

**LUCIANO TADEU NUNES**

**Análise estatística da influência dos parâmetros de  
corte na rugosidade no torneamento do aço  
microligado DIN 38MnSiVS5**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2011**

**LUCIANO TADEU NUNES**

**Análise estatística da influencia dos parâmetros de  
corte na rugosidade no torneamento do aço  
microligado DIN 38MnSiVS5**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de  
**MESTRE EM ENGENHARIA  
MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos  
de Fabricação

**Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva**

**UBERLÂNDIA – MG**

**2011**

|       |                                                                                                                                                                                  |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| N972a | Nunes, Luciano Tadeu                                                                                                                                                             |
|       | <p>Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5. / Luciano Tadeu Nunes. – Uberlândia, 2011. 143f.</p> |
|       | <p>Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva</p>                                                                                                                               |
|       | <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2011.</p>                                                                                 |
|       | <p>1. Rugosidade 2. Usinagem 3. Vibração I. Título II. Universidade Federal de Uberlândia.</p>                                                                                   |
|       | <p>CDD - 621</p>                                                                                                                                                                 |

*A Deus pela força; à minha esposa Lucimar e filho Victor Tadeu pelo companheirismo, compreensão e apoio; minha mãe Izabel e irmã Luciene pela ajuda; e meu pai **in memoriam** que tanto acreditou e lutou pela nossa educação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela capacitação e pela bondade, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva, pelas idéias, empenho, orientação, companheirismo e apoio no desenvolvimento da dissertação.

Ao prof. Dr. Helder Barbieri Lacerda pela colaboração durante os testes experimentais.

Ao Prof. MSc. Fábio de Freitas Lima e técnico Reginaldo Ferreira de Souza pela contribuição no decorrer do trabalho.

Ao meu amigo doutorando Marcelo Nascimento pela cooperação nas análises estatísticas.

A todos os meus amigos pela força e motivação durante este período de estudo.

Aos meus colegas do curso de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, Stéfano, Déborah, Janaína, Mauro, Sebastião, Ildeu, Cláudio ( capa ), Márcio Aurélio, Vitor Tomaz, José Radi, que contribuíram de forma direta e indireta para realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, que forneceram o apoio necessário. À CAPES pela bolsa concedida no penúltimo ano deste trabalho.

À empresa Aços Villares S.A. pelo fornecimento do material dos corpos de prova.

Às agências de fomento do programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFU: CNPq e Fapemig pelo apoio financeiro.

A todos, enfim, o mais precioso desta vida: amizade e gratidão.

NUNES, L. T. **ANÁLISE ESTATÍSTICA DA INFLUENCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO DO AÇO MICROLIGADO DIN 38MNSIVS5**. 2011. 143 páginas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas. Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície, assim o termo Integridade Superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e, portanto, engloba um grande número de variações da mesma. Para um processo de usinagem convencional, integridade superficial pode ser classificada em alterações na superfície (acabamento superficial) e alterações em camadas internas da peça (alterações sub-superficiais). O presente trabalho analisa o perfil de rugosidade de superfícies usinadas no torneamento cilíndrico externo verificando os efeitos dos principais parâmetros de usinagem: velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f_t$ ), raio de ponta da ferramenta ( $r_\xi$ ), fluido de corte nos parâmetros de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_v$ ,  $R_q$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{sk}$ ) e ainda, correlaciona estes parâmetros com o sinal de vibração durante a usinagem. Para uma melhor confiabilidade na influência destes parâmetros foram usadas ferramentas estatísticas através da análise de variância e teste t de Student. Através da análise estatística verificou-se que os parâmetros de usinagem: avanço e raio de ponta, foram significativos no parâmetro de rugosidade superficial  $R_q$  (rugosidade média quadrática) e que este apresenta uma boa correlação com o sinal de vibração.

---

**Palavras-chave:** Rugosidade, usinagem, vibração.

NUNES, L. T. **STATISTICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN TURNING OPERATION OF HIGH-STRENGTH LOW-ALLOW STEEL DIN 38MnSiVS5**. 2011. 143 pages. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### ABSTRACT

The condition of a machined surface is the result of a process that involves plastic deformation, rupture, elastic recovery, heat generation, vibration, residual stress and, sometimes, chemical reactions. All these factors can provide different effects on the new surface generated. The term surface integrity can embrace a great number of changes in the surface. For a conventional machining process, surface integrity can be classified in surface changes and changes in sub-surface. In this work the effect of the main cutting parameters, cutting speed ( $v_c$ ), feed rate ( $f$ ), tool nose radius ( $r_\epsilon$ ) and cutting fluid on surface roughness parameters ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_q$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{sk}$ ) and profile of a machined surface are analysed. The vibration signal was also obtained during the operation in order to find correlation to the roughness parameters. For more reliability of the results it was used a statistical analysis. The results shown that the feed rate and tool nose radius were the major cutting parameters affecting surface roughness (parameter  $R_q$ ) and it was found a good correlation between  $R_q$  parameter and vibration signal.

---

Keywords: surface roughness, machining, vibration

## Símbolos

$a_p$ : profundidade de corte [mm]

ABNT : Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADC: Conversor Digital Analógico

ARS: Análise do Ângulo de Dispersão

ADF: Função de distribuição de amplitude

ASME: Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânicos

APC: Aresta Postiça de Corte

$C_p$ : profundidade de cratera [ $\mu\text{m}$ ]

EP: Extrema Pressão

$f$ : avanço [ mm/volta ]

F: estatística F

$H_0$ : Hipótese nula

$H_1$ : Hipótese alternativa

$l_L$ : desgaste [ mm ]

GDL: grau de liberdade

ISO: Organização Internacional de Normalização

$K_s$ : pressão específica de corte

$l_e$ : comprimento de amostragem (cut – off) [mm]

$l_m$ : comprimento de medição [mm]

$l_t$ : comprimento total [mm]

MFDP: Máquina – Ferramenta – Dispositivo de Fixação – Peça

PPC: Placa de Capacitância Paralela

$r_\xi$ : raio de ponta da ferramenta [mm]

Ra: Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]

Ry: Rugosidade máxima parcial [ $\mu\text{m}$ ]

Rmax: Rugosidade máxima num comprimento de amostragem [ $\mu\text{m}$ ]

Rq: Rugosidade média quadrática [ $\mu\text{m}$ ]

Rku: Curtosis

Rsk: Skewness

SQ: Soma dos Quadrados

MQ: Média Quadrática

t: teste de student

TiN: Nitreto de titânio

$v_c$  = velocidade de corte [m/min]

$Y_{ij}$ : corresponde à resposta de interesse (variável dependente) do j-ésimo tratamento no enésimo indivíduo;

Z: direção de medição

$Z_i$ : amplitudes parciais

### **Outros Símbolos**

$\alpha$ : nível de significância

$\mu$ : corresponde a média geral de todos os indivíduos

$\mu_j$ : corresponde ao efeito do j-ésimo tratamento

$\xi_{ij}$ : corresponde ao efeito dos fatores não controláveis no experimento é denominado também de erro residual

$\eta$ : média populacional

$\sigma$ : desvio padrão

$\chi_r$ : ângulo de posição

$\gamma_0$ : ângulo de saída da ferramenta

$\alpha_0$ : ângulo de folga da ferramenta

## LISTA DE FIGURAS

Página

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 – Diagrama mostrando o procedimento requerido para o projeto de um produto (Machado et al, 2009).....                                           | 05 |
| 2.2 – Classificação dos processos de fabricação (Santos, 2006).....                                                                                 | 06 |
| 2.3 – Operação de torneamento cilíndrico externo.....                                                                                               | 07 |
| 2.4 – Tipos de torneamento (Ferraresi, 2006).....                                                                                                   | 09 |
| 2.5 – Classificação da integridade superficial (Machado et al, 2009).....                                                                           | 10 |
| 2.6 – Representação esquemática das ondulações e das rugosidades (Ferraresi, 2006) .....                                                            | 12 |
| 2.7 – Classificação dos instrumentos para medição de textura superficial (ASME B – 46: 1995).....                                                   | 13 |
| 2.8 – Princípio básico de funcionamento dos instrumentos de medição de textura superficial (Dagnall, 1986).....                                     | 15 |
| 2.9 – Componentes de instrumentos de medição de rugosidade e de ondulações através de contato (Dagnall, 1986) .....                                 | 16 |
| 2.10 – Representação do efeito do raio do apalpador na redução de amplitudes das irregularidades de uma determinada superfície (Dagnall, 1986)..... | 17 |
| 2.11 – Erro de medição de rugosidade média introduzido pela utilização de diferentes dimensões de apalpadores (Dagnall, 1986).....                  | 18 |
| 2.12 – Parâmetro Ra para medir o acabamento superficial (Dagnall, 1986).....                                                                        | 19 |
| 2.13 – Comprimentos de análise para cálculo da rugosidade (Santos 2007).....                                                                        | 20 |
| 2.14 – Ilustração esquemática de diferentes superfícies com mesmo valor de Ra (Dagnall, 1986).....                                                  | 21 |
| 2.15 – Rugosidade Ry definida pela rugosidade parcial (Lima e Correa, 2008).....                                                                    | 22 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.16 – Diversas formas de rugosidade podem ter o mesmo valor para $R_y$ (Carter, M., 2000).....                            | 22 |
| 2.17 – Representação esquemática do parâmetro $R_q$ no histograma de amplitude de uma ADF (Dagnall, 1986).....             | 23 |
| 2.18 – Comparação entre duas superfícies com diferentes valores de Skewness (Smith, 2002).....                             | 24 |
| 2.19 – Representação esquemática da assimetria de perfis de Rugosidade (Dagnall, 1986).....                                | 25 |
| 2.20 – Representação esquemática de perfis com semelhante assimetria e diferentes rugosidade média (Dagnall, 1986).....    | 26 |
| 3.1 – Região de aceitação de $H_0$ $R_A$ e região crítica de rejeição $R_c$ de $H_0$ .....                                 | 36 |
| 3.2 – Regiões de aceitação e rejeição de $H_0$ a um nível de significância $\alpha$ em um teste bilateral.....             | 38 |
| 3.3 – Regiões de aceitação e rejeição de $H_0$ a um nível de significância $\alpha$ em um teste unilateral à direita.....  | 39 |
| 3.4 – Regiões de aceitação e rejeição de $H_0$ a um nível de significância $\alpha$ em um teste unilateral a esquerda..... | 39 |
| 4.1 – Microestrutura da região Central – ataque Nital 2%.....                                                              | 41 |
| 4.2 – Torno CNC MULTIPLIC 34 D.....                                                                                        | 41 |
| 4.3 – Aparelho pulverizador para aplicação de mínima quantidade de fluido de corte.....                                    | 44 |
| 4.4 – Posicionamento dos bicos para a aplicação externa de MQF.....                                                        | 44 |
| 4.5 – Rugosímetro Taylor Hobson 3 <sup>+</sup> .....                                                                       | 46 |
| 4.6 – Intervalos de corte na barra de aço microligado DIN38MnSiVS5.....                                                    | 46 |
| 4.7 – Acelerômetro piezoelétrico fixado no porta – ferramentas.....                                                        | 47 |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8 – Cadeia de instrumentação para aquisição dos sinais de vibração.....                                                                                                                  | 48 |
| 5.1 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF,<br>direção transversal com $r_\xi = 0,8 \text{ mm}$ ; $v_C = 220 \text{ m/min}$ e<br>$f = 0,10 \text{ mm/volta}$ .....          | 53 |
| 5.2 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF,<br>direção transversal com $r_\xi = 0,8 \text{ mm}$ ; $v_C = 280 \text{ m/min}$ e<br>$f = 0,04 \text{ mm/volta}$ .....          | 54 |
| 5.3 – Comparação dos parâmetros $R_q$ teórico e experimental<br>obtido após torneamento do Aço Microligado DIN38MnSiVS5<br>com ferramentas de metal duro nas condições a seco e com MQF... | 54 |
| 5.4 (a) – Influência do raio de ponta e do avanço na rugosidade<br>superficial $R_q$ com aplicação de MQF.....                                                                             | 57 |
| 5.4 (b) – Influência do raio de ponta e do avanço na rugosidade<br>superficial $R_q$ a seco.....                                                                                           | 58 |
| 5.5 (a) – Influência da velocidade de corte e do avanço na<br>rugosidade superficial $R_q$ com aplicação de MQF.....                                                                       | 58 |
| 5.5 (b) – Influência da velocidade de corte e do avanço na<br>rugosidade superficial $R_q$ a seco.....                                                                                     | 59 |
| 5.6 (a) – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta<br>na rugosidade superficial $R_q$ com aplicação de MQF.....                                                                | 59 |
| 5.6 (b) – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta<br>na rugosidade superficial $R_q$ a seco.....                                                                              | 60 |
| 5.7 (a) – Diagrama de Pareto em função dos valores<br>da estatística de teste $t$ .....                                                                                                    | 61 |
| 5.7 (b) – Diagrama de Pareto em função dos valores<br>da estatística de teste $t$ .....                                                                                                    | 61 |
| 5.8 – Gráficos comparativos das médias para influência da<br>velocidade de corte na rugosidade $R_q$ com aplicação<br>de MQF e a seco.....                                                 | 62 |

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.9 – Gráficos comparativos das médias para influência do raio de Ponta da ferramenta na rugosidade $R_q$ com aplicação de MQF e a seco.....                                              | 63 |
| 5.10 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com $r_\xi = 0,4 \text{ mm}$ ; $v_C = 280 \text{ m/min}$ e $f = 0,05 \text{ mm/volta}$ .....              | 64 |
| 5.11 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com $r_\xi = 0,8 \text{ mm}$ ; $v_C = 280 \text{ m/min}$ e $f = 0,05 \text{ mm/volta}$ .....              | 64 |
| 5.12 – Gráficos comparativos das médias para influência do avanço rugosidade $R_q$ com aplicação de MQF e a seco.....                                                                     | 65 |
| 5.13 – Correlação entre os parâmetros Rms de vibração e $R_q$ de rugosidade obtidos na usinagem com aplicação de MQF.....                                                                 | 67 |
| 5.14 – Correlação entre os parâmetros RMS de vibração e $R_q$ de rugosidade obtidos na usinagem na condição a seco.....                                                                   | 67 |
| 5.15 – Influência da velocidade de corte e do avanço nos parâmetros RMS de vibração e $R_q$ de rugosidade obtidos na usinagem com aplicação de MQF.....                                   | 68 |
| 5.16 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com $r_\xi = 0,4 \text{ mm}$ ; $v_C = 220 \text{ m/min}$ e $f = 0,10 \text{ mm/volta}$ .....              | 69 |
| 5.17 – Perfil de rugosidade para condição de corte com aplicação de MQF, direção transversal com $r_\xi = 0,4 \text{ mm}$ ; $v_C = 220 \text{ m/min}$ e $f = 0,05 \text{ mm/volta}$ ..... | 69 |
| 5.18 – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta nos parâmetros RMS de vibração e $R_q$ de rugosidade obtidos na usinagem com aplicação de MQF.....                            | 70 |
| 5.19 – Influência da velocidade de corte e do avanço nos parâmetros RMS de vibração e $R_q$ de rugosidade obtidos na usinagem na condição a seco.....                                     | 71 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.20 – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta nos<br>parâmetros RMS de vibração e Rq de rugosidade<br>obtidos na usinagem na condição a seco..... | 72 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE TABELAS

Página

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 – Comprimentos de avaliação e posição dos picos e vales dos parâmetros de amplitude de picos e vales DIN 3760:1982 (Geus,et al., 1999)..... | 28 |
| 3.1 – Quadro dos valores observados nos experimentos.....                                                                                       | 33 |
| 3.2 – Quadro de análise de variância.....                                                                                                       | 36 |
| 4.1 – Composição química (% em massa) do material utilizado.....                                                                                | 40 |
| 4.2 – Características técnicas do Torno (Linha Multiplic 35D – ROMI).....                                                                       | 42 |
| 4.3 – Características típicas do óleo vegetal Accu-Lube®/LB-2000.....                                                                           | 43 |
| 4.4 – Condições de corte utilizadas.....                                                                                                        | 45 |
| 5.1 – Quadro de análise de variância para o parâmetro de rugosidade Ra obtido após usinagem com aplicação de MQF.....                           | 50 |
| 5.2 – Efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade superficial.....                                                                            | 51 |
| 5.3 – Quadro de análise de variância para o parâmetro Rq obtido após usinagem na condição a seco.....                                           | 51 |
| 5.4 – Quadro de análise de variância para parâmetros Rq com Aplicação de MQF.....                                                               | 52 |
| 5.5 – Valor p dos pares de testes.....                                                                                                          | 55 |
| 5.6 – Valor P dos pares de testes com todos fatores com 0,05 com MQF.....                                                                       | 56 |
| 5.7 – Valor P dos pares de testes com todos fatores com 0,05 a seco.....                                                                        | 56 |
| 5.8 – Dados referentes ao sinal de vibração RMS obtidos na condição de usinagem com aplicação de MQF.....                                       | 66 |
| 5.9 – Dados referentes ao sinal de vibração RMS obtidos na usinagem na condição a seco.....                                                     | 66 |

## SUMÁRIO

Página

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1.....                                                                                                       | 01 |
| INTRODUÇÃO.....                                                                                                       | 01 |
| 1.1 Considerações Iniciais.....                                                                                       | 01 |
| 1.2 Objetivos.....                                                                                                    | 02 |
| 1.3 Apresentação do trabalho.....                                                                                     | 02 |
| CAPÍTULO 2.....                                                                                                       | 04 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                                                            | 04 |
| 2.1 Introdução aos Processos de Fabricação.....                                                                       | 04 |
| 2.2 O Processo de Usinagem.....                                                                                       | 06 |
| 2.2.1 Torneamento.....                                                                                                | 08 |
| 2.3 Integridade Superficial.....                                                                                      | 10 |
| 2.3.1 Acabamento Superficial.....                                                                                     | 11 |
| 2.3.2 Rugosidade Superficial.....                                                                                     | 11 |
| 2.3.2.1 Formas de Medição de um Perfil de Rugosidade.....                                                             | 13 |
| 2.3.2.2 Características dos Componentes de Instrumentos de<br>Contato para Medição de Rugosidade e de Ondulações..... | 15 |
| 2.3.2.3 Apalpador ou Sensor de Contato.....                                                                           | 17 |
| 2.3.2.4 Parâmetros de Rugosidade.....                                                                                 | 19 |
| 2.3.2.5 Efeito dos Parâmetros de Corte na Rugosidade.....                                                             | 29 |
| CAPÍTULO 3.....                                                                                                       | 31 |
| ANÁLISE ESTATÍSTICA.....                                                                                              | 31 |
| 3.1 Comparação de K tratamentos – Análise de Variância.....                                                           | 31 |
| 3.1.1 A distribuição F.....                                                                                           | 34 |
| 3.1.2 Comparação de 2 tratamentos.....                                                                                | 36 |
| CAPÍTULO 4.....                                                                                                       | 40 |
| PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....                                                                                        | 40 |
| 4.1 Material do Corpo de Prova.....                                                                                   | 40 |
| 4.2 Máquina Ferramenta Utilizada.....                                                                                 | 41 |
| 4.3 Ferramentas Utilizadas.....                                                                                       | 42 |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4 Aplicação de Fluido de Corte.....                                               | 43 |
| 4.5 Condições de Corte Utilizadas.....                                              | 45 |
| 4.6 Medição da Rugosidade.....                                                      | 46 |
| 4.7 Medição do Sinal de Vibração.....                                               | 47 |
| CAPÍTULO 5.....                                                                     | 49 |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                        | 49 |
| 5.1 Análise Estatística da Influência dos Parâmetros de Corte na<br>Rugosidade..... | 49 |
| 5.2 Superfícies de Resposta.....                                                    | 57 |
| 5.3 Variação da Rugosidade Superficial Rq versus sinal<br>de vibração RMS.....      | 66 |
| CAPÍTULO 6.....                                                                     | 73 |
| CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                                  | 73 |
| 6.1 Conclusões.....                                                                 | 73 |
| 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....                                           | 73 |
| CAPÍTULO 7.....                                                                     | 75 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                     | 75 |
| ANEXOS.....                                                                         | 79 |

# **CAPÍTULO 1**

## **Introdução**

### **1.1 – Considerações iniciais**

Os processos de fabricação destinados à obtenção de produtos com melhores qualidades e custos operacionais reduzidos vêm esmerando-se com o rápido avanço tecnológico industrial.

Apesar de toda automatização envolvida nas linhas de produção, há, devido às dificuldades de equacionamento, necessidade de se levar em conta se o acabamento superficial está dentro dos limites esperados e se a ferramenta de corte atingiu sua vida estimada. O fim de vida da ferramenta é determinado quando o desgaste da mesma atinge valores previamente estabelecidos, os quais normalmente baseiam-se no limite de capacidade de produzir peças dentro dos padrões de qualidade (acabamento superficial e tolerância dimensional), determinados pelo projeto.

O acabamento superficial pode ser classificado como ondulações e desvios micro – geométricos, principalmente rugosidade superficial. Esta última refere-se as irregularidades finais resultantes da ação inerente do processo de corte e, depende, dentre outros fatores, das condições de usinagem: velocidade de corte, rigidez da máquina ferramenta, avanço, raio de ponta da ferramenta e fluido de corte. Vale ressaltar, que o acabamento superficial, de modo geral, melhora quando: deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas; a ponta da ferramenta não é aguda; a ferramenta e a peça estão centradas; material da peça livre de defeitos; aresta de corte sem quebras ou com valor abaixo do limite ; corte sem aresta postiça de corte (APC) (Machado et al., 2009). Tais fatores regem o processo de corte e influenciam no acabamento superficial.

Atualmente, sabe-se que algumas máquinas ferramentas automatizadas já conseguem realizar o controle do desgaste e a troca de ferramentas, sem interferência do homem. Estas ações só foram possíveis com o desenvolvimento de

técnicas de monitoramento do processo de usinagem em tempo real, as quais são fundamentadas em medições de parâmetros que se relacionam com o desgaste da ferramenta e/ou o acabamento superficial da peça (Du et al, 1995).

O controle em tempo real pode ser baseado no monitoramento de vibrações mecânicas do sistema (de Sousa et al., 1998; Beloni et al., 2001); na emissão acústica (Calderani, 1998; Souto, 2007; Silva, 2010) ou ainda através da medição de vários parâmetros do processo (Braga et al., 1993).

## **1.2 – Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo estudar os perfis de rugosidade do aço microligado: DIN 38MnSiVS5 obtidos por torneamento cilíndrico externo e verificar o efeito dos principais parâmetros de usinagem:  $v_c$ ,  $f$ ,  $r_\xi$ , fluido de corte. O trabalho também visa investigar o comportamento dos principais parâmetros utilizados para expressar a rugosidade ( $R_a$ ,  $R_Y$ ,  $R_{Ku}$ ,  $R_{Sk}$  e RMS) e correlacionar com o sinal de vibração.

## **1.3 – Apresentação do trabalho**

O trabalho é constituído de sete capítulos organizados da seguinte maneira:

Capítulo 1: Contém uma breve introdução sobre a importância do acabamento superficial e os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: Contém uma revisão bibliográfica sobre o tema, bem como os conceitos e definições de processo de usinagem e integridade superficial.

Capítulo 3: Este capítulo trata dos métodos estatísticos utilizados para correlacionar os parâmetros de usinagem com a rugosidade e vibração.

Capítulo 4: Este capítulo aborda os métodos experimentais, tais como: metodologia dos ensaios, planejamento dos ensaios, material usinado, máquina ferramenta utilizada e ferramentas utilizadas.

Capítulo 5: Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. É um capítulo dividido em cinco tópicos.

Capítulos 6 e 7: Estes capítulos contém as considerações finais, conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 8: Aqui são apresentadas as referências bibliográficas consultadas.

Anexo: Estão todas as figuras e tabelas obtidas através dos testes e outras informações pertinentes ao trabalho.

## **CAPÍTULO 2**

### **Revisão Bibliográfica**

#### **2.1 – Introdução aos Processos de Fabricação**

Fabricar significa fazer artigos e mercadorias por processos industriais. O termo fabricação é sinônimo de manufatura. A derivação da palavra manufatura reflete seu significado inicial: fazer a mão. Atualmente, entretanto, a manufatura é realizada principalmente por máquinas.

A mecanização da indústria iniciou-se com a revolução industrial durante o século XVIII. O ímpeto inicial foi dado à indústria têxtil, na Inglaterra, pelas grandes invenções de máquinas para fiação e tecelagem. No final daquele século, e no início do seguinte, máquinas básicas para transformação, conformação, usinagem de metais foram criadas na Inglaterra e no continente europeu.

No início do século XIX, os processos e conceitos rudimentares de produção de peças já eram conhecidos e aplicados. A demanda de produção da crescente quantidade de bens industriais e de consumo deu impulso ao desenvolvimento e aperfeiçoamento dos processos, das máquinas e dos sistemas de fabricação.

A fabricação foi sempre, e é atualmente, uma arte em crescimento e em constante modificação. Com isso, a fabricação passa a ser afetada por inúmeros fatores e decisões. Um exemplo que pode ser citado, é a produção de um simples clipe (Machado et al., 2009). Primeiramente, ele deve atender o requisito funcional que é segurar folhas de papéis juntas. Para isso, ele deve exercer força suficiente, para que as folhas não se soltem. Os cliques são feitos geralmente de arame de aço, apesar de serem encontrados cliques moldados em plástico e cliques de arame revestido de materiais coloridos no mercado. Para a sua fabricação o arame de aço é cortado e dobrado várias vezes, para dar a forma final própria. O arame é produzido por um processo de trefilação a frio, neste processo a espessura de uma haste longa é reduzida ao passar por uma matriz de fieira, que também lhe confere

algumas propriedades, como dureza e resistência. A haste por sua vez, é obtida por processos como trefilação e a extrusão de um lingote.

Desta forma, a produção de um simples clipe envolve várias etapas que devem ser analisadas até que o produto possa ser lançado no mercado para comercialização.

De uma maneira geral, a Fig. 2.1 mostra um diagrama esquemático das etapas envolvidas no processo de produção de um produto ou artigo. Possuir conhecimento básico dos processos de fabricação é de grande importância para o projeto final e início de fabricação.



Figura 2.1 – Diagrama mostrando o procedimento requerido para o projeto de um produto, que são etapas que antecedem a fabricação (Machado et al, 2009).

Na etapa de fabricação, a que se refere a Fig. 2.1, é necessária a escolha do processo mais adequado. Evidentemente a escolha vai depender de vários fatores, incluindo os econômicos. Por exemplo, a escolha vai depender da geometria da peça a ser fabricada, do material a ser processado, do tamanho do lote a ser produzido, tolerâncias geométricas e dimensionais da peça, entre outros.

A decisão requer, então, o conhecimento de características específicas de processos de fabricação. Considerando apenas peças metálicas, a Fig. 2.2 é apresentada uma classificação, que não é definitiva dos processos de fabricação, mas que sugere intencionalmente, a divisão em: processos com remoção de cavacos e sem remoção de cavacos. Neste trabalho utiliza-se o processo de torneamento, um processo com remoção de cavacos convencional. Este processo será tratado com mais detalhes nos itens que se seguem.



Figura 2.2 – Classificação dos Processos de fabricação (Santos, 2006).

## 2.2 – O Processo de Usinagem

Usinagem é conhecido popularmente como o processo de fabricação com remoção de cavaco. Consultando, porém, uma bibliografia especializada

(Ferraresi, 2006) pode-se definir usinagem de forma mais abrangente, como sendo: “Operação que ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação qualquer destes itens, produzem cavacos”. E por cavaco entende-se: “Porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar uma forma geométrica irregular”.

Apesar desta popularidade, trata-se, ainda, de um processo bastante imprevisível e a definição paradoxal que se segue relata com precisão toda a sistemática que envolve o mesmo: “É um processo, complexo e simples ao mesmo tempo, onde se produzem peças, removendo-se excesso de material, na forma de cavacos”. É “complexo” devido às dificuldades em se determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. É “simples” porque, uma vez determinadas as condições ideais de corte, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de ação especial do operador. As condições ideais de corte são as capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível (Machado et al, 2009).

De todos os processos de usinagem, o torneamento, Fig. 2.3, talvez seja o mais utilizado em pesquisa na área. Isto porque a ferramenta é mais simples e é um processo mais fácil de monitorar na maioria dos casos. Como foi o processo utilizado neste trabalho, serão feitas considerações a respeito do mesmo.



Figura 2.3 – Operação de torneamento cilíndrico externo.

### 2.2.1 – TORNEAMENTO

Segundo Ferraresi (2006), O torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o eixo referido.

