} \quad & D \\ \text{subject to: } \quad & \bar{\Phi}w + D\hat{n} = \bar{F}(\mathbf{x}) \\ & \mathbf{x} \in \Omega \end{aligned} \tag{3.12}$$

O problema de otimização representado pelo sistema de equações 3.12 pode ser resolvido iterativamente para diferentes valores de  $w$ , o que cria, por conseguinte, uma Fronteira de Pareto igualmente espaçada.

$w_n = 1 - \sum_{i=1} w_i$ . Por uma questão de simplificação, o parâmetro conceitual  $D$  pode ser algebricamente eliminado da Equação 3.13, dado que ele está tanto na função objetivo quanto nas restrições de igualdade.

Para o caso bidimensional, esta expressão simplificada pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \text{Min } \quad & \bar{f}_1(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.: } \quad & \bar{f}_1(\mathbf{x}) - \bar{f}_2(\mathbf{x}) + 2w - 1 = 0 \\ & g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \\ & 0 \leq w \leq 1 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Onde:  $\bar{f}_1(\mathbf{x})$  e  $\bar{f}_2(\mathbf{x})$  representam duas funções objetivo escalonadas (normalizadas).

O NBI utilizou a otimização para fornecer uma Fronteira de Pareto e encontrou soluções viáveis e equidistantes ao longo da fronteira entre os pontos de ancoragem. Para quantificar a informação de que existe um ponto de ótimo entre todos os pontos de ótimo, utilizamos o critério que se chama Entropia/EPG descrito na seção 5.10. Este método é capaz de gerar pontos ótimos viáveis em região não convexa da fronteira. Partindo-se dos valores da Min Ra, Min WPCA foi gerada a Fronteira de Pareto conforme é mostrado nas Figura 6.4.

A Tabela 6.20 mostra os pesos  $W_1$  e  $W_2$ , os valores Min Ra, Min WPCA, parâmetros de corte e os valores das respostas obtidas pela Otimização através do método NBI -WEQMM.

Tabela 6.20 – Otimização NBI -WEQMM de cada característica estudada no processo de torneamento do aço ABNT H13 para a ferramenta CC 6050 Wiper.

$W_1$	$W_2$	Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap	Kp	Ra	Fr	RD	T	EEC
0,00001	1	0,1787	3,2190	80,49	0,17	0,33	3,07	0,18	491,87	70,62	60,48	0,0071
0,05	0,95	0,1712	3,2209	79,59	0,17	0,33	3,06	0,17	493,68	70,66	60,18	0,0072
0,1	0,9	0,1639	3,2270	78,79	0,18	0,33	3,03	0,16	495,27	70,74	59,78	0,0073
0,15	0,85	0,1566	3,2392	78,16	0,18	0,33	3,01	0,16	496,54	70,87	59,27	0,0074
0,2	0,8	0,1496	3,2619	78,06	0,19	0,32	2,97	0,15	497,01	71,09	58,58	0,0076
0,25	0,75	0,1429	3,3070	79,48	0,19	0,32	2,91	0,14	495,51	71,43	57,83	0,0081
0,3	0,7	0,1369	3,3880	82,20	0,19	0,32	2,86	0,14	492,28	71,79	57,25	0,0090
0,35	0,65	0,1316	3,5067	85,32	0,20	0,33	2,81	0,13	488,31	72,14	56,79	0,0099
0,4	0,6	0,1269	3,6600	88,52	0,20	0,33	2,76	0,13	484,00	72,48	56,38	0,0110
0,45	0,55	0,1227	3,8446	91,72	0,20	0,34	2,71	0,12	479,45	72,82	55,99	0,0120
0,5	0,5	0,1191	4,0575	94,95	0,20	0,34	2,66	0,12	474,68	73,16	55,62	0,0130
0,55	0,45	0,1159	4,2965	98,18	0,20	0,34	2,61	0,12	469,74	73,50	55,26	0,0141
0,6	0,4	0,1132	4,5595	101,39	0,20	0,35	2,56	0,11	464,68	73,84	54,91	0,0152
0,65	0,35	0,1109	4,8447	104,60	0,20	0,35	2,51	0,11	459,50	74,18	54,55	0,0163
0,7	0,3	0,1089	5,1507	107,81	0,20	0,36	2,47	0,11	454,22	74,53	54,19	0,0174
0,75	0,25	0,1073	5,4762	111,01	0,20	0,36	2,42	0,11	448,86	74,89	53,84	0,0185
0,8	0,2	0,1061	5,8200	114,20	0,20	0,36	2,38	0,11	443,42	75,24	53,47	0,0196
0,85	0,15	0,1051	6,1810	117,39	0,20	0,36	2,33	0,11	437,92	75,61	53,11	0,0207
0,9	0,1	0,1045	6,5582	120,58	0,20	0,37	2,29	0,10	432,38	75,97	52,74	0,0218
0,95	0,05	0,1041	6,9507	123,76	0,20	0,37	2,24	0,10	426,78	76,34	52,36	0,0229
1	0,00001	0,1040	7,3577	126,94	0,20	0,37	2,20	0,10	421,16	76,72	51,97	0,0240

Os resultados apresentados nos itens 6.9 e 6.10 apontaram para uma boa funcionalidade do método proposto, visto que o procedimento do WEQMM foi capaz de localizar a solução Pareto-ótima mais eficiente na região de mínimo. Além disso, foi também possível visualizar a solução mais viável em relação às fronteiras de eficiência. Portanto, após esta análise, feita sobre uma abordagem mais simplificada do objeto de estudo justamente para se obter uma primeira impressão acerca do método desenvolvido, que é a identificação dos pesos ótimos

para um problema multi-objetivo em que as respostas se mostram significativamente correlacionadas. Para isso, as respostas relacionadas à custo, produtividade e à qualidade foram incorporadas ao problema de otimização.

Na Tabela 6.20 procedeu-se à alteração dos pesos com incrementos de 0,05, variando-os entre 0 e 1. Verifica-se que os valores dos parâmetros aumentam a medida que variam-se os pesos. Os valores das respostas, principalmente Ra, quando se atribui um peso menor, os resultados de Ra são maiores. Mas quando se atribui um peso maior para Ra, os resultados obtidos para Ra são menores. Este procedimento é análogo para a vida da ferramenta. Quando se atribui um peso menor para Ra, o parâmetro Vc é menor e conseqüentemente a vida da ferramenta é maior. Mas quando se atribui um peso maior para Ra, Vc é maior e conseqüentemente a vida da ferramenta é menor, este fato ocorre porque Vc é um fator de grande influência na vida da ferramenta.

A Tabela 6.20 apresenta os valores encontrados para cada combinação de pesos e com estes valores foi gerada a fronteira de Pareto para as funções MinRa e MinWPCA, de acordo com a Figura 6.30.

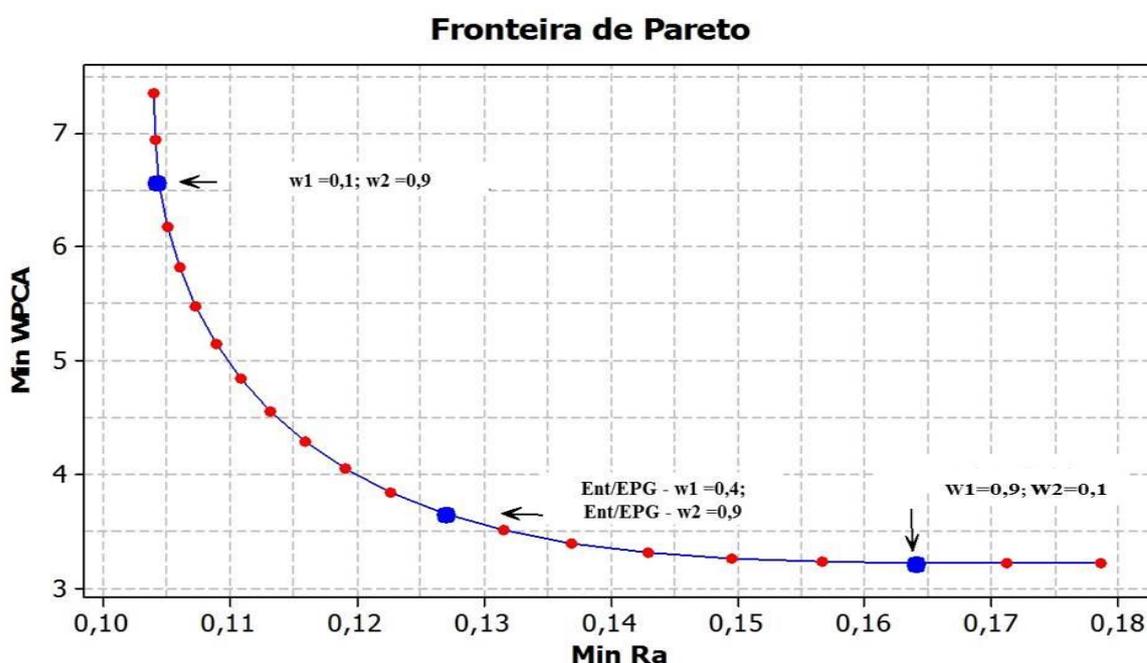


Figura 6.30 – Fronteira de Pareto para a ferramenta CC 6050 (*Wiper*).

Desta Fronteira foram selecionados somente 3 DMUs. Para que não fosse utilizado 21 DMUs, foi escolhido o ponto de máxima Entropia, mínimo EPG e o ponto com o maior valor da razão Entropia/EPG. Caso a Fronteira fosse gerada para 7 ferramentas e 21 pontos, teria um total para se rodar o DEA de 147 pontos. Então utilizou-se de um critério para selecionar

o melhor conjunto de 3 pontos dos 21 pontos na Fronteira de Pareto. O motivo de não se selecionar todos os pontos é que quanto maior for o número de DMUs na fronteira menor será o poder discriminatório do modelo.

### 6.11 Resultados da Entropia/EPG

O EPG quantifica o afastamento dos resultados ótimos individuais em relação aos resultados ótimos globais. Quanto menor o valor do EPG, melhor será o método multiobjetivo empregado. A entropia quantifica como a distribuição dos pesos entre as funções objetivo influencia o resultado da otimização multiobjetivo. Quanto maior a entropia, maior a diversificação de pesos. Para se considerar simultaneamente a entropia e o EPG, pode-se adotar a razão Entropia/EPG que quando maximizada conduz a máxima entropia com o mínimo EPG. A Tabela 6.21 apresenta os valores extremos e os valores de Entropia/EPG.

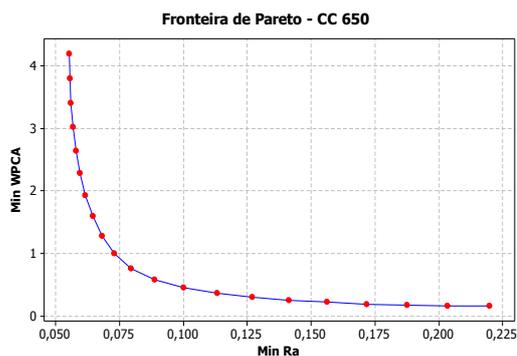
Tabela 6.21 – Valores extremos e os valores de Entropia /EPG

W1	W2	EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropia Ra	Entropia WPCA	Entropia Total	ENTROPIA/ EPG
0,00001	1	0,7189	0,0000	0,7189	0,0001	0,0000	0,0001	0,0002
0,05	0,95	0,6473	0,0006	0,6479	0,1498	0,0487	0,1985	0,3064
0,1 <sup>b</sup>	0,9 <sup>b</sup>	0,5765	0,0025	0,5790	0,2303	0,0948	0,3251	0,5614
0,15	0,85	0,5067	0,0063	0,5130	0,2846	0,1381	0,4227	0,8240
0,2	0,8	0,4388	0,0133	0,4521	0,3219	0,1785	0,5004	1,1068
0,25	0,75	0,3747	0,0273	0,4021	0,3466	0,2158	0,5623	1,3986
0,3	0,7	0,3169	0,0525	0,3694	0,3612	0,2497	0,6109	1,6536
0,35	0,65	0,2657	0,0894	0,3550	0,3674	0,2800	0,6474	1,8236
0,4 <sup>a</sup>	0,6 <sup>a</sup>	0,2204	0,1370	0,3574	0,3665	0,3065	0,6730	1,8831
0,45	0,55	0,1806	0,1943	0,3749	0,3593	0,3288	0,6881	1,8356
0,5	0,5	0,1457	0,2605	0,4061	0,3466	0,3466	0,6931	1,7067
0,55	0,45	0,1153	0,3347	0,4500	0,3288	0,3593	0,6881	1,5293
0,6	0,4	0,0891	0,4164	0,5055	0,3065	0,3665	0,6730	1,3315
0,65	0,35	0,0667	0,5050	0,5717	0,2800	0,3674	0,6474	1,1324
0,7	0,3	0,0480	0,6001	0,6481	0,2497	0,3612	0,6109	0,9426
0,75	0,25	0,0326	0,7012	0,7338	0,2158	0,3466	0,5623	0,7663
0,8	0,2	0,0205	0,8080	0,8284	0,1785	0,3219	0,5004	0,6040
0,85	0,15	0,0113	0,9201	0,9314	0,1381	0,2846	0,4227	0,4538
0,9 <sup>b</sup>	0,1 <sup>b</sup>	0,0049	1,0373	1,0422	0,0948	0,2303	0,3251	0,3119
0,95	0,05	0,0012	1,1592	1,1604	0,0487	0,1498	0,1985	0,1711
1	0,00001	0,0000	1,2857	1,2857	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001

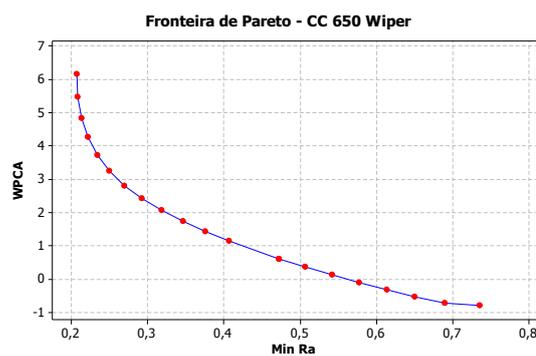
<sup>a</sup> Máxima razão Entropia/EPG selecionado para o DEA.

<sup>b</sup> Pontos extremos de ótimo selecionados para o DEA.

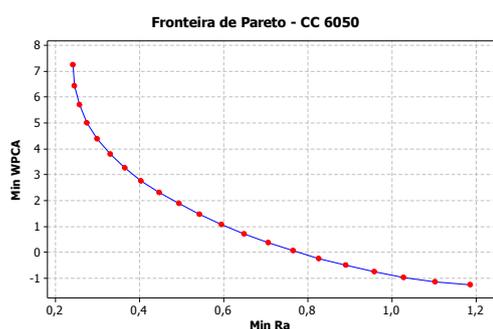
Para o estudo em questão, as fronteiras de Pareto para Min WPA x Min Ra foram plotadas para todas as demais respostas, adotando-se uma série de pesos para Min WPA compreendidos entre 0,10 e 0,90. Os pesos de Min Ra na fronteira são complementares aos escolhidos para Min WPCA. A Fronteira de Pareto apresenta o comportamento de diversas funções objetivo, otimizadas simultaneamente.



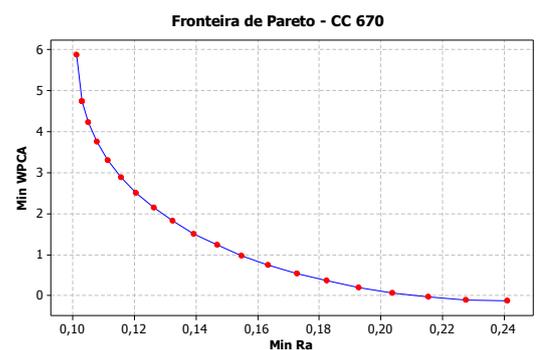
(a) - CC 650



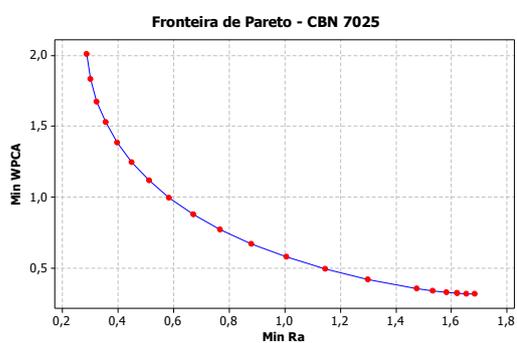
(b) - CC 650 Wiper



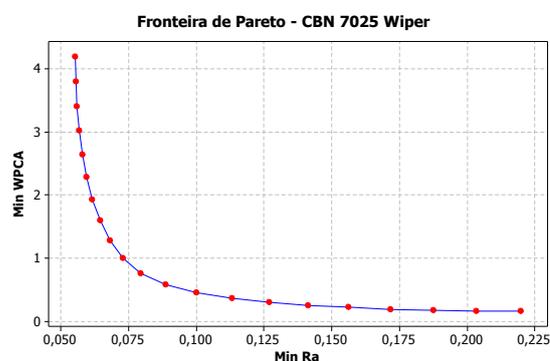
(c) CC 6050



(d) CC 670



(e) CBN 7025



(f) CBN 7025 Wiper

Figura 6.31 - Fronteira de Pareto para a ferramenta CC 650, CC 650 (Wiper), CC 6050, CC 670, CBN 7025, CBN 7025 (Wiper).

## 6.12 Definição dos *Inputs* e *Outputs* para implementação do DEA

Foram definidos os *Inputs* e *Outputs* de acordo com o item 5.3, para implementação do DEA de acordo com a Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – *Inputs* (minimização) e *Outputs* (maximização)

<i>Otimização</i>	<i>Min</i>	<i>Min</i>	<i>Min</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Max</i>
<i>Respostas</i>	<i>Kp (U\$)</i>	<i>Ra (<math>\mu m</math>)</i>	<i>Fr (N)</i>	<i>RD (dB)</i>	<i>T (min)</i>	<i>EEC(<math>cm^3.N/min</math>)</i>

## 6.13 Execução do DEA e escolha das DMUs para seleção da ferramenta ótima

Pode-se verificar que, na Tabela 6.22, os resultados dos valores obtidos dos parâmetros encontram-se diferenciados para cada tipo de ferramenta. Na mesma Tabela, são apresentados valores da otimização multobjetivo onde todas as respostas devem ser avaliadas em conjunto, diferentemente da otimização individual onde eram avaliadas uma a uma.

Conforme verifica-se nos resultados apresentados na Tabela 6.22, DMU 4, ferramenta CBN 7025 *Wiper*, o menor peso foi atribuído para *Ra*, com os parâmetros  $V_c = 147,7$  (m/min),  $f = 0,17$  (mm/rev) e  $a_p = 0,09$  (mm), com estes parâmetros, foram encontrados o valor de *Ra* de  $0,19$  ( $\mu m$ ), vida da ferramenta de  $57,25$  (min) e custo de U\$ 4,85.

Analisando a DMU 5, para a mesma ferramenta, atribuindo o menor peso para *Ra*, com os parâmetros  $V_c = 210,5$  (m/min),  $f = 0,12$  (mm/rev) e  $a_p = 0,12$  (mm), o resultado foi o valor de *Ra* de  $0,06$  ( $\mu m$ ), vida da ferramenta de  $41,17$  (min) e custo de U\$ 4,59.

Comparando estes resultados entre si, todos como pontos de ótimo, verifica-se que existe uma diferença entre os valores de *Ra*, vida da ferramenta e custo. Caso seja escolhida a DMU 4, a opção é que se deseja ter, uma vida maior da ferramenta, com uma rugosidade comparada a da retificação. Mas se a escolha for pela DMU 5, a opção é de que se pretende alcançar alta produtividade, com baixíssima rugosidade, vida da ferramenta mais baixa e com um custo menor.

Ao analisar a ferramenta CC650, DMU 15, para pesos distribuídos igualmente e parâmetros  $V_c = 171,86$  (m/min),  $f = 0,11$  (mm/rev) e  $a_p = 0,11$  (mm), obteve o valor de *Ra* de  $0,60$  ( $\mu m$ ), vida da ferramenta de  $45,19$  (min) e custo de U\$ 1,58.

Verifica-se que o objetivo foi procurar um custo menor, para que seja mantido um valor médio para a vida da ferramenta e um maior valor da rugosidade. Pretende-se conseguir mais

produtividade, menor custo, e não se preocupar com a qualidade. Caso o decisor queira adquirir maior custo, menor produtividade e menor qualidade superficial da peça, escolhe qual é a melhor ferramenta em função dos pesos e respostas obtidas. A escolha por apenas uma ferramenta individual e uma só resposta é algo fácil de acontecer.

Tabela 6.22 – Valores extremos da Fronteira de Pareto (0,10-0,90) e valor da máxima razão

Entropia /EPG

DMU	Ferramenta	W1	W2	Vc	f	ap	Kp	Ra	Fr	RD	T	EEC
1	CBN 7025	0,1**	0,9	120	0,18	0,11	2,86	1,44	376,91	78,02	56,67	0,0044
2		0,9**	0,1	145	0,08	0,25	4,32	0,29	348,15	78,29	48,19	0,0066
3		0,5*	0,5*	130	0,13	0,17	3,57	0,67	358,74	79,29	53,15	0,0087
4	CBN 7025 (wiper)	0,1**	0,9	147	0,17	0,09	4,85	0,19	333,25	77,72	57,25	0,0059
5		0,9**	0,1	210	0,12	0,12	4,59	0,06	257,19	87,29	41,17	0,0104
6		0,3*	0,7*	155	0,14	0,09	4,58	0,13	312,38	78,22	56,64	0,0058
7	CC 6050	0,1**	0,9	73	0,14	0,31	3,18	1,03	484,08	78,93	58,95	0,0049
8		0,9**	0,1	139	0,06	0,26	2,86	0,26	343,06	80,37	44,52	0,0054
9		0,45*	0,55*	96	0,09	0,30	3,22	0,60	429,76	78,09	55,40	0,0048
10	CC 6050 (wiper)	0,10**	0,90	78	0,18	0,33	3,03	0,16	495,27	70,74	59,78	0,0073
11		0,9**	0,1	120	0,20	0,37	2,29	0,10	432,38	75,97	52,74	0,0218
12		0,4*	0,6*	88	0,20	0,33	2,76	0,13	484,00	72,48	56,38	0,0110
13	CC 650	0,1**	0,9	147	0,17	0,09	1,40	1,07	337,33	84,55	49,15	0,0059
14		0,9**	0,1	210	0,12	0,12	1,40	0,64	257,86	90,09	35,97	0,0105
15		0,5*	0,5*	171	0,11	0,11	1,58	0,60	286,72	84,00	45,19	0,0062
16	CC 650 (wiper)	0,1**	0,9	71	0,14	0,31	3,11	0,65	489,06	79,31	62,04	0,0047
17		0,9**	0,1	136	0,10	0,23	2,40	0,21	353,20	82,80	48,60	0,0084
18		0,4*	0,6*	83	0,13	0,28	2,97	0,47	451,82	79,56	59,34	0,0058
19	CC 670	0,05**	0,95	66	0,14	0,30	4,32	0,23	328,09	75,17	62,06	0,0075
20		0,95**	0,05	105	0,19	0,36	3,38	0,10	310,99	80,98	55,09	0,0273
21		0,1*	0,9*	67	0,15	0,30	4,29	0,22	332,69	75,57	61,90	0,0082

\*Ponto de ótimo encontrado Entropia/EPG

\*\* Ponto de ótimo dos extremos.