Esta operação ainda pode também ser dividida em operações mais específicas. Ferraresi (2006), sugere as seguintes classificações:

- Torneamento cilíndrico – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (Fig. 2.4a) ou interno (Fig. 2.4b). Quando o torneamento cilíndrico visa obter na peça um entalhe circular, na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, o torneamento é denominado sangramento axial (Fig. 2.4c).
- Torneamento cônico – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo (Fig. 2.4d) ou interno (Fig. 2.4e);
- Torneamento radial - Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina.  
Quando o torneamento radial visa a obtenção de uma superfície plana, o torneamento é denominado torneamento de faceamento (Fig. 2.4f). Quando o torneamento radial visa a obtenção de um entalhe circular, o torneamento é denominado sangramento radial (Fig. 2.4g).
- Perfilamento – processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea radial (Fig. 2.4h) ou axial, visando a obtenção de uma forma definida, determinada pelo perfil da ferramenta.

Estas operações estão ilustradas na Fig. 2.4.

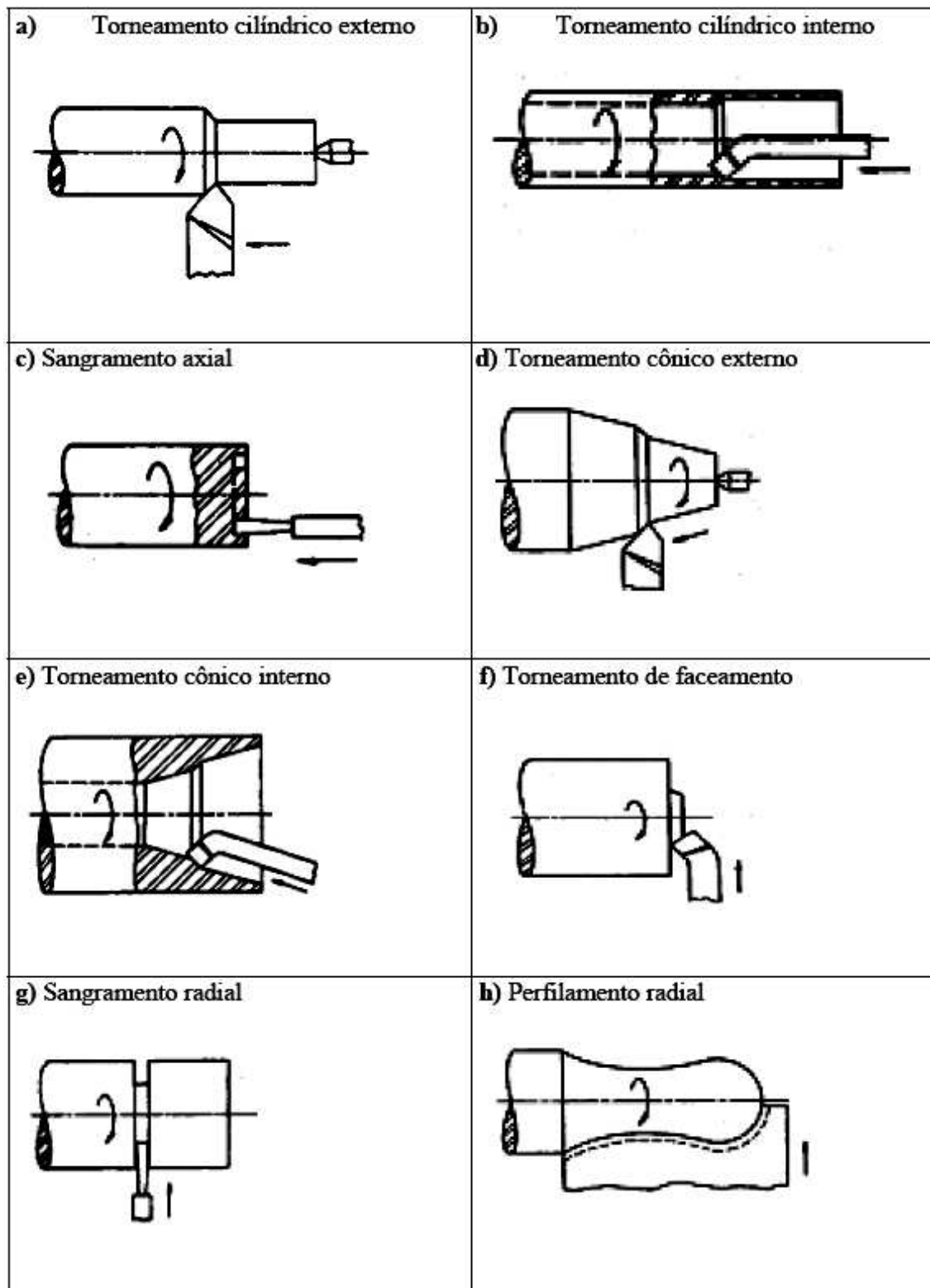


Figura 2.4 – Tipos de Torneamento (Ferraresi, 2006).

Qualquer que seja o processo de fabricação utilizado, a qualidade da peça é avaliada e deve atender certos pré-requisitos de projeto. Uma característica importante avaliada é a rugosidade da superfície, que será o tema do próximo item.

### 2.3 – Integridade Superficial

A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas. Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície e, portanto, engloba um grande número de variações na mesma. Desta forma, o conceito de integridade superficial não pode ser definido apenas em uma dimensão e não abrange somente a rugosidade da superfície ou a sua forma geométrica. Este termo engloba também outras características da superfície e de camadas abaixo desta. A Fig. 2.5 mostra uma classificação de alterações que podem ocorrer numa peça usinada por um processo de usinagem convencional. São classificadas em alterações na superfície (acabamento superficial) e alterações em camadas internas da peça (alterações sub-superficiais) e descrevem a integridade superficial.

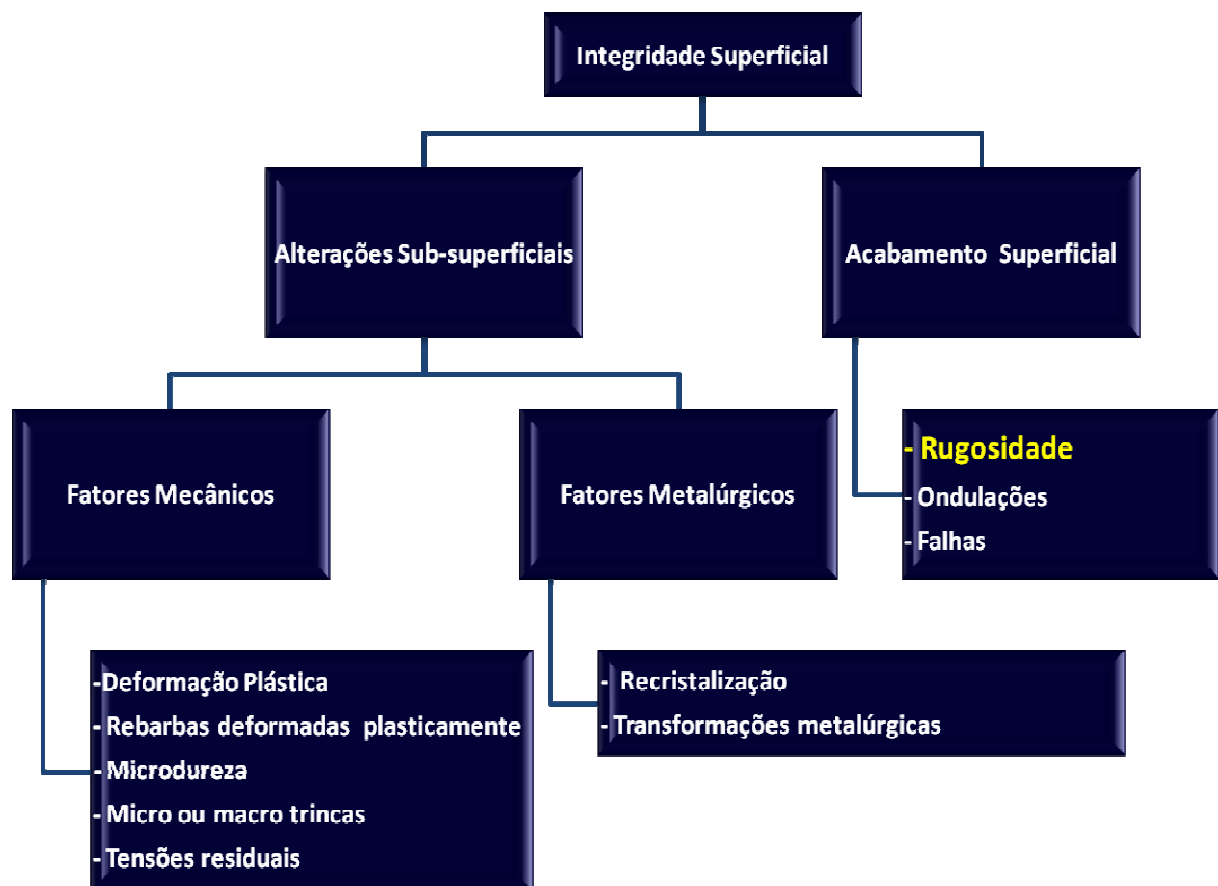


Figura 2.5 – Classificação da Integridade Superficial (Adaptado de Machado et al., 2009).

Dentre as alterações já citadas na Fig. 2.5, o acabamento superficial é a mais fácil de ser avaliada e, por isso, mais comumente monitorada. Assim, será abordado em maiores detalhes no item 2.3.1.

### **2.3.1 – Acabamento Superficial**

O acabamento superficial de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em (Juneja e Swkhon, 1987; Shaw, 1984; Schaffer, 1986; Drozda e Wick, 1983; Sata, 1963): rugosidade, ondulações e falhas.

Ondulações consistem de irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas como rugosidades. Podem ser causados por vibrações e deflexões da ferramenta e/ou peça, devido a forças de corte, temperaturas de corte ou erros de fixação da peça ou ferramenta. Peças longas e finas são mais sensíveis às forças elásticas e dinâmicas. Como resultado, as ondulações são mais pronunciadas. Por outro lado, peças grandes (grandes seções transversais), são rígidas e as alturas das ondulações são pequenas (Machado et al., 2009).

Falhas são interrupções na topografia típica da superfície de uma peça. São não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Podem ser causadas por defeitos inerentes, tais como: inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir também durante o processo de corte (Machado et al., 2009).

Normalmente, as ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, pois representam erros de fabricação. A rugosidade torna-se então um fator mais refinado a ser monitorado e depende de definições, normal a equipamentos específicos.

### **2.3.2 – Rugosidade Superficial**

São irregularidades finas ou erros micro-geométricos resultantes da ação inerente do processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.). A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros, alguns serão definidos mais adiante.

Em muitos casos a rugosidade é utilizada para controlar o processo de fabricação. De fato, a rugosidade de uma superfície é controlada por vários parâmetros: máquina ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, técnicas de aplicação do fluido, atmosfera e processo de usinagem. Métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um destes parâmetros (Whitehouse, 1997). Por exemplo, na operação de retificação pode-se avaliar a eficiência do processo ou a proporção de grãos que perderam o corte analisando-se a rugosidade da superfície da peça.

A rugosidade superficial é geralmente classificada em transversal e longitudinal Fig. 2.6. A rugosidade transversal apresenta-se na direção do movimento de avanço da ferramenta (direção AC da figura), enquanto que a rugosidade longitudinal está na direção do movimento de corte. Conforme o processo e as condições de usinagem, pode predominar um ou outro tipo de rugosidade. Assim, nas operações de torneamento e aplainamento, a máxima rugosidade é encontrada geralmente na direção de avanço, isto é, a rugosidade transversal (Ferraresi, 2006).

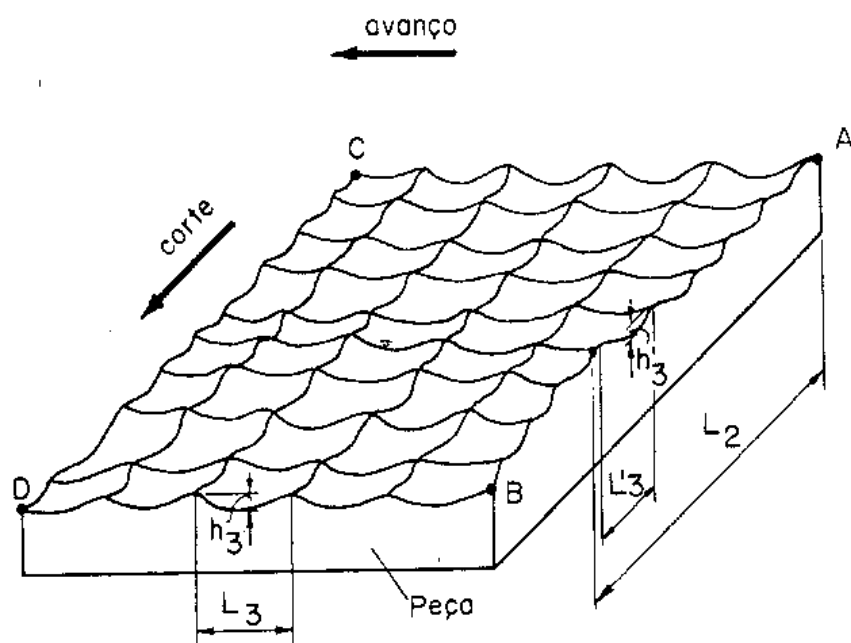


Figura 2.6 – Representação esquemática das ondulações e das rugosidades. (Ferraresi, 2006).

### 2.3.2.1 – Formas de Medição de um perfil de Rugosidade

A determinação da textura superficial teve um lugar de destaque nos principais campos de estudos, em particular na avaliação do desempenho de peças e de desgaste de revestimento. É pertinente considerar como a importância desse aspecto superficial tem mudado com o passar do tempo e como ela depende da escala de tamanho da peça e do processo de fabricação (Whitehouse, 1997).

A escolha do instrumento adequado para uma medição de textura superficial pode ser baseada nas informações contidas em normas técnicas. A Fig. 2.7 mostra um diagrama esquemático de uma típica classificação de instrumentos para medição de textura superficial (ASME B – 46:1 1995).

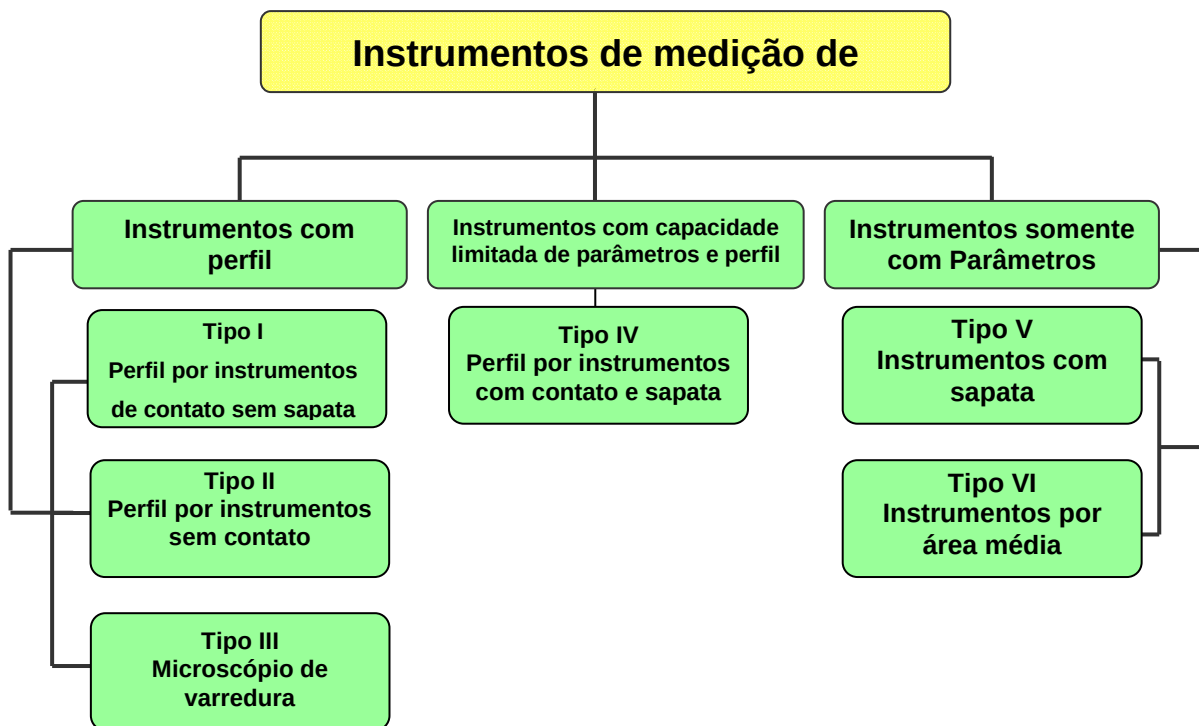


Figura 2.7 – Classificação dos instrumentos para medição de textura superficial (Adaptado de ASME B – 46:4, 1995).

De acordo com a Fig 2.7, podem ser citados três grupos de instrumentos de medição de textura superficial, que são: Instrumentos de perfil completo, instrumentos com capacidade limitada de parâmetros e de perfil e instrumentos somente de parâmetros.

Para a medição da rugosidade, esta deve ser separada da ondulação e dos desvios macrogeométricos. Esta separação é realizada através da filtragem. Um filtro de rugosidade separa o perfil de rugosidade dos demais desvios de forma.

O comprimento de onda do filtro, chamado de "cutt – off", determina o que deve passar e o que não deve passar. O sinal da rugosidade apresenta altas frequências (pequenos comprimentos de onda) e as ondulações e demais erros de forma apresentam sinais com baixas frequências (altos comprimentos de ondas). Os rugosímetros utilizam assim, filtros que deixam passar os sinais de altas frequência e eliminam os sinais de baixa frequências.

Os instrumentos do Tipo I apresentam sensores de contato com a superfície analisada e não possuem sapata (filtro mecânico). Estes aparelhos são capazes de medir amplas faixas de textura superficial, desde superfícies consideradas lisas até aquelas ásperas e, ainda, são capazes de gerar perfis filtrados (ou modificados) ou não filtrados (perfil efetivo), bem como realizar análises topográficas. Os instrumentos do tipo II usam sensores sem contato (ópticos ou elétricos) e são capazes de realizar medições de perfis ou análises topográficas, com ou sem filtragem. O fato da medição ser sem contato é uma vantagem para medições em superfícies macias. No entanto, deve-se considerar a possibilidade de variação da medição devido à condição superficial (tipo de material ou reflectância ) de cada amostra (ASME B – 46:1, 1995). Os instrumentos do tipo III utilizam a técnica de microscopia de varredura e apresentam alta resolução espacial (próxima à escala atômica). As medições realizadas por esses aparelhos são normalmente para análises topográficas. Uma limitação dessas medições diz respeito às pequenas regiões de análise, tendo um aspecto limitado de representatividade da superfície. Além disso, estes aparelhos são sensíveis às vibrações externas e às amplas variações de amplitude entre picos e vales (superfície muito rugosa e heterogênea). Por isso, estes aparelhos são tipicamente utilizados em ambientes de laboratório. Os instrumentos com capacidade limitada de parâmetros e de perfil ou somente parâmetros (tipos IV e V) são os mais usualmente utilizados. Estes aparelhos normalmente são de baixo custo de aquisição e têm em comum a utilização de sensores de contato do tipo agulha ou apalpador, acompanhados de sapata. Esses aparelhos não medem parâmetros de ondulações e erro de forma. Uma diferença entre estes instrumentos está associada à capacidade de análise de parâmetros e da utilização de perfis modificados. Os instrumentos do tipo VI são aqueles que

geram somente parâmetros a partir de análise de mapas topográficos. Pode-se dizer que os instrumentos do tipo VI permitem a determinação de um maior número de parâmetros e a utilização de variados filtros não mecânicos, enquanto aqueles do tipo V são mais limitados e utilizam normalmente filtros com maior distorção das amplitudes (tipo 2 RC – filtro eletrônico de capacitores e resistores).

Podem existir instrumentos no mercado que não se adequem claramente às classes propostas, o que não impede dessa classificação servir como ferramenta na escolha de instrumentos de medição de textura superficial e no entendimento do assunto.

### 2.3.2.2 – Características dos componentes de instrumentos de contato para medição de rugosidade e de ondulações

Os instrumentos de medição por sensor de contato são aqueles que exploram uma superfície com contato direto por meio de sensores ou apalpadores e adquirem os desvios na forma do perfil. Ainda, esses aparelhos têm a capacidade de calcular parâmetros e podem emitir relatórios do perfil graficamente.

A maioria dos instrumentos de medição de textura superficial baseia-se no princípio da identificação dessas irregularidades por um sensor deslocando sobre a superfície em uma determinada velocidade e distância de análise. A Fig. 2.8 mostra esquematicamente o princípio básico dos instrumentos de medição de textura superficial.

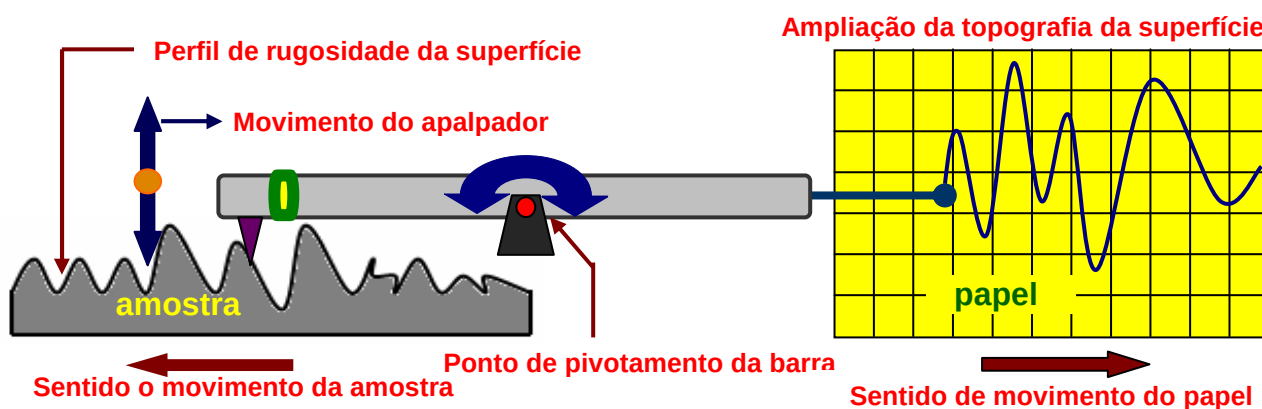


Figura 2.8 – Princípio básico de funcionamento dos instrumentos de medição de textura superficial (Santos, 2007).

Os típicos componentes de um instrumento de medição de rugosidade e de ondulação podem ser ilustrados na Fig.2.9.

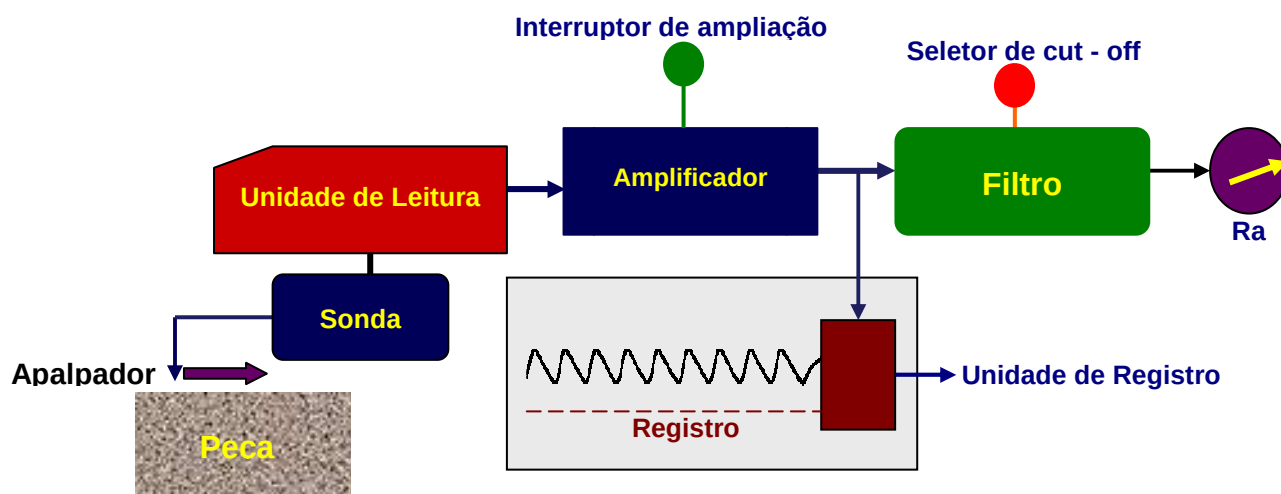


Figura 2.9 – Componentes de instrumentos de medição de rugosidade e de ondulações através de contato (Dagnall, 1986).

Conforme a Fig. 2.9, o sistema de medição compreende todos os componentes envolvidos na medição de textura superficial, tais como a mesa, acessório de fixação, amostra de análise, a sonda e a unidade de deslocamento. Por sua vez, a sonda compreende os componentes de medição propriamente dito, tais como os sensores e os transdutores. No caso específico de medição por contato através de sensor de contato (apalpador), esse componente de medição de textura se desloca, dentro de um intervalo de medição, para cima e para baixo na direção “Z”, em função da característica da superfície. Um transdutor converte o deslocamento vertical do sensor de contato em sinal elétrico. Esse sinal é exportado para um processador que o converte em sinal digital, Conversor Digital Analógico (ADC), permitindo posteriores análises matemáticas e apresentação gráfica do perfil medido.

Muitos dos perfis de textura superficial analisados em operações de engenharia são obtidos por contato direto, através do apalpador. As características desses sensores podem modificar o perfil analisado e até mesmo danificar a superfície analisada. Com isso, esse tipo de aparelho pode fornecer uma informação que não retrate a realidade. Além disso, as medições podem variar em função de outras condições, tais como características da filtragem do perfil de medição (tipos de filtros

e comprimento de amostragem) e a utilização de suportes da sonda, sendo necessário uma adequação das mesmas ao objetivo da medição. Sendo assim, vale destacar as principais características dos componentes de instrumentos de medição de textura superficial com contato.

### 2.3.2.3 – Apalpador ou sensor de contato

No sistema de medição dos instrumentos de medição de textura superficial com contato, o apalpador é o único componente que pode entrar em contato com as irregularidades da superfície a ser avaliada. As dimensões e forma desses apalpadores terão forte influência nas informações a serem obtidas pelo respectivo aparelho de medição, como pode ser ilustrado na Fig. 2.10 (Dagnall, 1986). Nesta figura é mostrado como a ponta de maior dimensão, aparentemente, reduz a amplitude das irregularidades de uma hipotética superfície.

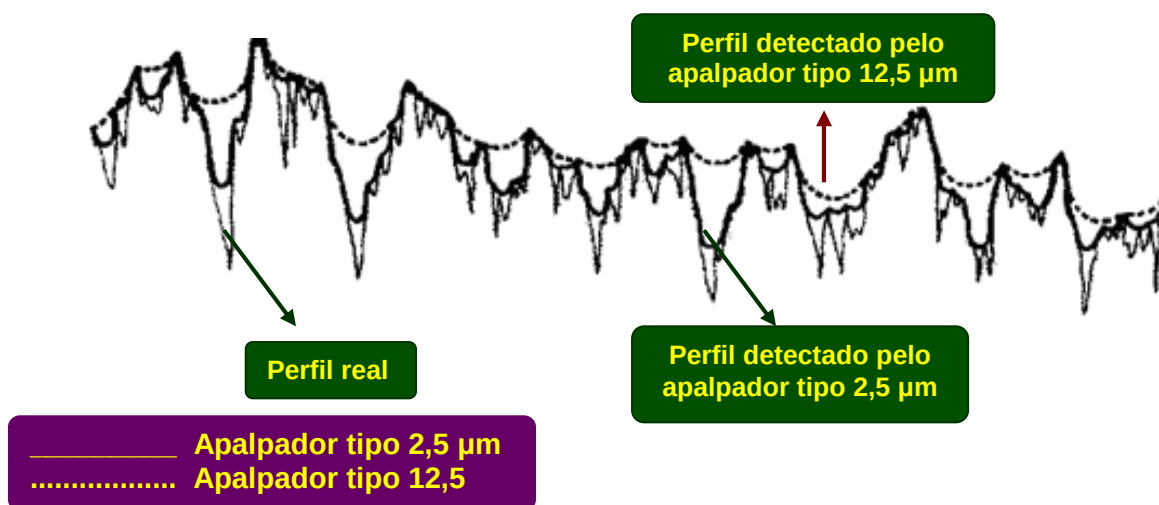


Figura 2.10 – Representação do efeito do raio do apalpador na redução de amplitude das irregularidades de uma determinada superfície (Dagnall, 1986).

Por menor que seja o raio do apalpador, o mesmo não poderá reconhecer as irregularidades da superfície que forem menores do que o seu raio. Sendo assim, sempre haverá uma distorção entre os perfis real e medido. Dependendo do nível de detalhamento exigido em relação à superfície analisada, deve-se optar por apalpadores de dimensões menores. Essa escolha pode ser relacionada com o erro introduzido nesta operação.

Dagnall (1986) apresenta o erro de medição da rugosidade média ( $R_a$ ) em função do raio de ponta do apalpador, Fig. 2.11. No eixo horizontal desta figura é indicado a relação entre o raio do apalpador e o valor da rugosidade  $R_a$  da superfície avaliada. Na ordenada é indicado o erro percentual devido às condições mencionadas no outro eixo.

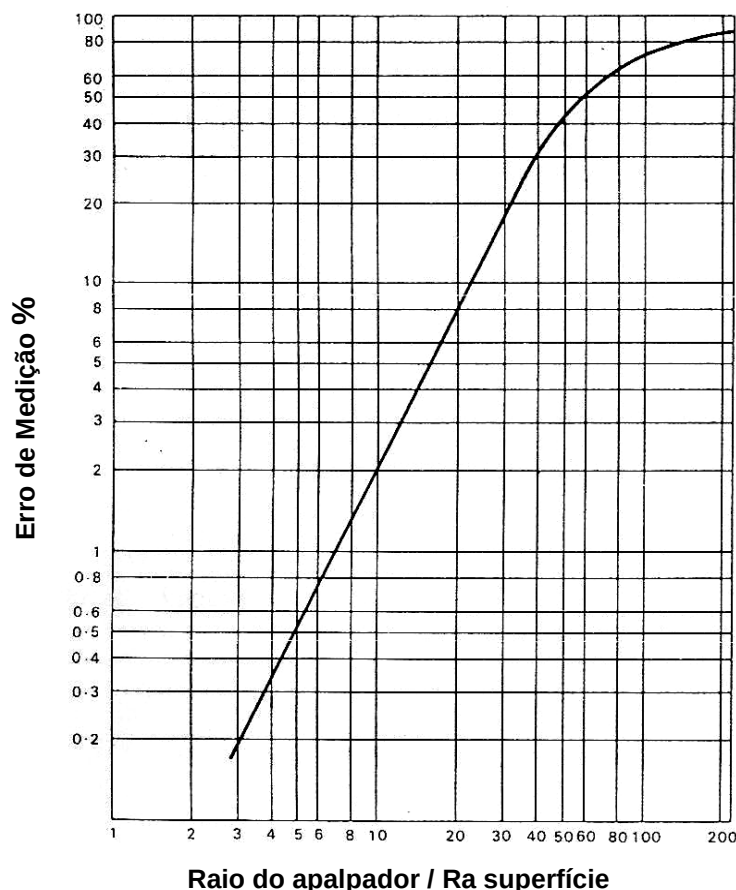


Figura 2.11 – Erro de medição de rugosidade média introduzido pela utilização de diferentes dimensões de apalpadores (Dagnall, 1986).

Conforme a Fig 2.11, percebe-se que quando o raio da ponta do apalpador é 10 vezes maior do que a rugosidade da superfície, o erro de medição será aproximadamente 2%. Para um apalpador com o dobro do raio (10  $\mu\text{m}$ ) esse erro aumentará para 8%. Nestas duas condições de análise, os valores de erros de medição serão significativos somente quando o raio do apalpador for 20 vezes maior que a rugosidade média da superfície.

Com base nestas considerações, a norma ISO indica o apalpador cônico com ponta esférica, com ângulo de  $60^\circ$  e raio de 2 a 10  $\mu\text{m}$  como geometrias ideais, exceto quando forem realizadas outras especificações (ISO 3274:996).

### 2.3.2.4 – Parâmetros de Rugosidade

A rugosidade superficial pode ser expressa pela determinação de parâmetros obtidos a partir do perfil da superfície. Estes parâmetros podem ser classificados em:

- a) Parâmetros de Amplitude: são determinados “apenas” por alturas dos picos, profundidades dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- b) Parâmetros de Espaço: são determinados “apenas” pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- c) Parâmetros Híbridos: são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaço.

Entre os Parâmetros de Amplitude, o mais utilizado é o parâmetro “Ra”. Matematicamente Ra é definido como sendo o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação a linha média, dentro de um comprimento de medição L (ISO 4287/1, DIN 4768). Este valor é obtido a partir da medição dos desvios dos picos e vales em relação a uma linha de centro. Esta linha de centro é tal que o somatório das áreas abaixo é igual ao somatório das áreas acima do traço do perfil Ra. A Fig. 2.12, é representado o parâmetro Ra para um perfil de rugosidade.

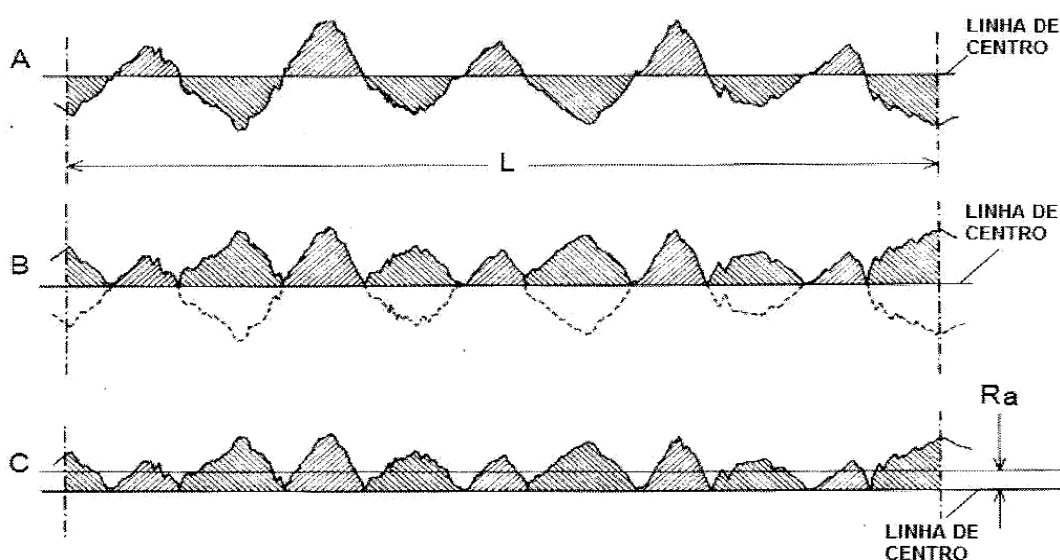


Figura 2.12 – Parâmetro Ra para medir o acabamento superficial. A – perfil com a linha de centro; B – porção inferior do perfil é invertida; C – Ra é altura média do perfil (Dagnall, 1986).

Para medir a rugosidade, é necessário um comprimento de amostragem que corresponde a cada trecho utilizado no cálculo dos parâmetros. Este deve assegurar a significância estatística sem incluir detalhes desnecessários.

Na Fig. 2.13 são mostrados os comprimentos de ajustes ( $l_v$  e  $l_n$ ), de amostragem ( $l_e$ ) e de medição ( $l_m$ ). O somatório desses comprimentos resultará no comprimento total ( $l_t$ ). Os comprimentos  $l_v$  e  $l_n$  são trechos iniciais e finais do perfil que não participam da avaliação propriamente dita, mas que tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas do sistema e a centralização do perfil. Os comprimentos  $l_e$  e  $l_m$  são trechos importantes para a determinação dos parâmetros de textura superficial.

O comprimento  $l_e$  corresponde ao cut-off nominal e, equivale a quinta parte do  $l_m$ .

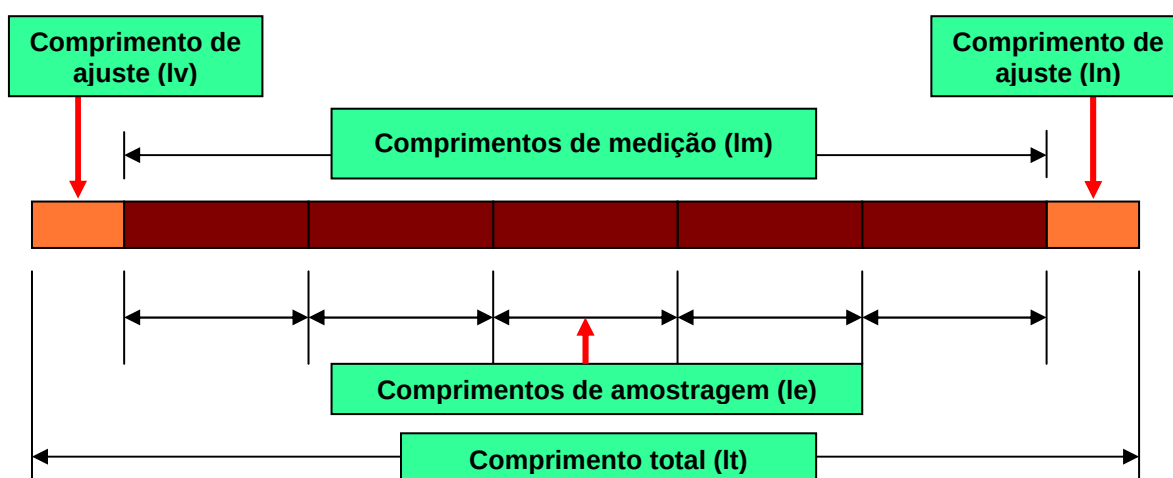


Figura 2.13 – Comprimentos de análise para cálculo da rugosidade (Santos, 2007).

$R_a$  é um parâmetro de controle de processo, se o seu valor alterar isto significa que o processo de fabricação também alterou. É um parâmetro muito utilizado na indústria e está disponível em instrumentos mais simples e mais baratos de todos os fabricantes. Como é um valor médio, ele é um parâmetro estável e não é influenciado por efeitos ocasionais. Assim, o parâmetro  $R_a$  isolado não é suficiente

para identificar algumas características importantes da superfície, pois superfícies geometricamente bastante diferentes podem ter  $R_a$  bem próximos.

A Fig. 2.14 ilustra perfis de superfícies diferentes que poderiam ter o mesmo valor de  $R_a$ .

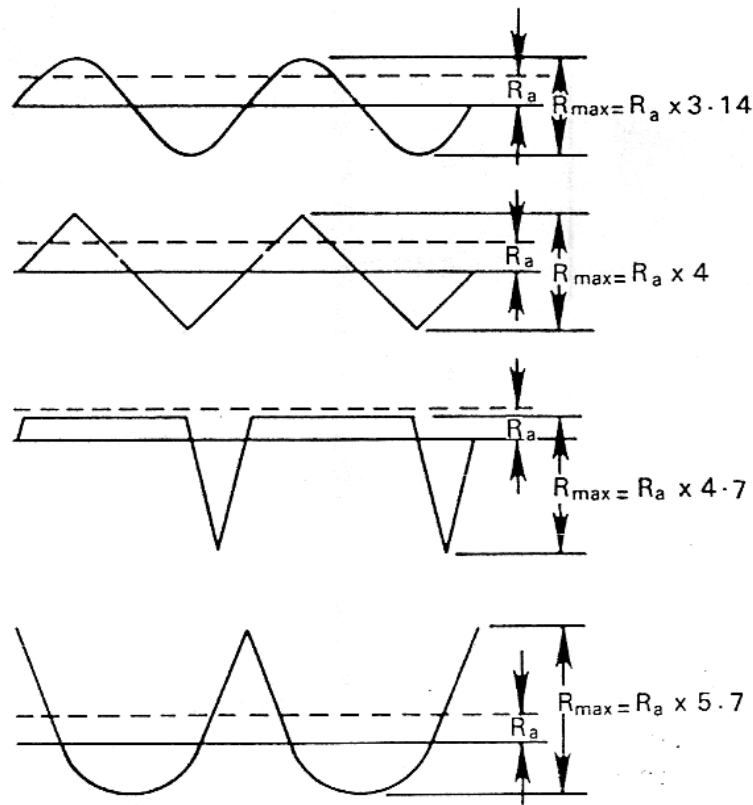


Figura 2.14 – Ilustração esquemática de diferentes superfícies com o mesmo valor de  $R_a$  (Dagnall, 1986).

O parâmetro  $R_y$  é definido como o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ). A Fig.2.15 ilustra um perfil de rugosidade, onde o maior valor parcial é o  $Z_3$ , que está localizado no 3º “cut off”, e que corresponde à rugosidade  $R_y$ .

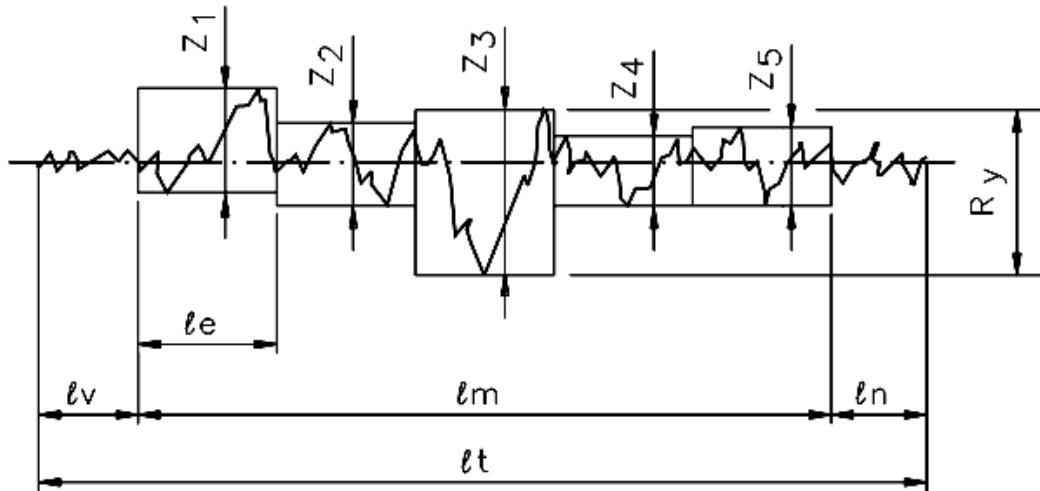


Figura 2.15 – Rugosidade  $R_y$  definida pela rugosidade parcial (neste caso  $Z_3$ ) (Lima e Correa, 2008).

O parâmetro  $R_y$ , individualmente, não apresenta informação suficiente a respeito da superfície, isto é, não informa o formato da superfície. A Fig. 2.16 ilustra esta idéia, onde diversas formas de rugosidade podem ter o mesmo valor para  $R_y$ .



Figura 2.16 – Diversas formas de rugosidade podem ter o mesmo valor para  $R_y$  (Carter, M. 2000)

Outro parâmetro que se baseia na altura dos picos do perfil num determinado comprimento de amostragem é a rugosidade  $R_q$ . É definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das amplitudes do perfil em relação à linha média, oferecendo uma medida do desvio padrão dos dados analisados. Analiticamente, esse parâmetro pode ser descrito como:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} Z^2(x) dx} \quad (1)$$

ou pela Eq.(2):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_j^2} \quad (2)$$

Este parâmetro exerce uma função que oferece peso extra para altos valores de picos e vales que aparecem ao acaso, pois eleva ao quadrado essas irregularidades, caracterizando uma destacada vantagem na sua determinação. Neste caso, pode-se citar uma aplicação na análise da qualidade ótica de superfícies.

Baseado na definição matemática do  $R_q$ , este parâmetro mede a largura da função de distribuição de amplitude (ADF), graficamente representada na Fig 2.17. Pode-se dizer que quanto mais larga for a ADF maiores serão os valores de  $R_q$  e, conseqüentemente, mais rugosa será a superfície em análise.

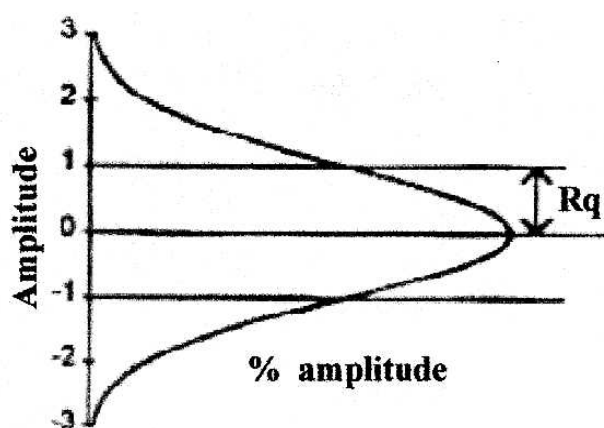


Figura 2.17 – Representação esquemática do  $R_q$  no histograma de amplitude de uma ADF (adaptado de Dagnall, 1986).

Além dos parâmetros definidos nos parágrafos anteriores destacam-se outros parâmetros estatísticos utilizados para avaliar a rugosidade de uma superfície. Pode-se calcular, por exemplo, a Kurtosis ( $R_{ku}$ ) e a Skewness ( $R_{sk}$ ) de um perfil. Se a distribuição da amplitude de um perfil tiver uma forma gaussiana balanceada, o valor de  $R_{ku}$  será próximo de 3. Uma superfície acidentada e áspera terá  $R_{ku}$  menor que 3, enquanto que superfícies com muitos picos o valor será maior que 3. Uma superfície retificada, por exemplo, com um rebolo afiado, teria  $R_{ku}$  igual a 3. A Kurtosis é uma medida da aspereza da superfície. A Skewness por sua vez, mede a simetria do perfil em relação a linha média. Este parâmetro indica se as irregularidades da superfície obtida na fabricação são em maioria picos ou vales, como ilustra a Fig. 2.18.

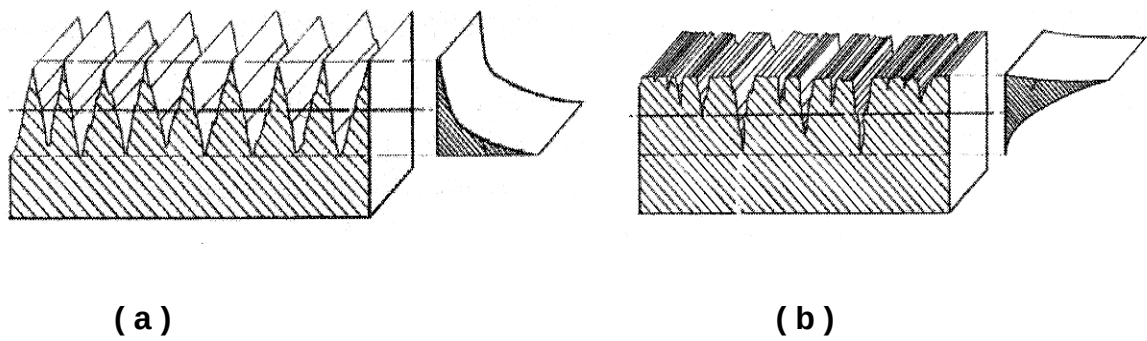


Figura 2.18 – Comparação entre duas superfícies com diferentes valores de Skewness: (a)  $R_{sk}$  positivo, (b)  $R_{sk}$  negativo (Smith, 2002).

Analiticamente, a rugosidade  $R_{sk}$  pode ser expressa como:

$$R_{sk} = \frac{1}{l_m \cdot X_q^3} \sum_0^{l_m} (x)^3 dx \quad (3)$$

ou aproximadamente; pela Eq.(4):

$$R_{sk} = \frac{1}{N X_q^3} \sum_{j=1}^N Z_j^3 \quad (4)$$

Nota-se que o  $R_{sk}$  é um parâmetro adimensional e é diretamente dependente dos valores do desvio médio  $R_q$  e das amplitudes parciais ( $Z_i$ ). Avaliando a resposta das Eq. (3) e (4) em relação a um determinado perfil de medição (Fig. 2.19), podemos dizer que os valores de  $R_{sk}$ , aproximadamente, iguais a zero, indicam uma superfície com picos e vales distribuídos semelhantemente ao longo do comprimento de avaliação, Fig. 2.19(a).

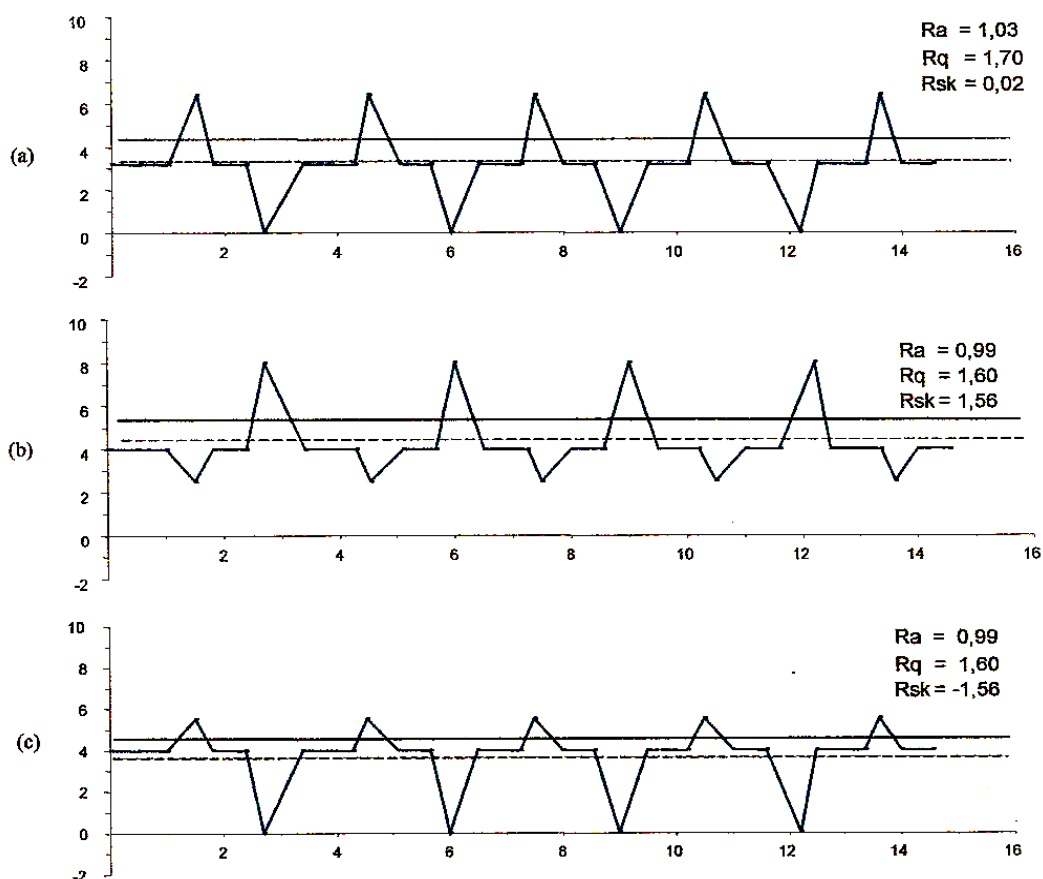


Figura 2.19 – Representação esquemática da assimetria de perfis de rugosidade (adaptado de Dagnall, 1986 ).

Quando o  $R_{sk}$  for positivo indicará que o perfil em análise representa uma superfície com picos altos associados a região de baixos vales ou aplainada, Fig. 2.19 (b). Em termos de amplitudes, isso quer dizer que os valores de amplitude de picos serão muito maiores do que os valores de amplitude de vales. Por outro lado, valores negativos indicam a presença de maiores amplitudes de vales em relação à amplitude de picos, caracterizando uma superfície predominantemente de plateaus, Fig 2.19(c).

Os valores absolutos de  $R_{sk}$  maiores do que 1,5 indicam que a superfície apresenta uma forma complexa e com altos picos ou profundos vales. Com isso, parâmetros de amplitude de picos e vales, tais  $R_a$  e  $R_q$ , não serão adequados para caracterização deste tipo de superfície. Com exemplo, as Fig.(s). 2.19 (b) e (c) apresentam perfis com semelhantes valores de  $R_a$  e  $R_q$ , mas com forma e valores de  $R_{sk}$  diferentes.

Cabe ressaltar que esse tipo de parâmetro é extremamente influenciado por picos ou vales isolados. Esse fato pode ser percebido diretamente nos valores deste parâmetro, ou graficamente.

Apesar da sua característica de parâmetro de forma, o  $R_{sk}$  necessita ser associado a outros parâmetros para uma adequada caracterização do perfil de medição. A Fig. 2.20 mostra exemplos de perfis com características de assimetria semelhantes, mas que terão forte influência no resultado final de aplicação dos respectivos produtos. Neste caso, apesar dos perfis serem graficamente diferentes, os parâmetros médios de amplitude, antecipando o parâmetro  $R_{ku}$ , podem ser considerados semelhantes, cabendo aos parâmetros de amplitude (como  $R_a$  e  $R_q$ ) a diferenciação numérica entre si.

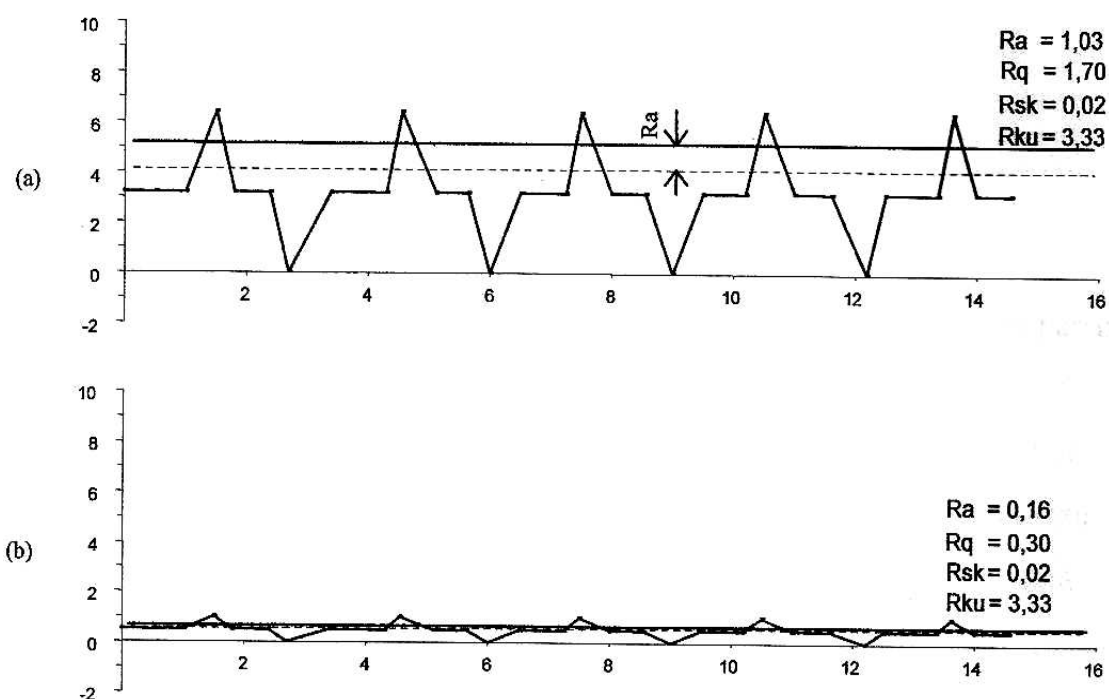


Figura 2.20 – Representação esquemática de perfis com semelhante assimetria e diferentes rugosidade média (adaptado de Dagnall, 1986).

O parâmetro  $R_{ku}$  mede o achatamento ou a convexidade do perfil da superfície em análise. Analiticamente, este parâmetro pode ser expresso da seguinte maneira, pela Eq. (5):

$$R_{ku} = \frac{1}{\text{Im}(Rq)^4} \int_0^{\text{Im}} Z(x)^4 dx \quad (5)$$

ou aproximadamente:

$$R_{ku} = \frac{1}{N.(Rq)^4} \sum_{j=1}^N Z_j^4 \quad (6)$$

Com base nas Eq. (5) e (6), percebe-se a mesma dependência deste parâmetro aos valores de desvio médio  $Rq$  e das amplitudes parciais ( $Z_i$ ), além de semelhante caráter adimensional em relação aos parâmetros skewness. A única diferença entre estes dois tipos de parâmetros de forma, até então, refere-se ao grau de potência dos respectivos constituintes ( $Z_j$  e  $Rq$ ). Segundo as equações (5) e (6), o valor de  $Rku$  necessariamente será positivo e destacará ainda mais a influência da amplitude dos picos e vales, quando comparado ao skewness.

A determinação de parâmetros de amplitude na análise de perfis superficiais, seja por valores de amplitude de picos e vales ou valores médios, apresenta vantagens no que diz respeito ao controle operacional e uma boa caracterização da superfície e forma. No entanto, além de permitirem uma forte influência de valores isolados de amplitude, esses parâmetros não são suficientemente capazes de determinar todas as características de um perfil superficial impossibilitando a interpretação de outros aspectos importantes, tais como o espaçamento e a inclinação dos elementos presentes no perfil.

A utilização desses parâmetros, ainda, deve ser realizada criteriosamente, levando em consideração a sua aplicação. A Tab.2.1 apresenta um resumo dos parâmetros de amplitude de picos e vales, destacando o comprimento de avaliação e a posição dos picos e vales. Percebe-se nesta tabela que a amplitude máxima pode ser determinada através de várias maneiras, de forma que aquela que considera o comprimento de avaliação " $l_m$ " deve apresentar valores maiores do que quando se considera o comprimento de amostragem " $l_e$ ". No que diz respeito à aplicabilidade, os parâmetros que consideram o " $l_m$ " e elementos adjacentes, ainda, devem apresentar maior sensibilidade às variações dos perfis.