É importante ressaltar que a utilização destes métodos é que para uma tomada de decisão onde se tem vários parâmetros e várias respostas, existe uma grande dificuldade de se encontrar uma relação entre os mesmos.

Verifica-se como fica difícil a escolha eficaz entre as seis respostas conjuntamente analisadas. Há várias opções de parâmetros e ferramentas que fornecem respostas unitárias e

ao mesmo tempo pode-se decidir por escolher uma delas. Mas se fosse para escolher duas destas respostas, deveria ser procurado outro parâmetro e talvez outra ferramenta que indicasse um melhor resultado para tais respostas e assim sucessivamente.

Entretanto, a utilização destes métodos traz a oportunidade de se alcançar um parâmetro e uma ferramenta que seja capaz de oferecer melhor custo/benefício para a tomada de decisão onde os fatores qualidade, produtividade e custo se tornaram essenciais para o crescimento de qualquer empresa.

A Tabela 6.23 apresenta os valores das respostas escalonadas referentes aos valores das respostas obtidas na Tabela 6.22.

Tabela 6.23 – Valores escalonados das respostas.

<b>DMU</b>	<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>Kp</b>	<b>Ra</b>	<b>Fr</b>	<b>RD</b>	<b>T</b>	<b>EEC</b>
1	0,1	0,9	0,345	0,707	0,702	0,258	0,223	1,027
2	0,9	0,1	0,764	0,005	0,583	0,267	0,422	0,989
3	0,5	0,5	0,549	0,236	0,627	0,301	0,306	0,952
4	0,1	0,9	0,207	0,488	0,477	0,379	0,271	1,001
5	0,9	0,1	0,173	0,002	0,154	0,683	0,625	0,922
6	0,3	0,7	0,173	0,264	0,388	0,395	0,284	1,003
7	0,1	0,9	0,966	0,554	1,041	0,249	0,013	0,042
8	0,9	0,1	0,818	0,010	0,515	0,331	0,380	0,033
9	0,45	0,55	0,981	0,249	0,838	0,201	0,104	0,043
10	0,1	0,9	0,834	0,356	1,093	0,121	0,095	0,952
11	0,9	0,1	0,510	0,216	0,859	0,322	0,265	0,702
12	0,4	0,6	0,714	0,269	1,051	0,188	0,177	0,888
13	0,1	0,9	0,193	0,891	0,086	0,258	0,316	0,992
14	0,9	0,1	0,260	0,540	0,095	0,166	0,347	0,993
15	0,5	0,5	0,197	0,819	0,046	0,232	0,307	0,994
16	0,1	0,9	0,967	0,539	1,061	0,172	0,019	0,241
17	0,9	0,1	0,633	0,008	0,552	0,338	0,342	0,177
18	0,4	0,6	0,900	0,323	0,921	0,184	0,084	0,222
19	0,05	0,95	1,020	0,412	1,008	0,107	0,011	0,947
20	0,95	0,05	0,699	0,185	0,932	0,348	0,235	0,615
21	0,1	0,9	1,012	0,390	1,029	0,123	0,017	0,936

É necessário que se faça um escalonamento para os valores das respostas antes da aplicação do DEA, deixando-os em um mesmo tamanho de escala. Como exemplo, os valores encontrados para a resposta força (Fr) na Tabela 6.1, DMU 1, com o valor de 376,91 (N) e o

valor encontrado para a rugosidade ( $R_a$ ) de 1,44 ( $\mu m$ ), aplicando o escalonamento estes valores ficaram com (0,258 e 0,707).

A Tabela 6.24 resume os resultados da otimização de cada DMU através do algoritmo DEA-CCR, orientado a *Inputs*. Nesta aplicação específica, a restrição de não negatividade, não poderia assumir valor nulo, dado que os extremos ( $P_1=0\%$  e  $P_2=100\%$  ou  $P_1=100\%$  e  $P_2=0\%$ ) da otimização multivariada-multiobjetivo não foram selecionados para o DEA. Para que o algoritmo possa convergir e mostrar que a ferramenta sera 100%, sera utilizada as restrições contidas no item 3.92, Equações (3.19 – 3.22) e a restrição de não negatividade (Restrição $W_i$ ) que foi determinada como sendo o resultado da otimização e que possua um valor obedecendo um percentual mínimo para que este não tenha os valores zerados.

Como exemplo, a DMU 1 da Tabela 6.19,  $P_1 = 0,1$  (10%) de  $R_a$  e  $P_2$  90% de ( $K_p$ ,  $R$ ,  $RD$ ,  $T$ ,  $EEC$ ), são 5 respostas, para cada uma sera atribuído o valor de 18%.

A DMU 3 da Tabela 6.19,  $P_1 = 0,5$  (50%) de  $R_a$  e  $P_2$  50% de ( $K_p$ ,  $R$ ,  $RD$ ,  $T$ ,  $EEC$ ), 5 respostas, para cada resposta, o valor atribuído é de 10%. De acordo com a restrição imposta, será utilizado o menor valor da otimização, 10% em termos relativos e de 0,39 de peso em termos absolutos e assim sucessivamente. A ferramenta, DMU 3, apresentou um valor percentual de 74%, demonstrando sua ineficiência.

Entretanto, o algoritmo tenta fazer com que esta DMU seja eficiente, encontrando a melhor combinação de peso possível para cada um dos *Inputs* e *Outputs*, de forma a tornar-se eficiente.

Mesmo utilizando o melhor padrão de pesos para esta DMU ou o padrão de peso que a favorecia, não foi possível torna-las eficiente. Temos para os mesmos pesos, outras DMUs melhores e eficientes. Para as DMUs que foram 100% eficientes, com os mesmos padrões de peso, outras também serão eficientes com os mesmos pesos.

O escore de eficiência calculado para cada DMU, através de um Algoritmo de Programação Linear (PPL), faz o indicador variar de 0 a 100%, sendo que um escore de eficiência igual a 100% identifica a unidade avaliada como eficiente em relação às demais.

Por conseguinte, levando em consideração as ponderações ( $P_1$  e  $P_2$ ) da fronteira Pareto-ótima obtida por NBI-WEQMM, os resultados ótimos dos multiplicadores (pesos), percentual de contribuição (%peso), eficiência e o conjunto de referência para cada DMU também são apresentados na Tabela 6.24.

Tabela 6.24 – Resultados da otimização de cada DMU

DMU	P1	P2	Restrição Wi	Inputs $\Omega$ (%peso)				Outputs $\Omega$ (%peso)		Eficiência	Referência DMU
				$\Omega_{Kp}$	$\Omega_{Ra}$	$\Omega_{Fr}$	$\Omega_{RD}$	$\Omega_T$	$\Omega_{EEC}$		
1	0,1	18%	0,28	0,28 <sup>a</sup> (10% <sup>b</sup> )	0,73 (26% <sup>b</sup> )	0,28 (10% <sup>b</sup> )	0,75 (27% <sup>b</sup> )	0,28 (10% <sup>b</sup> )	0,47 (17% <sup>b</sup> )	54%	2,5,14
2	0,9	2%	0,09	0,10a (2% <sup>b</sup> )	1,64 (33% <sup>b</sup> )	1,05 (21% <sup>b</sup> )	1,13 (23% <sup>b</sup> )	0,10 (2% <sup>b</sup> )	0,97 (9% <sup>b</sup> )	<b>100%</b>	2,5,14
3	0,5	10%	0,38	0,39a (10% <sup>b</sup> )	1,00 (26% <sup>b</sup> )	0,38 (10% <sup>b</sup> )	1,03 (27% <sup>b</sup> )	0,38 (10% <sup>b</sup> )	0,65 (17% <sup>b</sup> )	73%	2,5,14
4	0,1	18%	0,41	1,68 (40% <sup>b</sup> )	0,42 (10% <sup>b</sup> )	0,42 (10% <sup>b</sup> )	0,66 (16% <sup>b</sup> )	0,42 (10% <sup>b</sup> )	0,59 (14% <sup>b</sup> )	70%	5,14
5	0,9	2%	0,07	0,39 (10% <sup>b</sup> )	0,51 (13% <sup>b</sup> )	0,08 (2% <sup>b</sup> )	1,35 (35% <sup>b</sup> )	1,49 (38% <sup>b</sup> )	0,08 (2% <sup>b</sup> )	<b>100%</b>	2,5,14
6	0,3	10%	0,50	2,04 (40% <sup>b</sup> )	0,51 (10% <sup>b</sup> )	0,51 (10% <sup>b</sup> )	0,80 (16% <sup>b</sup> )	0,51 (10% <sup>b</sup> )	0,72 (14% <sup>b</sup> )	86%	5,14
7	0,1	18%	0,24	0,24 (10% <sup>b</sup> )	0,63 (26% <sup>b</sup> )	0,24 (10% <sup>b</sup> )	0,66 (27% <sup>b</sup> )	0,24 (10% <sup>b</sup> )	0,41 (17% <sup>b</sup> )	2%	2,14
8	0,9	2%	0,10	0,11 (2% <sup>b</sup> )	0,96 (18% <sup>b</sup> )	0,63 (12% <sup>b</sup> )	1,73 (32% <sup>b</sup> )	1,93 (35% <sup>b</sup> )	0,11 (2% <sup>b</sup> )	74%	2,5,14
9	0,45	11%	0,35	0,36 (11% <sup>b</sup> )	0,68 (21% <sup>b</sup> )	0,36 (11% <sup>b</sup> )	0,88 (27% <sup>b</sup> )	0,62 (19% <sup>b</sup> )	0,36 (11% <sup>b</sup> )	8%	5,14
10	0,1	18%	0,31	0,31 (10% <sup>b</sup> )	0,82 (26% <sup>b</sup> )	0,31 (10% <sup>b</sup> )	0,85 (27% <sup>b</sup> )	0,31 (10% <sup>b</sup> )	0,53 (17% <sup>b</sup> )	53%	2,14
11	0,9	2%	0,08	0,70 (18% <sup>b</sup> )	0,93 (23% <sup>b</sup> )	0,08 (2% <sup>b</sup> )	1,15 (29% <sup>b</sup> )	0,38 (9% <sup>b</sup> )	0,74 (19% <sup>b</sup> )	62%	2,14
12	0,4	12%	0,37	0,37 (12% <sup>b</sup> )	0,74 (24% <sup>b</sup> )	0,37 (12% <sup>b</sup> )	0,78 (25% <sup>b</sup> )	0,37 (12% <sup>b</sup> )	0,46 (15% <sup>b</sup> )	48%	5,14
13	0,1	18%	0,46	1,86 (40% <sup>b</sup> )	0,46 (10% <sup>b</sup> )	0,46 (10% <sup>b</sup> )	0,73 (16% <sup>b</sup> )	0,46 (10% <sup>b</sup> )	0,65 (14% <sup>b</sup> )	80%	5,14
14	0,9	2%	0,09	0,75 (17% <sup>b</sup> )	1,08 (25% <sup>b</sup> )	0,09 (2% <sup>b</sup> )	1,41 (32% <sup>b</sup> )	0,09 (2% <sup>b</sup> )	0,98 (22% <sup>b</sup> )	<b>100%</b>	2,5,14
15	0,5	10%	0,49	1,99 (40% <sup>b</sup> )	0,49 (10% <sup>b</sup> )	0,49 (10% <sup>b</sup> )	0,78 (16% <sup>b</sup> )	0,49 (10% <sup>b</sup> )	0,70 (14% <sup>b</sup> )	85%	5,14
16	0,1	18%	0,26	0,26 (10% <sup>b</sup> )	0,67 (26% <sup>b</sup> )	0,26 (10% <sup>b</sup> )	0,70 (27% <sup>b</sup> )	0,26 (10% <sup>b</sup> )	0,43 (17% <sup>b</sup> )	11%	2,14
17	0,9	2%	0,10	0,52 (10% <sup>b</sup> )	0,68 (13% <sup>b</sup> )	0,10 (2% <sup>b</sup> )	1,80 (35% <sup>b</sup> )	1,99 (38% <sup>b</sup> )	0,10 (2% <sup>b</sup> )	70%	2,5,14

Tabela 6.24 – Resultados da otimização de cada DMU – (continuação)

18	0,4	12%	0,35	0,35 (12%b)	0,69 (24%b)	0,35 (12%b)	0,74 (25%b)	0,35 (12%b)	0,44 (15%b)	13%	5,14
19	0,05	19%	0,21	0,21 (5%b)	0,84 (20%b)	0,21 (5%b)	2,05 (48%b)	0,21 (2%b)	0,76 (18%b)	72%	2,14
20	0,95	1%	0,03	0,59 (17%b)	0,82 (24%b)	0,03 (1%b)	1,16 (34%b)	0,03 (1%b)	0,78 (23%b)	49%	2,5,14
21	0,1	18%	0,30	0,30 (10%b)	0,77 (26%b)	0,30 (10%b)	0,80 (27%b)	0,30 (10%b)	0,50 (17%b)	42%	2,14

Valores absolutos (a) e relativos (b) dos pesos ótimos de inputs e outputs encontrados após a otimização por DEA.

Foram utilizados 21 DMUs baseados na unidade de tomada de decisão, considerando os pontos de extremos, hora ponderando 10% Ra e 90 % (Kp, R, RD, T, EEC) e hora ponderando 90% Ra e 10 % (Kp, R, RD, T, EEC) e considerando também o ponto Entropia/EPG.

A escolha das 21 DMUs e a alteração da restrição do peso foi essencial na discriminação. Os resultados encontrados para as ferramentas eficientes (CBN 7025 *Wiper*, CBN 7025 e CC 650) tiveram como ponto de ótimo escolhido, para os 3 casos, os pesos ponderados do extremo de 90% Ra e 10 % (Kp, R, RD, T, EEC).

A análise realizada para as sete ferramentas utilizando somente os 7 pontos de ótimo Entropia/EPG, foram encontradas como ferramentas eficientes (CBN 7025 *Wiper*, CBN 7025 e CC 650) apresentadas no ANEXO H. Os resultados estão relacionados às mesmas ferramentas, mas não à mesma DMU, mostrando a diferença em trabalhar diretamente com o ponto Entropia/EPG e com os pontos da Fronteira. Quando foi utilizado o valor global, o DEA escolheu as ferramentas mais eficientes. Porém, para as 21 DMUs, cada ferramenta foi avaliada por 3 pontos diferentes. O DEA não utiliza os pesos extremos para ponderação, ele utiliza a informação desta condição para redistribuição de pesos entre as respostas. Como as ferramentas são equivalentes e igualmente eficientes, mas com pesos diferentes para os mesmos *Inputs* e *Outputs*, verifica-se que os pesos dados pelo DEA é o grau de importância que ele atribuiu a cada resposta. Neste caso, mudando-se a prioridade, a análise será feita escolhendo o melhor peso. Caso o decisor queira optar por uma das ferramentas eficientes, a opção escolhida dependerá da prioridade dada a cada resposta.

Observando os pesos dos valores absolutos, verifica-se que não foi atribuído muita importância para o custo da ferramenta, pois na condição de comparação, o custo fica

aproximadamente igual. Preocupou-se mais com o ruído, vida da ferramenta, força e rugosidade. O DEA, em função dos dados que tem, ajusta os pesos e o algoritmo de decisão faz estas comparações com diferentes pesos.

A Tabela 6.23 apresenta 3 ferramentas eficientes. As DMUs 2, 5 e 14, as quais estão relacionadas com as ferramentas CBN 7025, CBN 7025 *Wiper* e CC 650, foram as que apresentaram eficiência 100%. Fazendo uma análise das ferramentas que foram consideradas eficientes, apresentamos a Tabela 6.25, 6.26 e 6.27, com os parâmetros da otimização individual e da otimização global.

Comparando-se as ferramentas CBN 7025, CBN 7025 *Wiper* e CC 650, o custo da ferramenta CBN 7025 *Wiper* foi o maior de todas. Para os parâmetros da otimização individual,  $V_c = 100$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,15$  (mm), esta ferramenta alcançou valor de vida de 70 (min) com rugosidade de  $0,13$  ( $\mu m$ ), mas com custo elevado de US\$ 7,00.

Tabela 6.25 – Valores da otimização individual e global para a ferramenta CBN7025 (*Wiper*).

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
	$V_c$ m/min	$f$ mm/rev	$a_p$ mm	$K_p$ (U\$)	$R_a$ ( $\mu m$ )	$Fr$ (N)	$RD$ (dB)	$T$ (min)	$\frac{EEC}{N.min}$ ( $cm^3/N.min$ )
<b>CBN7025 <i>Wiper</i></b>	249	0,21	0,29	3,26	0,31	216,98	95,08	29,29	0,0626
	216	0,12	0,13	4,59	0,06	253,15	88,52	39,34	0,0119
	265	0,17	0,26	3,67	0,21	205,92	98,22	25,11	0,0551
	65	0,12	0,23	10,91	0,21	453,01	65,79	69,39	0,0059
	65	0,13	0,21	10,31	0,23	446,69	65,93	69,54	0,0064
	249	0,21	0,29	3,26	0,31	216,98	95,08	29,29	0,0626
<b>Otimização Global</b>	<b>147</b>	<b>0,17</b>	<b>0,09</b>	4,85	0,19	333,25	77,72	57,25	0,0059
	<b>210</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	4,59	0,06	257,19	87,29	41,17	0,0104
	<b>155</b>	<b>0,14</b>	<b>0,09</b>	4,58	0,13	312,38	78,22	56,64	0,0058

Comparando os valores da otimização individual para  $V_c = 216,69$  (m/min),  $f = 0,12$  (mm/rev) e  $a_p = 0,13$  (mm), esta ferramenta alcançou valor de vida de 39,34 (min) com uma rugosidade de  $0,06$  ( $\mu m$ ), mas com custo de US\$ 4,59.

Na otimização global, para  $V_c = 210,55$  (m/min),  $f = 0,12$  (mm/rev) e  $a_p = 0,12$  (mm), esta ferramenta alcançou valor de vida de 41,17 (min) e rugosidade de  $0,06$  ( $\mu m$ ), o mesmo custo US\$ 4,59 e o menor valor de ruído. Portanto, a diminuição dos custos de usinagem, foi

resultado do menor tempo de corte e maior produtividade e a melhor qualidade superficial da peça, foi resultado do baixo nível de rugosidade alcançado. Verifica-se que com estes valores da otimização global, analisando todas as respostas conjuntas, esta ferramenta foi considerada eficiente.

Experimentalmente, a ferramenta CBN 7025 conseguiu baixo rendimento em relação à qualidade superficial das peças. Comparado com as ferramentas cerâmicas, o custo da ferramenta CBN 7025 apresentou o maior valor. Para os parâmetros da otimização individual  $V_c = 100$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,15$  (mm), esta ferramenta adquiriu valor de vida de 66 (min) com uma rugosidade de  $0,62$  ( $\mu m$ ), mas com um custo de U\$ 3,67.

Tabela 6.26 – Valores da otimização individual e global para a ferramenta CBN7025

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
	$V_c$ m/min	$f$ mm/rev	$a_p$ mm	$K_p$ (U\$)	$R_a$ ( $\mu m$ )	$Fr$ (N)	$RD$ (dB)	$T$ (min)	$EEC$ ( $cm^3/N.min$ )
<b>CBN7025</b>	248	0,21	0,29	1,66	1,92	220,26	96,19	28,30	1,66
	157	0,07	0,26	4,24	0,28	334,85	79,57	45,00	4,24
	265	0,17	0,27	1,85	1,41	206,78	100,02	23,62	1,85
	76	0,10	0,23	5,14	0,53	437,22	70,38	64,54	5,14
	66	0,13	0,20	4,88	0,76	449,24	71,18	66,14	4,88
	240	0,21	0,31	1,68	1,92	228,63	94,85	30,49	1,68
	<b>Otimização Global</b>	<b>120</b>	<b>0,18</b>	<b>0,11</b>	2,86	1,44	376,91	78,02	56,67
	<b>145</b>	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	4,32	0,29	348,15	78,29	48,19	0,0066
	<b>130</b>	<b>0,13</b>	<b>0,17</b>	3,57	0,67	358,74	79,29	53,15	0,0087

Comparando os valores da otimização individual para  $V_c = 157,63$  (m/min),  $f = 0,07$  (mm/rev) e  $a_p = 0,26$  (mm), esta ferramenta alcançou valor de vida de 45 (min) com rugosidade de  $0,28$  ( $\mu m$ ), mas com custo de U\$ 4,24, com os valores da otimização global, para  $V_c = 145,49$  (m/min),  $f = 0,08$  (mm/rev) e  $a_p = 0,25$  (mm), o valor de vida desta ferramenta foi de 48,19 (min) com rugosidade de  $0,29$  ( $\mu m$ ), com o mesmo custo U\$ 4,32 e com menor ruído.

Na realização do experimento 11, para  $V_c = 162,5$  (m/min),  $f = 0,05$  (mm/rev) e  $a_p = 0,24$  (mm), há  $R_a$  de  $0,31$  ( $\mu m$ ), vida de 40 (min) e custo de U\$ 4,32. Comparando estes valores de parâmetros e de respostas, pode se concluir que a ferramenta CBN 7025

experimentalmente não seria considerada eficiente diante das outras ferramentas, devido ao alto custo e altas rugosidades alcançadas, com exceção dos valores de vida da ferramenta.

Experimentalmente, a ferramenta CC 650 obteve um bom rendimento. Houve valores de parâmetros para alta produtividade e alguns resultados foram baixos para qualidade superficial da peça. Para os parâmetros da otimização individual,  $V_c = 100$  (m/min),  $f = 0,10$  (mm/rev) e  $a_p = 0,15$  (mm), valor de vida de 59 (min) com rugosidade de  $0,23$  ( $\mu\text{m}$ ) e com baixo custo de U\$ 2,35.