Tabela 2.1 – Comprimentos de avaliação e posição dos picos e vales dos parâmetros de amplitude de picos e vales. DIN 4760:1982 (Geus, D. et al., 1999)

| Símbolo                                                                                                | Discriminação                                | Comprimento de avaliação | Posição dos picos e vales      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Rp ou Wp, Rv ou Wv                                                                                     | Amplitude de picos (p) e vales (v)           | Lm                       | -                              |
| Rz ou Wz (ISO 4287:1997)                                                                               | Amplitude máxima                             | Lm                       | Não necessariamente adjacentes |
| Rz ou Wz (DIN, ISO 4287:1984 ou JIS610)                                                                | Amplitude máxima                             | le                       | Não necessariamente adjacentes |
| R3Z                                                                                                    | Amplitude máxima nos terceiros picos e vales | Le                       | Não necessariamente adjacentes |
| Rmax                                                                                                   | Amplitude máxima                             | le                       | Não necessariamente adjacentes |
| Ry (DIN)                                                                                               | Amplitude máxima                             | le                       | Não necessariamente adjacentes |
| Rc ou Wc                                                                                               | Amplitude média                              | lm                       | adjacentes                     |
| Rt ou Wt                                                                                               | Amplitude total                              | lm                       | Não necessariamente adjacentes |
| le – comprimento de amostragem (cut – off)<br>Lm – comprimento de medição (equivalente a 5 cut – off). |                                              |                          |                                |

### 2.3.2.5 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE

A rugosidade superficial sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo a geometria da ferramenta de corte, a geometria da peça, a rigidez da máquina – ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta (Machado, et. al.,2009).

Segundo Shaw (1986), O acabamento de peças torneadas depende muito da relação entre o avanço e o raio de ponta. Este par  $(f - r_\epsilon)$  têm uma contribuição geométrica à rugosidade superficial dada pela equação:

$$R_{th} = \frac{f^2}{8.r_\epsilon} \quad (7)$$

O valor de rugosidade máxima dada pela equação (7) é chamado teórico, porque leva em conta apenas o avanço e o raio de ponta da ferramenta.

A rugosidade real obtida após uma operação de corte é bem maior do que a obtida pela equação (7). Vários fatores contribuem para esse resultado como: vibração, deformação do cavaco, fluxo lateral do cavaco e erros de fixação da peça e da ferramenta.

As condições de corte exercem grande influência sobre a rugosidade, sendo que o avanço o que produz maior efeito devido a uma maior contribuição geométrica. A alturas dos picos e profundidade de vales, tendem a aumentar em proporção quadrática com o avanço.

Segundo Bonifácio (1983), raio de ponta maior gera um acabamento pior. Isso acontece por causa da maior área de contato peça-ferramenta ( maior atrito e maior vibração ), exceto para valores pequenos de avanço.

Sob baixas velocidades de corte pode ocorrer a formação da APC e o resultado é um acabamento inferior. Um aumento no avanço sob baixas velocidades de corte resulta em uma superfície bem pior. Isso é atribuído a um aumento da APC. Portanto, o aumento da velocidade de corte melhora o acabamento porque não há formação de APC. Além disso, o aumento de temperatura provoca uma redução da resistência ao cisalhamento do material da peça, provocando uma redução das forças de usinagem e, conseqüentemente uma melhora no acabamento. Porém o aumento da velocidade pode gerar vibrações prejudicando o acabamento (Machado, et al., 2009).

Bonifácio (1983) afirma que não existe uma influência marcante da profundidade de corte na rugosidade, pelo menos para  $a_p$  menor do que 1 mm. A partir desse valor houve um pequeno decréscimo de rugosidade em seus testes. Uma possível explicação é que a profundidade de usinagem passou a ser menor do que o raio de ponta da ferramenta, que no caso era 0,8 mm. Assim parte do contato peça-ferramenta passou a ser feito na porção reta da aresta de corte, o que proporcionalmente diminui a força de profundidade e facilitou a formação de um bom acabamento superficial.

Segundo Shaw (1986), velocidades de corte baixas, a rugosidade de peças de material dúctil tende a ser alta devido à formação da aresta postiça de corte. Em valores de velocidade de corte acima daqueles onde se forma o APC, a rugosidade oscila entre valores altos e baixos, à medida que a velocidade de corte cresce. Este fenômeno é explicado pela vibração do sistema máquina – ferramenta - dispositivo de fixação – peça que, dependendo da velocidade de corte, pode ser mais forte ou mais fraca, de acordo com a rigidez do sistema.

O fluido de corte diminui o desgaste da ferramenta e o atrito entre a ferramenta e a peça ou cavaco. Tudo isto, melhora o acabamento superficial. O fluido atuando como refrigerante, entretanto, pode aumentar a força de usinagem e aumentar a rugosidade da peça. Um revestimento aplicado sobre uma ferramenta para atuar como um lubrificante, ou diminuir a afinidade química entre o material da peça e ferramenta pode também contribuir para melhorar o acabamento superficial (Machado e Silva, 1999).

# CAPÍTULO 3

## ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a realização de experimentos significativos e confiáveis deve-se usar o método científico de planejamento. Da mesma forma para o tratamento de dados experimentais e análise de resultados é imprescindível o uso de métodos estatísticos. A seguir será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre alguns conceitos estatísticos que serão utilizados neste trabalho.

### 3.1 Comparação de K tratamentos – Análise de Variância

Os modelos de análise de variância constitui um conjunto de técnicas estatísticas que permitem um estudo da relação existente entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes (fatores) (Montgomery, 2000). Esses modelos de análise de variância podem ser tanto empregados para analisar dados experimentais quanto dados observados. Para a realização da análise de variância em um experimento, deve-se considerar algumas hipóteses necessárias para validar o modelo.

Um modelo matemático de análise de variância pode ser descrito da seguinte forma: (Banzatto e Kronka, 1989).

$$Y_{ij} = \mu + \mu_j + \xi_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Onde:

$Y_{ij}$ : corresponde à resposta de interesse (variável dependente) do j-ésimo tratamento no i-ésimo indivíduo;

$\mu$ : corresponde a media geral de todos os indivíduos;

$\mu_j$ : corresponde ao efeito do j-ésimo tratamento;

$\xi_{ij}$ : corresponde ao efeito dos fatores não controláveis no experimento e é denominado também de erro residual;

As hipóteses básicas que devemos admitir para a validade da análise de variância são as seguintes: (Box et al, 1978).

- Aditividade: os efeitos dos fatores que ocorrem no modelo matemático devem ser aditivos.
- Independência: os erros  $\xi_i$  devidos aos efeitos dos fatores não controlados, devem ser independentes. Isto implica que os efeitos dos tratamentos sejam independentes ou seja não haja correlação entre eles.
- Homocedasticidade ou homogenidade de variância: os erros  $\xi_{ij}$ , devido as efeitos dos fatores não controlados, deveram possuir uma variância em comum  $\sigma^2$ . Isto significa que a variabilidade das repetições de um tratamento deve ser semelhante a dos outros tratamentos. Uma maneira de checar a veracidade dessa suposição é através de um gráfico de resíduos versus valores ajustados (preditos). Quando a variância do erro é constante, esse gráfico deve apresentar uma nuvem de pontos dispostos aleatoriamente sobre o eixo dos resíduos.
- Normalidade: Os erros  $\xi_{ij}$ , devido ao efeito dos fatores não controlados, devem possuir uma distribuição de probabilidade normal. A normalidade dos resíduos pode ser avaliada no gráfico de probabilidade normal dos erros. Esse recurso compara as frequências observadas e esperadas dos resíduos sob a hipótese de que esses são provenientes de uma distribuição normal. Então, quanto mais próximos da reta estiverem os pontos, maior a garantia se tem com relação à normalidade dos resíduos.

Admitido o modelo e satisfeitas às hipóteses necessárias, pode-se passar a obtenção da análise de variância do experimento. Considerando-se um experimento com I tratamentos e J repetições. De acordo como modelo matemático, o valor observado na parcela que recebeu o tratamento i na repetição j, referente à característica em estudo, é denotado por  $y_{ij}$ , de forma que se pode organizar os valores observados no experimento, de acordo com o quadro (Banzatto e Kronka, 1989) mostrados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Quadro dos valores observados nos experimentos.

| Tratamentos | Repetições      |                 |     |                 |     |                 | Totais                                 |
|-------------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|----------------------------------------|
|             | 1               | 2               | ... | j               | ... | J               |                                        |
| 1           | y <sub>11</sub> | y <sub>12</sub> | ... | y <sub>1j</sub> | ... | y <sub>1J</sub> | $\sum_{j=1}^J y_{1j} = T_1$            |
| 2           | y <sub>21</sub> | y <sub>22</sub> | ... | y <sub>2j</sub> | ... | y <sub>2J</sub> | $\sum_{j=1}^J y_{2j} = T_2$            |
| .           | .               | .               |     | .               |     | .               |                                        |
| .           | .               | .               |     | .               |     | .               |                                        |
| .           | .               | .               |     | .               |     | .               |                                        |
| i           | y <sub>i1</sub> | y <sub>i2</sub> | ... | y <sub>ij</sub> | ... | y <sub>iJ</sub> | $\sum_{j=1}^J y_{ij} = T_i$            |
| .           | .               | .               |     | .               |     | .               |                                        |
| .           | .               | .               |     | .               |     | .               |                                        |
| .           | .               | .               |     | .               |     | .               |                                        |
| I           | y <sub>I1</sub> | y <sub>I2</sub> |     | y <sub>Ij</sub> |     | y <sub>IJ</sub> | $\sum_{j=1}^J y_{Ij} = T_I$            |
|             |                 |                 |     |                 |     |                 | $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij} = G$ |

A construção do quadro de análise de variância inicia-se com a soma de quadrados que são:

a) Soma de quadrados total, que corresponde à soma dos quadrados dos desvios de todos os dados em relação a média, e possui  $I \cdot J - 1$  grau de liberdade, sendo representada pela equação:

$$SQTO = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y_{ij}^2 - C \quad \text{onde} \quad C = \frac{G^2}{IJ} \quad (4.1)$$

b) Soma de quadrados de tratamentos, que corresponde à soma dos quadrados de todos dos efeitos de todos os tratamentos, e possui  $I - 1$  grau de liberdade, sendo representado pela equação:

$$SQT = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^I T_i^2 - C \quad (4.2)$$

c) Soma de quadrados de resíduos, que corresponde à diferença entre a soma de quadrados total e de tratamento, e possui  $I(J - 1)$  grau de liberdade, sendo representado pela equação:

$$SOTR = SQTO - SQT \quad (4.3)$$

Para construção do quadro de análise de variância calcula-se o que é chamado de quadrado médio, que usualmente são obtidos dividindo cada soma de quadrados por seus respectivos graus de liberdade, da seguinte forma:

$$QMR = \frac{SQR}{I(J - 1)} \quad (4.4)$$

$$QMT = \frac{SQT}{I - 1} \quad (4.5)$$

### 3.1.1 A distribuição F

Enquanto outros testes de médias se baseiam na diferença entre dois valores, análise de variância utiliza a razão das duas estimativas, ou seja, os quadrados médios, através da estatística F.

$$F_{cal} = \frac{QMT}{QMR} \quad (4.6)$$

Esta razão entre as estimativas é usada para testar as seguintes hipóteses:

$H_0$ : A hipótese nula propõe, que qualquer diferença observada entre as amostras é considerada como uma ocorrência casual, mero resultado do erro amostral.

Portanto, uma diferença, entre duas ou mais medias não representam, à luz da hipótese nula, uma verdadeira diferença entre as medias amostrais.

$H_1$ : A hipótese alternativa que afirma existir uma verdadeira diferença populacional.

Os processos que nos permitem aceitar ou rejeitar uma determinada hipótese, são denominados teste de hipótese ou teste de significância e tem-se que grandes valores de  $F_{cal}$  favorecem  $H_1$ , pois QMT excederá QMR quando  $H_1$  é verdadeira e por outro lado, valores de  $H_1$  próximo de 1 beneficiam  $H_0$ , tendo dessa forma QMT e QMR aproximadamente o mesmo valor esperado quando  $H_0$  é verdadeira. Porém ao tomar a decisão de rejeitar ou aceitar uma hipótese, se sujeita a incorrer em um dos seguintes erros: erro tipo 1 que se comete ao rejeitar uma hipótese  $H_0$  verdadeira, que deveria ser aceita, e erro tipo 2 que é cometido ao aceitar uma hipótese  $H_0$  falsa, que deveria ser rejeitada. O erro tipo 1 é sempre o erro considerado como sendo o mais grave ou o menos desejado.

De um modo geral, controla-se apenas o erro tipo 1, através do nível de significância do teste, representado por  $\alpha$ , e que consiste na probabilidade máxima com que sujeita-se a ocorrer o risco de cometer um erro tipo 1 ao se testar uma dada hipótese.

Na pratica, é comum (embora não seja obrigatório) fixar o nível de significância em 5% e 1%, isto é,  $\alpha = 0.01$  ou  $\alpha = 0.05$ . Se, por exemplo, for escolhido o nível de 5% ( $\alpha = 0.05$ ), isto indica que haverá 5 possibilidades em 100 de rejeitar a hipótese quando ela deveria ser aceita, ou seja, existe uma confiança de 95% de que tenhamos tomado uma decisão correta.

Utiliza-se a seguinte regra para controlar o nível de significância  $\alpha$  do teste:

Se  $F_{cal} \leq F_{(1-\alpha; i-1, l(J-1))}$ , então não rejeita-se  $H_0$ .

Se  $F_{cal} \geq F_{(1-\alpha; i-1, l(J-1))}$ , então rejeita-se  $H_0$ , e aceita-se  $H_1$ .

Onde  $F_{(1-\alpha; i-1, l(j-1))}$  é o  $(1-\alpha)100\%$  percentil de uma distribuição F com  $(l-1)$  e  $l(J-1)$  grau de liberdade.

A Fig.3.1 apresenta a região de aceitação de  $H_0$ , RA e a, região critica de rejeição de  $H_0$ , Rc.

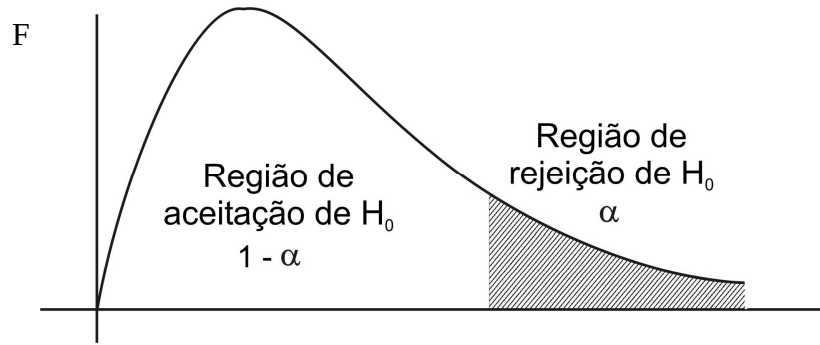


Figura 3.1 - Região de aceitação de H<sub>0</sub>, RA e região crítica de rejeição Rc de H<sub>0</sub>.

Com base em todas as informações discutidas, consegue-se construir uma tabela de análise de variância, como mostra a Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Quadro de análise de variância

| Causa da variação | gl     | soma de quadrados                               | quadrado médios            | F                       |
|-------------------|--------|-------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Tratamentos       | I-1    | $SQT = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^I T^2_i - C$      | $QMT = \frac{SQT}{I-1}$    | $F_n = \frac{QMT}{QMR}$ |
| Resíduos          | I(J-1) | $SOTR = SQTO - SQT$                             | $QMR = \frac{SQR}{I(J-1)}$ |                         |
| Total             | IJ-1   | $SQTO = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J y^2_{ij} - C$ |                            |                         |

Após a verificação de que realmente existe diferença entre os tratamentos através da análise de variância faz-se a comparação de 2 tratamentos.

### 3.1.2 Comparação de 2 tratamentos

Na comparação de dois tratamentos tem-se a comparação com amostras grandes e comparação com amostras pequenas.

Para comparar dois tratamentos com amostra grandes deve-se se ter as seguintes suposições (Barroso, 2003):

- i) Seja  $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$  uma a.a. de tamanho  $n_1$  da população 1 com média populacional  $\eta_1$  e desvio-padrão populacional  $\sigma_1$
- ii) Seja  $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$  uma a.a. de tamanho  $n_2$  da população 2 com média populacional  $\eta_2$  e desvio-padrão populacional  $\sigma_2$
- iii) As amostras são independentes. Em outras palavras, as medidas dos dois tratamentos, não são relacionados entre si.

Na comparação de dois tratamentos utiliza-se o teste de hipótese explicado anteriormente, que é seguindo as seguintes observações:

- (i) Identificar a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) em termos de parâmetros populacionais.
- (ii) Escolher o teste estatístico
- (iii) Estabelecendo um nível de significância  $\alpha$ , determinar a região de rejeição
- (iv) Calcular o valor observado do teste estatístico a partir dos dados da amostra selecionada. Verificar se este valor observado está incluído na região de rejeição ou não.

O teste estatístico utilizado para determinar a diferença entre dois tratamentos, deve seguir uma distribuição aproximadamente normal, Z, para amostras grandes, com média  $E(\bar{x} - \bar{y}) = \eta_1 - \eta_2$  e variância  $\text{var}(\bar{x} - \bar{y}) = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$ .

Para a comparação de dois tratamentos com amostras pequenas  $n_1$  e  $n_2$ , além de considerar as suposições anteriores, deve-se também supor as seguintes suposições adicionais:

- (i) ambas populações são normais
- (ii) os desvios padrões das populações 1 e 2 são iguais, isto é,  $\sigma_1 = \sigma_2$
- (iii)  $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$  é uma a.a. de distribuição  $N(\eta_1, \sigma^2)$
- (iv)  $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$  é uma a.a. de distribuição  $N(\eta_2, \sigma^2)$
- (v)  $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$  e  $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$  são duas amostras independentes.

Depois de confirmado as suposições mencionadas anteriormente, utiliza-se o teste estatístico t e Student para amostras pequenas  $n_1 + n_2 - 2$  graus de liberdade dado pela equação:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\eta_1 - \eta_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t_{n_1 + n_2 - 2} \quad (4.7)$$

Onde  $s_p$  é um estimador comum para as variâncias dos dois tratamentos e é dado pela equação:

$$s_p = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (4.8)$$

Depois de calcular o valor de  $t$  estipula-se um nível  $\alpha$  de significância para verificar se rejeita ou não a hipótese nula, através de teste bilateral ou unilaterais apresentados a seguir.

**Teste Bilateral:** Apresenta duas regiões de rejeição da hipótese nula  $H_0$ , situadas nos extremos da distribuição amostral, é utilizado para testar hipótese do tipo.

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B \neq 0$$

A Fig. 3.2 mostra as regiões de aceitação e rejeição de  $H_0$  a um nível de significância  $\alpha$  em um teste bilateral.

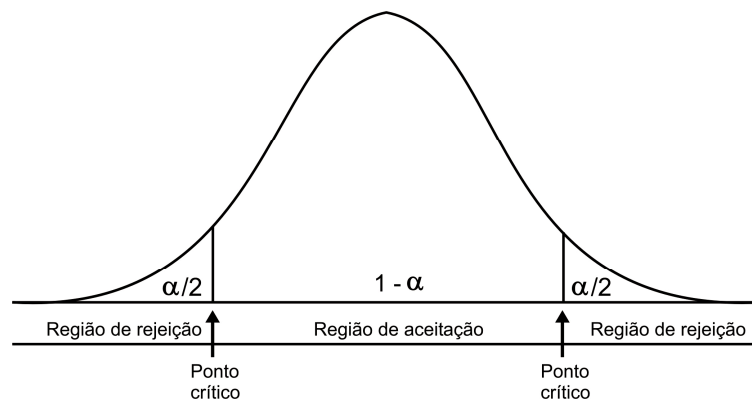


Figura 3.2 - Regiões de aceitação e rejeição de  $H_0$  a um nível de significância  $\alpha$  em um teste bilateral.

**Teste Unilateral a Direita:** Apresenta uma única região de rejeição da hipótese nula  $H_0$ , sendo utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B > 0$$

A Fig. 3.3 mostra as regiões de aceitação e rejeição de  $H_0$  a um nível de significância  $\alpha$  em um teste unilateral a direita.

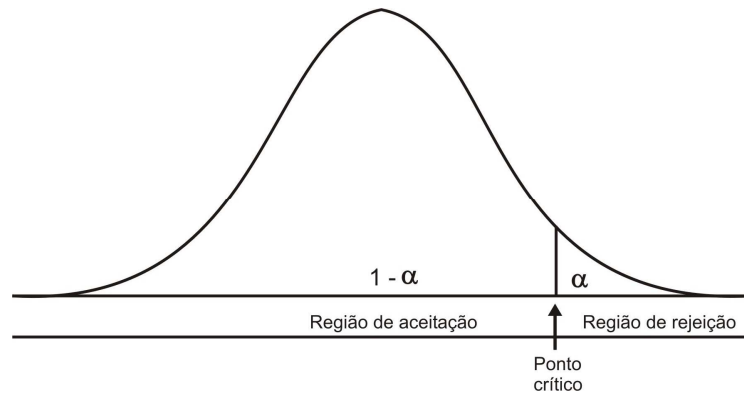


Figura 3.3 - Regiões de aceitação e rejeição de  $H_0$  a um nível de significância  $\alpha$  em um teste unilateral à direita.

Teste Unilateral a Esquerda: Apresenta uma região de rejeição da hipótese nula  $H_0$ , situada no extremo inferior da distribuição amostral, é utilizado para testar as hipóteses do tipo:

$$H_0 : \eta_A - \eta_B = 0$$

$$H_1 : \eta_A - \eta_B < 0$$

A Fig. 3.4 mostra as regiões de aceitação e rejeição de  $H_0$  a um nível de significância  $\alpha$  em um teste unilateral a esquerda.

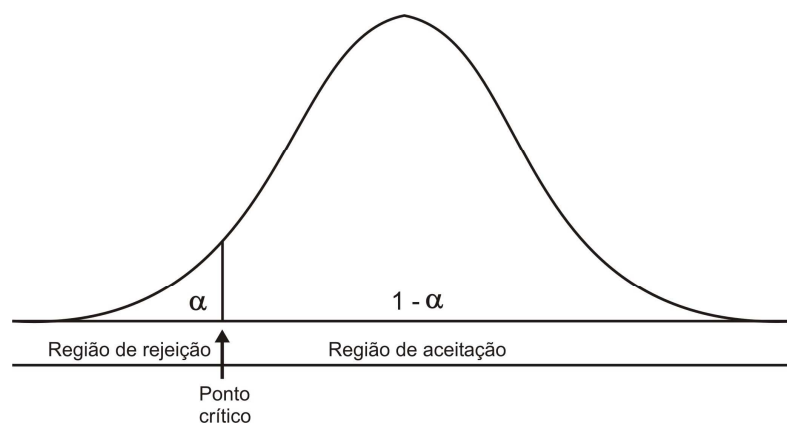


Figura 3.4 - Regiões de aceitação e rejeição de  $H_0$  a um nível de significância  $\alpha$  em um teste unilateral a esquerda.

Nesta pesquisa trabalhou-se com amostras pequenas então será utilizado o teste t de Student bilateral como mostrado anteriormente.

## CAPÍTULO 4

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

São abordados neste capítulo os procedimentos experimentais utilizados no trabalho. Foram analisadas a influência dos parâmetros de corte velocidade de corte, avanço, raio de ponta da ferramenta e forma de aplicação do fluido na rugosidade superficial e vibração na operação de torneamento cilíndrico externo do aço microligado DIN 38MnSiVS5.

A seguir são apresentados detalhes dos materiais, equipamentos e metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

#### 4.1 – Material do Corpo de Prova

Para o torneamento cilíndrico foi utilizado uma barra de seção circular de diâmetro inicial 104 mm e comprimento 500 mm de aço microligado DIN 38MnSiVS5. Este material foi fornecido pela aços Villares S.A., com dureza média de 255 HV e composição química, de acordo com o fabricante, mostrada na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Composição química (% em massa) do material utilizado.

| C    | Si   | Mn   | S     | Al    | V    | N      |
|------|------|------|-------|-------|------|--------|
| 0,38 | 0,60 | 1,30 | 0,050 | 0,020 | 0,11 | 0,0160 |

A figura 4.1 mostra a microestrutura obtida de uma região central da barra do corpo de prova.

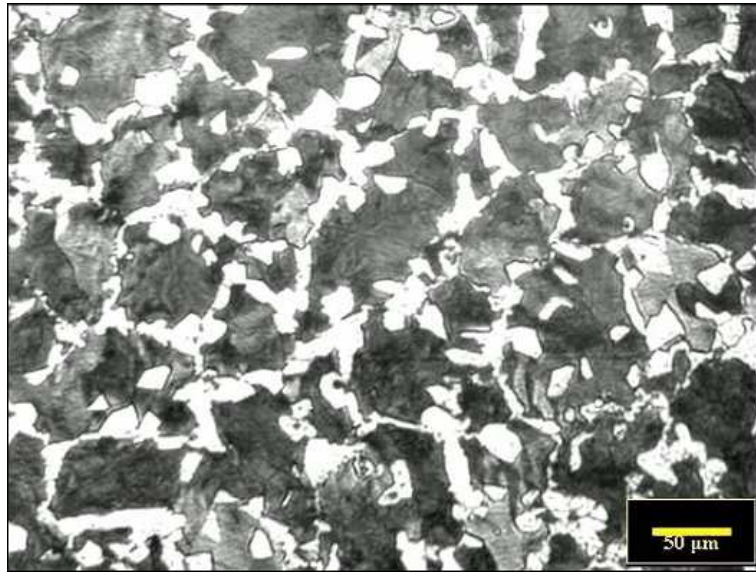


Figura 4.1 – Microestrutura da região central da amostra de aço microligado DIN 38MnSiVS5 – ataque Nital 2%.

#### 4.2 – Máquina Ferramenta Utilizada

A máquina ferramenta utilizada foi um torno CNC ROMI modelo MULTIPLIC 35D, Fig. 4.2, cujas principais características estão mostradas na Tab. 4.2



Figura 4.2 – Torno CNC MULTIPLIC 35 D.

Tabela 4.2 – Características técnicas do Torno (Linha Multiplic 35D – ROMI).

| TORNO MULTIPLIC 35D                           |                    |         |
|-----------------------------------------------|--------------------|---------|
| Altura de pontas                              | 255                | mm      |
| Distância entre pontas                        | 1,0 / 1,5 / 2,0    | m       |
| Diâmetro admissível sobre o barramento        | 520                | mm      |
| Diâmetro admissível sobre o carro transversal | 260                | mm      |
| Diâmetro admissível sobre as asas da mesa     | 450                | mm      |
| Curso transversal do carro (eixo X)           | 280                | mm      |
| Curso longitudinal do carro (eixo Z)          | 1000 / 1500 / 2000 | mm      |
| Nariz do eixo-árvore                          | A2-8               | ASA     |
| Diâmetro do furo do eixo-árvore               | 80                 | mm      |
| Faixa de velocidades                          | 2 a 2.200          | rpm     |
| Motor principal CA                            | 15 / 11            | cv / kW |
| Avanço rápido longitudinal (eixo Z)           | 10                 | m/min   |
| Avanço rápido longitudinal (eixo x)           | 7,5                | m/min   |
| Potência total instalada                      | 20                 | kVA     |

### 4.3 – Ferramentas Utilizadas

Foram utilizados insertos de metal duro revestidos com TiN de especificação ISO SNMG 120404 - PM e SNMG 120408 - PM; montados em um suporte DSBNR 2020 K12, resultando nos seguintes ângulos principais:

- Ângulo de posição ( $\chi_r$ ) 75°.
- Ângulo de saída ( $\gamma_0$ ) 6°.
- Ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) 0°.

Assim, com relação à ferramenta de corte, foram utilizados raios de ponta de 0,4 e 0,8 mm. Em todos os testes foram utilizadas ferramentas novas, minimizando, portanto, influência do desgaste.

#### 4.4 – Aplicação de Fluido de Corte

Foram realizados testes a seco e com aplicação de fluido de corte pelo método de mínima quantidade de fluido – MQF. Foi utilizado o fluido de corte vegetal, Accu - Lube®/LB-2000, na vazão de 40 ml/h. Este fluido é biodegradável, atóxico e insolúvel em água; é uma composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos. A Tab. 4.3 mostra algumas das características típicas deste óleo, segundo o fabricante.

Tabela 4.3 – Características típicas do óleo vegetal Accu-Lube®/LB-2000.

| Propriedade                | Valor         |
|----------------------------|---------------|
| Densidade, g/ml (20/-3 °C) | 0,900 – 0,940 |
| Ponto de Ebulição (°C)     | >100          |
| Ponto de Fulgor (°C)       | >300          |

O aparelho pulverizador de fluido, modelo O2AO-STD fabricado pela ITW Fluid Products Group, trabalha com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de 0,43 Mpa, e “spray” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo. Este sistema consiste de um reservatório para o fluido de corte com alimentação manual, válvulas para regulação do fluxo de ar comprimido e óleo, manômetro, mangueiras condutoras (ar comprimido e fluido) e 2 bicos com base de fixação magnética, para aplicação externa da mistura ar comprimido-fluido sobre a ferramenta-peça. O fluido de corte é conduzido através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de uma outra maior que conduz o ar comprimido. A figura 4.3 mostra o aparelho pulverizador de fluido de corte e a figura 3.4 os bicos aplicadores de MQF.

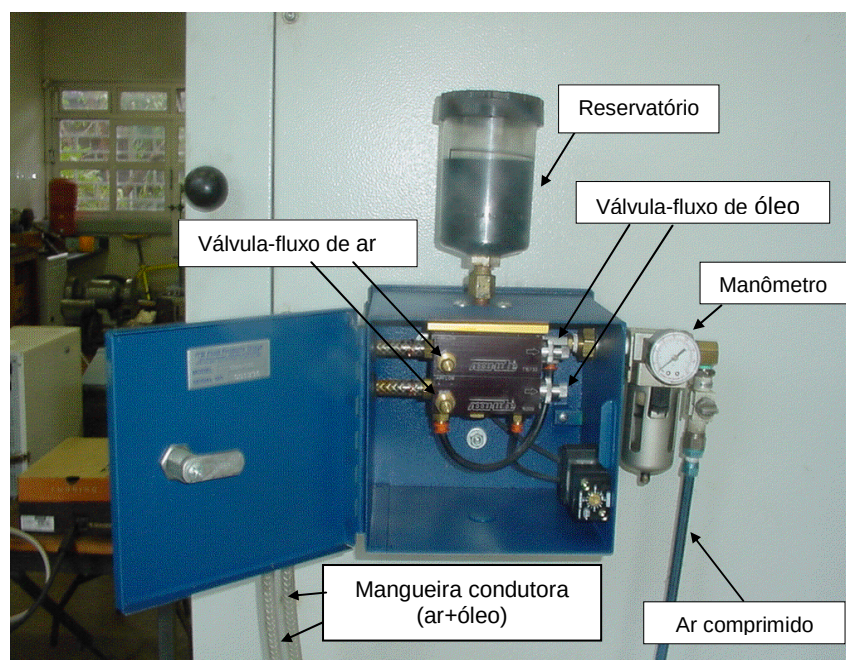


Figura 4.3 – Aparelho pulverizador para aplicação de mínima quantidade de fluido de corte.

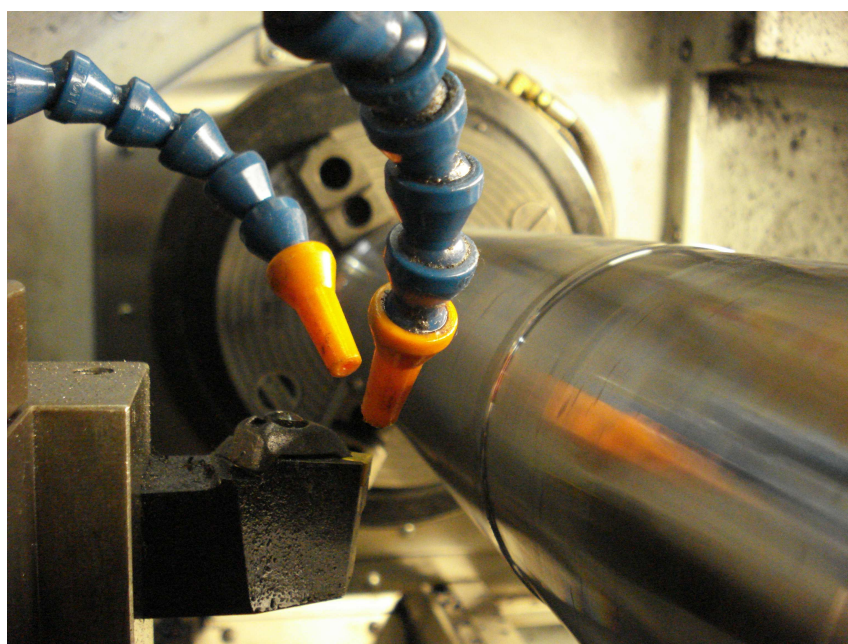


Figura 4.4 – Posicionamento dos bicos para a aplicação externa de MQF.

#### 4.5 – Condições de Corte Utilizadas

Para os ensaios foram definidas como variáveis: o raio de ponta da ferramenta, a velocidade de corte, o avanço e a aplicação de fluido. Estas variáveis foram utilizadas em dois níveis, conforme mostra a Tab. 3.4.

Tabela 4.4 – Condições de corte utilizadas.

| Condição | Raio de ponta<br>$r_x$ ( mm ) | Vc<br>( m/min ) | f<br>( mm/volta ) | Sistema de<br>Lubrificrefrigeração |
|----------|-------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|
| 1        | 0,4                           | 220             | 0,05              | Seco                               |
| 2        | 0,4                           | 220             | 0,05              | MQF                                |
| 3        | 0,4                           | 220             | 0,10              | Seco                               |
| 4        | 0,4                           | 220             | 0,10              | MQF                                |
| 5        | 0,4                           | 280             | 0,05              | Seco                               |
| 6        | 0,4                           | 280             | 0,05              | MQF                                |
| 7        | 0,4                           | 280             | 0,10              | Seco                               |
| 8        | 0,4                           | 280             | 0,10              | MQF                                |
| 9        | 0,8                           | 220             | 0,05              | Seco                               |
| 10       | 0,8                           | 220             | 0,05              | MQF                                |
| 11       | 0,8                           | 220             | 0,10              | Seco                               |
| 12       | 0,8                           | 220             | 0,10              | MQF                                |
| 13       | 0,8                           | 280             | 0,05              | Seco                               |
| 14       | 0,8                           | 280             | 0,05              | MQF                                |
| 15       | 0,8                           | 280             | 0,10              | Seco                               |
| 16       | 0,8                           | 280             | 0,10              | MQF                                |

Desta forma, foram definidas 16 condições de corte. Para cada condição, foram realizadas duas repetições, assim, no total foram realizados 48 testes. Para todos os ensaios, a profundidade de corte foi mantido constante em 1,0 mm. Os ensaios seguiram um planejamento fatorial  $2^K$ .

#### 4.6 – Medição de Rugosidade

Para cada condição de corte foi obtido o perfil de rugosidade da superfície usinada utilizando um rugosímetro Taylor Hobson 3<sup>+</sup>, Fig. 4.5, com programa Gold Profile que possibilita a obtenção de vários parâmetros de rugosidade dos quais foram analisados: Ra, Ry, Rsk, Rku e Rms ou Rq e também permite obter o perfil de rugosidade da superfície.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Vista frontal (a) e de topo (b) do Rugosímetro Taylor Hobson 3<sup>+</sup> em posição de medição dos parâmetros na peça paralelo à direção de avanço.

A rugosidade foi medida em duas posições: radial (direção paralela à direção de corte) e transversal (paralela à direção de avanço) para um comprimento de amostragem (cut – off) de 0,8 mm na direção transversal e 0,4 mm para direção radial.

Os 48 testes foram divididos em intervalos de 10 mm conforme a Fig. 4.6 e realizados em um único passe. Sendo assim, o diâmetro da peça é constante para todos os testes.

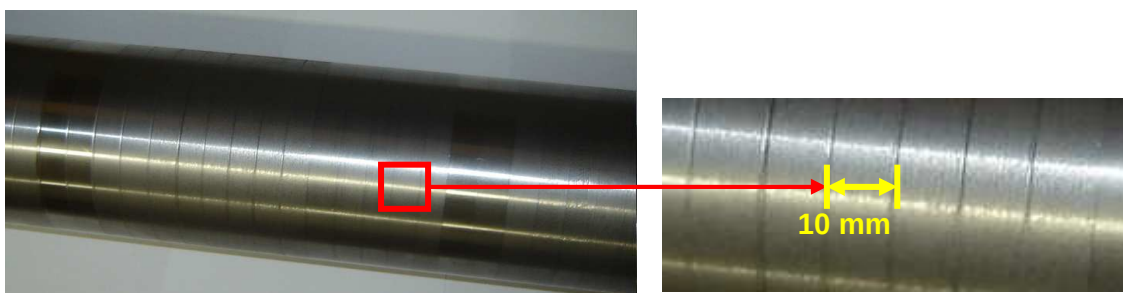


Figura 4.6 – Intervalos de corte na barra de aço microligado DIN 38MnSiVS5.

#### 4.7 – Medição do Sinal de Vibração

O sinal de vibração do suporte da ferramenta também foi medido com o objetivo de avaliar a relação entre o sinal de vibração e a rugosidade superficial. Para isto foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico do tipo 4367 Bruel & Kjaer fixado no suporte da ferramenta para a medição do sinal de vibração perpendicular ao plano de trabalho, conforme pode ser vista na Fig. 4.7.

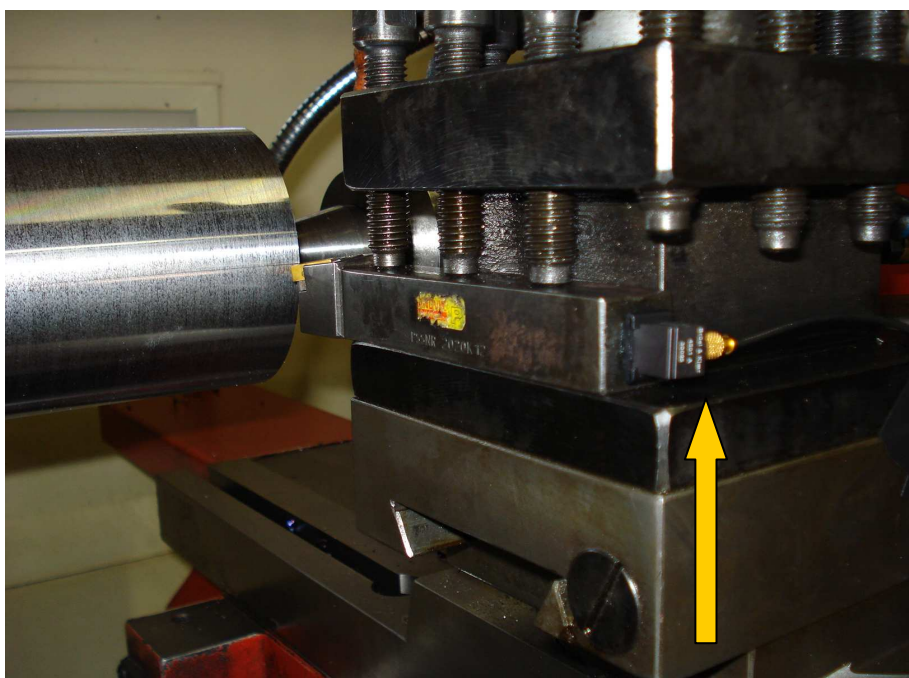


Figura 4.7 – Acelerômetro piezoelétrico fixado no porta-ferramentas.

As medições dos sinais de vibração foram realizadas com os seguintes parâmetros:

- Taxa de amostragem: 20000 Hz;
- Medida: aceleração;
- Tempo de aquisição: 10 segundos;
- Ganho:  $1,0 \text{ mV/m.s}^{-2}$ ;
- Filtros: inferior (0,1 Hz); superior (3 KHz).

O sensor foi conectado a um condicionador de sinais e este à uma placa analógico/digital de 12 bits da National Instruments, cuja especificação é PCI-6111E com frequência máxima de amostragem de 5 milhões de amostras por segundo. Foi utilizado um microcomputador do tipo PC Pentium III, 700 MHz, HD SCSI de 20 GB.

A Fig. 4.8 apresenta o esquema montado para aquisição de sinais de vibração.

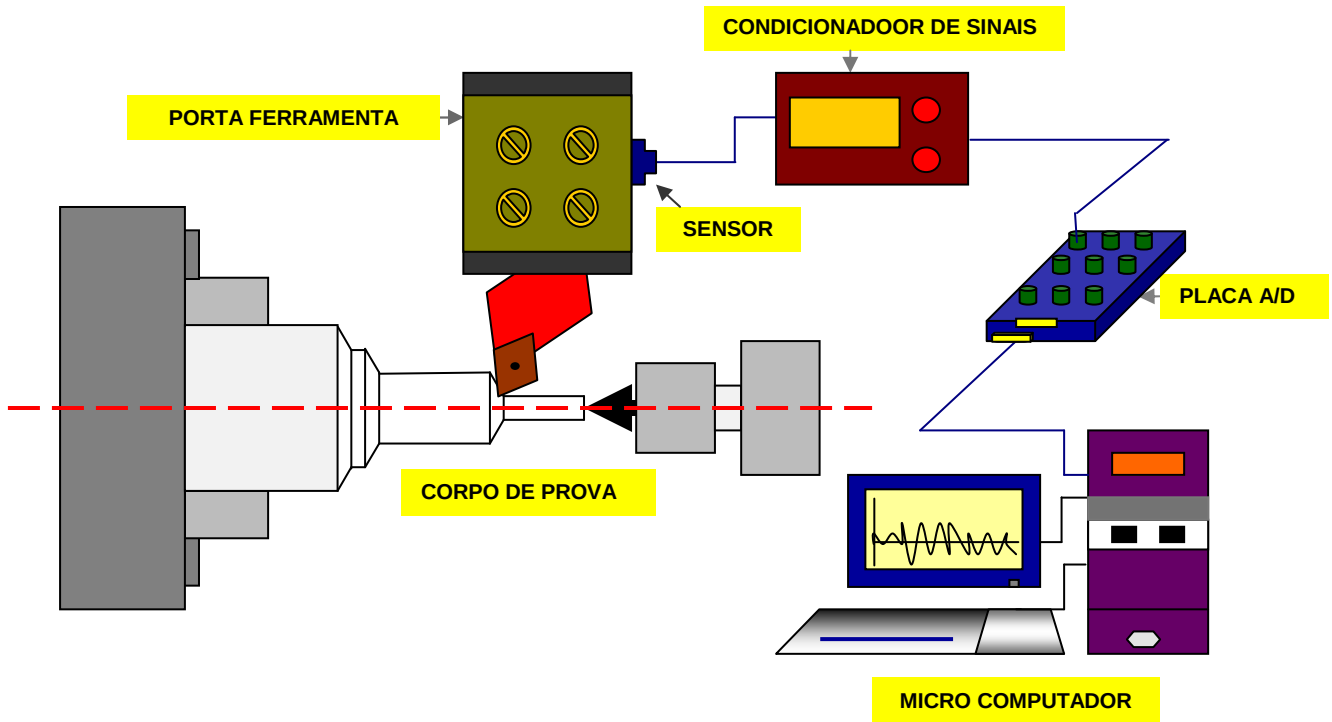


Figura 4.8 – Cadeia de instrumentação para aquisição dos sinais de vibração.

Com os dados de vibração e rugosidade medidos, foram determinados os espectros de frequência para ambos sinais discretos, para fins de comparação e verificação de qualquer relação entre eles.

Foi feito uma ANOVA para os resultados obtidos a fim de garantir se existe variabilidade estatística.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 – Análise estatística da Influência dos parâmetros de corte na rugosidade

Neste capítulo, são apresentadas e discutidas a influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial e a correlação entre o sinal de vibração e os parâmetros de rugosidade.

Para a análise da influência dos parâmetros de corte na rugosidade, selecionou-se o parâmetro  $R_q$ , pois ele foi o único que sofreu influência estatística dos parâmetros de corte. O parâmetro  $R_q$  oferece um peso extra às amplitudes dos picos e vales, pois, eleva ao quadrado os valores.

Os outros parâmetros de rugosidade (cujas tabelas estão em anexo) foram analisados, como o  $R_a$ . Apesar deste parâmetro de rugosidade ser o mais utilizado pelas indústrias e estar disponível em instrumentos mais simples e mais baratos, não mostrou estatisticamente ser influenciado pelos parâmetros de corte para este teste. O fato é que o  $R_a$  é pouco sensível às variações das características da superfície, como por exemplo, especificar a máxima altura de picos e vales. Da mesma forma, os parâmetros estatísticos Kurtosis ( $R_{ku}$ ) e Skewness ( $R_{sk}$ ) mostraram que a superfície apresenta picos e vales distribuídos de forma balanceada, sendo assim, não apresentou variações que pudessem ser detectadas pela ANOVA, como mostra o anexo 2

A Tab. 5.1 mostra um exemplo de teste com aplicação de MQF, cujo parâmetro de rugosidade é o  $R_a$ .

Tabela 5.1 – Quadro da ANOVA para o parâmetro de rugosidade Ra, para os testes com aplicação de MQF.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F         | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|-----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,088200 | 1   | 0,088200 | 49,000000 | 0,090334 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000450 | 1   | 0,000450 | 0,250000  | 0,704833 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,036450 | 1   | 0,036450 | 20,50000  | 0,139209 |
| 1 e 2                  | 0,002450 | 1   | 0,002450 | 1,361110  | 0,451125 |
| 1 e 3                  | 0,061250 | 1   | 0,061250 | 34,02778  | 0,108084 |
| 2 e 3                  | 0,001800 | 1   | 0,001800 | 1,000000  | 0,500000 |
| Erro                   | 0,001800 | 1   | 0,001800 |           |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,192400 | 7   |          |           |          |

Observa-se para o valor P de 0,05, que este não apresenta influência estatística que pudesse ser detectada pela ANOVA., porém, nota-se que o avanço e este em conjunto com o raio de ponta, possui valores muito próximos do nível de significância.

A Tab. 5.2 apresenta todos os resultados obtidos nos testes a seco e com fluido de corte, aplicados pelo método MQF.

Tabela 5.2 – Efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade superficial.

| Teste<br>( FLUIDO ) | $r_\xi$<br>( mm ) | Vc<br>( m/min ) | f<br>( mm/min ) | Rq ( $\mu\text{m}$ ) |      |      | Rq médio<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|------|------|-------------------------------|
|                     |                   |                 |                 |                      |      |      |                               |
| 1( MQF )            | 0,4               | 220             | 0,05            | 0,44                 | 0,46 | 0,44 | 0,45                          |
| 2( MQF )            | 0,4               | 220             | 0,1             | 1,2                  | 1,1  | 1,2  | 1,17                          |
| 3( MQF )            | 0,4               | 280             | 0,05            | 0,49                 | 0,47 | 0,47 | 0,48                          |
| 4( MQF )            | 0,4               | 280             | 0,1             | 1                    | 1,1  | 1,1  | 1,07                          |
| 5( MQF )            | 0,8               | 220             | 0,05            | 0,36                 | 0,37 | 0,37 | 0,37                          |
| 6( MQF )            | 0,8               | 220             | 0,1             | 0,62                 | 0,67 | 0,71 | 0,67                          |
| 7( MQF )            | 0,8               | 280             | 0,05            | 0,74                 | 0,57 | 0,87 | 0,73                          |
| 8( MQF )            | 0,8               | 280             | 0,1             | 0,68                 | 0,69 | 0,72 | 0,70                          |
| 1( SECO )           | 0,4               | 220             | 0,05            | 0,55                 | 0,59 | 0,56 | 0,57                          |
| 2( SECO )           | 0,4               | 220             | 0,1             | 0,99                 | 1    | 1    | 1,00                          |
| 3( SECO )           | 0,4               | 280             | 0,05            | 0,63                 | 0,65 | 0,53 | 0,60                          |
| 4( SECO )           | 0,4               | 280             | 0,1             | 1                    | 1    | 1,1  | 1,03                          |
| 5( SECO )           | 0,8               | 220             | 0,05            | 0,69                 | 0,63 | 0,54 | 0,62                          |
| 6( SECO )           | 0,8               | 220             | 0,1             | 0,64                 | 0,7  | 0,69 | 0,68                          |
| 7( SECO )           | 0,8               | 280             | 0,05            | 0,59                 | 0,77 | 0,61 | 0,66                          |
| 8( SECO )           | 0,8               | 280             | 0,1             | 0,68                 | 0,64 | 0,63 | 0,65                          |

A Tab. 5.3 apresenta os resultados obtidos pela análise de variância do teste pra condição a seco. Para valores de  $p < 0,05$  os fatores tem influência e se  $p > 0,05$  não tem influência.

Tabela 5.3 – Quadro de análise de variância para o parâmetro Rq a seco.

| FATOR                | SQ       | GDL | MQ       | F         | P        |
|----------------------|----------|-----|----------|-----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta ) | 0,090312 | 1   | 0,090312 | 16,38322  | 0,154195 |
| ( 2 ) Vc ( m/min )   | 0,000112 | 1   | 0,000112 | 0,020410  | 0,909666 |
| ( 3 ) $r_\xi$ ( mm ) | 0,040612 | 1   | 0,040612 | 7,367350  | 0,224721 |
| 1 e 2                | 0,000613 | 1   | 0,000613 | 0,111111  | 0,795167 |
| 1 e 3                | 0,074112 | 1   | 0,074112 | 13,444444 | 0,169501 |
| 2 e 3                | 0,002812 | 1   | 0,002812 | 0,510200  | 0,605137 |
| Erro                 | 0,005513 | 1   | 0,005513 |           |          |
| <b>TOTAL</b>         | 0,214087 | 7   |          |           |          |

Da Tab. 5.3 observa-se que a condição a seco, não houve influência significativa dos parâmetros de corte sobre a rugosidade. Isto não quer dizer que os parâmetros de corte não influenciam no acabamento superficial, mas, quando os

testes são comparados entre eles, não se observa diferença sob a ótica estatística. Observa-se que o avanço (1) e este com o raio de ponta (1) e (3), apesar de não detectados pela ANOVA, apresentam-se com 85% de influência na rugosidade.

A Tab. 5.4 apresenta os resultados obtidos pela análise de variância do teste com aplicação de MQF.

Tabela 5.4 – Quadro de análise de variância para o parâmetro Rq com aplicação de MQF.

| FATOR                       | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|-----------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )        | 0,270112 | 1   | 0,270112 | 441,0000 | 0,030292 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)           | 0,010512 | 1   | 0,010512 | 17,1633  | 0,150783 |
| ( 3 ) r <sub>ξ</sub> ( mm ) | 0,066613 | 1   | 0,066613 | 108,7551 | 0,060860 |
| 1 e 2                       | 0,040613 | 1   | 0,040613 | 66,3061  | 0,077792 |
| 1 e 3                       | 0,143113 | 1   | 0,143113 | 233,6531 | 0,041589 |
| 2 e 3                       | 0,043513 | 1   | 0,043513 | 71,0408  | 0,075180 |
| Erro                        | 0,000613 | 1   | 0,000613 |          |          |
| <b>TOTAL</b>                | 0,575088 | 7   |          |          |          |

De acordo com a Tab. 5.4, podemos observar os parâmetros avanço e raio de ponta foram os que apresentaram variações que puderam ser detectadas pela ANOVA, ou seja, são estatisticamente significantes.

O fato da velocidade de corte ser a que menos influi no acabamento superficial, se deve ao fato de que, em velocidades de corte mais elevadas, o acabamento superficial torna-se insensível às variações da velocidade de corte.

O aumento do avanço tem efeito geométrico na rugosidade, já que, ao contribuir para o aumento da distância entre picos, no perfil de rugosidade, aumentando o valor da amplitude de rugosidade.

Com relação ao raio de ponta da ferramenta, teoricamente, o aumento tende a diminuir a rugosidade. Seu efeito também é na geometria do perfil. No entanto, pode influenciar na vibração durante o corte. O perfil de rugosidade teórico é a combinação do avanço com o raio de ponta da ferramenta. Quando o valor do raio

de ponta é muito alto, relativamente ao avanço, pode-se ter efeitos negativos na rugosidade.

Tratando-se de uma operação de acabamento, a relação entre o raio de curvatura e o avanço não pode ser pequena. Um raio de curvatura igual ao avanço dará origem a uma aparência de rosca na superfície da peça. Porém, uma relação  $\frac{r_\xi}{f}$  maior que 10 origina um atrito podendo prejudicar o acabamento superficial da peça (Ferraresi, 2006).

Ainda pode-se dizer que o aumento do raio de ponta a partir de um ponto crítico acarreta aumento nas forças de usinagem e vibrações afetando de forma negativa a rugosidade.

Analisando os testes com MQF 6 e 7 da tabela 5.1, observamos que a rugosidade sofreu um acréscimo, que de acordo com a literatura se contradiz, pois, com o aumento da velocidade de corte e redução do avanço, a tendência da rugosidade é diminuir. O fato pode ser explicado pela relação entre o raio de ponta e o avanço, onde:  $\frac{r_\xi}{f} = \frac{0,8}{0,05} = 16$ . De acordo com o resultado, pode-se afirmar que houve atrito e com o aumento da velocidade vibração no sistema, com isto, prejudicando o acabamento superficial.

As Fig. 5.1 e 5.2 mostram os perfis de rugosidade obtidos para os 6 e 7 da tabela 5.1.

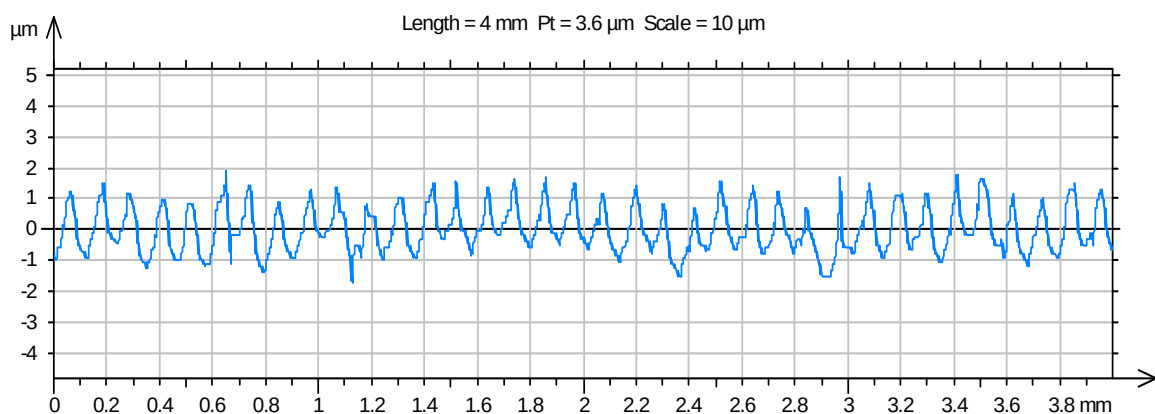


Figura 5.1 – Perfil de rugosidade Rq para condição de corte com MQF, direção transversal com  $r_\xi = 0,8$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

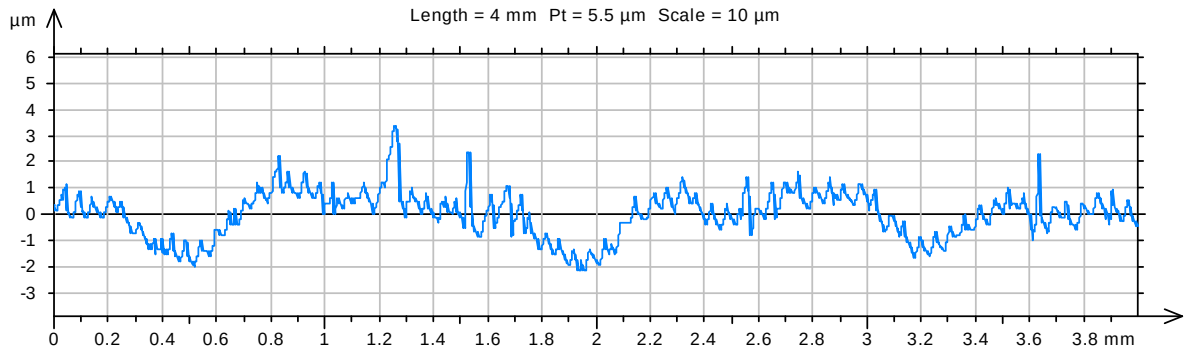


Figura 5.2 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_c = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

Os perfis mostram a influência do atrito no perfil de rugosidade.