Tabela 6.27 – Valores da otimização individual e global para a ferramenta CC650.

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
	$V_c$	$f$	$a_p$	$K_p$	$R_a$	$Fr$	$RD$	$T$	$\frac{EEC}{(cm^3/N.min)}$
	m/min	mm/rev	mm	(U\$)	( $\mu\text{m}$ )	(N)	(dB)	(min)	
<b>CC650</b>	242	0,21	0,31	1,02	1,28	229,46	93,10	24,60	0,0619
	159	0,06	0,25	2,51	0,05	324,45	84,39	40,27	0,0062
	266	0,17	0,26	1,12	0,84	207,60	98,54	18,97	0,0525
	79	0,10	0,20	2,84	0,30	414,73	74,25	58,76	0,0068
	62	0,13	0,23	2,97	0,49	467,44	75,21	60,12	0,0055
	242	0,21	0,31	1,02	1,26	228,64	93,24	24,50	0,0619
<b>Otimização Global</b>	<b>147</b>	<b>0,17</b>	<b>0,09</b>	1,40	1,07	337,33	84,55	49,15	0,0059
	<b>210</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	1,40	0,64	257,86	90,09	35,97	0,0105
	<b>171</b>	<b>0,11</b>	<b>0,11</b>	1,58	0,60	286,72	84,00	45,19	0,0062

Comparando os valores da otimização individual para  $V_c = 159,44$  (m/min),  $f = 0,06$  (mm/rev) e  $a_p = 0,25$  (mm), o valor de vida desta ferramenta foi de 40,27 (min) com rugosidade de  $0,05$  ( $\mu\text{m}$ ) e custo de U\$ 2,51.

Na otimização global, para  $V_c = 210,55$  (m/min),  $f = 0,12$  (mm/rev) e  $a_p = 0,12$  (mm), o valor de vida desta ferramenta foi de 35,97 (min) com rugosidade de  $0,64$  ( $\mu\text{m}$ ), com o custo U\$ 1,40 e maior valor de ruído. Houve, com a otimização global, analisando todas as respostas conjuntas, alta produtividade, uma boa qualidade e custo menor ao da otimização individual. Pelos resultados dos parâmetros analisados, esta ferramenta apresentou características de ser eficiente. Conforme o DEA, ela realmente foi eficiente, porque os valores dos parâmetros ótimos alcançaram as melhores respostas conjuntamente.

Fazendo uma análise das ferramentas que não foram consideradas eficientes, a Tabela 6.28 apresenta os valores dos parâmetros do experimento, da otimização individual e da otimização global e as respostas encontradas.

Tabela 6.28 – Valores experimentais, otimização individual e global de todas as ferramentas.

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
<i>CC 6050 Wiper</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>	<i>Kp</i>	<i>Ra</i>	<i>Fr</i>	<i>RD</i>	<i>T</i>	<i>EEC</i>
<i>Otimização:</i>	<i>m/min</i>	<i>mm/rev</i>	<i>mm</i>	<i>(U\$)</i>	<i>(µm)</i>	<i>(N)</i>	<i>(dB)</i>	<i>(min)</i>	<i>(cm<sup>3</sup>/ N.min)</i>
<i>Experimento</i>	100	0,10	0,15	2,55	0,13	340,22	64,39	62	0,0042
<i>Individual</i>	201	0,08	0,17	1,99	0,01	258,58	81,51	36,15	0,0087
<i>Global</i>	<b>88</b>	<b>0,20</b>	<b>0,33</b>	<b>2,76</b>	<b>0,13</b>	<b>484,00</b>	<b>72,48</b>	<b>56,38</b>	<b>0,0110</b>
<i>CC 6050 Wiper</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>	<i>Kp</i>	<i>Ra</i>	<i>Fr</i>	<i>RD</i>	<i>T</i>	<i>EEC</i>
<i>Otimização:</i>	<i>m/min</i>	<i>mm/rev</i>	<i>mm</i>	<i>(U\$)</i>	<i>(µm)</i>	<i>(N)</i>	<i>(dB)</i>	<i>(min)</i>	<i>(cm<sup>3</sup>/ N.min)</i>
<i>Experimento</i>	100	0,10	0,15	2,47	0,62	339,38	71,22	57	0,0044
<i>Individual</i>	152	0,06	0,26	2,74	0,24	326,79	81,88	41,38	0,0060
<i>Global</i>	<b>96</b>	<b>0,09</b>	<b>0,30</b>	<b>3,22</b>	<b>0,60</b>	<b>429,76</b>	<b>78,09</b>	<b>55,40</b>	<b>0,0048</b>
<i>CC 650 Wiper</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>	<i>Kp</i>	<i>Ra</i>	<i>Fr</i>	<i>RD</i>	<i>T</i>	<i>EEC</i>
<i>Otimização:</i>	<i>m/min</i>	<i>mm/rev</i>	<i>mm</i>	<i>(U\$)</i>	<i>(µm)</i>	<i>(N)</i>	<i>(dB)</i>	<i>(min)</i>	<i>(cm<sup>3</sup>/ N.min)</i>
<i>Experimento</i>	100	0,10	0,15	2,42	0,45	344,24	70,43	61	0,0043
<i>Individual</i>	148	0,10	0,23	2,28	0,21	341,13	84,26	46,01	0,0096
<i>Global</i>	83	0,13	0,28	2,97	0,47	451,82	79,56	59,34	0,0058
<i>CC 670 Wiper</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>	<i>Kp</i>	<i>Ra</i>	<i>Fr</i>	<i>RD</i>	<i>T</i>	<i>EEC</i>
<i>Otimização:</i>	<i>m/min</i>	<i>mm/rev</i>	<i>mm</i>	<i>(U\$)</i>	<i>(µm)</i>	<i>(N)</i>	<i>(dB)</i>	<i>(min)</i>	<i>(cm<sup>3</sup>/ N.min)</i>
<i>Experimento</i>	100	0,10	0,15	2,99	0,14	137,92	68,48	59,5	0,0108
<i>Individual</i>	203	0,08	0,17	2,34	0,01	122,69	88,03	36,63	0,0203
<i>Global</i>	<b>67</b>	<b>0,15</b>	<b>0,30</b>	<b>4,29</b>	<b>0,22</b>	<b>332,69</b>	<b>75,57</b>	<b>61,90</b>	<b>0,0082</b>
<b>CBN 7025 Wiper</b>	155	0,14	0,09	4,58	0,13	312,38	78,22	56,64	0,0058
<b>CBN 7025</b>	130	0,13	0,17	3,57	0,67	358,74	79,29	53,15	0,0087
<b>CC 650</b>	171	0,11	0,11	1,58	0,60	286,72	84,00	45,19	0,0062

De acordo com os resultados apresentados pelas ferramentas consideradas não eficientes, nos pontos de ótimo para a razão Entropia/EPG, as velocidades de corte de todas elas, são iguais à metade do valor das velocidades de corte das ferramentas eficientes. O avanço tem uma variação de 0,09 – 0,20 (mm/rev) e a profundidade de corte para as ferramentas não eficientes foi de 0,3 – 0,33 (mm).

Experimentalmente, estes parâmetros não resultam nos valores de respostas encontradas pelo método. As velocidades possuem valores baixos em relação à profundidade de corte e alguns avanços. Foi realizado o experimento de confirmação e as ferramentas não eficientes foram danificadas antes de atingir um desgaste de 0,3 (mm), não sendo apresentados os valores das respostas na Tabela 6.29.

Mas como foi relatado anteriormente, estas ferramentas não conseguiram atingir os melhores resultados de eficiência devido aos parâmetros do resultado da otimização e das respostas conseguidas com os pontos de ótimo, isto é, estes parâmetros não estavam nos limites aceitáveis para a melhor condição experimental imposta às estas ferramentas.

Os resultados apresentados na Tabela 6.22, indicam que a utilização dessa metodologia levou o algoritmo a atingir um valor ótimo para cada resposta bem próximo aos valores alvos estipulados em comparação à otimização individual.

A rugosidade superficial é a grandeza que quantifica o nível de acabamento das peças. Ela está diretamente relacionada à geometria da ferramenta e aos parâmetros de usinagem. Aumentando o raio de ponta da ferramenta, por exemplo, pode-se reduzir essa rugosidade. Isto ocorre até certo ponto, uma vez que o aumento do raio pode causar vibrações, as quais contribuem para a piora do acabamento. A taxa de avanço é também uma variável que influencia diretamente os valores de rugosidade teórica, já que quanto menor é o seu valor, menores serão as chances de se obter marcas sobre a superfície da peça pela passagem da ferramenta. Na prática, o acabamento superficial é ainda influenciado pelo ângulo de saída, o desgaste da ferramenta e a rigidez de fixação do sistema peça-ferramenta. Alheio à geometria de corte, o acabamento superficial sofre uma pequena influência da velocidade de corte.

Comparativamente no torneamento duro, a influência da profundidade de usinagem é maior que a observada com o aumento da velocidade de corte. Quando a profundidade de usinagem é incrementada, uma maior capacidade de remoção de material, devido ao uso de uma porção maior da aresta de corte, será observada, provocando, porém, o aumento da força passiva e da vibração da peça e, conseqüentemente, piorando as condições da rugosidade. Portanto, considerando as conseqüências de um processo otimizado, obtido pela metodologia DEA-OTS, acredita-se que os

parâmetros obtidos são adequados para o planejamento do processo de torneamento do aço ABNT H13 endurecido.

A metodologia da Análise Envoltória de Dados (DEA) tem como principais vantagens considerar múltiplos fatores e não requer pressupostos paramétricos dos tradicionais métodos multivariados.

Porém, existem alguns fatores críticos que devem ser considerados na aplicação dessa metodologia. Para citar (1) Os indicadores de eficiência podem ser muito sensíveis a alterações nos dados e dependem profundamente do número e do tipo de fatores considerados de *input* e de *output*. (2) De forma genérica, *inputs* podem incluir qualquer tipo de recurso utilizado por uma DMU e *outputs* podem variar conforme os produtos produzidos para uma variedade de medidas de desempenho e de atividade. (3) O tamanho do conjunto de dados analisados é também um fator de grande importância quando utilizamos modelos tradicionais de DEA.

## 6.14 Experimentos de confirmação

Para analisar a efetividade dos parâmetros ótimos encontrados na Tabela 6.17 e para confirmar os resultados em estudo, um conjunto de testes de confirmação foi executado, procedendo-se ao torneamento de oito peças. As duas respostas de rugosidade foram medidas três vezes na região central das peças. O principal objetivo dos ensaios de confirmação foi verificar se os valores das respostas encontradas eram mínimos com seus valores próximos dos alvos estabelecidos. Desta forma, iniciou-se o experimento de confirmação conforme planejamento e o resultado estão representados na Tabela 6.16. Realizaram-se os experimentos de confirmação com o valor da máxima razão Entropia/EPG encontrado na Tabela 6.14, com os valores das DMU 3, 6 e 15 e foi repetido 3 vezes para cada ferramenta.

Na DMU 5, ferramenta CBN 7025 *Wiper*, foi apresentado pela otimização multobjetivo um valor muito significativo da rugosidade 0,06 ( $\mu m$ ), diante deste fato foi realizado um experimento de confirmação e foi alcançado um valor de rugosidade ( $R_a$ ) de 0,06 ( $\mu m$ ), onde verifica-se a eficácia. Diante do exposto foi apresentada a Figura 6.5 com os valores medidos. É possível verificar que os resultados do experimento de confirmação são satisfatórios para este grupo de análise. Os modelos matemáticos adotados são muito adequados, uma vez que o comportamento das variáveis de resposta foi previsto com sucesso. O método de otimização também se apresentou capaz de indicar um ponto ótimo (no alvo com mínima variação). Para os experimentos de confirmação realizados com as ferramentas CC6050 *Wiper*, CC 6050, CC

650 Wiper, CC 670 não foi possível obter desgaste de 0,3 mm para os parâmetros utilizados, pois a Vc teve valor muito baixo para ap muito alto.

Todas as variáveis de resposta consideradas atingiram valores próximos dos seus respectivos alvos de acordo com a Tabela 6.29.

Tabela 6.29 – Experimento de confirmação

<i>Ferramenta</i>	$V_c$ m/min	$f$ mm/rev	$a_p$ mm	<i>Conf.</i>	$K_p$	$R_a$	$Fr$	$RD$	$T$	$EEC$
<b>CC6050</b> <i>Wiper</i>	88,52*	0,20	0,33	<b>1° Rep</b>	-	-	-	-	-	-
<b>CC 6050</b>	96,18*	0,09	0,30	<b>1° Rep</b>	-	-	-	-	-	-
<b>CC 650</b> <i>Wiper</i>	83,88*	0,13	0,28	<b>1° Rep</b>	-	-	-	-	-	-
<b>CC 670</b>	67,27*	0,15	0,30	<b>1° Rep</b>	-	-	-	-	-	-
<b>CC 650</b>	171,86*	0,11	0,11	<b>1° Rep</b>	1,61	0,65	288,65	86,40	43,35	0,007
<b>CBN 7025</b> <i>Wiper</i>	155,33*	0,14	0,09	<b>1° Rep</b>	4,60	0,14	316,78	80,90	54,30	0,006
<b>CBN 7025</b> <i>Wiper</i>	<b>210,55**</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>1° Rep</b>	4,60	<b>0,06</b>	261,30	89,20	39,60	0,011
<b>CBN 7025</b>	130,71*	0,13	0,17	<b>4° Rep</b>	3,57	0,67	358,74	79,29	53,15	0,0087

\*Ponto de ótimo encontrado Entropia/EPG usado na confirmação

\*\* Ponto de ótimo do extremo (0,9-0,1) da ferramenta CBN 7025 utilizado na confirmação

A Figura 6.32 apresenta o valor medido da rugosidade ( $R_a$ ) realizada no experimento de confirmação da ferramenta CBN 7025 *Wiper* ( DMU 5).

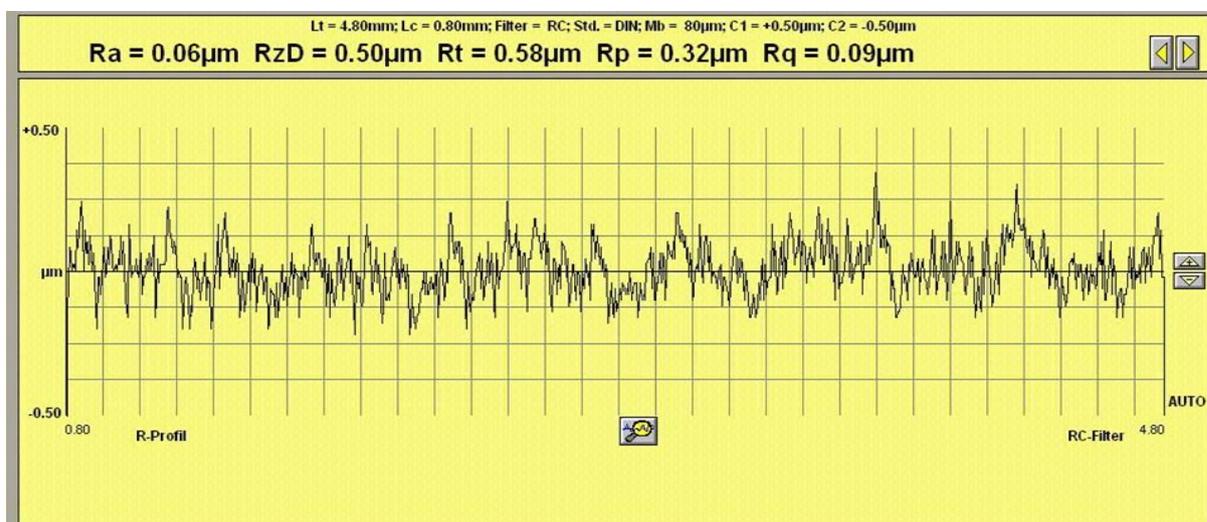


Figura 6.32 - Valor de rugosidade experimento de confirmação ferramenta CBN 7025 *Wiper*.

## 7 CONCLUSÕES

No contexto da otimização multi-objetivo dos processos de manufatura, sobretudo em relação ao conjunto de ferramentas de análise empregado para esta finalidade, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor uma metodologia de otimização de seleção de ferramentas. Por meio de uma análise criteriosa dos trabalhos da literatura voltados para este tema, ficou constatado a existência de um campo para potenciais contribuições, o que fez da relevância quanto à identificação dos pesos ótimos, juntamente com a complexidade observada quando os múltiplos objetivos se mostram significativamente correlacionados, os elementos motivacionais para a realização desta pesquisa. Sendo assim, levando-se em consideração todas as discussões apresentadas nos capítulos anteriores, principalmente para os resultados observados com a aplicação prática do método, conclui-se que o método proposto foi desenvolvido e aplicado com êxito, uma vez que os pesos ótimos obtidos resultaram em uma condição ótima para cada ferramenta na qual teve como a mais eficiente as ferramentas CBN 7025, CBN 7025 (*Wiper*) e CC 650. Portanto, a partir dos objetivos específicos enumerados no Capítulo 1, podem ser estabelecidas as seguintes considerações:

1. Os modelos matemáticos desenvolvidos pela Metodologia de Superfície de Resposta, tanto para as funções objetivo das respostas otimizadas, ou para os componentes principais, se mostraram como expressões confiáveis para a análise e otimização do objeto de estudo. Os resultados estatísticos para estas funções apresentaram um nível de confiança superior a 95% para todos os modelos e a representatividade das equações foi superior a 80% para a maioria deles.
2. A análise do comportamento da usinagem do aço H13, sob o ponto de vista dos efeitos principais e efeitos das interações entre os parâmetros, além de esclarecer informações relevantes para um adequado controle do processo, permitiu visualizar os conflitos de interesse existente entre as múltiplas variáveis. No entanto, como os seus níveis de influência foram diferentes entre as respostas, com pontos de ótimo individuais levando a configurações distintas do processo, comprovou-se a necessidade de sua otimização multi-objetivo.
3. A atividade de otimização individual das variáveis de resposta demonstra claramente o conflito existente entre estas variáveis na determinação de um ponto ótimo comum.

Cada variável de resposta possui um ponto ótimo específico e isto ocorre mesmo entre as variáveis fortemente correlacionadas. Determinar um ponto ótimo comum é uma tarefa árdua e frequentemente uma variável (ou um conjunto de variáveis) é penalizada em detrimento das demais.

4. Para o cenário de otimização de múltiplas respostas independentes, os resultados alcançados com o método NBI também permitiram a visualização dos pesos ótimos ao longo das Fronteiras de Pareto do problema, localizando o ponto mais eficiente frente às inúmeras possibilidades. O método proposto foi capaz de identificar a melhor solução dentro dos limites especificados para o processo de usinagem.

5. As ferramentas eficientes de acordo com o DEA foram: CBN 7025 (*Wiper*), CBN 7025 e CC650.

6. A ferramenta CBN 7025 (*Wiper*) obteve resultados excelentes em todas as respostas, a ferramenta CBN 7025 obteve resultados satisfatórios e a ferramenta CC 650 obteve o menor custo.

7. Não foram observadas quebras ou lascamentos nas arestas de corte das ferramentas nos experimentos iniciais, mas houve lascamentos no experimento de confirmação.

8. A rugosidade ao final da vida das ferramentas manteve-se dentro do padrão de rugosidade N6 (até 0,8  $\mu\text{m}$  na escala Ra), para os valores  $V_c = 100 \text{ m/min}$ ,  $f = 010 \text{ mm/rev}$  e  $a_p = 015 \text{ mm}$ .

9. O fator que teve a maior influência exercida sobre a vida da ferramenta foi a velocidade de corte e o de maior influência exercida sobre a rugosidade da peça foi o avanço de corte.

10. As ferramentas CC 650 *Wiper*, CC 670, CC6050, CC 6050 *Wiper* não foram consideradas eficientes.

É necessário considerar, entretanto, que a qualidade dos resultados obtidos com a presente abordagem não pode ser extrapolada para diferentes materiais, ferramentas ou máquinas e são válidos para a faixa de níveis adotados. Pode-se, todavia, em virtude dos resultados obtidos neste trabalho, recomendá-lo na otimização de outros processos de usinagem.

## 7.1 Contribuições do trabalho

A principal contribuição desta pesquisa, de acordo com o que foi destacado ao longo de todo o trabalho, se refere à proposição de uma metodologia estruturada, diferenciada em relação às técnicas encontradas na literatura, para a seleção de ferramentas. Como alguns desses elementos diferenciais, destacam-se a independência do método de análises subjetivas provenientes dos tomadores de decisão, a alternativa para sua aplicação na otimização de múltiplas características correlacionadas e a possibilidade de visualização do resultado ótimo na fronteira de Pareto do problema, sendo esta última uma informação de grande relevância para uma gestão mais eficiente dos processos.

Além disso, pode-se afirmar que o método proposto promove o máximo valor entre os múltiplos objetivos, ou seja, entre um conjunto de soluções Pareto-ótimas, consegue identificar o melhor ponto de ótimo. Outro ponto importante diz respeito ao privilégio dos ótimos individuais dado pelo método para o processo de usinagem analisado, uma vez que os alvos das respostas foram definidos a partir da otimização individual das funções objetivo (pontos de ancoragem da fronteira de Pareto). Portanto, espera-se que o método NBI e DEA possam ser aplicável a diferentes processos industriais, contribuindo, através de seus resultados, para as suas melhorias sob o ponto de vista operacional e também tecnológico.

## 7.2 Sugestões para estudos futuros

A partir da proposição de Otimização de Seleção de Ferramentas para o Torneamento do Aço H13, as pesquisas futuras vislumbram a melhoria e a consolidação da estratégia desenvolvida. Assim, as sugestões para estes estudos podem ser direcionados para os seguintes tópicos:

- Comparação, em um mesmo problema, do método proposto com outras ferramentas e outro tipo de material no processo de torneamento.
- Aplicação do método proposto na otimização de outros processos de usinagem, visando verificar sua funcionalidade em outros contextos e em operações diferentes.
- Aplicação do método proposto na otimização de outros processos de manufatura, visando verificar sua eficiência em outros contextos.
- Utilização de outros critérios para avaliação das soluções Pareto-ótimas no método NBI, avaliando seus impactos na localização das soluções mais viáveis.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K. The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. *Wear*, Vol. 196, p. 279-284, 1996.

ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M. L. H. Tool wear, cutting forces and temperature evaluation when turning hardened bearing steel using PCBN and ceramic materials. *Proceeding of the Thirty-First International Matador Conference, Manchester*, p. 209-16, 1996.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões. Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, p. 295, 1990.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões. 5ª reimpressão, Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, 1995.