A Fig. 5.3 mostram os resultados obtidos comparados com o  $R_q$  teórico

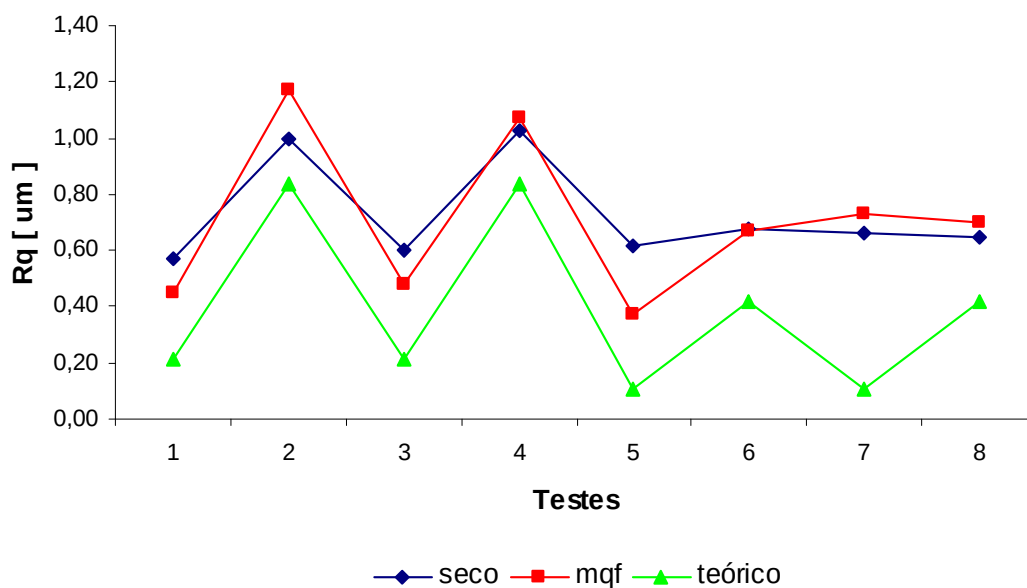


Figura 5.3 – Comparação dos parâmetros  $R_q$  teórico e experimental obtido após torneamento do Aço Microligado DIN 38MnSiVS5 com ferramentas de metal duro nas condições a seco e com MQF.

De acordo com a Fig. 5.3 pode-se constatar que as curvas apresentam o mesmo comportamento e que o fluido de corte teve uma influência significativa se comparado com o teste a seco, nos testes, 1, 2, 3 e 5.

Para o teste 2, observa-se na Fig. 5.3 que o teste a seco apresentou uma rugosidade menor em relação a com a aplicação de MQF. Explica-se o fato de que o fluido atuou como refrigerante, aumentando a resistência ao cisalhamento do material da peça e, conseqüentemente, a força de usinagem, prejudicando, assim, o acabamento da peça.

A Tab. 5.5 mostra os testes para os quais o valor tiveram  $p < 0,05$ , portanto se diferem estatisticamente, confirmando o gráfico da figura 4.3.

Tabela 5.5 – Valor p dos pares de testes.

| Testes |        | Valor p |
|--------|--------|---------|
| 1 MQF  | 1 Seco | 0,0009  |
| 2 MQF  | 2 Seco | 0,0071  |
| 3 MQF  | 3 Seco | 0,0335  |
| 4 MQF  | 4 Seco | 0,4439  |
| 5 MQF  | 5 Seco | 0,004   |
| 6 MQF  | 6 Seco | 0,7701  |
| 7 MQF  | 7 Seco | 0,5373  |
| 8 MQF  | 8 Seco | 0,06    |

Sabendo-se que existe diferença entre os fatores do parâmetro  $R_q$  através da análise de variância mostrada na Tab. 5.3, utilizou-se também o teste t de student com um nível de significância de 5% para se ter maior confiabilidade nos resultados como mostram as Tab. 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6 – Valor P dos pares de testes com todos os fatores com 0,05 com MQF.

| Testes | Fatores                             | p      |
|--------|-------------------------------------|--------|
| 1 e 2  | f                                   | 0,000  |
| 1 e 3  | V <sub>c</sub>                      | 0,6763 |
| 1 e 4  | V <sub>c</sub> e f                  | 0,000  |
| 1 e 5  | r <sub>ξ</sub>                      | 0,0014 |
| 1 e 6  | r <sub>ξ</sub> e f                  | 0,0012 |
| 1 e 7  | r <sub>ξ</sub> e V <sub>c</sub>     | 0,000  |
| 1 e 8  | r <sub>ξ</sub> , V <sub>c</sub> e f | 0,000  |
| 2 e 4  | V <sub>c</sub>                      | 0,1010 |
| 2 e 6  | r <sub>ξ</sub>                      | 0,0003 |
| 6 e 8  | V <sub>c</sub>                      | 0,3545 |

Tabela 5.7 – Valor P dos pares de testes com todos os fatores com 0,05 a seco.

| Testes | Fatores                             | p      |
|--------|-------------------------------------|--------|
| 1 e 2  | f                                   | 0,0000 |
| 1 e 3  | V <sub>c</sub>                      | 0,3474 |
| 1 e 4  | V <sub>c</sub> e f                  | 0,0002 |
| 1 e 5  | r <sub>ξ</sub>                      | 0,3429 |
| 1 e 6  | r <sub>ξ</sub> e f                  | 0,0052 |
| 1 e 7  | r <sub>ξ</sub> e V <sub>c</sub>     | 0,2011 |
| 1 e 8  | r <sub>ξ</sub> , V <sub>c</sub> e f | 0,0130 |
| 2 e 4  | V <sub>c</sub>                      | 0,3480 |
| 2 e 6  | r <sub>ξ</sub>                      | 0,0010 |
| 6 e 8  | V <sub>c</sub>                      | 0,2879 |

De acordo com o teste t realizado, podemos observar que dos três parâmetros de corte utilizados, o avanço e a combinação deste com o raio de ponta, foram os que mais influenciaram na rugosidade. A variação da velocidade e corte mantendo

constante os outros fatores (avanço e raio de ponta), como mostram os testes (1 e 3), (2 e 4) e (6 e 8) a seco e com MQF, reforçam os resultados obtidos na ANOVA e confirma com a literatura que para velocidades de cortes mais elevadas, o acabamento superficial melhora.

## 5.2 – Superfícies de resposta

A seguir são apresentadas nas Fig. 5.4 a 5.6 as superfícies de resposta obtidas através da relação entre os parâmetros de corte e a rugosidade superficial  $R_q$ .

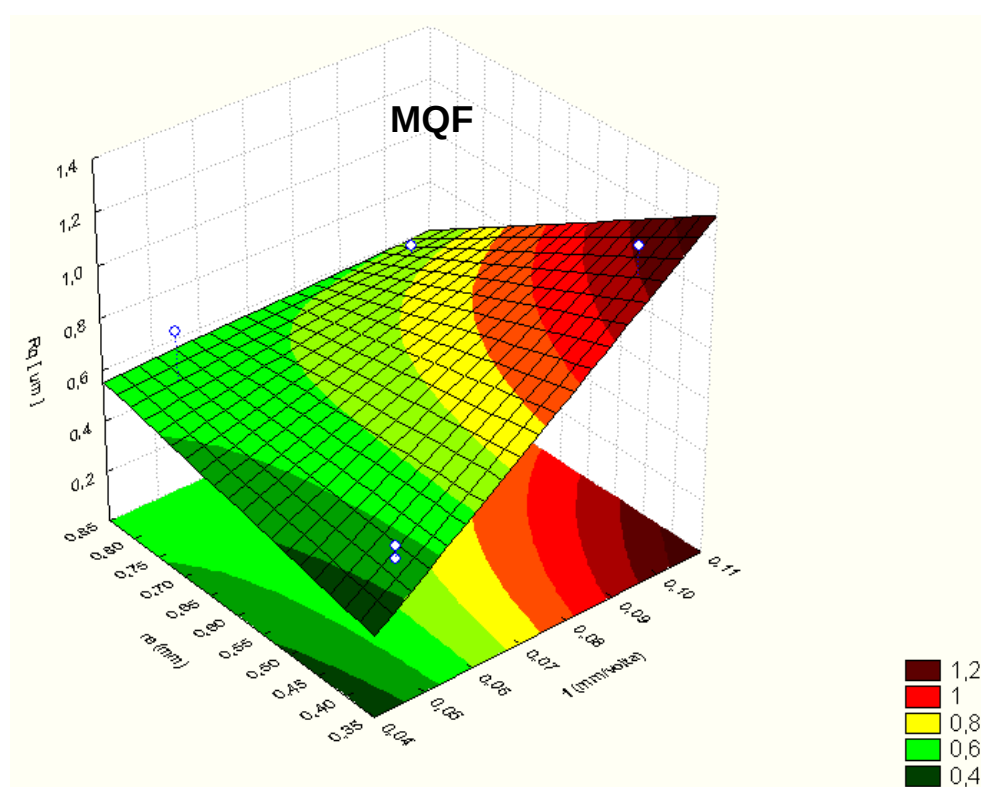


Figura 5.4 (a) – Influência do raio de ponta e do avanço na rugosidade superficial  $R_q$  com aplicação de MQF.

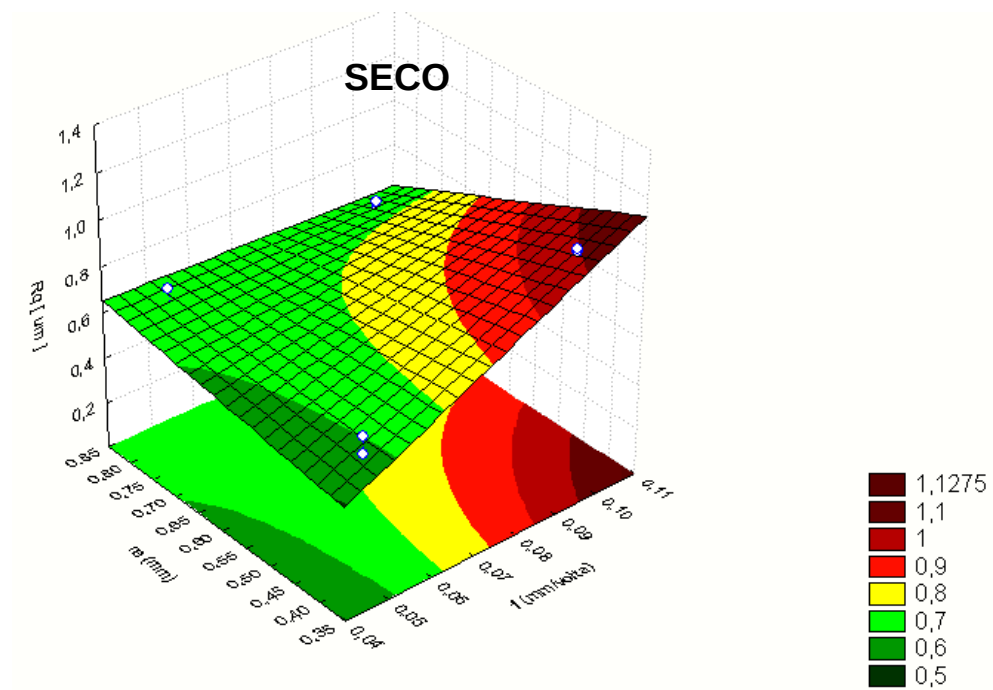


Figura 5.4 (b) – Influência do raio de ponta e do avanço na rugosidade superficial  $R_q$  a seco.

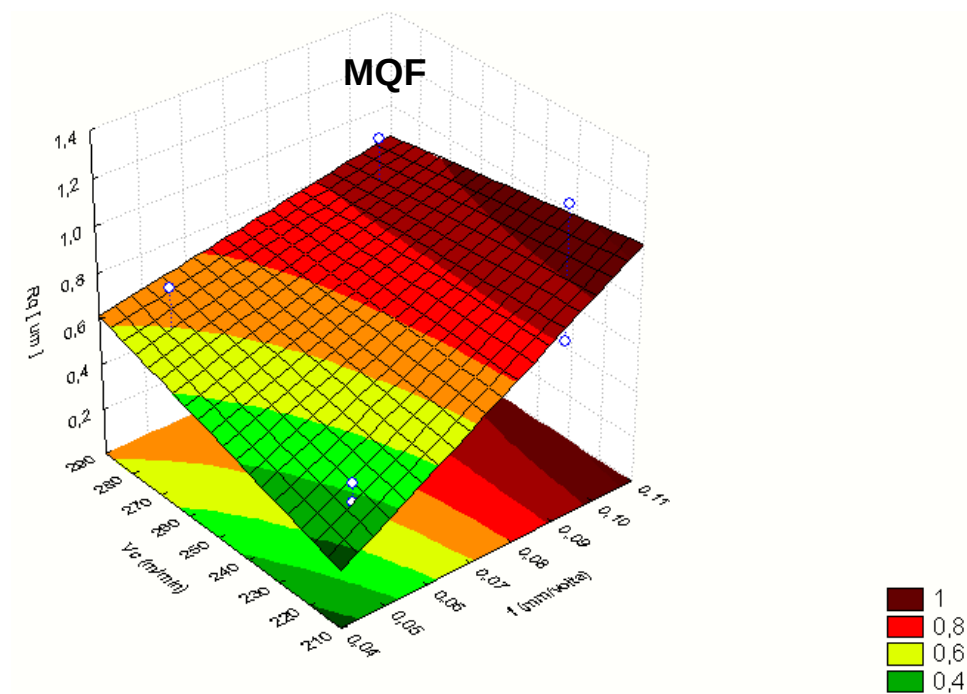


Figura 5.5 (a) – Influência da velocidade de corte e do avanço na rugosidade superficial  $R_q$  com aplicação de MQF.

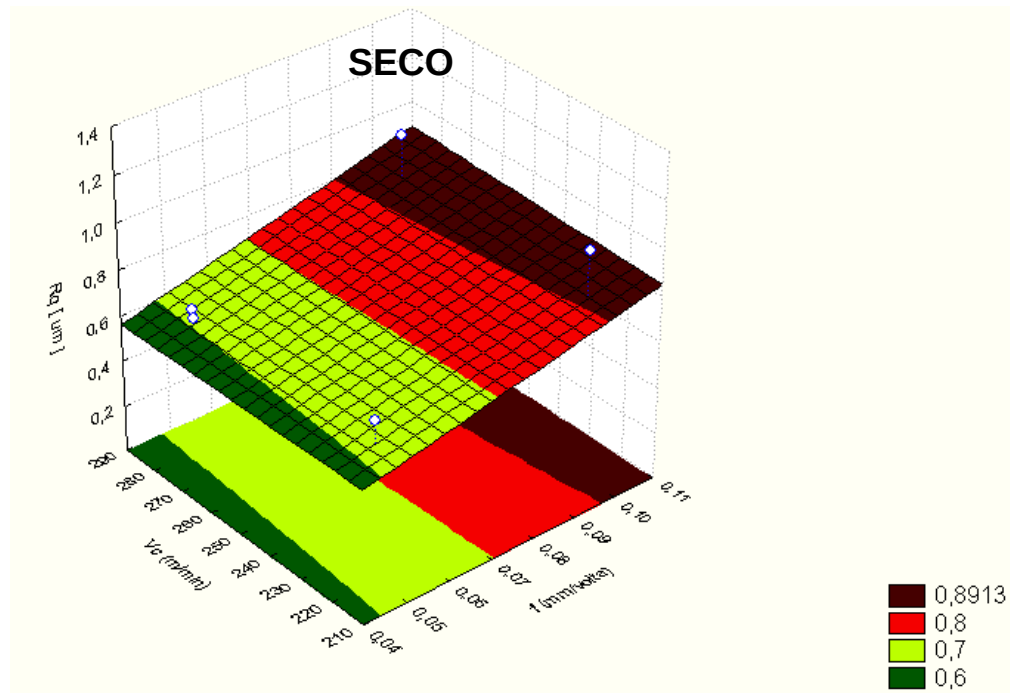


Figura 5.5 (b) – Influência da velocidade de corte e do avanço na rugosidade superficial  $R_q$  a seco.

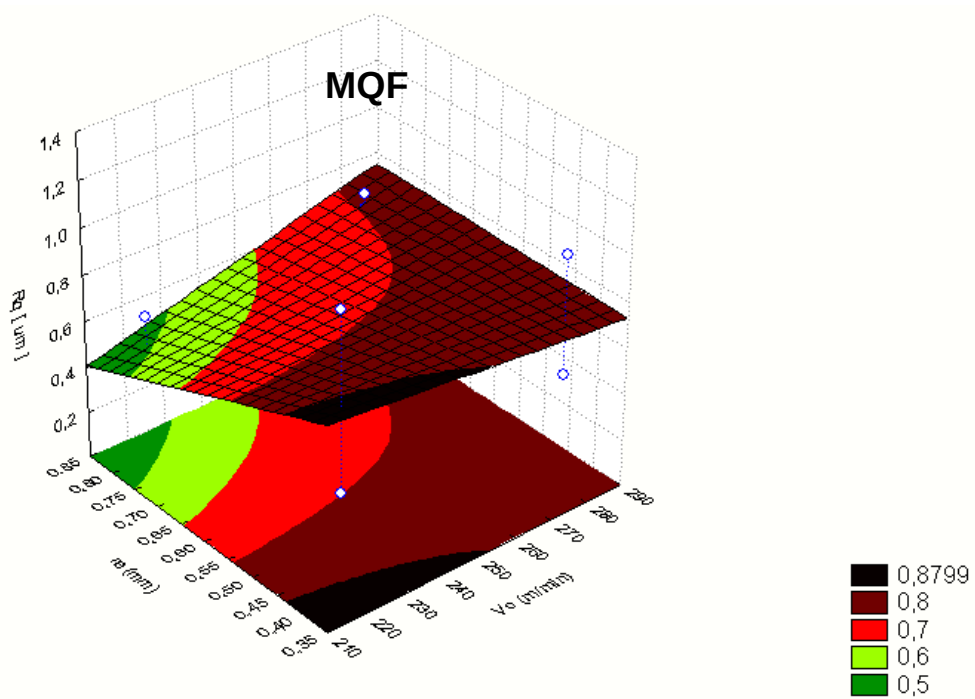


Figura 5.6 (a) – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta na rugosidade superficial  $R_q$  com aplicação de MQF.

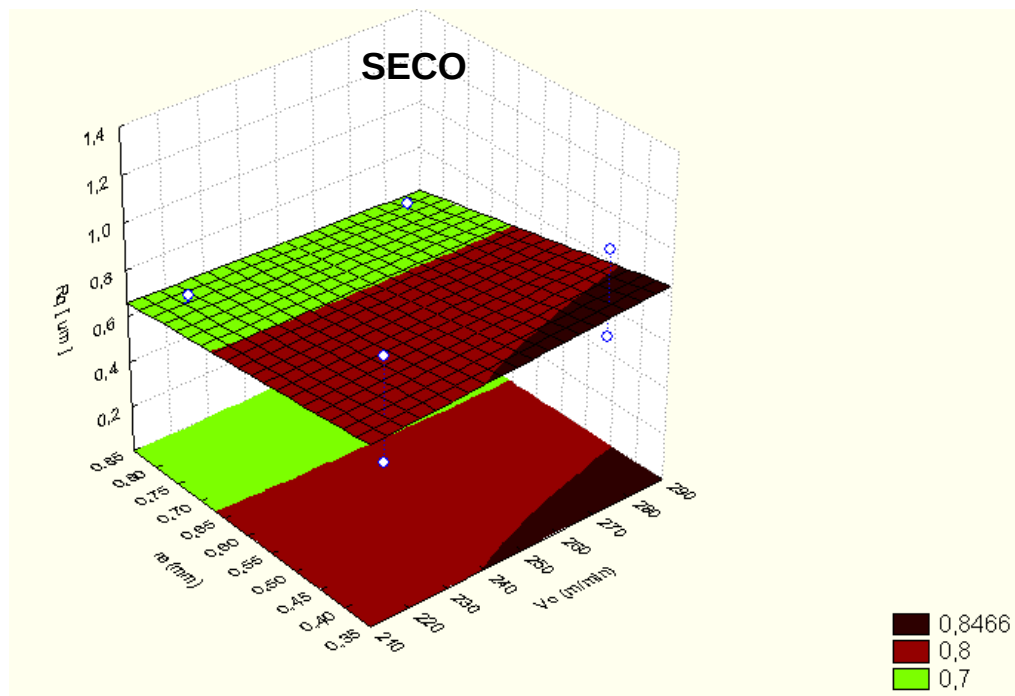


Figura 5.6 (b) – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta na rugosidade superficial  $R_q$  a seco.

Dos gráficos apresentados, pode-se destacar o avanço como parâmetro de corte que mais contribui para o aumento da rugosidade seguido do raio de ponta e da velocidade de corte. Observa-se que para pequenos avanços, altas velocidades e raio de ponta da ferramenta maiores, temos uma rugosidade menor, isto é um acabamento melhor.

A Fig. 5.7 (a) e (b) apresentam os diagramas com objetivo de identificar de forma rápida e clara os efeitos que são estatisticamente importantes, ou seja, permite verificar quais são as causas que devem ser “atacadas” primeiro ou que surtirão melhores resultados.

Os efeitos cujos retângulos estiverem à direita da linha divisória ( $p = 0,05$ ) devem ser considerados. Os valores ao lado do retângulo representam os valores da estatística  $t$ , obtidos na janela dos efeitos principais.

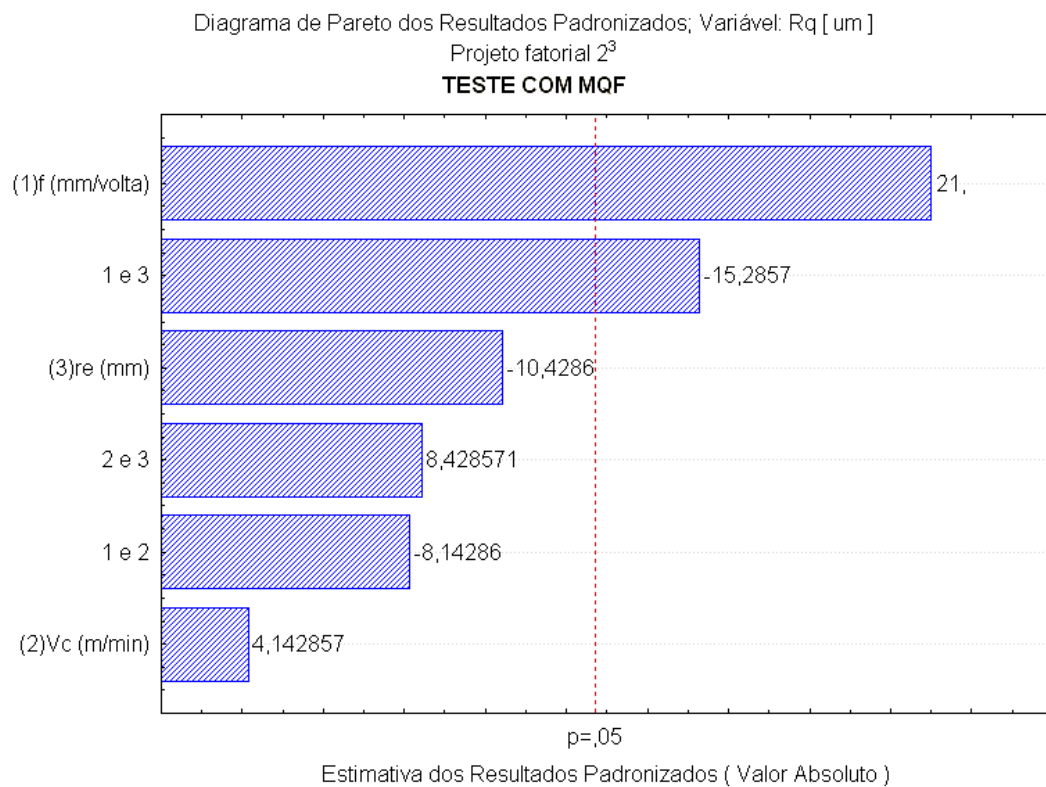


Figura 5.7 (a) – Diagrama de Pareto em função dos valores da estatística de teste t.

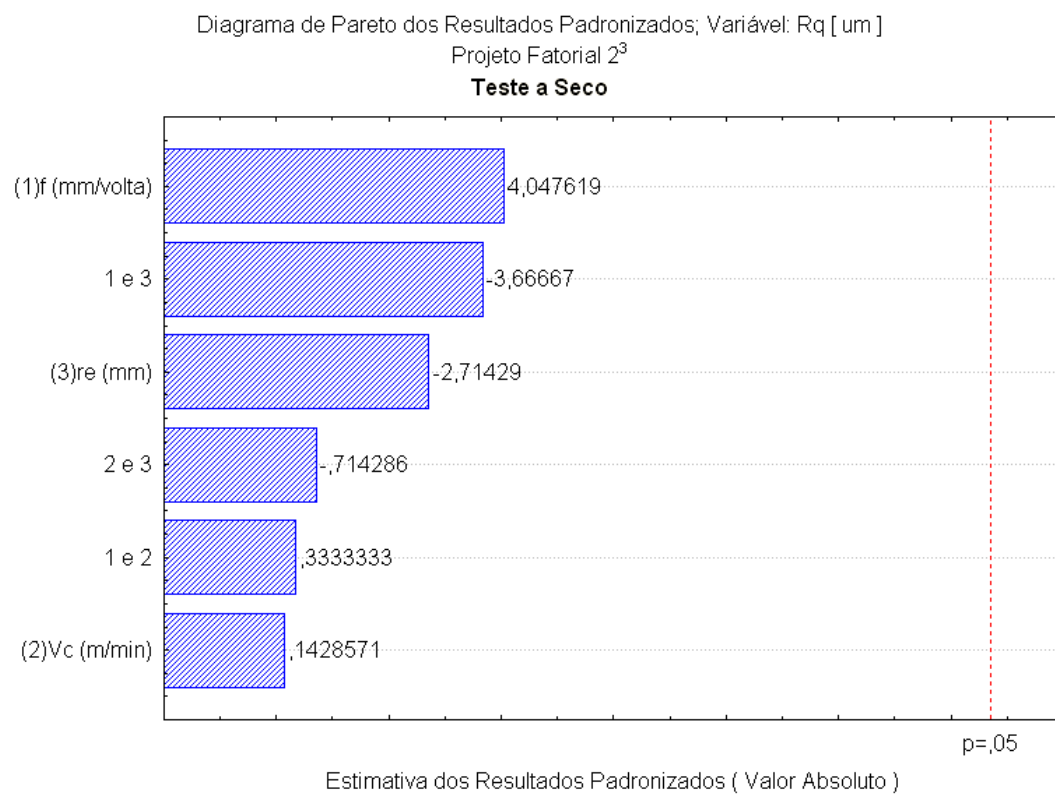


Figura 5.7 (b) – Diagrama de Pareto em função dos valores da estatística de teste t.

De acordo com o diagrama 5.7 (a), testes com aplicação de MQF, podemos observar que o avanço e o raio de ponta, são os que exercem maior influência na rugosidade, o que confirma o apresentado nas análises anteriores.

Já o diagrama 5.7 (b), para testes realizados a seco, observamos que o avanço e o raio de ponta, apesar de exercerem maior influência, estas não são estatisticamente relevantes.

De acordo com as Fig. 5.8(a) e 5.8(b), observa-se que a rugosidade não sofre influência estatística da velocidade de corte.

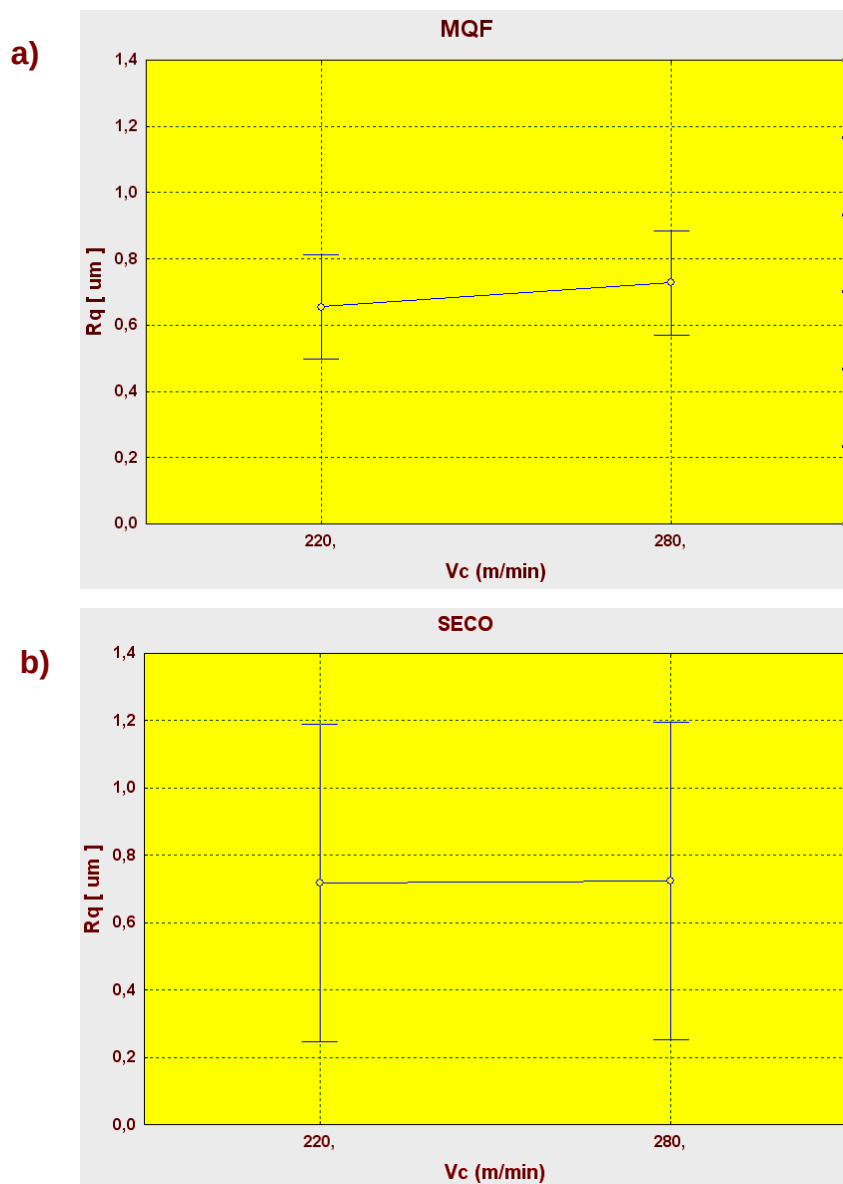


Figura 5.8 – Gráficos comparativos das médias para influência da velocidade de corte na rugosidade Rq com aplicação de MQF e a seco.

A Fig. 5.9 mostra que para um aumento do raio de ponta da ferramenta, há uma diminuição na rugosidade, que pode ser explicada pelo fato da diminuição da contribuição geométrica.

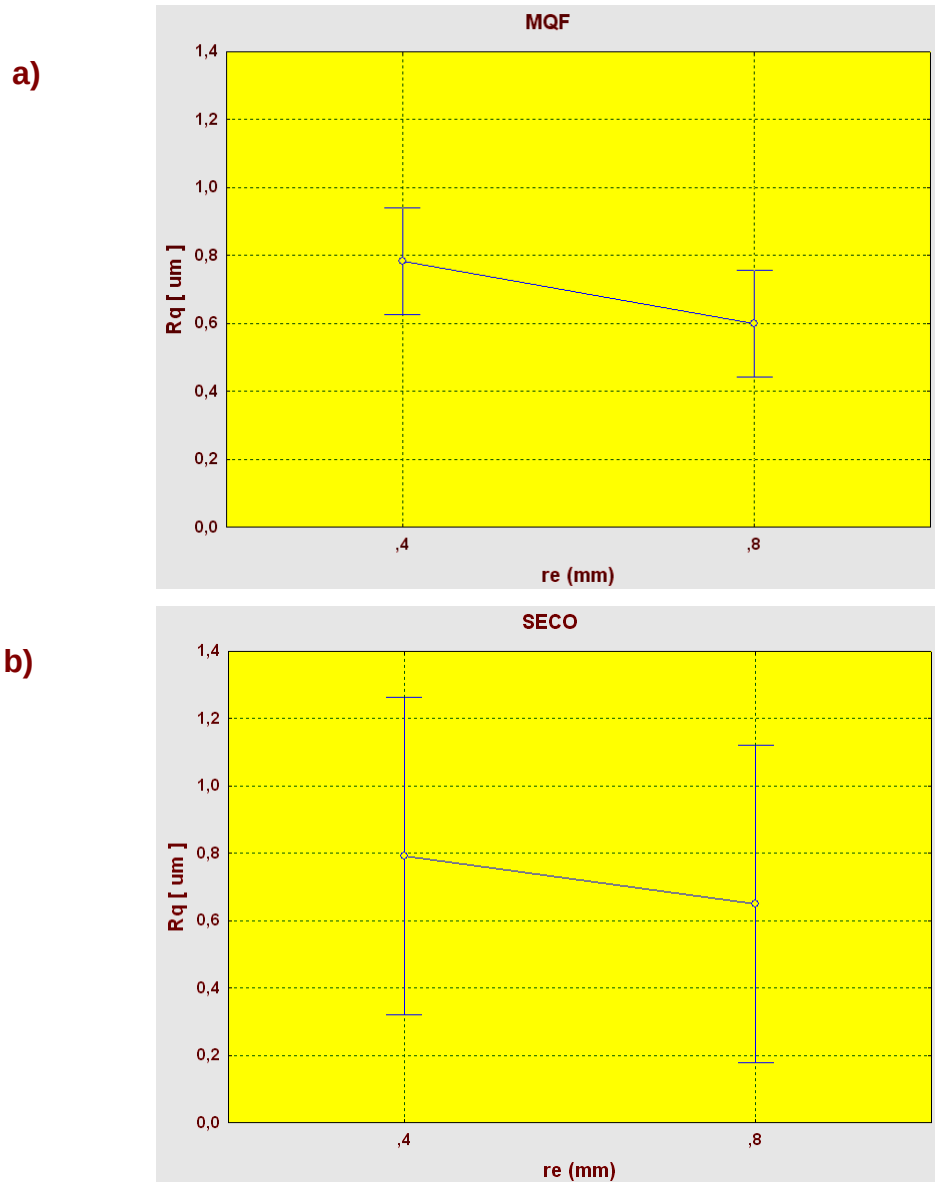


Figura 5.9 – Gráficos comparativos das médias para influência do raio de ponta da ferramenta na rugosidade  $R_q$  com aplicação de MQF e a seco.

Na Tab. 5.1, temos os testes 3 e 7 ( com aplicação de MQF ) que apresentaram comportamentos diferentes com relação ao raio de ponta, ou seja, com o aumento deste a rugosidade diminuiu. Podemos atribuir este resultado ao aumento da área de contato peça-ferramenta, provocando assim maior atrito e maior vibração.

As figuras 5.10 e 5.11, mostram os perfis de rugosidade dos testes 3 e 7 respectivamente, onde podemos observar as diferenças provocadas pela vibração.

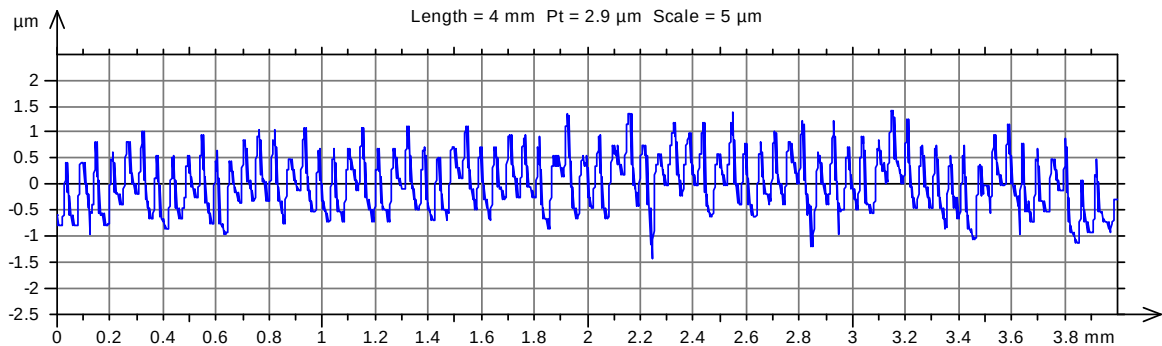


Figura 5.10 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com  $r_\xi = 0,4$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

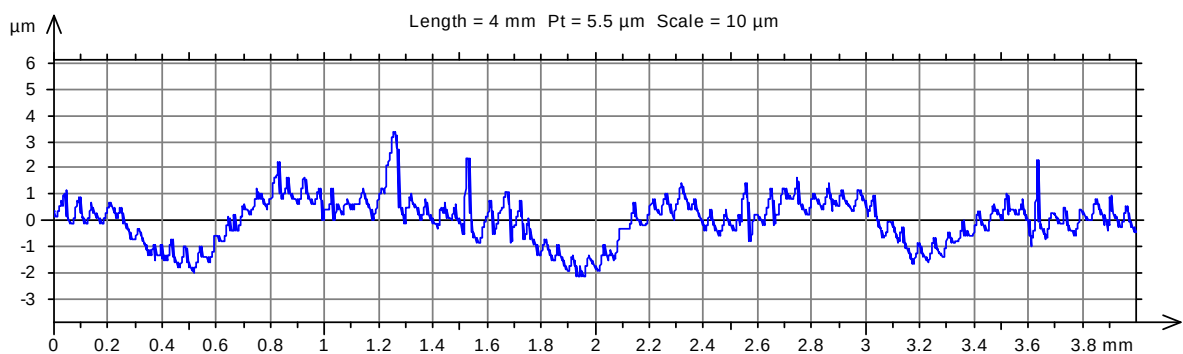


Figura 5.11 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com  $r_\xi = 0,8$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

Observando os gráficos da figura 5.12 abaixo relacionados, podemos constatar que o avanço tanto a seco quanto com aplicação de MQF, possuem o mesmo comportamento, sendo que, nos testes a seco Fig.5.12(b), a rugosidade em torno da média sofre maior dispersão. Podemos explicar o resultado, pelo fato que o fluido de corte diminuiu o atrito entre a peça e a ferramenta, fazendo assim com que a rugosidade diminua e os resultados ficassem mais próximos da média.

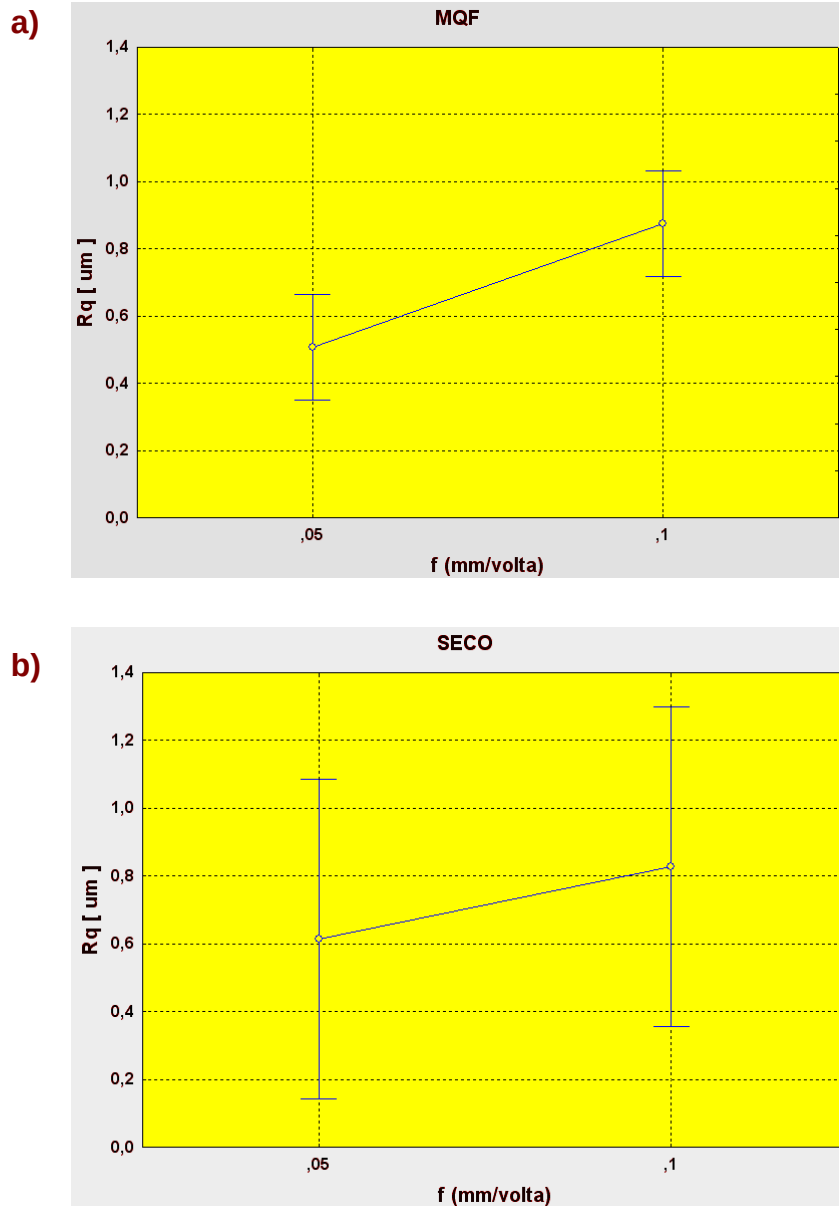


Figura 5.12 – Gráficos comparativos das médias para influência do avanço rugosidade  $R_q$  com aplicação de MQF e a seco.

### 5.3 – Variação da Rugosidade Superficial $R_q$ versus sinal de vibração RMS

As tabelas 5.8 e 5.9 mostram os resultados obtidos da medição do sinal de vibração para os testes realizados. A medição foi feita no sentido transversal ( perpendicular à direção de avanço ).

Tabela 5.8 – Dados referentes ao sinal de vibração RMS obtidos na condição de usinagem com aplicação de MQF.

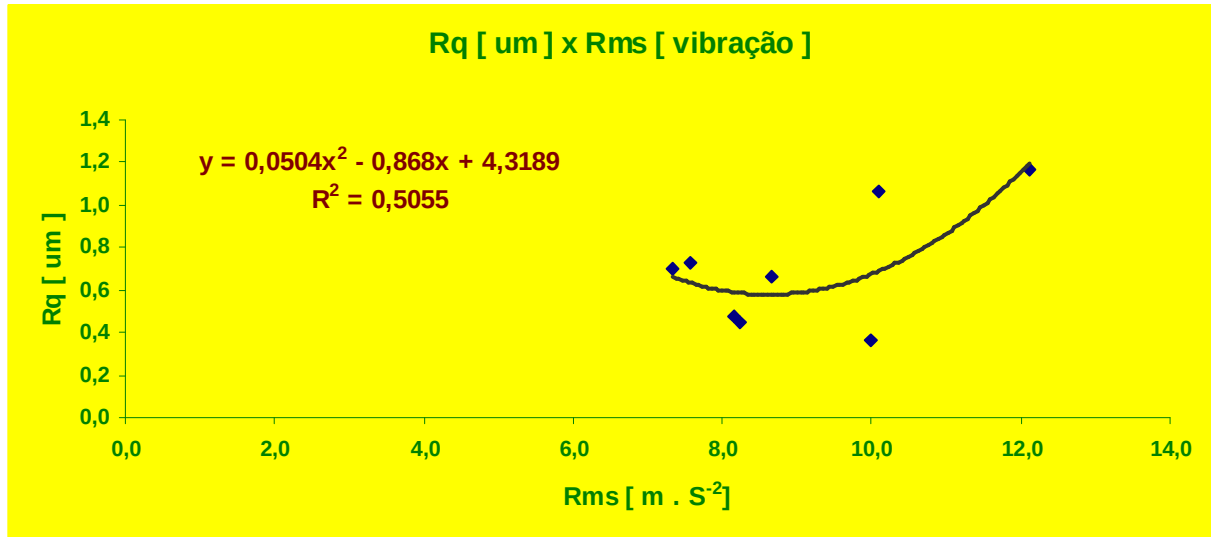
| Sinal de Vibração – RMS [ MQF ] |                |             |              |                                |       |       |                          |
|---------------------------------|----------------|-------------|--------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------|
| Teste ( Fluido )                | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rms de vibração ( $m.s^{-2}$ ) |       |       | Rms médio ( $m.s^{-2}$ ) |
| 1 ( MQF )                       | 0,4            | 220         | 0,05         | 7,03                           | 8,65  | 9,05  | 8,24                     |
| 2 ( MQF )                       | 0,4            | 220         | 0,10         | 11,70                          | 12,46 | 12,19 | 12,12                    |
| 3 ( MQF )                       | 0,4            | 280         | 0,05         | 8,09                           | 8,04  | 8,32  | 8,15                     |
| 4 ( MQF )                       | 0,4            | 280         | 0,10         | 10,30                          | 10,00 | 10,02 | 10,11                    |
| 5 ( MQF )                       | 0,8            | 220         | 0,05         | 8,34                           | 11,70 | 9,94  | 9,99                     |
| 6 ( MQF )                       | 0,8            | 220         | 0,10         | 8,62                           | 8,83  | 8,51  | 8,65                     |
| 7 ( MQF )                       | 0,8            | 280         | 0,05         | 7,46                           | 7,45  | 7,78  | 7,56                     |
| 8 ( MQF )                       | 0,8            | 280         | 0,10         | 7,62                           | 7,33  | 7,05  | 7,33                     |

Tabela 5.9 – Dados referentes ao sinal de vibração RMS obtidos na usinagem na condição a seco.

| Sinal de Vibração – RMS [ MQF ] |                |             |              |                                |       |       |                          |
|---------------------------------|----------------|-------------|--------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------|
| Teste ( Fluido )                | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rms de vibração ( $m.s^{-2}$ ) |       |       | Rms médio ( $m.s^{-2}$ ) |
| 1 SECO                          | 0,4            | 220         | 0,05         | 8,24                           | 9,57  | 10,32 | 9,38                     |
| 2 SECO                          | 0,4            | 220         | 0,10         | 13,69                          | 14,08 | 13,67 | 13,81                    |
| 3 SECO                          | 0,4            | 280         | 0,05         | 9,12                           | 9,09  | 9,18  | 9,13                     |
| 4 SECO                          | 0,4            | 280         | 0,10         | 11,47                          | 11,12 | 11,25 | 11,28                    |
| 5 SECO                          | 0,8            | 220         | 0,05         | 9,11                           | 13,69 | 10,40 | 11,07                    |
| 6 SECO                          | 0,8            | 220         | 0,10         | 10,50                          | 10,83 | 10,77 | 10,70                    |
| 7 SECO                          | 0,8            | 280         | 0,05         | 8,93                           | 9,04  | 9,26  | 9,08                     |
| 8 SECO                          | 0,8            | 280         | 0,10         | 8,97                           | 9,14  | 9,02  | 9,04                     |

A seguir as Fig. 5.13 e 5.14, são apresentados gráficos onde mostram a correlação entre o sinal de vibração ( Rms ) e o parâmetros de rugosidade Rq com aplicação de MQF e a seco respectivamente.

Figura 5.13 – Correlação entre os parâmetros Rms de vibração e Rq de rugosidade



obtidos na usinagem com aplicação de MQF.

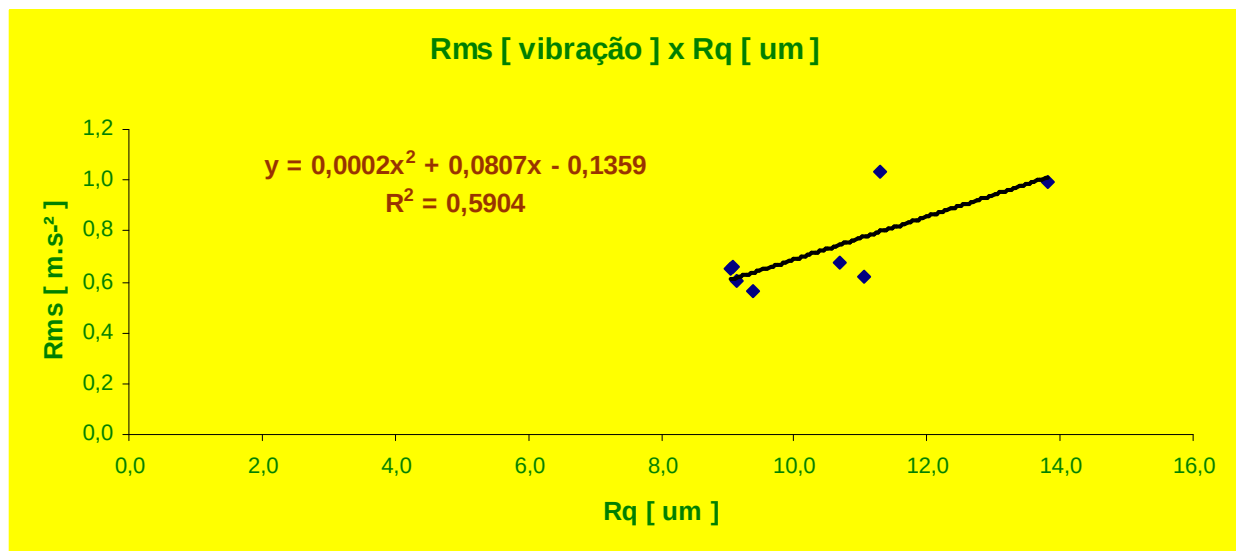


Figura 5.14 – Correlação entre os parâmetros Rms de vibração e Rq de rugosidade a seco.

As Fig. 5.13 e 5.14 mostram que não foram observadas correlações que pudessem demonstrar os efeitos da vibração na rugosidade. O que pode ser explicado pelo fato de que quando analisamos o sinal de vibração, encontramos um grande número de componentes periódicos de frequência que são diretamente relacionados com os movimentos fundamentais de várias partes do torno.

A figura 5.15 mostra a influência conjunta dos parâmetros velocidade de corte e avanço na rugosidade  $R_q$  e no sinal Rms de vibração com aplicação de MQF.

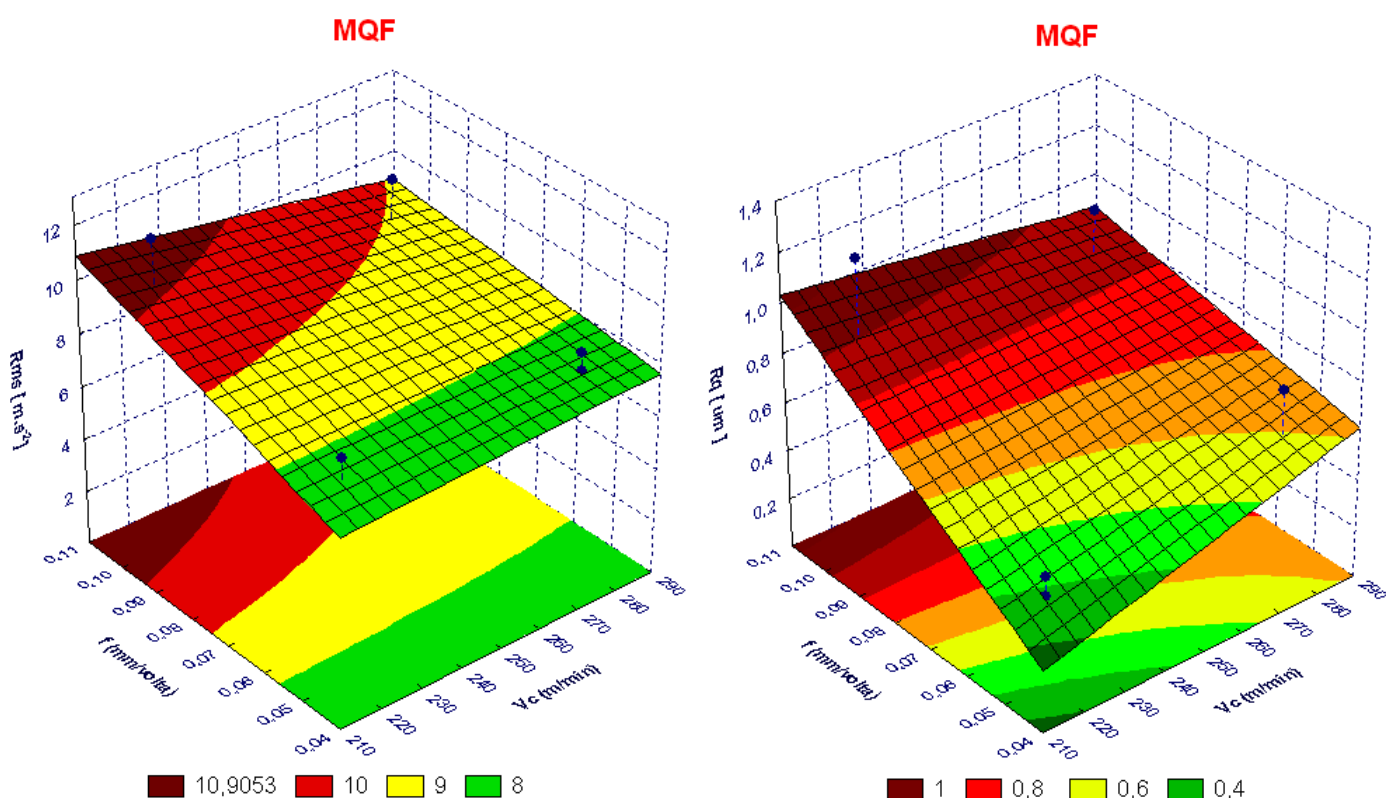


Figura 5.15 – Influência da velocidade de corte e do avanço nos parâmetros Rms de vibração e  $R_q$  de rugosidade obtidos na usinagem com aplicação de MQF.

Podemos observar na superfície de resposta da Fig. 5.15, que um aumento no avanço sob baixas velocidades de corte resulta em uma superfície bem pior. Podemos explicar pelo fato de que aumentando o avanço, há uma maior contribuição geométrica e sendo o material da peça de difícil usinagem, com a diminuição da velocidade, ocorre uma diminuição na temperatura de cisalhamento, aumentando assim as forças de usinagem e, conseqüentemente, a piora no

acabamento. A figura também mostra um aumento na vibração, o que também contribuiu para o aumento da rugosidade.

As Fig. 5.16 e 5.17 mostram os perfis de rugosidade obtido para as condições descritas acima.

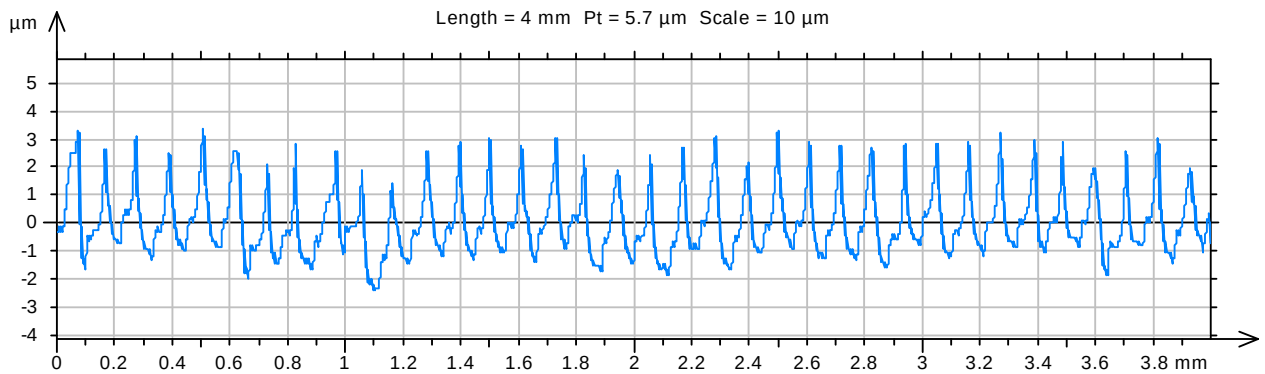


Figura 5.16 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com  $r_\xi = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

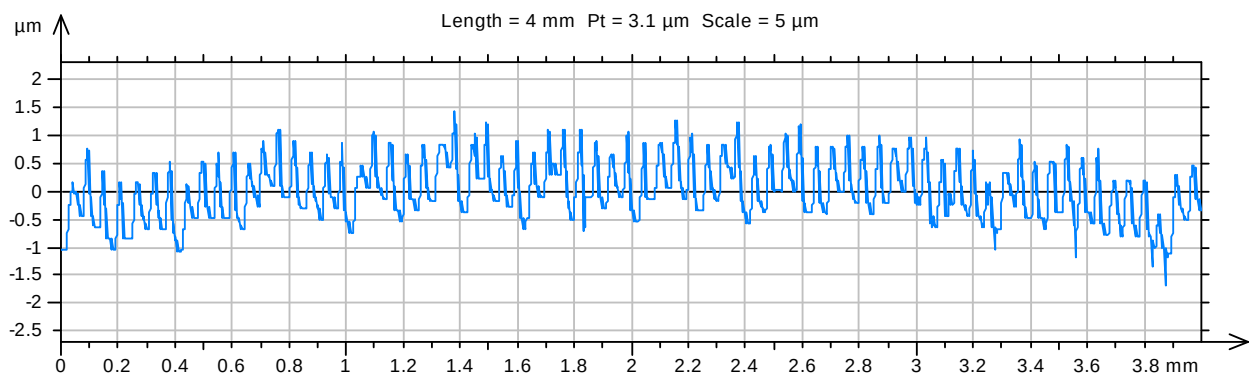


Figura 5.17 – Perfil de rugosidade para condição de corte com MQF, direção transversal com  $r_\xi = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

A Fig. 5.18 mostra a influência dos parâmetros velocidade de corte e raio de ponta na rugosidade  $R_q$  e no sinal Rms de vibração com aplicação de MQF.