ANEIRO, F. M.; COELHO, R. T.; BRANDÃO, L. C. Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds, *Journal of the Brazilian Society Mechanical Science Engineering*, Vol. 30, no 2, p. 104-109, 2008.

ANGSERYD, J. et al. Detailed microstructure of a CBN based cutting tool material., *International Journal of Refractory Metals& Hard Materials*, Vol. 27, p. 249-255, 2009.

ARDAKANI, M. K. e NOOROSSANA, R. A new optimization criterion for robust parameter design – the case of target is best. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, n. 9-10, p. 851-859, 2008.

ARNDT, G.; BROWN, R. H. On the temperature distribution in orthogonal machining. *International Journal of Machine Tool Design Research*, Vol. 7, n. 1, p. 39-53, 1967.

ATTANASIO, A.; CERETTI, E.; FIORENTINO, A.; CAPPELINIA, C.; GIARDINI C. Investigation and FEM-based simulation of tool wear in turning operation with uncoated carbide tools, *Wear*, Vol. 269, p. 344-350, 2010.

ATTANASIO, A.; UMBRELLO, D.; CAPPELLINI, C.; ROTELLA, G.; M'SAOUBI, R. *Wear*, vol. 98, p. 286-287, 2012.

ASTAKHOV, V. P. *Tribology of Metal Cutting*. 1. ed. Elsevier, 2006.

BAJIC, D.; CELENT, L.; JOZIC, S. Modeling of the Influence of Cutting Parameters on the Surface Roughness, Tool Wear and Cutting Force in Face Milling in Off-Line Process Control, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 58, p. 673-682, 2012.

BYRNE, G. Thermoelectric signal characteristics and average interfacial temperatures in the machining of metals under geometrically defined conditions, *International Journal Machine Tools Manufacturing*, Vol. 27, n. 2, p. 215-224, 1987.

BARBACKIA.; KAWALEC, M.; HAMROL, A. Turning and Grinding as a Source of Microstructural Changes in the Surface Layer of Hardened Steel, *Journal Materials Processing Technology*, p. 21-25, 2003.

BARRY, J.; BYRNE, G. Cutting Tool Wear in Machining of Hardened Steels, Part I: Alumina/TiC Cutting Tool Wear, *Journal Wear*, p. 139-151, 2001.

BARRY, J.; BYRNE, G. Cutting Tool Wear in Machining of Hardened Steels, Part II: Cubic Boron Nitride Cutting Tool Wear, *Journal Wear*, p. 152-160, 2001.

BAS, J. Aços especiais de usinabilidade melhorada. *Máquinas e Metais*, n. 422, p. 96-113, março, 2001.

BARTARYA, G.; CHOUDHURY, G. S. K. State of the art in hard turning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 53, p. 1-14, 2012.

BELHADI, S. et al. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel. *Journal Engineering Manufacture, Part B*, Vol. 219, p. 515-524, 2005.

BENGA, G.; ABRAO, A. Turning of hardened 100Cr6 Bearing Steel with Ceramic and PCBN Cutting Tools, *Journal Materials Processing Technology*, p. 237-241, 2003.

BITTERLICH, B.; BITSCH, S.; FRIEDERICH, K. Sialon based ceramic cutting tools. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, 2008.

BIERMANN, D.; KIRSCHNER, M.; PANTKE, K.; TILLMANN, W.; HERPER, J. New coating systems for temperature monitoring in turning processes, *Surface & Coatings Technology*, vol. 215, p. 376-380, 2013.

BORDUI, D. Hard-part machining with ceramic inserts. *Ceramic Bulletin*, Vol. 67, n. 6, p. 298-304, 1988.

BOSHEH, S. S.; MATIVENGA, P. T. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, p. 225-233, 2006.

BOUACHA, K. et al. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 28, p. 349-361, 2010.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W (a). *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker, Inc, Second Edition, p. 11 -28, 1989.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A (b). *Fundamentals of machining and machine tools*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1989.

BOX, G. E. P.; JONES, S. *Designing products that are robust to the environment*. *Total Quality Management*, Vol. 3, p. 265-282, 1992.

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

BUSACCA, G. P.; MARSEGUERRA, M.; ZIO, E. Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72, p. 59-74, 2001.

BRATCHELL, N. Multivariate Response Surface Modeling by Principal Components Analysis. *Journal of Chemometrics*, Vol. 3, p. 579-588, 1989.

BRINKSMEIER, E.; MAYR, P.; LUBBEN, T.; POUTEAU, P.; DIERSEN, P. Influence of Material Properties on Surface Integrity and Chip Formation in High Speed Turning, *Metal Cutting and High Speed Machining*, Kluwer Academic/ Plenum Publisher, p. 31-40, 2002.

CAMPOS, P. H. S.; DAVIM, J. P.; FERREIRA, J. R.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P. *The Machinability of Hard Materials A Review*. *Machinability of Advanced Materials*. 45ed.: 1ed. London, UK: John Wiley & Sons, Ltd, , Vol. 1, p. 145-174, 2014.

CHARNES, W. W. COOPER, E. RHODES, Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, Vol.2, p.429-444, 1978.

CHAVOSH, S. Z., TAJDARI, M., Surface roughness modeling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool, *International Journal Materials Forming*, Vol. 3, p. 233-239, 2010

- CHAO, B. T. E.; TRIGGER, K. J. Cutting temperatures and metal cutting phenomena. *Transactions of the ASME*, Vol. 73, n. 6, p. 777-793, 1951.
- CHEN, W. Cutting Forces and Surface Finish when Machining Medium Hardness Steel Using CBN Tools, *International Journal Machine Tools & Manufacture*, p. 455-466, 1997.
- CHEN, M. C. e FAN, S. K. S. Tolerance evaluation of minimum zone straightness using non-linear programming techniques: a spreadsheet approach. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 43, n. 3, p. 437-453, 2002.
- CHIAO, C. H. e HAMADA, M. Analyzing experiments with correlated multiple responses. *Journal of Quality Technology*, Vol. 33, n. 4, p. 451-465, 2001.
- CH'NG, C. K.; QUAH, S. H. e LOW, H. C. Index Cpm in multiple response optimization. *Quality Engineering*, Vol. 17, n. 1, p. 165-171, 2005.
- CHO, B. R.; PARK, C. Robust design modeling and optimization with unbalanced data, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 48, p. 173-180, 2005.
- CHOU, Y.; EVANS, C.; BRARASH, M. Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel. *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 124, p. 274-283, 2002.
- CHOUY.; EVANS, C. Cubic Boron Nitride Tool Wear in Interrupted Hard Cutting, *Journal Wear*, p. 234-245, 1999.
- CHOU, Y.; EVANS, C. Tool Wear Mechanisms in Continuous Cutting of Hardened Tool Steel, *Journal Wear*, p. 59-65, 1997.
- COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data Envelopment Analysis (DEA) - Thirty years on. *European Journal of Operational Research*, Vol. 192, p. 1-17, 2009.
- COOPER, W. W.; SIEFORD, L. M.; TONE, K. Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, application, references and DEA-Solver Software. 2nd. ed. New York: Springer Science Business Media, 2007.
- CORREIA, D. S.; GONÇALVES, C. V.; CUNHA, J. R.; FERRARESI, V. A. Comparison Between Genetic Algorithms and Response Surface Methodology in GMAW Welding Optimization, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, p. 70-76, 2005.
- COSTA, D. D. Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Dissertação de Mestrado, p. 110, 1993.

- CUPINI, N. L.; FERREIRA, J. R. Turning of carbon and glass fiber hybrid cloth composite material, NIST-Special Publication, n. 847, p. 447-53, 1993.
- DAVIES, M.; PRATT, J.; DUTTERER, B.; BURNS, T. Regenerative Stability Analysis of Highly Interrupted Machining, Metal Cutting and High Speed Machining, Kluwer Academic/ Plenum Publisher, p. 151-160, 2002.
- DAVIES, M.; CHOU, Y.; EVANS, C. J. On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning, Ann. CIRP, Vol. 45, n. 1, p. 77-82, 1996.
- DAVIM, J. P. Machine of Hard Materials, Springer: London, 2011.
- DAVIM, J. P. Princípios de Maquinagem, Editora Almedina, p. 111-134, 1995.
- DAWSON, T.; KURFESS, R. Wear Trends of PCBN Cutting Tools in Hard Turning, Metal Cutting and High Speed Machining, Kluwer Academic/ Plenum Publisher, p. 221-231, 2002.
- DEGARMO, E.; BLACK, J.; KOHSER, R.; Cutting Tools for Machining, Materials and Processes in Manufacturing, Willey Text Books, p. 618-652, 1997.
- DEL CASTILLO, E.; FAN, S.; SEMPLE J. Optimization of dual response systems: A comprehensive procedure for degenerate and non-degenerate problems. European Journal of Operational Research, Vol. 112, p. 174-186, 1999.
- DERRINGER, G., SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. Journal of Quality Technology, Vol. 12, n. 4, p. 214-219, 1980.
- DING, X.; LIEW, W.; NGOI, B.; GAN, J.; YEO, S. Wear of CBN Tools in Ultra Precision Machining of STAVAX”, Tribology Letter, Vol. 12, n.1, p. 3-12, 2002.
- DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. Influência dos parâmetros de corte na rugosidade de peças torneadas, Departamento de Engenharia de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, 2002.
- DINIZ, A.; OLIVEIRA, A. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. Journal of Materials Processing Technology, 275-281, 2008.
- DINIZ, A.; GOMES, D.; BRAGHINI, A. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. Journal of Materials Processing Technology, p. 240-248, 2005
- DINIZ, A.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. (5ª ed.). São Paulo: Artliber, 2006.

- DINIZ, A.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. (9ª ed.). São Paulo: Artliber, 2014.
- DONNANGELO, F.; GEORGETTI, A. D.; SANTOS, J. R. Torneamento de engrenagens de furo liso em material endurecido, Máquinas e Metais, maio, p. 103-112, 2001.
- DUDZINSKI, D. Metal Cutting and High Speed Machining, Kluwer Academic/ Plenum Publisher, p. 221-231, 2002.
- ELBESTAWI, M. A.; SRIVASTAVA, A. K.; EL-WARDANY, T. I. A model for chip formation during machining of hardened steel, Vol. 45, n1, p. 71-76, 1996.
- ERNST, M. Chip formation, friction and high quality machined surfaces, Surface Treatment of metals. American Society of Metals, Vol. 29, p. 299, 1941.
- EZUGWU E.; OKEKE C.; Tool Life and Wear Mechanisms of TiN Coated Tools in an Intermittent Cutting Operation – Journal Materials Processing Technology, p. 10-15, 2001.
- FARIAS, A. D. Análise da Tensão Residual e Integridade Superficial no Processo de Torneamento em Material Endurecido do Aço ABNT 8620 Cementado. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society, p. 253-290, 1957.
- FERREIRA, C. M. C.; GOMES, A. P. Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações. Viçosa: Editora UFV, 2012.
- FUNG, C. P., KANG, P. C. Multi-response optimization in friction properties of PBT composites using Taguchi method and principal component analysis. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, issue 3. p. 602-610, 2005.
- GAITONDE, V. N.; KARNIK, S. R.; FIGUEIRA, L.; DAVIM, J. P. Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and *Wiper* ceramic inserts. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, vol. 27, p. 763-754, 2009.
- GOMES, J. H. F.; SALGADO Jr., A. R.; PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; COSTA, S. C. e BALESTRASSI, P. P. Global Criterion Method based on Principal Components to the Optimization of Manufacturing Processes with Multiple Responses. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Vol. 58, n. 5, p. 345-353, 2012.

- GOMES, J. H. F.; PAIVA, A. P.; COSTA, S. C.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, E. J. Weighted Multivariate Mean Square Error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings. *European Journal of Operational Research*, Vol. 226, p. 522-535, 2013.
- GRZESIK, W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials - Theory, Modelling and Applications*. Elsevier, 2008.
- GRZESIK, W. Wear development on wiper  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  mixed ceramic tools in hard machining of high strength steel. *Wear* Vol. 266, p. 1021-1028, 2008.
- GUO, Y., SAHNI, J. A Comparative Study of Hard Turned and Cylindrically Ground White Layers, *International Journal Machine Tools & Manufacture*, p. 135-145, 2004.
- GUTTMAN, L. Some Necessary Conditions for Common Factor Analysis, *Psychometrika*, Vol. 19, p. 149-161, 1954.
- HUANG, Y.; CHOU, Y. K.; LIANG, S. Y. CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, p. 443-453, 2007.
- HUANG, Y.; LIANG, S. Y. Modelling of CBN Tool crater wear in finish hard turning. *International Journal Advanced Manufacture Technology*. Vol. 24, p. 639-632, 2005.
- IKUA, B.; TANAKA, H.; OBATA, F.; SAKAMOTO, S. *Study on Chatter Vibration in Ramping of Sculptured Surfaces Metal Cutting and High Speed Machining*, Kluwer Academic/ Plenum Publisher, p. 141-149, 2002.
- JACKSON, D. A. Stopping Rules in Principal Component Analysis. A Comparison of Heuristical and Statistical Approaches. *Ecology*, Vol. 74, p. 2204-2214, 1993.
- JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue. *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, p. 2050-2055, 2008.
- JIA, Z.; IERAPETRITOU, G. Generate Pareto optimal solutions of scheduling problems using normal boundary intersection technique. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 31, p. 268-280, 2007.
- KAZEMZADEH, R. B.; BASHIRI, M.; ATKINSON, A. C.; NOOROSSANA, R. A general framework for multiresponse optimization problems based on goal programming. *European Journal of Operational Research*, Vol. 189, p. 421-429, 2008.

KHAMEL, S.; OUELAA, N.; BOUACHA, K.; Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, n.11, p. 3605-3616, 2012.

KHURI, A. I., CONLON, M. Simultaneous optimization of multiple responses represented by polynomial regression functions. *Technometrics*, Vol. 23, n. 4, p. 363-375, 1981.

KLOCKE, E.; DAMBOM, O.; CAPUDI, F. G. G. Influence of polishing process on the near-surface zone of hardened steel. *Science Direct*, 2005.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability profile of hard cutting and grinding processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, p. 22-45, 2005.

KOMANDURI, R.; SCHROEDER, T.; HAZRA, J.; VON TURKOVICH, B. F.; FLOM, D. G. On the catastrophic shear instability in high-speed machining of AISI 4340 steel, *Transactions of the ASME, Journal Computers & Industrial Engineering*, Vol. 104, p.121-131, 1982.

KLIMENKO, S. A.; MUKOVOZ, Y. A.; LYASHKO, V. A.; OGORODNIK, V. On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools. *Wear*, Vol. 157, n.1, p. 1-7, 1992.

KÖKSOY, O. A nonlinear programming solution to robust multi-response quality problem. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 196, n. 2, p. 603-612, 2008.

KÖKSOY, O. & DOGANAKSOY, N. Joint optimization of mean and standard deviation using response surface methods. *Journal of Quality Technology*, Vol. 35, n. 3, p. 237-334, 2003.

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

KÖKSOY, O. A nonlinear programming solution to robust multi-response quality problem. *Applied Mathematics and Computation*. doi: 10.1016/j.amc.2007/06.023, 2007.

KÖNIG, W.; WAND, T. H. Turning bearings steel with amorphous & ceramic. *Industrial Diamond Review*, Vol. 47, p. 117-120, 1993.

KUNDRÁK, J. et al. Accuracy of hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 202, p. 328-338, 2008.

KOMANDURY, R. *Ceramic Cutting Tools, Friction Wear Ceramics*, Marcel Dekker Inc, p. 289-311, 1994.

KURT, A.; SEKER, U. The effect of chamfer angle of polycrystalline cubic boron nitride cutting tool on the cutting forces and the tool stresses in finishing hard turning of AISI 52100 steel. *Materials & Design*, Vol. 26, p. 351-356, 2005.

KONIG, W.; KOMANDURI, R.; TONSHOFF, H.; AKERSHOTT, G. Machining of Hard Materials, *Annals of the CIRP*, Vol. 33, n. 2, p. 417- 427, 1984.

KORKUT, I.; ACIR, A.; BOY, M.; Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool–chip interface temperature in machining. *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, p. 11651-11656, 2011.

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

LAHIFF, C.; GORDON, S.; PHELAN, P. PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 23, p. 638-644, 2007.

LALWANI D. I.; MEHTA, N. K.; JAIN, P. K. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel, *Journal Materials Processing Technology*, Vol. 206, p. 167-179, 2008.

LASDON, L. S.; WARREN, A. D.; JAIN, A. & RATNER, M. Design and testing of a Generalized Reduced Gradient Code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 4, n. 1, p. 34-50, 1978.

LEE, S. B.; PARK, C. Development of robust design optimization using incomplete data. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 50, p. 345-356, 2006.

LEE.; SHAFFER, B. The theory of plasticity applied to a problem of machining, *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 18, n. 4, p. 405, 2007.

LESHOCK, C. E.; SHIN, Y. C. Investigation on cutting temperature in turning by a tool-work thermocouple technique, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, p. 502-508, 1997.

LIAO, H. C. Multi-response optimization using weighted principal component. *International Journal Adv. Manuf. Technol*, n. 27, p. 720-725, 2005.

LIMA, F. E.; NOVASKI, O.; LORCA, M. C. A.; GUARNIERI, A.; PARANHO, E.; DEZORDI, NÓBREGA, R.; GIBSON, L. G. Usinagem de materiais endurecidos. Usinagem 2000 – Feira e Congresso, São Paulo, p. 11, 2000.

LIMA, J. G.; ÁVILA, R. F.; ABRÃO, A. M.; FAUSTINO, M.; DAVIM, J. P. Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. *Journal of Material Processing Technology*. Vol. 169, p. 395-388, 2005.

LIN, D. K. J. & TU, W. Dual response surface optimization. *Journal of Quality Technology*, Vol. 27, p. 34-39, 1995.

LIST, G.; SUTTER, G.; BOUTHICHE, A.; Cutting temperature prediction in high speed machining by numerical modelling of chip formation and its dependence with crater wear, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 54-55, p. 1-9, 2012.

LIU, J. S.; LU, L. Y.; LU, W. M.; LIN, B. J. Data envelopment analysis 1978-2010: A citation-based literature survey. *Omega*, Vol.41, n.1, p. 3-15, 2013.

LIU , X.; WEN, D.; LI, Z.; XIAO, L.; Yan, F. Cutting Temperature and Tool Wear of Hard Turning Hardened Bearing Steel, *Journal Materials Processing Technology*, p. 200-206, 2002 a.

LIU, X.; WEN, D.; LI, Z.; XIAO, L.; Yan, F. Experimental Study on Hard Turning GCr15 Steel with PCBN Tool, *Journal Materials Processing Technology*, p. 217-221, 2002 b.

LOPES, L. F. D. Análise de Componentes Principais Aplicada à Confiabilidade de Sistemas Complexos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina–UFSC, Florianópolis, p.138, 2001.

LUENBERGER, D. G. e YE, Y. Linear and nonlinear programming. 3 ed. New York: Springer, p. 516, 2008.

LUO, S.; LIAO, Y.; TSAI, Y. Wear Characteristics in Turning High Hardness Alloy Steel by Ceramic and CBN Tools, *Journal Materials Processing Technology*, p. 114-122, 1999.

MACHADO, Á. R. et al., Teoria da Usinagem dos Materiais. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MARCIO, B.; JAMES, W. Cutting temperature: prediction and measurement methods-a review, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, p. 195-202, 1999.

MARIANO, E. B.; ALMEIDA, M. R.; REBELATTO, D. A. N. Princípios Básicos para uma proposta de ensino sobre análise por envoltória de dados. In: Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Anais. Passo Fundo, 2006.

MATSUMOTO, H. Uma contribuição ao estudo do processo de torneamento de aços endurecidos. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Tese de doutorado, p. 148, 1998.

MINGOTI, S. A. Pareto Chart and Principal Components Analysis Combined, Revista Produto & Produção, Vol. 5, n. 1, p. 21-29, 2001.

MOHAMED, W. A.; SALIM, B.; MOHAMED, A. Y.; TAREK M.; JEAN-FRANÇOIS, R. Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26, n.12, p. 4105 - 4114, 2012.

MONTGOMERY, D. C. Designs and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 2005.

MURPHY, T. E. Multivariate Quality Control Using Loss-Scaled Principal Components, PhD. Thesis, Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, p. 248, 2004.

NABHANI, F. Wear Mechanisms of Ultra Hard Cutting Tools Materials, Journal Materials Technology, p. 402-412, 2001.

NAKAYAMA, K.; ARAI, M.; KANDA, T. Machining characteristics of hard materials. Annals of the CIRP, Vol. 37, n.1, p. 89 -92, 1988.

NASH, S. G., SOFER, A. Linear and nonlinear programming. McGraw-Hill, 1996, 692 p.

NG, E. G.; ASPINWALL, D. K. The Effect of Workpiece Hardness and Cutting Speed on the Machinability of AISI H13 Hot Work Die Steel When Using PCBN Tooling. Transactions of the ASME. Vol. 124, p. 588-594, 2002.

OBIKAWA, T.; MATSUMURA, T.; SHIRAKASHI, T.; USUI, E. Wear Characteristics of Alumina Coated and Alumina Ceramic Tools, Journal Materials Processing Technology, p. 211-216, 1997.

OLIVEIRA, F.; SILVA, R.; VIEIRA, J. Improved Wear Resistance of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Tool Inserts by Addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Platelets – Tribology International, p. 57-60, 2003.

OLIVEIRA, A. J. D.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, J. D. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, p. 5262-5270, 2009.

OZEL, T. Modelling of Hard Machining: Effect of Insert Edge Preparation in CBN Cutting Tools, *Journal Materials Processing Technology*, p. 284-293, 2003.

OZEL, T.; ALTAN, T. Determination of Workpiece Flow Stress and Friction at the Chip-Tool Contact for High-Speed Cutting, *International Journal Machine Tools & Manufacture*, p. 134 -152, 2000.

PAIVA, E. J.; RODRIGUES, L. O.; COSTA, S. C.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P.; COSTA, S. C. FCAW process optimization using the multivariate mean square error. *Welding International*, Vol. 26, p. 79-86, 2012.

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

PAIVA, A. P.; PAIVA, E. J.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P.; & COSTA, S. C. A. multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 43, p. 631-643, 2009.

PAIVA, A. P.; CAMPOS, P. H.; FERREIRA, J. R.; LOPES, L. G. D.; PAIVA, E. J.; & BALESTRASSI, P. P. A multivariate robust parameter design approach for optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol.30, p. 152-163, 2012.

PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 189, p. 26-35, 2007.

PALANI, P. K. & MURUGAN, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.

PANTALE, O. et al. 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects. *Comput. Mech. Engrg.* Vol. 193, p. 4383-4399, 2004.

PAMPUCH, R.; LIS, J. Ceramic Charting the Future, *Techna*, p. 2327-2334, 1995.

- PAVEL, R. et al. Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, p. 341-349, 2005.
- PENALVA, M. L. et al. Effect of Tool Wear on Roughness in Hard Turning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51, p. 57-60, 2002.
- PEREIRA, J. Estudo das condições de corte no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos (DOE). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, Dissertação de Mestrado, 2006.
- POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY, B.; JAWAHIR, I.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, E. The Influence of the Microstructure of Hardened Tool Steel Workpiece on the Wear of PCBN Cutting Tools, *International Journal Machine Tools & Manufacture*, p. 139-144, 2003.
- QIAN, L.; HOSSAN, M. R. Effect on cutting force in turning hardened tool steels. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.191, p. 274-278, 2007.
- RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 840 p. 2009.
- RECH, J.; MOISAN, A. Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, p. 543-550, 2003.
- RENCHER, A.C. *Methods of Multivariate Analysis*. John Wiley and Sons, 2 ed., p.740. 2002.
- RHODES, E. *Data envelopment analysis and related approaches for measuring the efficiency of decision making units with an application to program following through in US education*. Thesis. Carnegy Melon University, 1978.
- RIBEIRO, M. V.; BAHIA, A. L. H. Study of the turning nickel alloy Pyromet ® 31V (SAE HEV8). In: *European Symposium on Superalloys and their Applications*. Kreuth - Germany, p. 25-28, 2010.
- RODRIGUES, L. O.; PAIVA, A. P. & COSTA, S. C. Otimização do processo de soldagem com eletrodo tubular através da análise da geometria do cordão de solda. *Soldagem & Inspeção*, Vol. 13, n. 2, p. 118-127, 2008.
- SAHIN, Y. Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, p. 3478–3489, 2009.
- SANDVIK. *Manual Técnico: Tecnologia de Usinagem dos Metais*, Sandvik Coromant, 2010.

SANTOS, M. A. R.; MARINS, F. A. S.; SALOMON, Vol. A. P. A Utilização da Função Arbitragem de Nash nos Modelos DEA CCR: Uma abordagem na orientação combinada input/output sob a ótica da Teoria dos Jogos de Barganha. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Anais. Ubatuba, 2011.

SATA, T. Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications. *Annals of the CIRP*, Vol. 34, p. 473-476, 1985.

SAURIN, V.; LOPES, A. L. M.; JÚNIOR, N. C. A. C.; GONÇALVES, C. A. Medidas de eficiência e retorno de investimento: um estudo nas distribuidoras de energia elétrica brasileiras com base em Data Envelopment Analysis, Índice de Malmquist e ROI. *Revista de Administração da UFSM*, Vol. 6, n.1, p.25-38, 2013.

SINGH, D.; RAO, P. V. A surface roughness model for hard turning process. *International Journal Advanced Manufacture Technology*, Vol. 32, p. 1124-1115, 2007.

SMITH, G. T. *Cutting Tool Technology - Industrial Handbook*. Springer, 2008.

SHAW, M. C. *Metal cutting principles*. I New York: Clarendon Press Oxford, 1986.

SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*, second ed., Oxford, New York, 2005.

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

SHIN, S.; CHO, B. R. Bias-specified robust design optimization and its analytical solutions. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 48, p. 129-140, 2005.

SHUKLA, P.K.; DEB, K. On finding multiple Pareto-optimal solutions using classical and evolutionary generating methods. *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, p. 1630-1652, 2007.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; ANGULO MEZA, L.; GOMES, E. G.; BIONDI NETO, L. Curso de análise de envoltória de dados. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Anais. Gramado, 2005.

SOUZA, J. V. C.; RIBEIRO, M. V.; SILVA, O. M. M.; MELO, F. C. L. . Materiais Cerâmicos Uma tecnologia viabilizadora nos processos de usinagem. *Máquinas e Metais*, Vol. 47, p. 240-263, 2011.

SOUZA, J. V. C ; SILVA, O. M. M.; NONO, M. C. A.; MACHADO, J. P. B. ; PIMENTA, M.; RIBEIRO, M. V.; Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tool sintered with CeO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additives with AlCrN coating. *Materials Research (São Carlos. Impresso)*, Vol. 14, p. 514-518, 2011.

STAKHNIV, N. E.; DEVIN, L. N.; PETRUSHA, I. A.; OSIPOV, A. S. Dynamic Phenomena in Finish Turning of Hardened Steels with CBN-Based Tools, *Journal of Superhard Materials*, Vol. 31, n. 3, P. 196-202, 2009.

STEPHENSON, D. A. Assessment of steady-state metal cutting temperature models based on simultaneous infrared and thermocouple data, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, n. 2, p. 121-128, 1991.

STEPHENSON, D. A.; ALI, A. Tool temperatures in interrupted cutting, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, p.127-136, 1992.

STEPHENSON, D. A. Tool-work thermocouple temperature measurements - theory and implementation issues, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, p. 432-437, 1993.

STEPHENSON, A. D.; AGAPIOU, J. S. *Metal Cutting Theory and Practice*. 2nd ed. Taylor & Francis, 2006.

STEENACKERS, G.; GUILLAUME, P. Bias-specified robust design optimization: a generalized mean squared error approach. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 54, p. 259-268, 2008.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; GAITONDE, V.N.; SAMUEL, G.L.; DAVIM, J.P.; State-of-the-art research in machinability of hardened steels, *Proceedings of the Institution of Mechanical: Engineers, Part B: Journal of Engineering*, Vol. 227 n. 2, p. 191-209, 2013.

TANG, L. C.; XU, K. A unified approach for dual response surface optimization. *Journal of Quality Technology*, Vol. 34, p. 437-447, 2002.

TAMIZHARASAN, T.; SEVARAJ, T.; HAQ, A. N. Analysis of tool wear and surface finish in hard turning. *International Journal Advanced Manufacture Technology*, Vol. 28, p. 679-671, 2006.

THIELE, J. D.; MELKOTE, S. N. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 94, p. 216-226, 1999.

TÖNSHOFF, H. K.; ARENDT, C.; AMOR, R. B. Cutting of Hardened Steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 49, p. 547-566, 2000.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. *Metal Cutting*. 4. ed. Butterworth-Heinemann, 2000.

TURKES, E.; ORAK, S.; NESELI, S.; YALDIZ, S. Linear analysis of chatter vibration and stability for orthogonal cutting in turning, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 29, p. 163-169, 2011.

UMBRELLO, D.; FELICE, L. Improving surface integrity in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel by modeling white and dark layers formation *Manufacturing Technology*, Vol. 58, p. 73-76, 2009.

UMBRELLO, D.; JAYAL, A. D.; CARUSO, S.; DILLON O. W.; JAWAHIR, I. S. *Machining Science and Technology*. Vol. 14, p. 128, 2010.

UTYUZHNIKOV, S. V.; FANTINI, P.; GUENOV, M. D. A method for generating a well-distributed Pareto set in nonlinear multiobjective optimization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 223, p. 820-841, 2009.

VAHIDINASAB, V.; JADID, S. Normal boundary intersection method for suppliers' strategic bidding in electricity markets: An environmental/economic approach. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, p. 1111-1119, 2010.

VALDÉZ, C. E. Avaliação através da inspeção magnética da condição superficial de anéis de rolamento de aço DIN 100Cr6 após torneamento duro a seco. São Paulo: Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

VINING, G. G.; MYERS, R. H. Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. *Journal of Quality Technology*, Vol. 22, p. 38-45, 1990.

YACOUB, F.; MacGREGOR, J. F. Product Optimization and Control in the Latent Variable Space of Nonlinear PLS Models, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 70, p. 63-74, 2004.

YALLESEA, M. A.; KAMEL, C.; NASSEREDDINE, Z.; LAKHDAR, B.; RIGAL, J. F. Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, p. 1092–1104, 2009.

YANG, J. B.; SEN, P. Preference modelling by estimating local utility functions for multiobjective optimization. *European Journal of Operational Research*, Vol. 95, p. 115-138, 1996.

YEN, Y. C.; JAIN, A.; ALTAN, T. A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, , p. 72-81, 2004.

WAIKAR, R. A.; GUO, Y. B. A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.197, p. 189-199, 2008.

WELLER, E. J; SCHRIER, H. M.; WEICHBRODT, B. What Soud Can Be Expected From a Worn Tool. *Journal of Engineering for Industry*, p. 525-534, 1969.

WHITEHOUSE, D. J. Handbook of surface and nanometrology. 1 ed. Bristol: IPP Publisher, p. 1128, 2003.

WHITNEY, E. *Ceramic Cutting Tools*, Noyes Publications, p. 28 - 304, 1994.

ZHOU, J. M. Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, p. 301-305, 2003.

## ANEXOS

### ANEXO A – Tabela com todas as respostas CC 6050 Wiper

Tabela A1 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC6050 Wiper

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>43,98</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,97</b>	<b>0,47</b>	<b>0,96</b>	<b>6,33</b>	<b>336,47</b>	<b>495,02</b>	<b>84,92</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,08</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,57</b>	0,03	-0,00	<b>2,43</b>	<b>-84,64</b>	<b>46,92</b>	<b>7,32</b>	<b>0,01</b>
f	-1,67	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,32</b>	<b>0,11</b>	<b>0,44</b>	<b>2,43</b>	12,65	9,31	1,35	<b>0,00</b>
ap	-0,72	0,00	0,01	<b>0,14</b>	-0,04	-0,26	<b>2,37</b>	14,59	-4,29	1,17	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,71	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,09	<b>-0,06</b>	0,26	0,00	3,47	1,36	-1,43	<b>0,00</b>
f x f	-1,46	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,06	-0,04	<b>0,37</b>	0,00	-2,22	15,76	-1,52	0,00
ap x ap	<b>1,93</b>	-0,01	-0,02	-0,09	<b>-0,09</b>	0,12	-0,00	-0,08	<b>30,86</b>	-1,97	0,00
Vc x f	2,12	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,0	<b>0,11</b>	<b>0,53</b>	<b>0,93</b>	-11,79	-1,89	-0,97	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,75	-0,00	-0,01	-0,11	-0,02	-0,08	<b>0,91</b>	-15,54	-18,33	1,06	<b>0,00</b>
f x ap	-0,00	-0,00	-0,00	-0,07	<b>-0,10</b>	<b>-0,55</b>	<b>0,91</b>	-10,76	19,12	-0,89	<b>0,00</b>
R <sup>2</sup> adj.	93,17%	96,96%	96,93%	96,76%	92,24%	79,68%	99,24%	95,45%	73,88%	64,85%	97,65%

Tabela A2 – Otimização individual de cada característica estudada no processo do torneamento do aço ABNT H13 com ferramenta CC6050 Wiper.

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
	$\frac{Vc}{m/min}$	$\frac{f}{mm/rev}$	$\frac{ap}{mm}$	$\frac{Kp}{(U\$)}$	$\frac{Ra}{(\mu m)}$	$\frac{Fr}{(N)}$	$\frac{RD}{(dB)}$	$\frac{T}{(min)}$	$\frac{EEC}{(cm^3/N.min)}$
<b>CC6050 Wiper</b>	244,51	0,21	0,30	1,12	0,44	217,81	91,50	26,59	0,0627
	201,34	0,08	0,17	1,99	0,01	258,58	81,51	36,15	0,0087
	265,29	0,17	0,26	1,21	0,38	201,41	93,56	22,11	0,0549
	64,25	0,12	0,24	3,37	0,28	458,33	67,61	63,68	0,0049
	62,90	0,13	0,25	3,42	0,28	470,40	67,66	63,75	0,0044
	242,92	0,21	0,31	1,12	0,42	219,57	91,38	26,98	0,0628

Figura A1 – Exemplificação dos dados encontrados para a aplicação dos modelos.

G22							f <sub>z</sub>	TPCA1 (eT*Zt)+(eKp*Zt...)
A	B	C	D	E	F	G		
19					43,80263158		2,02968421	
20								
21	<b>PC1A</b>							
22	<b>Respostas</b>	<b>Autovetor(e)</b>	<b>Yt (Utopia)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-P</b>	<b>Zt = ((Yt-M)/DP)</b>	<b>TPCA1 (eT*Zt)+(eKp*Zt...)</b>	
23	T	0,478881903	69,54	43,80263158	11,20471718	2,30	2,50	
24	Kp	0,442824208	3,264	2,029684211	0,619643451	1,99		
25	FR	0,446145984	205,899	337,3164211	78,05900821	-1,68		
26	RD	-0,445627398	65,784	81,37736842	7,731284098	-2,02		
27	ECC	-0,420652857	0,007	0,020866842	0,015892881	-0,87		
28								
29	<b>PC2A</b>							
30	<b>Respostas</b>	<b>Autovetor(e)</b>	<b>Yt (Utopia)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-P</b>	<b>Zt = ((Yt-M)/DP)</b>	<b>TWPCA2 (eT*Zt)+(eKp*Zt...)</b>	
31	T	0,125083823	69,54	43,80263158	11,20471718	2,30	-1,28	
32	Kp	0,080097192	3,264	2,029684211	0,619643451	1,99		
33	FR	0,574270175	205,899	337,3164211	78,05900821	-1,68		
34	RD	0,029500729	65,784	81,37736842	7,731284098	-2,02		
35	ECC	0,804538346	0,007	0,020866842	0,015892881	-0,87		
36								
37	<b>PC3A</b>							
38	<b>Respostas</b>	<b>Autovetor(e)</b>	<b>Yt (Utopia)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-P</b>	<b>Zt = ((Yt-M)/DP)</b>	<b>TWPCA3 (eT*Zt)+(eKp*Zt...)</b>	
39	T	0,256048272	69,54	43,80263158	11,20471718	2,30	0,88	
40	Kp	-0,628164969	3,264	2,029684211	0,619643451	1,99		
41	FR	-0,177254252	205,899	337,3164211	78,05900821	-1,68		
42	RD	-0,691334481	65,784	81,37736842	7,731284098	-2,02		
43	ECC	0,174601316	0,007	0,020866842	0,015892881	-0,87		
44								
45	<b>PC4A</b>							
46	<b>Respostas</b>	<b>Autovetor(e)</b>	<b>Yt (Utopia)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-P</b>	<b>Zt = ((Yt-M)/DP)</b>	<b>TWPCA4 (eT*Zt)+(eKp*Zt...)</b>	
47	T	-0,280475071	69,54	43,80263158	11,20471718	2,30	2,01	
48	Kp	0,618301749	3,264	2,029684211	0,619643451	1,99		
49	FR	-0,464024851	205,899	337,3164211	78,05900821	-1,68		
50	RD	-0,463303204	65,784	81,37736842	7,731284098	-2,02		
51	ECC	0,330254085	0,007	0,020866842	0,015892881	-0,87		
52								
53	<b>PC5A</b>							
54	<b>Respostas</b>	<b>Autovetor(e)</b>	<b>Yt (Utopia)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio-P</b>	<b>Zt = ((Yt-M)/DP)</b>	<b>TWPCA5 (eT*Zt)+(eKp*Zt...)</b>	
55	T	0,781536421	69,54	43,80263158	11,20471718	2,30	2,05	
56	Kp	0,143537033	3,264	2,029684211	0,619643451	1,99		
57	FR	-0,473739797	205,899	337,3164211	78,05900821	-1,68		
58	RD	0,328561569	65,784	81,37736842	7,731284098	-2,02		
59	ECC	0,190304606	0,007	0,020866842	0,015892881	-0,87		

Figura A2 – Exemplificação dos dados encontrados para a aplicação dos modelos.

TWPCA = 5, COM ALVO					
3,949388388	0,404257716	0,322511104	0,246135547	0,07770725	autovalores
0,789877678	0,080851543	0,064502221	0,049227109	0,01554145	proportions
PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	EQMM1
2,589509899	-0,615106556	1,212840181	0,723457562	0,45208084	0,80
-1,292934409	-1,243301895	0,194863896	0,175595956	-0,243212	15,15
1,653677406	0,04388118	0,380539596	-0,672026398	-0,4500474	1,50
-2,036587757	-0,399060879	0,555724435	0,300907132	-0,2814062	21,34
3,357244081	0,49072304	-0,006034743	0,458257946	0,22302135	1,53
-1,743366132	-0,365870559	-0,205837998	0,666662193	-0,1427207	18,77
2,19139309	0,770204999	0,446374431	0,153409371	-0,6211161	0,88
-3,439751524	1,431164562	0,578722495	0,596536161	0,15561741	36,03
3,30660925	0,594567161	-0,824245544	0,180612966	-0,0509322	1,45
-3,541868872	0,22571349	-0,346029781	0,056488492	0,06349552	37,26
0,551606143	-0,755036915	-1,232850235	0,683608412	-0,1163514	4,57
-0,863085909	0,507014677	0,112483709	-0,618483695	-0,2168029	12,08
0,325144545	-0,725718469	0,653309749	-0,875242276	0,21068624	5,51
-0,206773426	0,595579707	-0,236053703	-0,379742024	0,39465702	8,10
-0,09912568	-0,11282493	-0,156149221	-0,183471232	0,02955128	7,53

Figura A3 – Formula para decodificação.

Z22							f <sub>c</sub> = (R17-R22)/Y22
A	B	C	D	E	F	G	
<b>FERRAMENTA CC650 - WIPER, AÇO H13</b>							
	V <sub>c</sub>	P <sub>c</sub>	A <sub>p</sub>				
X <sub>L</sub>	100	0,10	0,15				
X <sub>H</sub>	225	0,22	0,3				
Fórmula de decodificação: $x_{i\text{axcel}} * (X_H - X_L)/2 + (X_H + X_L)/2 = x_{iR}$							
x <sub>i</sub> <sub>axcel</sub> = resposta codificada							
x <sub>i</sub> <sub>R</sub> = resposta não-codificada (é a resposta)							
$(X_H + X_L)/2 = CP$							
	V <sub>c</sub>	f	ap				
X <sub>L</sub>	100	0,1	0,15				
X <sub>H</sub>	225	0,22	0,33				





Figura A6 - Valores dos pontos Min Ra e Min WPCA plotados na fronteira ferramenta

CC6050 Wiper.

Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap
0,1787	3,2190	80,49	0,17	0,33
0,1712	3,2209	79,59	0,17	0,33
0,1639	3,2270	78,79	0,18	0,33
0,1566	3,2392	78,16	0,18	0,33
0,1496	3,2619	78,06	0,19	0,32
0,1429	3,3070	79,48	0,19	0,32
0,1369	3,3880	82,20	0,19	0,32
0,1316	3,5067	85,32	0,20	0,33
0,1269	3,6600	88,52	0,20	0,33
0,1227	3,8446	91,72	0,20	0,34
0,1191	4,0575	94,95	0,20	0,34
0,1159	4,2965	98,18	0,20	0,34
0,1132	4,5595	101,39	0,20	0,35
0,1109	4,8447	104,60	0,20	0,35
0,1089	5,1507	107,81	0,20	0,36
0,1073	5,4762	111,01	0,20	0,36
0,1061	5,8200	114,20	0,20	0,36
0,1051	6,1810	117,39	0,20	0,36
0,1045	6,5582	120,58	0,20	0,37
0,1041	6,9507	123,76	0,20	0,37
0,1040	7,3577	126,94	0,20	0,37

## Fronteira de Pareto

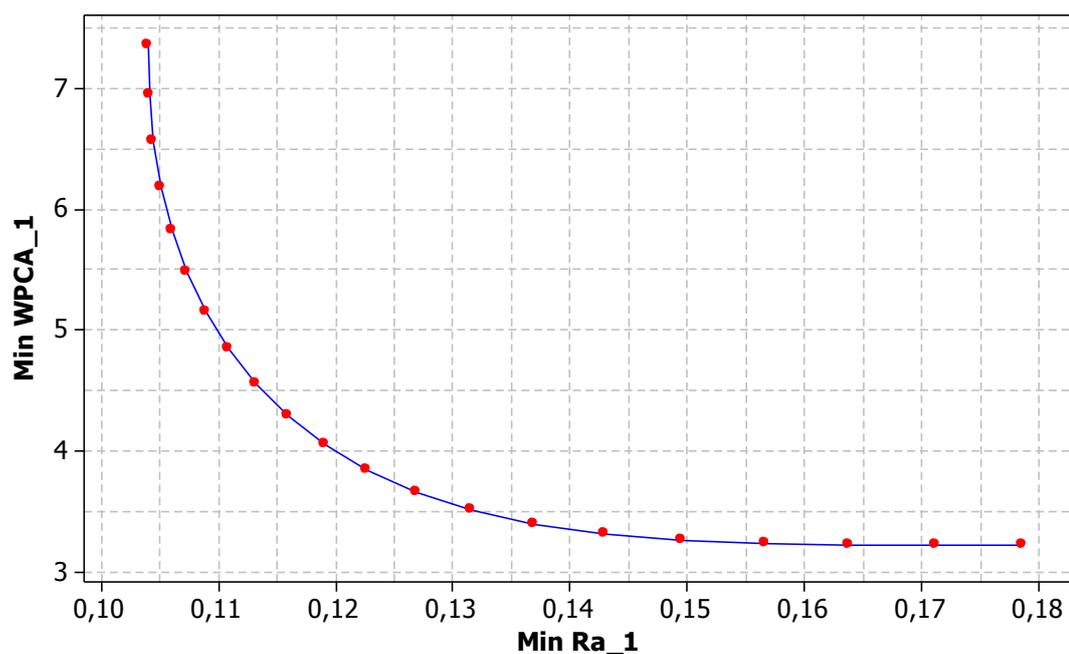


Figura A7 - Valores dos pontos razão ENTROPY/EPG.

EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropy Ra	Entropy WPCA	Entropy Total	Razão ENTROPY/EPG
0,7189	0,0000	<b>0,7189</b>	0,0001	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0002
0,6473	0,0006	<b>0,6479</b>	0,1498	0,0487	<b>0,1985</b>	0,3064
0,5765	0,0025	<b>0,5790</b>	0,2303	0,0948	<b>0,3251</b>	0,5614
0,5067	0,0063	<b>0,5130</b>	0,2846	0,1381	<b>0,4227</b>	0,8240
0,4388	0,0133	<b>0,4521</b>	0,3219	0,1785	<b>0,5004</b>	1,1068
0,3747	0,0273	<b>0,4021</b>	0,3466	0,2158	<b>0,5623</b>	1,3986
0,3169	0,0525	<b>0,3694</b>	0,3612	0,2497	<b>0,6109</b>	1,6536
0,2657	0,0894	<b>0,3550</b>	0,3674	0,2800	<b>0,6474</b>	1,8236
<b>0,2204</b>	<b>0,1370</b>	<b>0,3574</b>	0,3665	0,3065	<b>0,6730</b>	1,8831
0,1806	0,1943	<b>0,3749</b>	0,3593	0,3288	<b>0,6881</b>	1,8356
0,1457	0,2605	<b>0,4061</b>	0,3466	0,3466	<b>0,6931</b>	1,7067
0,1153	0,3347	<b>0,4500</b>	0,3288	0,3593	<b>0,6881</b>	1,5293
0,0891	0,4164	<b>0,5055</b>	0,3065	0,3665	<b>0,6730</b>	1,3315
0,0667	0,5050	<b>0,5717</b>	0,2800	0,3674	<b>0,6474</b>	1,1324
0,0480	0,6001	<b>0,6481</b>	0,2497	0,3612	<b>0,6109</b>	0,9426
0,0326	0,7012	<b>0,7338</b>	0,2158	0,3466	<b>0,5623</b>	0,7663
0,0205	0,8080	<b>0,8284</b>	0,1785	0,3219	<b>0,5004</b>	0,6040
0,0113	0,9201	<b>0,9314</b>	0,1381	0,2846	<b>0,4227</b>	0,4538
0,0049	1,0373	<b>1,0422</b>	0,0948	0,2303	<b>0,3251</b>	0,3119
0,0012	1,1592	<b>1,1604</b>	0,0487	0,1498	<b>0,1985</b>	0,1711
0,0000	1,2857	<b>1,2857</b>	0,0000	0,0001	<b>0,0001</b>	0,0001

## ANEXO B - Ferramenta CC6050

Tabela B1 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC 6050

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>41,90</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,86</b>	<b>1,13</b>	<b>7,41</b>	<b>6,33</b>	<b>336,17</b>	<b>491,52</b>	<b>85,29</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-11,75</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,54</b>	0,12	0,07	<b>2,43</b>	<b>-84,61</b>	<b>46,12</b>	<b>4,38</b>	<b>0,01</b>
f	-1,36	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,31</b>	<b>0,28</b>	<b>1,99</b>	<b>2,43</b>	11,66	4,92	1,74	<b>0,01</b>
ap	-0,58	0,00	0,01	<b>0,12</b>	0,06	-0,03	<b>2,37</b>	13,74	-5,54	0,04	<b>0,01</b>
Vc x Vc	-1,22	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,10	0,11	<b>-0,78</b>	0,00	2,89	3,81	0,21	<b>0,00</b>
f x f	-1,80	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,07	-0,14	<b>-0,82</b>	0,00	-2,66	16,77	0,09	0,00
ap x ap	1,86	-0,01	-0,02	-0,08	-0,11	<b>-0,92</b>	-0,00	-0,42	<b>33,89</b>	0,09	0,00
Vc x f	<b>1,96</b>	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,03	0,01	0,23	<b>0,93</b>	-10,93	5,44	-2,25	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,71	-0,00	-0,01	-0,10	<b>-0,00</b>	0,14	<b>0,91</b>	-14,93	-13,92	-0,60	<b>0,00</b>
f x ap	<b>0,34</b>	-0,00	-0,00	-0,06	0,06	0,06	<b>0,91</b>	-11,28	7,85	-1,43	<b>0,00</b>
R <sup>2</sup> adj.	93,11%	96,96%	96,93%	96,78%	77,23%	91,01%	99,24%	95,29%	78,24%	48,00%	97,46%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value< 5%)

Tabela B2 – Otimização individual de cada característica estudada no processo do torneamento do aço ABNT H13 com ferramenta CC6050.

Ferramenta	Parâmetros			Respostas individuais					
	Vc m/min	f mm/rev	ap mm	Kp (U\$)	Ra (µm)	Fr (N)	RD (dB)	T (min)	EEC (cm <sup>3</sup> / N.min)
CC6050	243,68	0,21	0,30	1,07	1,66	216,81	89,19	24,41	0,0644
	152,73	0,06	0,26	2,74	0,24	326,79	81,88	41,38	0,0060
	265,37	0,17	0,26	1,17	1,71	199,64	92,36	19,22	0,0564
	83,00	0,10	0,20	3,01	0,72	400,63	74,54	57,30	0,0069
	62,69	0,13	0,26	3,26	1,06	473,19	76,67	59,47	0,0049
	243,10	0,21	0,31	1,07	1,65	217,43	89,14	24,64	0,0645

Figura B3 - Valores dos pontos Min Ra e Min WPCA plotados na fronteira ferramenta  
CC6050.

Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap
1,1867	-1,2510	243,68	0,21	0,30
1,1033	-1,1506	152,73	0,06	0,26
1,0280	-0,9775	265,37	0,17	0,26
0,9575	-0,7611	83,00	0,10	0,20
0,8906	-0,5128	62,69	0,13	0,26
0,8266	-0,2382	243,10	0,21	0,31
0,7651	0,0595	85,97	0,11	0,31
0,7061	0,3790	89,26	0,10	0,31
0,6494	0,7195	<b>92,66</b>	<b>0,10</b>	<b>0,31</b>
0,5951	1,0812	96,18	0,09	0,30
0,5432	1,4650	99,88	0,09	0,30
0,4940	1,8723	103,75	0,08	0,29
0,4476	2,3054	107,88	0,08	0,29
0,4045	2,7674	112,28	0,08	0,28
0,3650	3,2625	117,03	0,07	0,28
0,3298	3,7960	122,15	0,07	0,27
0,2996	4,3740	127,67	0,07	0,27
0,2750	5,0032	133,57	0,06	0,26
0,2569	5,6902	139,78	0,06	0,26
0,2458	6,4401	146,21	0,06	0,26
0,2421	7,2561	152,73	0,06	0,26

Figura B4 - **FRONTEIRA DE PARETO**

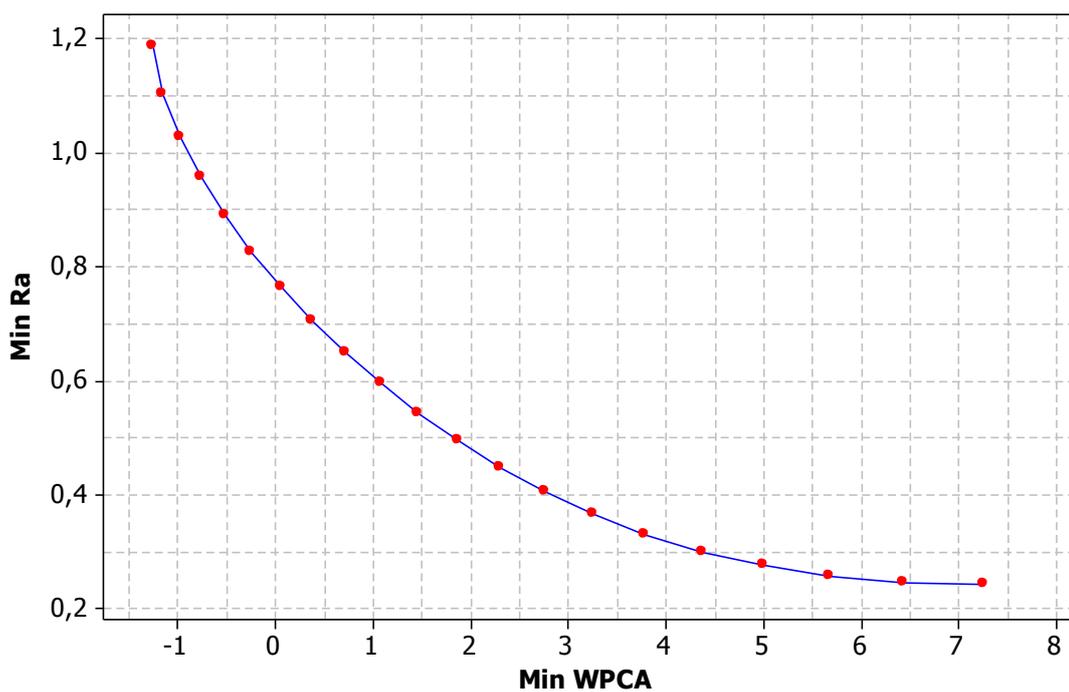


Figura B5 - Valores dos pontos razão ENTROPY/EPG.

EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropy Ra	Entropy WPCA	Entropy Total	Razão ENTROPY/EPG
3,2284	1,1701	<b>4,3984</b>	0,0001	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0000
2,9146	1,1735	<b>4,0881</b>	0,1498	0,0487	<b>0,1985</b>	0,0486
2,6061	1,1843	<b>3,7904</b>	0,2303	0,0948	<b>0,3251</b>	0,0858
2,3035	1,2031	<b>3,5066</b>	0,2846	0,1381	<b>0,4227</b>	0,1205
2,0076	1,2310	<b>3,2386</b>	0,3219	0,1785	<b>0,5004</b>	0,1545
1,7197	1,2696	<b>2,9892</b>	0,3466	0,2158	<b>0,5623</b>	0,1881
1,4414	1,3214	<b>2,7627</b>	0,3612	0,2497	<b>0,6109</b>	0,2211
1,1757	1,3903	<b>2,5660</b>	0,3674	0,2800	<b>0,6474</b>	0,2523
0,9278	1,4834	<b>2,4112</b>	0,3665	0,3065	<b>0,6730</b>	0,2791
0,7075	1,6141	<b>2,3216</b>	0,3593	0,3288	<b>0,6881</b>	0,2964
<b>0,5304</b>	<b>1,8035</b>	<b>2,3339</b>	0,3466	0,3466	<b>0,6931</b>	0,2970
0,4022	2,0593	<b>2,4615</b>	0,3288	0,3593	<b>0,6881</b>	0,2796
0,3094	2,3632	<b>2,6726</b>	0,3065	0,3665	<b>0,6730</b>	0,2518
0,2398	2,6986	<b>2,9384</b>	0,2800	0,3674	<b>0,6474</b>	0,2203
0,1863	3,0561	<b>3,2424</b>	0,2497	0,3612	<b>0,6109</b>	0,1884
0,1452	3,4303	<b>3,5756</b>	0,2158	0,3466	<b>0,5623</b>	0,1573
0,1142	3,8181	<b>3,9323</b>	0,1785	0,3219	<b>0,5004</b>	0,1273
0,0915	4,2174	<b>4,3089</b>	0,1381	0,2846	<b>0,4227</b>	0,0981
0,0761	4,6266	<b>4,7027</b>	0,0948	0,2303	<b>0,3251</b>	0,0691
0,0673	5,0447	<b>5,1120</b>	0,0487	0,1498	<b>0,1985</b>	0,0388
0,0645	5,4709	<b>5,5353</b>	0,0000	0,0001	<b>0,0001</b>	0,0000

## ANEXO C - Ferramenta CC650 (Wiper)

Tabela C1 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC650 Wiper

Respostas	<b>T</b>	<b>Tc</b>	<b>Tt</b>	<b>Kp</b>	<b>Ra</b>	<b>Rt</b>	<b>MRR</b>	<b>Fr</b>	<b>Tp°</b>	<b>RD</b>	<b>EEC</b>
Constante	<b>42,18</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,80</b>	<b>0,33</b>	<b>1,87</b>	<b>6,33</b>	<b>340,21</b>	<b>469,48</b>	<b>87,42</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,01</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,52</b>	0,08	0,20	<b>2,43</b>	<b>-84,34</b>	<b>49,04</b>	<b>5,59</b>	<b>0,01</b>
f	-1,55	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,31</b>	<b>0,25</b>	<b>0,76</b>	<b>2,43</b>	12,72	5,22	1,30	<b>0,01</b>
ap	-0,79	0,00	0,01	<b>0,12</b>	-0,03	-0,16	<b>2,37</b>	14,35	-8,57	0,16	<b>0,01</b>
Vc x Vc	-0,43	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	<b>0,18</b>	<b>0,89</b>	0,00	3,39	5,61	0,23	<b>0,00</b>
f x f	-1,13	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,07	<b>0,13</b>	<b>0,59</b>	0,00	-1,24	20,54	0,00	0,00
ap x ap	2,04	-0,01	-0,02	-0,07	<b>0,15</b>	<b>0,69</b>	-0,00	0,45	<b>35,45</b>	-0,14	-0,00
Vc x f	2,37	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,04	0,00	-0,12	<b>0,93</b>	-12,35	3,17	-1,76	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,93	-0,00	-0,01	-0,09	-0,03	-0,23	<b>0,91</b>	-14,35	-19,99	-0,20	<b>0,00</b>
f x ap	-0,00	-0,00	-0,01	-0,06	-0,07	-0,22	<b>0,91</b>	-10,63	9,69	-2,59	0,00
R <sup>2</sup> adj.	92,49%	96,96%	96,93%	96,77%	91,53%	90,57%	99,24%	95,31%	75,71%	49,18%	97,25%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value< 5%)

Tabela C2 – Otimização individual de cada característica estudada no processo do torneamento do aço ABNT H13 com ferramenta CC650 (Wiper).

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
	<b>Vc</b> m/min	<b>f</b> mm/rev	<b>ap</b> mm	<b>Kp</b> (U\$)	<b>Ra</b> (µm)	<b>Fr</b> (N)	<b>RD</b> (dB)	<b>T</b> (min)	<b>EEC</b> (cm <sup>3</sup> / N.min)
<b>CC650</b> <b>Wiper</b>	243,19	0,21	0,31	1,05	1,03	224,66	92,61	26,05	0,0627
	148,07	0,10	0,23	2,28	0,21	341,13	84,26	46,01	0,0096
	265,60	0,17	0,26	1,14	1,03	205,76	96,74	21,23	0,0545
	82,98	0,10	0,19	2,86	0,42	401,04	75,68	60,51	0,0071
	63,60	0,13	0,26	3,18	0,59	472,79	77,33	62,84	0,0050
	242,94	0,21	0,31	1,05	1,02	224,97	92,59	26,14	0,0627

Figura C3 - Valores dos pontos Min Ra e Min WPCA plotados na fronteira ferramenta CC650

*Wiper.*

Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap
0,7361	-0,8015	243,19	0,21	0,31
0,6898	-0,7149	148,07	0,10	0,23
0,6509	-0,5314	265,60	0,17	0,26
0,6142	-0,3193	82,98	0,10	0,19
0,5780	-0,1004	63,60	0,13	0,26
0,5423	0,1262	242,94	0,21	0,31
0,5073	0,3613	81,01	0,13	0,28
0,4731	0,6064	83,88	0,13	0,28
0,4731	0,6064	83,88	0,13	0,28
0,4074	1,1331	90,26	0,12	0,27
0,3763	1,4192	93,86	0,12	0,26
0,3467	1,7245	97,81	0,11	0,25
0,3189	2,0532	102,16	0,11	0,25
0,2932	2,4108	106,98	0,11	0,24
0,2702	2,8033	112,31	0,11	0,24
0,2504	3,2377	118,10	0,10	0,23
0,2343	3,7194	124,20	0,10	0,23
0,2219	4,2516	130,40	0,10	0,23
0,2134	4,8340	136,51	0,10	0,23
0,2085	5,4639	142,42	0,10	0,23
0,2070	6,1374	148,07	0,10	0,23

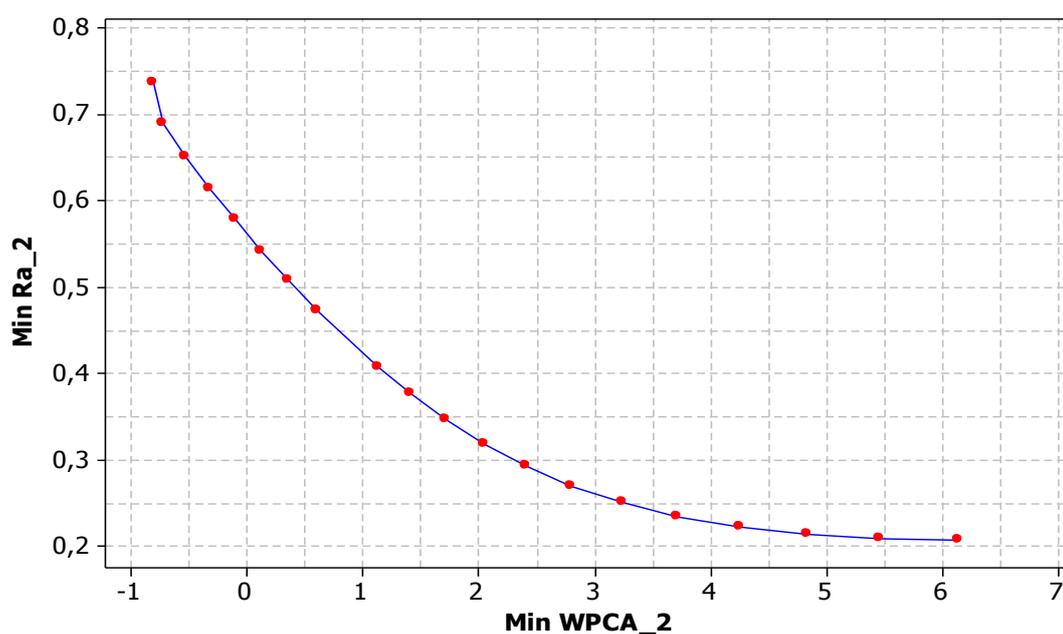
Figura C4 - **FRONTEIRA DE PARETO**

Figura C5 - Valores dos pontos razão ENTROPY/EPG.

EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropy Ra	Entropy WPCA	Entropy Total	Razão ENTROPY/EPG
2,5563	0,0000	<b>2,5563</b>	0,0001	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0000
2,3326	0,1080	<b>2,4406</b>	0,1498	0,0487	<b>0,1985</b>	0,0813
2,1446	0,3370	<b>2,4816</b>	0,2303	0,0948	<b>0,3251</b>	0,1310
1,9671	0,6016	<b>2,5688</b>	0,2846	0,1381	<b>0,4227</b>	0,1646
1,7921	0,8748	<b>2,6669</b>	0,3219	0,1785	<b>0,5004</b>	0,1876
1,6199	1,1574	<b>2,7774</b>	0,3466	0,2158	<b>0,5623</b>	0,2025
1,4510	1,4508	<b>2,9018</b>	0,3612	0,2497	<b>0,6109</b>	0,2105
1,2856	1,7567	<b>3,0423</b>	0,3674	0,2800	<b>0,6474</b>	0,2128
1,2856	1,7567	<b>3,0423</b>	0,3665	0,3065	<b>0,6730</b>	0,2212
0,9684	2,4138	<b>3,3821</b>	0,3593	0,3288	<b>0,6881</b>	0,2035
0,8181	2,7707	<b>3,5888</b>	0,3466	0,3466	<b>0,6931</b>	0,1931
0,6750	3,1517	<b>3,8266</b>	0,3288	0,3593	<b>0,6881</b>	0,1798
0,5404	3,5619	<b>4,1023</b>	0,3065	0,3665	<b>0,6730</b>	0,1641
0,4165	4,0079	<b>4,4245</b>	0,2800	0,3674	<b>0,6474</b>	0,1463
0,3055	4,4978	<b>4,8033</b>	0,2497	0,3612	<b>0,6109</b>	0,1272
0,2099	5,0397	<b>5,2496</b>	0,2158	0,3466	<b>0,5623</b>	0,1071
0,1317	5,6408	<b>5,7725</b>	0,1785	0,3219	<b>0,5004</b>	0,0867
0,0722	6,3048	<b>6,3769</b>	0,1381	0,2846	<b>0,4227</b>	0,0663
0,0311	7,0314	<b>7,0625</b>	0,0948	0,2303	<b>0,3251</b>	0,0460
0,0075	7,8174	<b>7,8249</b>	0,0487	0,1498	<b>0,1985</b>	0,0254
0,0000	8,6577	<b>8,6577</b>	0,0000	0,0001	<b>0,0001</b>	0,0000

## ANEXO D - Ferramenta CC650

Tabela D1 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC650

Respostas	<b>T</b>	<b>Tc</b>	<b>Tt</b>	<b>Kp</b>	<b>Ra</b>	<b>Rt</b>	<b>MRR</b>	<b>Fr</b>	<b>Tp°</b>	<b>RD</b>	<b>EEC</b>
Constante	<b>41,41</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>1,71</b>	<b>0,81</b>	<b>4,42</b>	<b>6,33</b>	<b>342,33</b>	<b>488,86</b>	<b>86,69</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-11,96</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,50</b>	0,00	-0,06	<b>2,43</b>	<b>-84,91</b>	<b>49,13</b>	<b>6,56</b>	<b>0,01</b>
f	-1,55	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,31</b>	<b>0,57</b>	<b>1,82</b>	<b>2,43</b>	13,39	5,43	0,87	<b>0,00</b>
ap	-0,71	0,00	0,01	<b>0,10</b>	-0,00	0,13	<b>2,37</b>	15,08	-8,90	0,25	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,91	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	-0,01	-0,26	0,00	3,28	-1,90	0,51	<b>0,00</b>
f x f	-1,53	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,07	0,07	-0,01	0,00	-0,71	12,31	-0,23	0,00
ap x ap	1,60	-0,01	-0,02	-0,07	0,07	-0,10	-0,00	0,10	27,11	-0,25	-0,00
Vc x f	1,81	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	0,04	-0,00	<b>0,017</b>	<b>0,93</b>	-11,10	3,07	-2,07	<b>0,00</b>
Vc x ap	-0,50	-0,00	-0,01	-0,08	-0,05	-0,10	<b>0,91</b>	-13,41	-20,10	-0,18	<b>0,00</b>
f x ap	0,75	-0,00	-0,00	-0,05	0,01	0,04	<b>0,91</b>	-12,11	9,50	-1,88	<b>0,00</b>
R <sup>2</sup> adj.	92,84%	96,96%	96,93%	96,79%	86,60%	89,96%	99,24%	95,13%	73,81%	60,03%	97,26%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value

Tabela D2– Otimização individual de cada característica estudada no processo do torneamento do aço ABNT H13 com ferramenta CC650.

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
<b>CC650</b>	<b>Vc</b>	<b>f</b>	<b>ap</b>	<b>Kp</b>	<b>Ra</b>	<b>Fr</b>	<b>RD</b>	<b>T</b>	<b>EEC</b>
	<b>m/min</b>	<b>mm/rev</b>	<b>mm</b>	<b>(U\$)</b>	<b>(µm)</b>	<b>(N)</b>	<b>(dB)</b>	<b>(min)</b>	<b>(cm<sup>3</sup>/N.min)</b>
	242,30	0,21	0,31	1,02	1,28	229,46	93,10	24,60	0,0619
	159,44	0,06	0,25	2,51	0,05	324,45	84,39	40,27	0,0062
	266,42	0,17	0,26	1,12	0,84	207,60	98,54	18,97	0,0525
	79,18	0,10	0,20	2,84	0,30	414,73	74,25	58,76	0,0068
	62,18	0,13	0,23	2,97	0,49	467,44	75,21	60,12	0,0055
242,96	0,21	0,31	1,02	1,26	228,64	93,24	24,50	0,0619	

Figura D3 - Valores dos pontos Min Ra e Min WPCA plotados na fronteira ferramenta  
CC650.

Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap
0,2199	0,1596	242,30	0,21	0,31
0,2036	0,1628	159,44	0,06	0,25
0,1875	0,1729	266,42	0,17	0,26
0,1718	0,1906	79,18	0,10	0,20
0,1564	0,2167	62,18	0,13	0,23
0,1414	0,2530	242,96	0,21	0,31
0,1270	0,3016	155,33	0,14	0,09
0,1132	0,3663	157,91	0,14	0,09
0,1003	0,4537	161,14	0,13	0,10
0,0888	0,5763	165,56	0,12	0,10
0,0796	0,7540	171,86	0,11	0,11
0,0729	0,9940	178,82	0,11	0,11
0,0681	1,2793	185,00	0,11	0,11
0,0645	1,5940	190,36	0,11	0,11
0,0617	1,9295	195,12	0,11	0,11
0,0596	2,2807	199,43	0,11	0,12
0,0579	2,6446	203,39	0,12	0,12
0,0568	3,0193	207,08	0,12	0,12
0,0560	3,4033	210,55	0,12	0,12
0,0555	3,7957	213,84	0,12	0,12
0,0554	4,1956	216,96	0,12	0,13

Figura D4 - **FRONTEIRA DE PARETO**

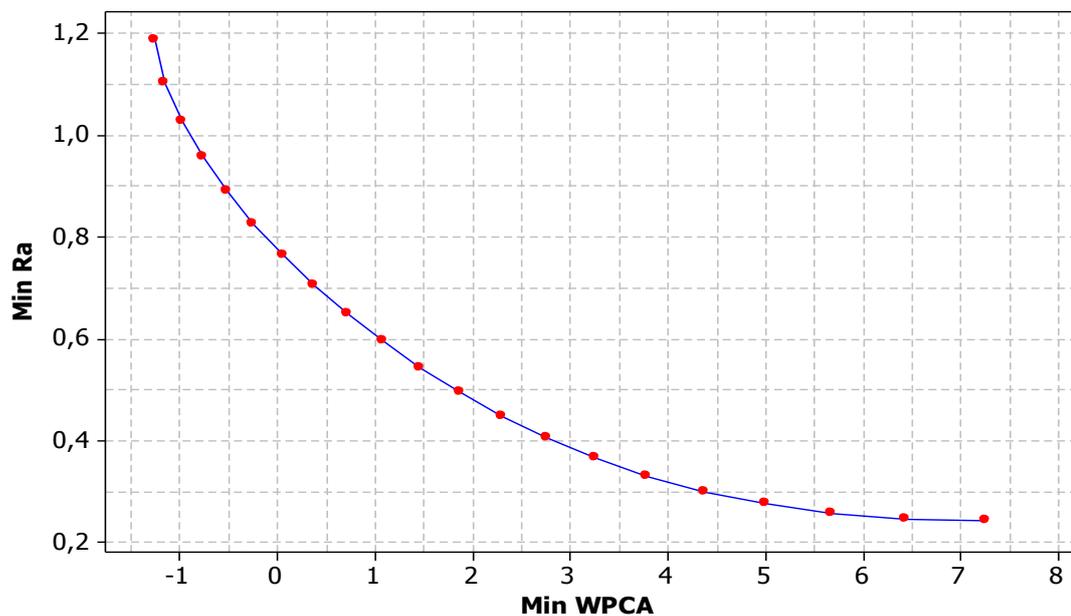


Figura D5 - Valores dos pontos razão ENTROPY/EPG.

EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropy Ra	Entropy WPCA	Entropy Total	Razão ENTROPY/EPG
3,2284	1,1701	<b>4,3984</b>	0,0001	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0000
2,9146	1,1735	<b>4,0881</b>	0,1498	0,0487	<b>0,1985</b>	0,0486
2,6061	1,1843	<b>3,7904</b>	0,2303	0,0948	<b>0,3251</b>	0,0858
2,3035	1,2031	<b>3,5066</b>	0,2846	0,1381	<b>0,4227</b>	0,1205
2,0076	1,2310	<b>3,2386</b>	0,3219	0,1785	<b>0,5004</b>	0,1545
1,7197	1,2696	<b>2,9892</b>	0,3466	0,2158	<b>0,5623</b>	0,1881
1,4414	1,3214	<b>2,7627</b>	0,3612	0,2497	<b>0,6109</b>	0,2211
1,1757	1,3903	<b>2,5660</b>	0,3674	0,2800	<b>0,6474</b>	0,2523
0,9278	1,4834	<b>2,4112</b>	0,3665	0,3065	<b>0,6730</b>	0,2791
0,7075	1,6141	<b>2,3216</b>	0,3593	0,3288	<b>0,6881</b>	0,2964
0,5304	1,8035	<b>2,3339</b>	0,3466	0,3466	<b>0,6931</b>	0,2970
0,4022	2,0593	<b>2,4615</b>	0,3288	0,3593	<b>0,6881</b>	0,2796
0,3094	2,3632	<b>2,6726</b>	0,3065	0,3665	<b>0,6730</b>	0,2518
0,2398	2,6986	<b>2,9384</b>	0,2800	0,3674	<b>0,6474</b>	0,2203
0,1863	3,0561	<b>3,2424</b>	0,2497	0,3612	<b>0,6109</b>	0,1884
0,1452	3,4303	<b>3,5756</b>	0,2158	0,3466	<b>0,5623</b>	0,1573
0,1142	3,8181	<b>3,9323</b>	0,1785	0,3219	<b>0,5004</b>	0,1273
0,0915	4,2174	<b>4,3089</b>	0,1381	0,2846	<b>0,4227</b>	0,0981
0,0761	4,6266	<b>4,7027</b>	0,0948	0,2303	<b>0,3251</b>	0,0691
0,0673	5,0447	<b>5,1120</b>	0,0487	0,1498	<b>0,1985</b>	0,0388
0,0645	5,4709	<b>5,5353</b>	0,0000	0,0001	<b>0,0001</b>	0,0000

## ANEXO E - Ferramenta CC670

Tabela E1 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CC670

Respostas	T	Tc	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>44,71</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>2,55</b>	<b>0,13</b>	<b>0,96</b>	<b>6,33</b>	<b>218,97</b>	<b>443,84</b>	<b>85,83</b>	<b>0,02</b>
Vc	<b>-10,77</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,74</b>	0,03	-0,00	<b>2,43</b>	-26,00	<b>50,20</b>	<b>7,66</b>	<b>0,01</b>
f	-1,43	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,34</b>	<b>0,12</b>	<b>0,44</b>	<b>2,4</b>	25,64	6,57	1,49	<b>0,00</b>
ap	-0,66	0,00	0,01	<b>0,23</b>	-0,04	-0,26	<b>2,37</b>	29,79	-8,28	0,51	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,50	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,09	0,05	0,26	0,00	28,54	5,40	0,78	-0,00
f x f	-2,10	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	0,03	<b>0,07</b>	<b>0,37</b>	0,00	-25,22	19,16	-0,75	0,00
ap x ap	1,30	-0,01	-0,02	-0,14	0,02	0,12	-0,00	-6,84	<b>33,36</b>	-0,10	-0,00
Vc x f	1,75	<b>0,1</b>	<b>0,11</b>	-0,01	<b>0,10</b>	<b>0,53</b>	<b>0,93</b>	-1,23	1,94	-1,40	0,00
Vc x ap	-1,00	-0,00	-0,01	<b>-0,18</b>	0,00	-0,08	<b>0,91</b>	-1,38	-20,30	-0,13	0,00
f x ap	0,50	-0,00	-0,00	-0,11	<b>-0,09</b>	<b>-0,55</b>	<b>0,91</b>	12,88	8,98	-0,54	0,00
R <sup>2</sup> adj.	92,42%	96,96%	96,93%	96,68%	82,59%	79,68%	99,24%	52,14%	69,69%	69,90%	82,79%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value< 5%)

Tabela E2 – Otimização individual de cada característica estudada no processo do torneamento do aço ABNT H13 com ferramenta CC670.

Ferramenta	Parâmetros			Respostas individuais					
	Vc m/min	f mm/rev	ap mm	Kp (U\$)	Ra (µm)	Fr (N)	RD (dB)	T (min)	EEC (cm <sup>3</sup> / N.min)
CC670	246,76	0,21	0,30	1,33	0,49	259,97	96,71	28,18	0,0603
	203,03	0,08	0,17	2,34	0,01	122,69	88,03	36,63	0,0203
	174,69	0,06	0,23	3,03	0,09	101,52	83,00	38,92	0,0221
	78,19	0,10	0,22	3,93	0,27	250,34	72,59	60,06	0,0056
	61,27	0,14	0,26	4,26	0,25	326,19	74,05	62,42	0,0044
	218,35	0,24	0,29	1,47	0,55	231,65	92,12	31,20	0,0639

Figura E3 - Valores dos pontos Min Ra e Min WPCA plotados na fronteira ferramenta  
CC670.

Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap
0,2411	-0,1294	246,76	0,21	0,30
0,2409	-0,1294	203,03	0,08	0,17
0,2407	-0,1294	174,69	0,06	0,23
0,2405	-0,1293	78,19	0,10	0,22
0,2403	-0,1293	61,27	0,14	0,26
0,2400	-0,1292	218,35	0,24	0,29
0,2397	-0,1291	72,01	0,16	0,32
0,2394	-0,1289	73,77	0,16	0,32
0,2390	-0,1287	75,72	0,17	0,32
0,2385	-0,1283	77,86	0,17	0,33
0,2379	-0,1278	80,20	0,17	0,33
0,2379	-0,1278	82,70	0,18	0,34
0,2362	-0,1257	85,40	0,18	0,34
0,2350	-0,1236	88,27	0,18	0,34
0,2333	-0,1201	91,34	0,18	0,35
0,2309	-0,1138	94,59	0,18	0,35
0,2273	-0,1012	98,02	0,19	0,35
0,2212	-0,0715	101,65	0,19	0,36
0,2212	-0,0715	105,48	0,19	0,36
0,1765	0,4612	105,48	0,19	0,36
0,1012	5,8772	113,73	0,19	0,37

Figura E4 - **FRONTEIRA DE PARETO**

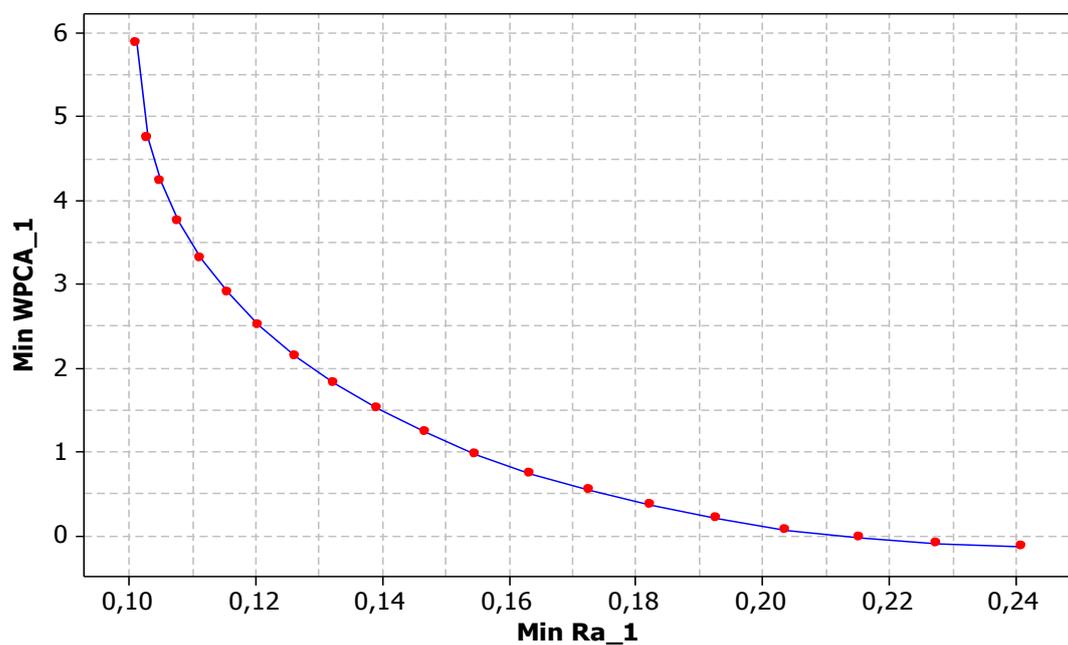


Figura E5 - Valores dos pontos razão ENTROPY/EPG.

EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropy Ra	Entropy WPCA	Entropy Total	Razão ENTROPY/EPG
1,3819	0,0000	<b>1,3819</b>	0,0001	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0001
1,2498	0,2048	<b>1,4546</b>	0,1498	0,0487	<b>0,1985</b>	0,1365
1,1274	0,7361	<b>1,8635</b>	0,2303	0,0948	<b>0,3251</b>	0,1744
1,0127	1,5235	<b>2,5362</b>	0,2846	0,1381	<b>0,4227</b>	0,1667
0,9045	2,5323	<b>3,4368</b>	0,3219	0,1785	<b>0,5004</b>	0,1456
0,8024	3,7440	<b>4,5464</b>	0,3466	0,2158	<b>0,5623</b>	0,1237
0,7060	5,1488	<b>5,8549</b>	0,3612	0,2497	<b>0,6109</b>	0,1043
0,6153	6,7424	<b>7,3577</b>	0,3674	0,2800	<b>0,6474</b>	0,0880
0,5301	8,5238	<b>9,0539</b>	0,3665	0,3065	<b>0,6730</b>	0,0743
0,4506	10,4945	<b>10,9450</b>	0,3593	0,3288	<b>0,6881</b>	0,0629
0,3768	12,6577	<b>13,0345</b>	0,3466	0,3466	<b>0,6931</b>	0,0532
0,3089	15,0185	<b>15,3274</b>	0,3288	0,3593	<b>0,6881</b>	0,0449
0,2470	17,5829	<b>17,8299</b>	0,3065	0,3665	<b>0,6730</b>	0,0377
0,1914	20,3579	<b>20,5494</b>	0,2800	0,3674	<b>0,6474</b>	0,0315
0,1424	23,3517	<b>23,4940</b>	0,2497	0,3612	<b>0,6109</b>	0,0260
0,1001	26,5727	<b>26,6728</b>	0,2158	0,3466	<b>0,5623</b>	0,0211
0,0648	30,0304	<b>30,0952</b>	0,1785	0,3219	<b>0,5004</b>	0,0166
0,0369	33,7345	<b>33,7714</b>	0,1381	0,2846	<b>0,4227</b>	0,0125
0,0166	37,6947	<b>37,7113</b>	0,0948	0,2303	<b>0,3251</b>	0,0086
0,0166	37,6947	<b>37,7113</b>	0,0487	0,1498	<b>0,1985</b>	0,0053
0,0000	46,4226	<b>46,4226</b>	0,0000	0,0001	<b>0,0001</b>	0,0000

## ANEXO F - Ferramenta PCBN 7025 (*Wiper*)

Tabela F1 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CBN 7025 *Wiper*

Respostas	<b>T</b>	<b>Tc</b>	<b>Tt</b>	<b>Kp</b>	<b>Ra</b>	<b>Rt</b>	<b>MRR</b>	<b>Fr</b>	<b>Tp°</b>	<b>RD</b>	<b>EEC</b>
Constante	46,59	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>7,85</b>	0,15	1,07	<b>6,33</b>	<b>338,46</b>	<b>511,79</b>	<b>85,12</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,84</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-2,29</b>	<b>-0,04</b>	-0,25	<b>2,43</b>	<b>-84,66</b>	<b>49,44</b>	<b>9,43</b>	<b>0,01</b>
f	-1,87	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,52</b>	<b>0,14</b>	<b>0,56</b>	<b>2,43</b>	12,36	5,83	1,23	<b>0,00</b>
ap	-0,95	0,00	0,01	<b>1,01</b>	0,01	0,17	<b>2,37</b>	14,13	-7,82	0,53	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,30	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,00	0,02	0,19	0,00	4,21	-4,24	-0,81	<b>0,00</b>
f x f	-1,05	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	-0,22	<b>0,06</b>	0,18	0,00	-2,15	9,51	-1,78	0,00
ap x ap	2,30	-0,01	-0,02	<b>-0,57</b>	0,00	0,19	-0,00	-0,31	25,48	-1,59	0,00
Vc x f	2,62	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	<b>-0,38</b>	-0,02	-0,19	<b>0,93</b>	-11,66	3,24	-1,12	<b>0,00</b>
Vc x ap	0,25	-0,00	-0,01	<b>-0,83</b>	0,03	0,30	<b>0,91</b>	-13,90	-19,01	-0,08	<b>0,00</b>
f x ap	0,25	-0,00	-0,00	<b>-0,50</b>	0,01	-0,07	<b>0,91</b>	-10,88	10,24	-0,07	0,00
R <sup>2</sup> adj.	90,56%	96,96%	96,93%	96,62%	92,92%	90,35%	99,24%	95,33%	57,51%	74,77%	97,20%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value< 5%)

Tabela F2 – Otimização individual de cada característica estudada no processo do torneamento do aço ABNT H13 com ferramenta CBN7025 (*Wiper*).

<i>Ferramenta</i>	<i>Parâmetros</i>			<i>Respostas individuais</i>					
	<b>Vc</b> m/min	<b>f</b> mm/rev	<b>ap</b> mm	<b>Kp</b> (U\$)	<b>Ra</b> (µm)	<b>Fr</b> (N)	<b>RD</b> (dB)	<b>T</b> (min)	<b>EEC</b> (cm <sup>3</sup> / N.min)
<b>CBN7025</b> <i>Wiper</i>	249,58	0,21	0,29	3,26	0,31	216,98	95,08	29,29	0,0626
	216,96	0,12	0,13	4,59	0,06	253,15	88,52	39,34	0,0119
	265,54	0,17	0,26	3,67	0,21	205,92	98,22	25,11	0,0551
	65,80	0,12	0,23	10,91	0,21	453,01	65,79	69,39	0,0059
	65,92	0,13	0,21	10,31	0,23	446,69	65,93	69,54	0,0064
	249,58	0,21	0,29	3,26	0,31	216,98	95,08	29,29	0,0626

Figura F3 - Valores dos pontos Min Ra e Min WPCA plotados na fronteira ferramenta  
CBN7025 (Wiper).

Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap
0,2199	0,1596	249,58	0,21	0,29
0,2036	0,1628	216,96	0,12	0,13
0,1875	0,1729	265,54	0,17	0,26
0,1718	0,1906	65,80	0,12	0,23
0,1564	0,2167	65,92	0,13	0,21
0,1414	0,2530	242,86	0,21	0,31
0,1270	0,3016	155,33	0,14	0,09
0,1132	0,3663	157,91	0,14	0,09
0,1003	0,4537	161,14	0,13	0,10
0,0888	0,5763	165,56	0,12	0,10
0,0796	0,7540	171,86	0,11	0,11
0,0729	0,9940	178,82	0,11	0,11
0,0681	1,2793	185,00	0,11	0,11
0,0645	1,5940	190,36	0,11	0,11
0,0617	1,9295	195,12	0,11	0,11
0,0596	2,2807	199,43	0,11	0,12
0,0579	2,6446	203,39	0,12	0,12
0,0568	3,0193	207,08	0,12	0,12
0,0560	3,4033	210,55	0,12	0,12
0,0555	3,7957	213,84	0,12	0,12
0,0554	4,1956	216,96	0,12	0,13

Figura F4 - **FRONTEIRA DE PARETO**

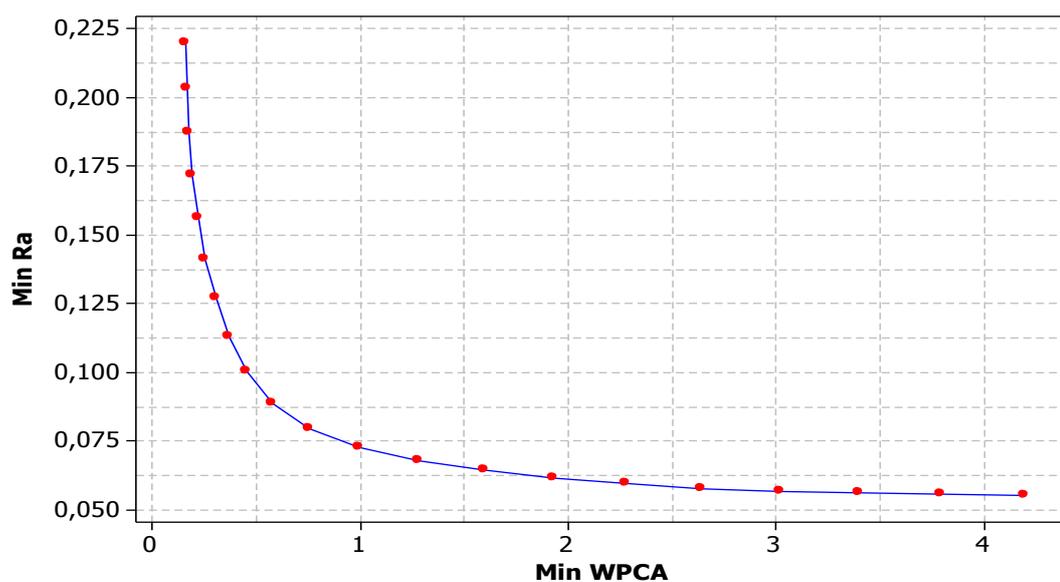


Figura F5 - Valores dos pontos razão ENTROPY/EPG.

EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropy Ra	Entropy WPCA	Entropy Total	Razão ENTROPY/EPG
2,9723	0,0000	<b>2,9723</b>	0,0001	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0000
2,6775	0,0203	<b>2,6978</b>	0,1498	0,0487	<b>0,1985</b>	0,0736
2,3877	0,0836	<b>2,4712</b>	0,2303	0,0948	<b>0,3251</b>	0,1315
2,1034	0,1940	<b>2,2975</b>	0,2846	0,1381	<b>0,4227</b>	0,1840
1,8255	0,3581	<b>2,1836</b>	0,3219	0,1785	<b>0,5004</b>	0,2292
1,5549	0,5852	<b>2,1401</b>	0,3466	0,2158	<b>0,5623</b>	0,2628
1,2935	0,8897	<b>2,1831</b>	0,3612	0,2497	<b>0,6109</b>	0,2798
1,0439	1,2950	<b>2,3389</b>	0,3674	0,2800	<b>0,6474</b>	0,2768
0,8110	1,8426	<b>2,6537</b>	0,3665	0,3065	<b>0,6730</b>	0,2536
0,6041	2,6110	<b>3,2151</b>	0,3593	0,3288	<b>0,6881</b>	0,2140
0,4378	3,7246	<b>4,1624</b>	0,3466	0,3466	<b>0,6931</b>	0,1665
0,3173	5,2285	<b>5,5458</b>	0,3288	0,3593	<b>0,6881</b>	0,1241
0,2301	7,0159	<b>7,2461</b>	0,3065	0,3665	<b>0,6730</b>	0,0929
0,1647	8,9880	<b>9,1527</b>	0,2800	0,3674	<b>0,6474</b>	0,0707
0,1145	11,0899	<b>11,2044</b>	0,2497	0,3612	<b>0,6109</b>	0,0545
0,0759	13,2906	<b>13,3665</b>	0,2158	0,3466	<b>0,5623</b>	0,0421
0,0467	15,5711	<b>15,6178</b>	0,1785	0,3219	<b>0,5004</b>	0,0320
0,0254	17,9188	<b>17,9441</b>	0,1381	0,2846	<b>0,4227</b>	0,0236
0,0109	20,3250	<b>20,3359</b>	0,0948	0,2303	<b>0,3251</b>	0,0160
0,0027	22,7836	<b>22,7862</b>	0,0487	0,1498	<b>0,1985</b>	0,0087
0,0000	25,2894	<b>25,2894</b>	0,0000	0,0001	<b>0,0001</b>	0,0000

### Principal Component Analysis: T; Kp; FR; RD; ECC

#### Eigenanalysis of the Correlation Matrix

Eigenvalue	4.0224	0.4838	0.3384	0.0973	0.0581
Proportion	0.804	0.097	0.068	0.019	0.012
Cumulative	0.804	0.901	0.969	0.988	1.000

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
T	0.470	0.167	0.446	0.089	0.738
Kp	0.432	-0.523	-0.530	-0.459	0.219
FR	0.462	-0.420	0.043	0.715	-0.311
RD	-0.467	-0.117	-0.469	0.499	0.547
ECC	-0.402	-0.713	0.546	-0.146	0.105

## ANEXO G - Ferramenta PCBN 7025

Tabela G1 – Modelos quadráticos completos para a ferramenta CBN 7025

Respostas	T	Ct	Tt	Kp	Ra	Rt	MRR	Fr	Tp°	RD	EEC
Constante	<b>43,52</b>	<b>0,59</b>	<b>1,37</b>	<b>3,44</b>	<b>0,80</b>	<b>0,21</b>	<b>6,33</b>	<b>343,17</b>	<b>470,20</b>	<b>85,72</b>	<b>0,01</b>
Vc	<b>-12,36</b>	<b>-0,34</b>	<b>-0,38</b>	<b>-1,00</b>	0,09	0,32	<b>2,43</b>	<b>-85,70</b>	<b>50,87</b>	<b>8,20</b>	<b>0,01</b>
f	-1,64	<b>-0,34</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,37</b>	<b>0,67</b>	<b>1,99</b>	<b>2,43</b>	11,74	5,94	1,40	<b>0,00</b>
ap	-0,66	0,00	0,01	<b>0,36</b>	-0,05	-0,16	<b>2,37</b>	14,23	-6,55	0,51	<b>0,00</b>
Vc x Vc	-0,06	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	0,07	0,10	1,43	0,00	3,57	-0,01	0,29	<b>0,00</b>
f x f	-0,86	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	-0,00	0,21	1,74	0,00	-2,13	10,30	-1,42	0,00
ap x ap	2,40	-0,01	-0,02	<b>-0,21</b>	0,12	1,45	-0,00	-0,54	28,70	-1,26	0,00
Vc x f	2,37	<b>0,12</b>	<b>0,11</b>	-0,07	0,06	0,2	<b>0,93</b>	-9,54	1,93	-1,43	<b>0,00</b>
Vc x ap	0,50	-0,00	-0,01	<b>-0,29</b>	0,05	0,14	<b>0,91</b>	-15,99	-17,00	0,27	<b>0,00</b>
f x ap	0,62	-0,00	-0,00	-0,18	0,00	0,06	<b>0,91</b>	-11,56	11,19	-0,24	0,00
R <sup>2</sup> adj.	92,95%	96,96%	96,93%	96,62%	82,72%	80,30%	99,24%	94,79%	54,59%	73,28%	97,33%

<sup>1</sup>Valores em negrito representam os termos significativos ( P-Value< 5%)

Tabela G2 –Otimização individual de cada característica estudada no processo do torneamento do aço ABNT H13 com ferramenta CBN7025.

Ferramenta	Parâmetros			Respostas individuais					
	Vc m/min	f mm/rev	ap mm	Kp (U\$)	Ra (µm)	Fr (N)	RD (dB)	T (min)	EEC (cm <sup>3</sup> / N.min)
CBN7025	248,11	0,21	0,29	1,66	1,92	220,26	96,19	28,30	1,66
	157,63	0,07	0,26	4,24	0,28	334,85	79,57	45,00	4,24
	265,46	0,17	0,27	1,85	1,41	206,78	100,02	23,62	1,85
	76,59	0,10	0,23	5,14	0,53	437,22	70,38	64,54	5,14
	66,43	0,13	0,20	4,88	0,76	449,24	71,18	66,14	4,88
	240,01	0,21	0,31	1,68	1,92	228,63	94,85	30,49	1,68

Figura G3 - Valores dos pontos Min Ra e Min WPCA plotados na fronteira ferramenta  
CBN7025 (Wiper).

Min Ra	Min WPCA	Vc	f	ap
1,6845	0,3160	115,44	0,20	0,12
1,5542	0,3309	118,62	0,19	0,11
1,4377	0,3659	120,86	0,18	0,11
1,3262	0,4084	122,02	0,18	0,12
1,2186	0,4565	123,20	0,17	0,12
1,1150	0,5106	124,39	0,16	0,13
1,0157	0,5710	125,61	0,16	0,14
0,9210	0,6381	126,85	0,15	0,15
0,8312	0,7124	128,11	0,15	0,16
0,7464	0,7941	129,40	0,14	0,16
0,6672	0,8840	130,71	0,13	0,17
0,5939	0,9825	132,06	0,13	0,18
0,5269	1,0904	133,46	0,12	0,19
0,4667	1,2082	134,91	0,11	0,20
0,4138	1,3368	136,44	0,10	0,21
0,3690	1,4772	138,08	0,10	0,22
0,3328	1,6304	139,92	0,09	0,23
0,3061	1,7974	142,17	0,08	0,24
0,2894	1,9792	145,49	0,08	0,25
0,2822	2,1748	151,13	0,07	0,26
0,2807	2,3789	157,63	0,07	0,26

Figura G4 - **FRONTEIRA DE PARETO**

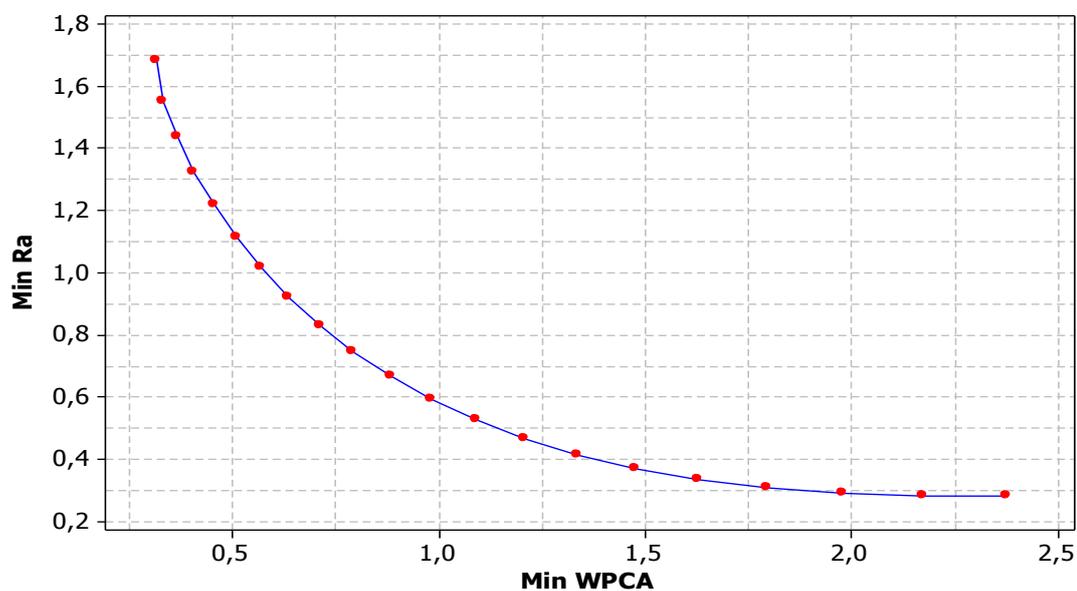


Figura G5 - Valores dos pontos razão ENTROPY/EPG.

EPG Ra	EPG PCA	EPG Total	Entropy Ra	Entropy WPCA	Entropy Total	Razão ENTROPY/EPG
5,0012	0,0000	<b>5,0012</b>	0,0001	0,0000	<b>0,0001</b>	0,0000
4,5372	0,0471	<b>4,5843</b>	0,1498	0,0487	<b>0,1985</b>	0,0433
4,1219	0,1578	<b>4,2797</b>	0,2303	0,0948	<b>0,3251</b>	0,0760
3,7248	0,2922	<b>4,0170</b>	0,2846	0,1381	<b>0,4227</b>	0,1052
3,3413	0,4446	<b>3,7859</b>	0,3219	0,1785	<b>0,5004</b>	0,1322
2,9724	0,6158	<b>3,5881</b>	0,3466	0,2158	<b>0,5623</b>	0,1567
2,6187	0,8069	<b>3,4257</b>	0,3612	0,2497	<b>0,6109</b>	0,1783
2,2813	1,0193	<b>3,3006</b>	0,3674	0,2800	<b>0,6474</b>	0,1962
1,9611	1,2541	<b>3,2152</b>	0,3665	0,3065	<b>0,6730</b>	0,2093
1,6593	1,5129	<b>3,1722</b>	0,3593	0,3288	<b>0,6881</b>	0,2169
<b>1,3770</b>	<b>1,7973</b>	<b>3,1743</b>	0,3466	0,3466	<b>0,6931</b>	0,2184
1,1158	2,1090	<b>3,2248</b>	0,3288	0,3593	<b>0,6881</b>	0,2134
0,8770	2,4502	<b>3,3272</b>	0,3065	0,3665	<b>0,6730</b>	0,2023
0,6626	2,8230	<b>3,4856</b>	0,2800	0,3674	<b>0,6474</b>	0,1858
0,4743	3,2301	<b>3,7044</b>	0,2497	0,3612	<b>0,6109</b>	0,1649
0,3146	3,6743	<b>3,9889</b>	0,2158	0,3466	<b>0,5623</b>	0,1410
0,1858	4,1590	<b>4,3447</b>	0,1785	0,3219	<b>0,5004</b>	0,1152
0,0906	4,6874	<b>4,7780</b>	0,1381	0,2846	<b>0,4227</b>	0,0885
0,0312	5,2626	<b>5,2938</b>	0,0948	0,2303	<b>0,3251</b>	0,0614
0,0053	5,8817	<b>5,8870</b>	0,0487	0,1498	<b>0,1985</b>	0,0337
0,0000	6,5275	<b>6,5275</b>	0,0000	0,0001	<b>0,0001</b>	0,0000

## ANEXO H – Execução do DEA e seleção da ferramenta ótima para as 7 DMUs

Figura H1 – Resultados da otimização de cada DMU

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
25					Multipliers	0,281808	0,725798	0,2786868	0,751953	0,278687	0,469936	
26			W1	W2	>=	10%	26%	10%	27%	10%	17%	
27		DMU1	=MENOR(E27:F27;1)*SOMA(\$H\$25:\$M\$25)			0,28	0,75	0,28	0,47	1,00		
28		DMU2	0,9000	0,02	0,28	0,10	0,27	0,10	0,17			
29		DMU3	0,5000	0,1	0,28	Kp	Ra	Fr	RD	T	EEC	SI
30		DMU4	0,1000	0,18	0,28	0,28	0,73	0,28	0,75	0,28	0,47	1,00
31		DMU5	0,9000	0,02	0,06	10%	26%	10%	27%	10%	17%	
32		DMU6	0,3000	0,1	0,28	0,100	1,63696	1,052611	1,1295	0,099749	0,969	1,00
33		DMU7	0,1000	0,18	0,28	2%	33%	21%	23%	2%	19%	
34		DMU8	0,9000	0,02	0,06	0,388	0,99858	0,3834278	1,034565	0,383428	0,647	1,00
35		DMU9	0,4500	0,11	0,31	10%	26%	10%	27%	10%	17%	
36		DMU10	0,1000	0,18	0,28	1,678	0,418012	0,4180118	0,657924	0,418012	0,590	1,00
37		DMU11	0,9000	0,02	0,06	40%	10%	10%	16%	10%	14%	
38		DMU12	0,4000	0,12	0,33	0,389	0,510349	0,0777278	1,345791	1,485998	0,078	1,00
39		DMU13	0,1000	0,18	0,28	10%	13%	2%	35%	38%	2%	
40		DMU14	0,9000	0,02	0,06	2,040739	0,508409	0,5084087	0,800203	0,508409	0,717918	1
41		DMU15	0,5000	0,1	0,28	40%	10%	10%	16%	10%	14%	
42		DMU16	0,1000	0,18	0,28	0,243	0,630425	0,2426857	0,659886	0,242686	0,408	1,00

Tabela H1 - Autovalores e Autovetores

Autovalores					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
	4,022	0,483	0,338	0,097	0,058
$\Theta$	72%	9%	6%	2%	1%
Autovetores					
<b>T</b>	0,469541342	0,167059452	0,445809179	0,088776614	0,738237737
<b>Kp</b>	0,43152752	0,523251283	0,530471426	0,458729858	0,219451767
<b>FR</b>	0,462012291	0,420111035	0,043127313	0,715241269	0,310839707
<b>RD</b>	0,467000223	0,117276998	0,469262339	0,498778209	0,546964398
<b>ECC</b>	0,402206865	0,712777706	0,545698759	0,146067982	0,105140805

Tabela H2 - Matriz de pesos ( $\Phi_{p \times g}$ ) para  $p$  variáveis originais e ( $\Psi_i$ ) pesos associados às variáveis originais.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	
	$\Phi_{p_i}$					$\Psi_i$
<b>T</b>	15%	1%	1%	0%	0%	18%
<b>Kp</b>	14%	2%	2%	0%	0%	18%
<b>FR</b>	15%	2%	0%	1%	0%	18%
<b>RD</b>	15%	1%	1%	0%	0%	18%
<b>ECC</b>	13%	3%	2%	0%	0%	18%

Para ser realizada esta análise, foi verificado somente com os pontos de ótimo Entropia/EPG.

Tabela H 3 – valor da máxima razão Entropia /EPG codificados

DMU	Tool	W1	W2	Vc	f	ap	Kp	Ra	Fr	RD	T	EEC
3	CBN 7025	0,50	0,50	-0,51	-0,46	-0,74	0,55	0,24	0,63	0,30	0,31	0,95
6	CBN 7025 wiper	0,30	0,70	-0,11	-0,28	-1,65	0,17	0,26	0,39	0,40	0,28	1,00
9	CC 6050	0,45	0,55	-1,06	-1,10	0,70	0,98	0,25	0,84	0,20	0,10	0,04
12	CC 6050 wiper	0,40	0,60	-1,18	0,61	1,03	0,71	0,27	1,05	0,19	0,18	0,89
15	CC 650	0,50	0,50	-0,23	0,11	-1,66	0,20	0,82	0,05	0,23	0,31	0,99
18	CC 650 wiper	0,40	0,60	-1,26	-0,56	0,43	0,90	0,32	0,92	0,18	0,08	0,22
21	CC 670	0,10	0,90	-1,52	-0,25	0,67	1,01	0,39	1,03	0,12	0,02	0,94

Tabela H 4 – valores eficientes pelo DEA

Vc	f	ap	Kp	Ra	Fr	RD	T	EEC
130,71	0,13	0,17	2,24	0,34	350,95	77,79	52,22	<b>0,00744</b>
155,33	0,14	0,09	1,59	0,20	309,92	75,98	52,13	<b>0,00519</b>
96,18	0,09	0,30	3,38	0,33	430,01	70,82	59,55	<b>0,00461</b>
88,52	0,20	0,33	2,76	0,13	484,00	72,48	56,38	<b>0,01095</b>
148,17	0,17	0,09	1,55	0,29	329,18	76,47	52,73	<b>0,00509</b>
83,88	0,13	0,28	3,21	0,33	449,38	71,30	60,48	<b>0,00530</b>
67,2691	0,14	0,30	3,37	0,25	493,14	68,62	62,99	<b>0,00412</b>

Tabela H 5 – Resultados da otimização de cada DMU

w1	w2	>=		DMU	Kp	Ra	Fr	RD	T	EEC
0,5000	0,1000	10%	0,325	3	0,389	0,615	0,389	1,321	0,389	0,790
0,3000	0,1400	14%	0,455	6	0,679	1,328	0,679	0,679	0,679	0,805
0,4500	0,1100	11%	0,358	9	0,388	0,505	0,388	0,835	1,026	0,388
0,4000	0,1200	12%	0,390	12	0,388	0,508	0,388	0,949	0,388	0,615
0,5000	0,1000	10%	0,325	15	0,441	0,916	1,301	0,441	0,441	0,870
0,4000	0,1200	12%	0,390	18	0,371	0,485	0,371	0,907	0,371	0,588
0,1000	0,1800	10%	0,325	21	0,325	0,514	0,325	1,104	0,325	0,660

Tabela H 6 – Resultados da porcentagens de cada DMU

Tool	DMU	Kp	Ra	Fr	RD	T	EEC	Eff
CBN 7025	3	10%	16%	10%	34%	10%	20%	100%
CBN 7025 wiper	6	14%	27%	14%	14%	14%	17%	100%
CC 6050	9	11%	14%	11%	24%	29%	11%	12%
CC 6050 wiper	12	12%	16%	12%	29%	12%	19%	63%
CC 650	15	10%	21%	29%	10%	10%	20%	100%
CC 650 wiper	18	12%	16%	12%	29%	12%	19%	16%
CC 670	21	10%	16%	10%	34%	10%	20%	62%

## ANEXO I – Correlação existente entre as respostas para cada ferramenta

### Ferramenta 650:

#### Correlação: Ra; T; Kp; Fr; RD; EEC

T	Ra	T	Kp	Fr	RD
	-0,149 0,542				
Kp	-0,460 0,048	0,739 0,000			
Fr	0,138 0,572	0,854 0,000	0,724 0,000		
RD	0,137 0,576	-0,900 0,000	-0,666 0,002	-0,729 0,000	
EEC	0,388 0,101	-0,747 0,000	-0,701 0,001	-0,600 0,007	0,629 0,004

**Ferramenta 650 Wiper:****Correlação: Ra; T; Kp; Fr; RD; EEC**

	Ra	T	Kp	Fr	RD
T	-0,252 0,299				
Kp	-0,455 0,050	0,748 0,000			
Fr	-0,089 0,718	0,855 0,000	0,738 0,000		
RD	0,277 0,250	-0,860 0,000	-0,634 0,004	-0,655 0,002	
EEC	0,416 0,077	-0,743 0,000	-0,698 0,001	-0,606 0,006	0,589 0,008

**Ferramenta 670:****Correlação: Ra; T; Kp; Fr; RD; EEC**

	Ra	T	Kp	Fr	RD
T	-0,278 0,249				
Kp	-0,386 0,103	0,758 0,000			
Fr	-0,005 0,984	0,233 0,337	0,351 0,141		
RD	0,224 0,357	-0,894 0,000	-0,741 0,000	-0,003 0,989	
EEC	0,399 0,091	-0,690 0,001	-0,683 0,001	-0,092 0,708	0,638 0,003

**Ferramenta 6050:****Correlação: Ra; T; Kp; Fr; RD; EEC**

	Ra	T	Kp	Fr	RD
T	-0,331 0,167				
Kp	-0,500 0,029	0,733 0,000			
Fr	-0,125 0,612	0,874 0,000	0,751 0,000		
RD	0,277 0,250	-0,828 0,000	-0,657 0,002	-0,609 0,006	
EEC	0,618 0,005	-0,738 0,000	-0,697 0,001	-0,615 0,005	0,575 0,010

**Ferramenta 6050 Wiper:****Correlação: Ra; T; Kp; Fr; RD; EEC**

	Ra	T	Kp	Fr	RD
T	-0,204 0,402				
Kp	-0,366 0,124	0,756 0,000			
Fr	-0,129 0,600	0,861 0,000	0,759 0,000		
RD	0,310 0,196	-0,846 0,000	-0,705 0,001	-0,698 0,001	
EEC	0,261 0,281	-0,752 0,000	-0,693 0,001	-0,609 0,006	0,678 0,001

**Ferramenta CBN 7025 Wiper:****Correlação: Ra; T; Kp; FR; RD; ECC**

	Ra	T	Kp	FR	RD
T	0,051 0,836				
Kp	0,036 0,885	0,698 0,001			
FR	0,356 0,135	0,838 0,000	0,865 0,000		
RD	-0,208 0,392	-0,935 0,000	-0,712 0,001	-0,826 0,000	
ECC	0,252 0,299	-0,732 0,000	-0,608 0,006	-0,607 0,006	0,706 0,001

**Ferramenta CBN 7025:****Correlação: Ra; Kp; Fr; RD; EEC; T**

	Ra	Kp	Fr	RD	EEC
Kp	-0,426 0,069				
Fr	-0,038 0,876	0,842 0,000			
RD	0,120 0,626	-0,718 0,001	-0,776 0,000		
EEC	0,482 0,037	-0,666 0,002	-0,655 0,002	0,709 0,001	
T	-0,217 0,372	0,738 0,000	0,851 0,000	-0,926 0,000	-0,737 0,000