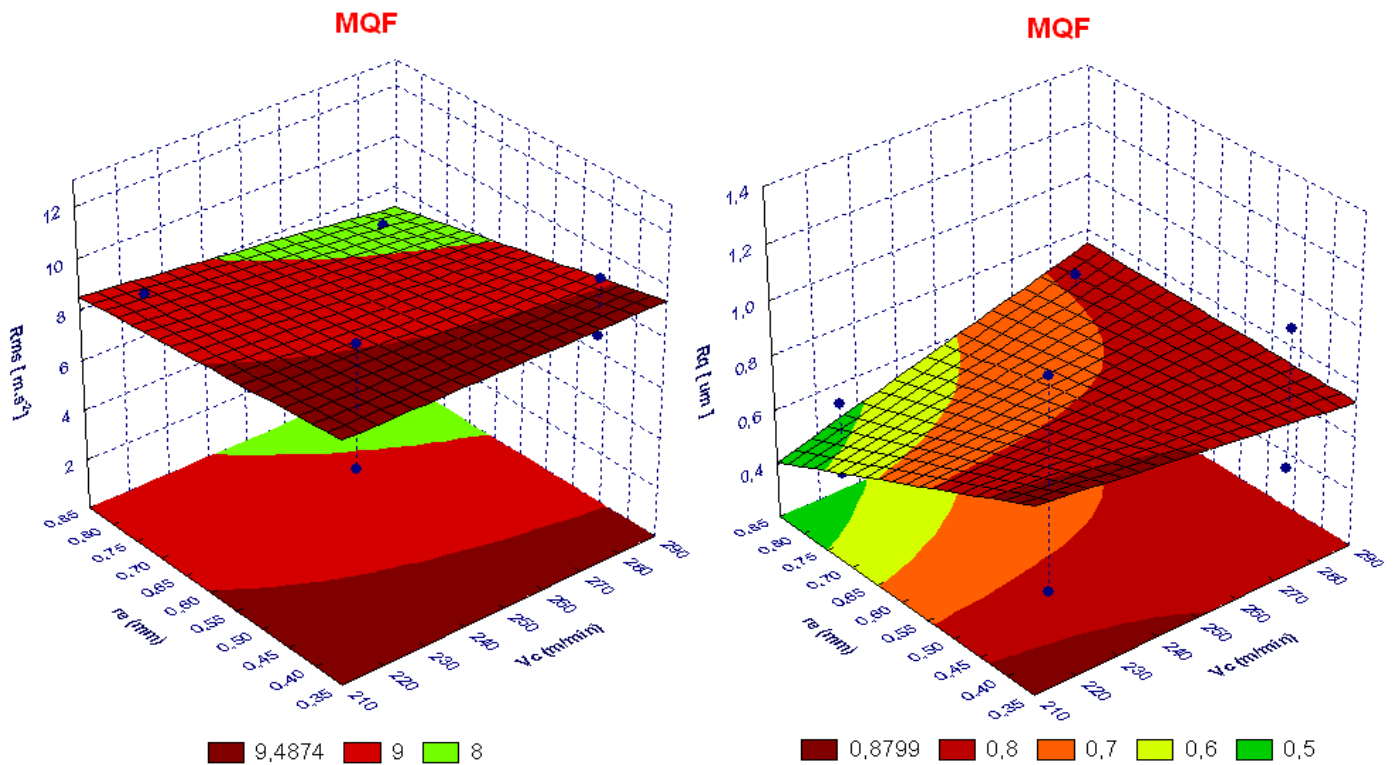


Figura 5.18 – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta nos parâmetros Rms de vibração e  $R_q$  de rugosidade obtidos na usinagem com aplicação de MQF.

A Fig. 5.18 mostra que para velocidades de corte baixas e raio de ponta menores, temos uma maior rugosidade, porém, quando observamos o gráfico de vibração, notamos que apesar destas variações, a vibração sofreu pouca influência destes parâmetros.

A Fig. 5.19 mostra a influência conjunta dos parâmetros velocidade de corte e avanço na rugosidade  $R_q$  e no sinal Rms de vibração a seco.

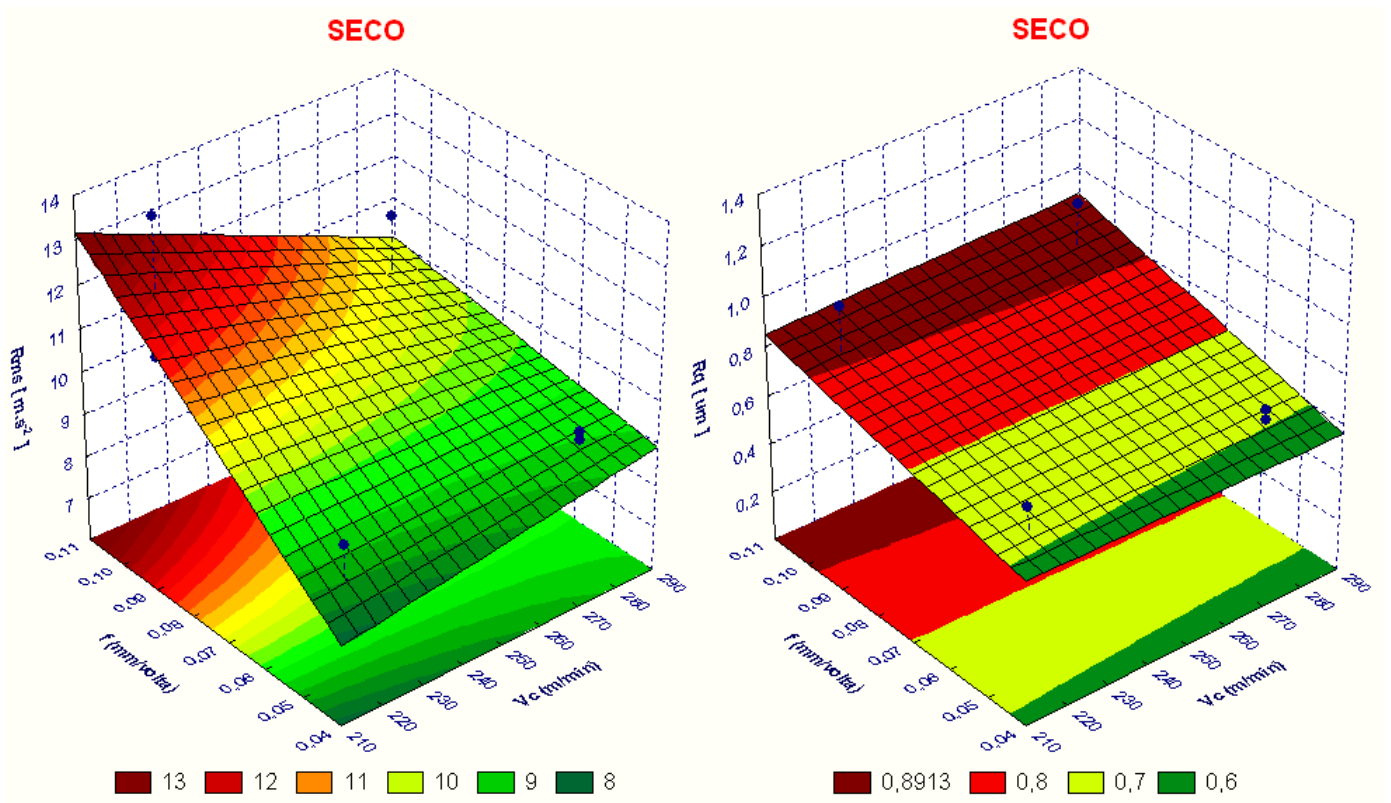


Figura 5.19 – Influência da velocidade de corte e do avanço nos parâmetros Rms de vibração e Rq de rugosidade obtidos na usinagem na condição a seco.

A superfície de resposta da Fig. 5.19 mostra que semelhante ao que aconteceu com aplicação de MQF a rugosidade piorou com o aumento do avanço e diminuição da velocidade de corte. Podemos observar ainda um aumento da vibração, que pode ser explicado pela contribuição geométrica do avanço e o aumento do atrito.

A Fig. 5.20 mostra a influência conjunta dos parâmetros velocidade de corte e avanço na rugosidade Rq e no sinal Rms de vibração a seco.

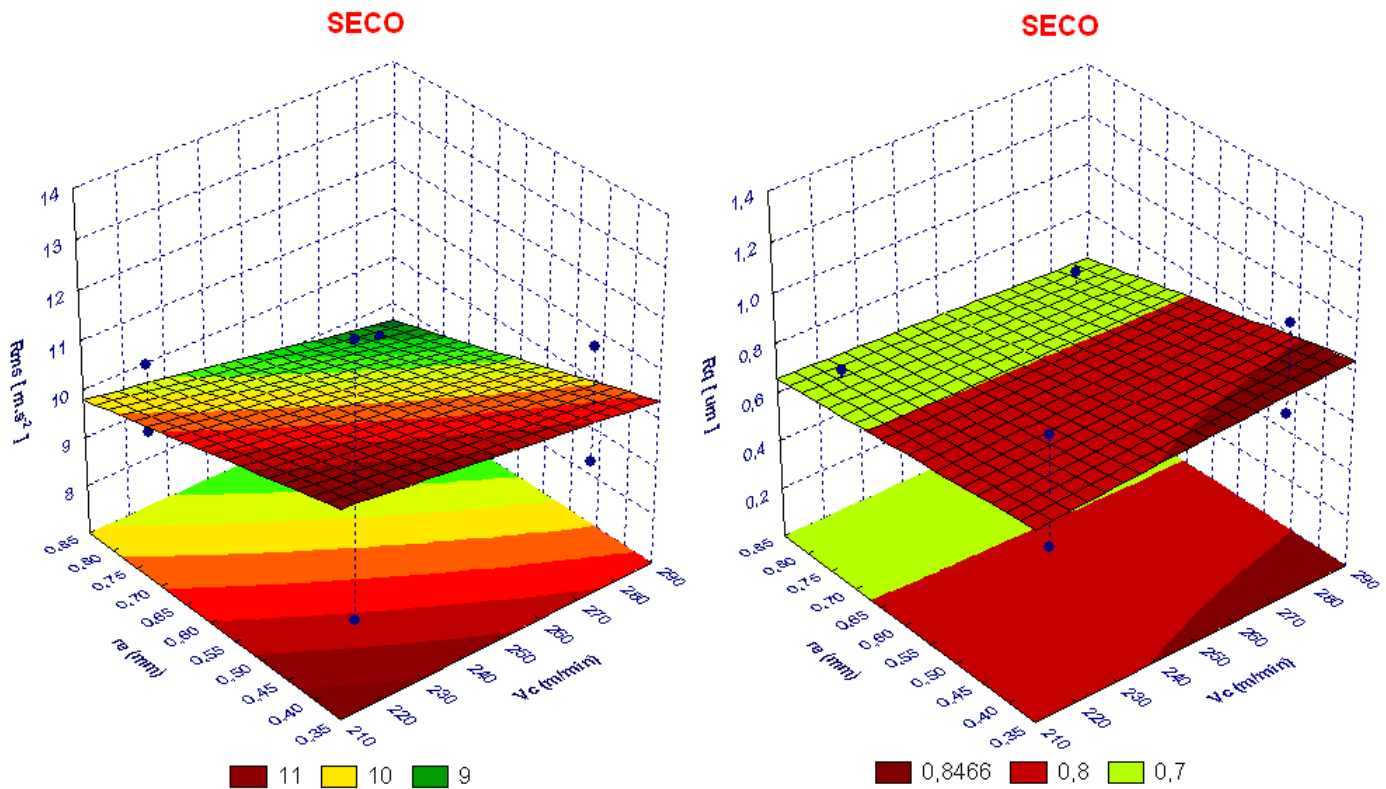


Figura 5.20 – Influência da velocidade de corte e do raio de ponta nos parâmetros Rms de vibração e Rq de rugosidade a seco.

A Fig. 5.20 mostra que para raio de ponta menores e velocidade de corte maiores, há um pequeno aumento na rugosidade, o que ocasiona também um aumento de vibração.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

#### **6.1 – Conclusões**

Em função dos resultados obtidos para os testes de rugosidade e o sinal Rms de vibração, verifica-se que:

- O parâmetro de rugosidade  $R_q$ , foi o que apresentou diferença estatística para os parâmetros de corte utilizados.
- Entre os parâmetros de corte analisados, o avanço é o que apresentou maior influência na rugosidade, seguido do raio de ponta e da velocidade de corte.
- Os testes a seco mostraram uma rugosidade em média maior que os testes com aplicação de MQF.
- Os parâmetros de rugosidade não apresentaram correlação com o sinal Rms de vibração.

#### **6.2 – Sugestões para trabalhos futuros**

- Analisar o comportamento da rugosidade, através do sinal Rms de deslocamento.
- Verificar se existe correlação entre os parâmetros de rugosidade e o sinal de vibração para outro tipo de material.

- Fazer um estudo com outras condições de corte, como: fluido em abundância e gotejamento.
- Desenvolver um novo estudo da influência dos parâmetros de corte na rugosidade com outro tipo de ferramenta e material da peça.

## CAPÍTULO 7

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Mechanical Engineers. ASME B - 46.1-1995; **Surface Texture ( Surface Roughness, Waviness, and Lay )**. 1995. 50p.

Associação Brasileira de Normas e Técnicas. NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto ( GPS ) – Rugosidade: Método do perfil – Termos definições e parâmetros de rugosidade**. Rio de Janeiro, RJ. 2002. 18p.

BARROSO, M. A. S, **Planejamento de Experimentos**. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química”, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M.G., 2003.

BENZATTO, D.A. e KRONKA, S.N., **Experimentação Agrícola**, Funep Unesp, Jaboticabal – SP, pp 245, 1989.

BONIFÁCIO, M.E.R., **Monitoramento do Processo de Torneamento de Acabamento Via Sinais de Vibração**, tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1983.

BOX, G. E. and HUNTER, J.S., **Statistics for Experiments**, Printed in the United States of America, 1978.

BRAGA, D. V., Diniz E. A. e CUPINI, N. L., 1993, **”Monitoramento Indireto da Vida da Ferramenta deTorneamento Usando Parâmetros Elétricos de Máquina Ferramenta”**, J. Of the Braz. Soc.Mechanical Sciences Vol. XV, pp 210-220.

CALDERANI, J. F., 1998, **“Estudo do Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis”**, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP.

CARTER, M. A, **Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro – Telecurso 2000 – Metrologia – Profissionalizante – Aula 19**, 2009. Disponível em: <[http://www.grima.ufsc.br/capp/rugosidade/aula19\\_ParametrosDeRugosidade.pdf](http://www.grima.ufsc.br/capp/rugosidade/aula19_ParametrosDeRugosidade.pdf) >. Acesso em: 28 Novr. de 2010.

DAGNALL, H. **“Exploring Surface Texture”**, 2<sup>nd</sup> edition, Rank Taylor Hobson Limited, England, 1986.

DINIZ, A.E., **“Tecnologia da Usinagem dos Metais”**, ed. Artliber, São Paulo, Brasil, 2006.

DROZDA, T. J.; WICK, C. **“Tools and Manufacturing Engineers Handbook”**, vol. 1: Machining, SME, 1983, pp. 21-40.

Du, R., ELBESTAWI, M. and WU, S. M., 1995 **“ Automated Monitoring of Manufaturing Process Part 1, Monitoring Methods”**. Journal of Engeneering for Industry vol. 117, pp 121 – 131.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 12<sup>a</sup> ed. São Paulo; Edgard Blücher, 2006. 751p.

GEUS, D.; KILLMAIER, T.; WECKENMA, A..**Course for technical universities, Tolerances of form, Geometrical Product Specifications**. 1999. Chapter 8, pp 127-156.

International Organization for Standardization. ISO 3274:1996; **Geometrical product specication (GPS) – Nominal characteristics of contact ( stylus ) instruments**. Switzerland, 1996. 13p.

JUNEJA, B.L.; SWKHON, G.S. **“Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools”**, John Wiley & Sons, New Delhi, Índia, 1987, 462p., ISBN 0 – 470 – 20860 – 0.

LIMA, FRANCISCO E.; CORRÊA MAURÍCIO. **Correlação entre os parâmetros de rugosidade: uma abordagem matemática**, Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 29, n. 1, p. 110-116, jun. 2008.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M., B.; COELHO, R.T.; Abrão, A.M.; **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 1<sup>a</sup> ed. São Paulo; Editora Blücher, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; **Design and Analysis of Experiments**, 5<sup>a</sup> ed., Ed Jonh Wiley & Sons, 2000.

SANTOS, L. B. A.; **“Metodologia via Redes Neurais para a Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento Frontal”**, Tese (em Engenharia Mecânica). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2001.

SANTOS, S. C.; SALES W. F.; **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**, 1<sup>a</sup> ed. São Paulo; Editora Artliber Ltda, 2007.

SATA, T. **“Surface Finish in Metal Cutting”**, Annals of the CIRP, vol. 12 ( 4 ), 1963, pp. 190 – 197.

SCHAFFER, G.H. **“The many Faces of Surface Texture”**, American Machinist and Automated Manufacturing, June 1988, pp. 61 – 68.

SHAW, M. C. **“Metal Cutting Principles”**, Oxford Science Publication, New York, 1984, 594 pags, ISBN, 0 – 19 – 859002 – 4.

SILVA, R.H.L, 2010, **“Monitoramento do Desgaste de Ferramentas no Fresamento de Topo Através dos Sinais de Potência e Emissão Acústicas e Redes Neurais”**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SMITH, G. T. **“Industral Metrology: Surface and Roundness”**, Springer, 2002.

SOUSA, M. M., 1998, **“Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar os Desgastes de Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento”**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUTO, U. B., 2007, **“Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento Via Emissão Acústica”**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

WHITEHOUSE, D. J. **“Review Article: Surface Metrology”**, Meas. Sci. Technol., n 8, pp 955 – 972, 1997.

YOUNG JANG, D., CHO, Y., KIM, H.G. HSIA, A. **Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning**. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 36, No. 4, 1996.

## ANEXO 1

## PRIMEIRO ESTUDO DE CASO

As tabelas abaixo, apresenta as condições de corte empregadas no teste a **Seco transversal** ( paralela à direção de avanço ), profundidade de corte  $a_p = 1,0$  mm e diâmetro da peça  $\varnothing = 94$  mm.

| Teste a SECO transversal |                |             |              |                |        |        |          |
|--------------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste                    | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ra [ $\mu$ m ] |        |        | Ra média |
|                          |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                        | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,45           | 0,46   | 0,44   | 0,45     |
| 2                        | 0,4            | 220         | 0,10         | 0,83           | 0,83   | 0,85   | 0,84     |
| 3                        | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,49           | 0,52   | 0,42   | 0,48     |
| 4                        | 0,4            | 280         | 0,10         | 0,88           | 0,89   | 0,89   | 0,89     |
| 5                        | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,55           | 0,51   | 0,43   | 0,50     |
| 6                        | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,52           | 0,56   | 0,55   | 0,54     |
| 7                        | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,47           | 0,58   | 0,48   | 0,51     |
| 8                        | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,57           | 0,53   | 0,52   | 0,54     |
|                          |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,16     |

| Teste a SECO transversal |                |             |              |                |        |        |          |
|--------------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste                    | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rq [ $\mu$ m ] |        |        | Rq média |
|                          |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                        | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,55           | 0,59   | 0,56   | 0,57     |
| 2                        | 0,4            | 220         | 0,10         | 0,99           | 1      | 1      | 1,00     |
| 3                        | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,63           | 0,65   | 0,53   | 0,60     |
| 4                        | 0,4            | 280         | 0,10         | 1              | 1      | 1,1    | 1,03     |
| 5                        | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,69           | 0,63   | 0,54   | 0,62     |
| 6                        | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,64           | 0,7    | 0,69   | 0,68     |
| 7                        | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,59           | 0,77   | 0,61   | 0,66     |
| 8                        | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,68           | 0,64   | 0,63   | 0,65     |
|                          |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,18     |

| Teste a SECO transversal |                |             |              |                |        |        |          |
|--------------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste                    | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ry [ $\mu$ m ] |        |        | Ry média |
|                          |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                        | 0,4            | 220         | 0,05         | 3,3            | 3,4    | 3,3    | 3,33     |
| 2                        | 0,4            | 220         | 0,10         | 4,4            | 5      | 5      | 4,80     |
| 3                        | 0,4            | 280         | 0,05         | 4,4            | 3,4    | 2,9    | 3,57     |
| 4                        | 0,4            | 280         | 0,10         | 4,4            | 4,2    | 4,2    | 4,27     |
| 5                        | 0,8            | 220         | 0,05         | 3,9            | 3,7    | 4      | 3,87     |
| 6                        | 0,8            | 220         | 0,10         | 2,9            | 3,4    | 3,6    | 3,30     |
| 7                        | 0,8            | 280         | 0,05         | 3,5            | 4,2    | 4,1    | 3,93     |
| 8                        | 0,8            | 280         | 0,10         | 3,4            | 3,1    | 3,5    | 3,33     |
|                          |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,59     |

| Teste a SECO transversal |                  |             |              |               |        |        |           |
|--------------------------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|--------|-----------|
| Teste                    | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rku           |        |        | Rku média |
|                          |                  |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                        | 0,4              | 220         | 0,05         | 3,4           | 4      | 4,4    | 3,93      |
| 2                        | 0,4              | 220         | 0,10         | 2,6           | 2,6    | 2,5    | 2,57      |
| 3                        | 0,4              | 280         | 0,05         | 5,4           | 3      | 3,2    | 3,87      |
| 4                        | 0,4              | 280         | 0,10         | 2,3           | 2,3    | 2,2    | 2,27      |
| 5                        | 0,8              | 220         | 0,05         | 2,9           | 3,4    | 4,3    | 3,53      |
| 6                        | 0,8              | 220         | 0,10         | 2,5           | 2,6    | 2,7    | 2,60      |
| 7                        | 0,8              | 280         | 0,05         | 3,3           | 4,5    | 3,9    | 3,90      |
| 8                        | 0,8              | 280         | 0,10         | 2,4           | 2,5    | 2,5    | 2,47      |
|                          |                  |             |              | Desvio Padrão |        |        | 0,86      |

| Teste a SECO transversal |                  |             |              |               |        |        |           |
|--------------------------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|--------|-----------|
| Teste                    | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rsk           |        |        | Rku média |
|                          |                  |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                        | 0,4              | 220         | 0,05         | 0,2           | 0,84   | 0,94   | 0,66      |
| 2                        | 0,4              | 220         | 0,10         | 0,65          | 0,61   | 0,53   | 0,60      |
| 3                        | 0,4              | 280         | 0,05         | 1,1           | 0,59   | 0,38   | 0,69      |
| 4                        | 0,4              | 280         | 0,10         | 0,53          | 0,56   | 0,57   | 0,55      |
| 5                        | 0,8              | 220         | 0,05         | 0,14          | 0,42   | 0,38   | 0,31      |
| 6                        | 0,8              | 220         | 0,10         | 0,16          | 0,24   | 0,17   | 0,19      |
| 7                        | 0,8              | 280         | 0,05         | 0,15          | 1      | 0,5    | 0,55      |
| 8                        | 0,8              | 280         | 0,10         | 0,33          | 0,46   | 0,39   | 0,39      |
|                          |                  |             |              | Desvio Padrão |        |        | 0,27      |

| Teste a Seco transversal de vibração |                  |             |              |                  |        |        |           |
|--------------------------------------|------------------|-------------|--------------|------------------|--------|--------|-----------|
| Teste                                | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | RMS ( vibração ) |        |        | RMS médio |
|                                      |                  |             |              | Teste            | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                                    | 0,4              | 220         | 0,05         | 8,24             | 9,57   | 10,32  | 9,38      |
| 2                                    | 0,4              | 220         | 0,10         | 13,69            | 14,08  | 13,67  | 13,81     |
| 3                                    | 0,4              | 280         | 0,05         | 9,12             | 9,09   | 9,18   | 9,13      |
| 4                                    | 0,4              | 280         | 0,10         | 11,47            | 11,12  | 11,25  | 11,28     |
| 5                                    | 0,8              | 220         | 0,05         | 9,11             | 13,69  | 10,40  | 11,07     |
| 6                                    | 0,8              | 220         | 0,10         | 10,50            | 10,83  | 10,77  | 10,70     |
| 7                                    | 0,8              | 280         | 0,05         | 8,93             | 9,04   | 9,26   | 9,08      |
| 8                                    | 0,8              | 280         | 0,10         | 8,97             | 9,14   | 9,02   | 9,04      |
|                                      |                  |             |              | Desvio Padrão    |        |        | 1,66      |

## SEGUNDO ESTUDO DE CASO

A tabela abaixo, apresenta as condições de corte empregadas no teste com **MQF transversal** ( paralela à direção de avanço ), profundidade de corte  $a_p = 1,0$  mm e diâmetro da peça  $\varnothing = 94$  mm.

| Teste com MQF transversal |                |             |              |                      |        |        |          |
|---------------------------|----------------|-------------|--------------|----------------------|--------|--------|----------|
| Teste                     | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |        |        | Ra médio |
|                           |                |             |              | Teste                | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                         | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,37                 | 0,38   | 0,36   | 0,37     |
| 2                         | 0,4            | 220         | 0,10         | 0,89                 | 0,86   | 0,95   | 0,90     |
| 3                         | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,41                 | 0,4    | 0,39   | 0,40     |
| 4                         | 0,4            | 280         | 0,10         | 0,82                 | 0,87   | 0,9    | 0,86     |
| 5                         | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,29                 | 0,3    | 0,29   | 0,29     |
| 6                         | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,51                 | 0,56   | 0,6    | 0,56     |
| 7                         | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,6                  | 0,45   | 0,64   | 0,56     |
| 8                         | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,57                 | 0,57   | 0,58   | 0,57     |
|                           |                |             |              | Desvio Padrão        |        |        | 0,21     |

| Teste com MQF transversal |                |             |              |                      |        |        |          |
|---------------------------|----------------|-------------|--------------|----------------------|--------|--------|----------|
| Teste                     | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rq [ $\mu\text{m}$ ] |        |        | Rq médio |
|                           |                |             |              | Teste                | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                         | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,44                 | 0,46   | 0,44   | 0,45     |
| 2                         | 0,4            | 220         | 0,10         | 1,2                  | 1,1    | 1,2    | 1,17     |
| 3                         | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,49                 | 0,47   | 0,47   | 0,48     |
| 4                         | 0,4            | 280         | 0,10         | 1                    | 1,1    | 1,1    | 1,07     |
| 5                         | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,36                 | 0,37   | 0,37   | 0,37     |
| 6                         | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,62                 | 0,67   | 0,71   | 0,67     |
| 7                         | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,74                 | 0,57   | 0,87   | 0,73     |
| 8                         | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,68                 | 0,69   | 0,72   | 0,70     |
|                           |                |             |              | Desvio Padrão        |        |        | 0,28     |

| Teste com MQF transversal |                |             |              |                      |        |        |          |
|---------------------------|----------------|-------------|--------------|----------------------|--------|--------|----------|
| Teste                     | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ry [ $\mu\text{m}$ ] |        |        | Ry médio |
|                           |                |             |              | Teste                | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                         | 0,4            | 220         | 0,05         | 2                    | 2,3    | 2,6    | 2,30     |
| 2                         | 0,4            | 220         | 0,10         | 5,9                  | 5      | 5,5    | 5,47     |
| 3                         | 0,4            | 280         | 0,05         | 2,8                  | 2,3    | 2,8    | 2,63     |
| 4                         | 0,4            | 280         | 0,10         | 5,1                  | 5,2    | 5,5    | 5,27     |
| 5                         | 0,8            | 220         | 0,05         | 1,9                  | 2,4    | 2      | 2,10     |
| 6                         | 0,8            | 220         | 0,10         | 3,2                  | 3,6    | 3,3    | 3,37     |
| 7                         | 0,8            | 280         | 0,05         | 4,3                  | 3,4    | 4,8    | 4,17     |
| 8                         | 0,8            | 280         | 0,10         | 3,3                  | 3,3    | 3,9    | 3,50     |
|                           |                |             |              | Desvio Padrão        |        |        | 1,27     |

| Teste com MQF transversal |                  |             |              |               |        |        |           |
|---------------------------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|--------|-----------|
| Teste                     | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rku           |        |        | Rku médio |
|                           |                  |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                         | 0,4              | 220         | 0,05         | 2,2           | 2,3    | 2,7    | 2,40      |
| 2                         | 0,4              | 220         | 0,10         | 3,5           | 3,2    | 2,9    | 3,20      |
| 3                         | 0,4              | 280         | 0,05         | 2,4           | 2,3    | 2,6    | 2,43      |
| 4                         | 0,4              | 280         | 0,10         | 3,3           | 3,2    | 3      | 3,17      |
| 5                         | 0,8              | 220         | 0,05         | 3,1           | 3      | 3,1    | 3,07      |
| 6                         | 0,8              | 220         | 0,10         | 2,5           | 2,3    | 2,1    | 2,30      |
| 7                         | 0,8              | 280         | 0,05         | 3,1           | 5,6    | 6,7    | 5,13      |
| 8                         | 0,8              | 280         | 0,10         | 2,5           | 2,8    | 3      | 2,77      |
|                           |                  |             |              | Desvio Padrão |        |        | 1,04      |

| Teste com MQF transversal |                  |             |              |               |        |        |           |
|---------------------------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|--------|-----------|
| Teste                     | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rsk           |        |        | Rsk médio |
|                           |                  |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                         | 0,4              | 220         | 0,05         | 0,34          | 0,32   | 0,41   | 0,36      |
| 2                         | 0,4              | 220         | 0,10         | 0,99          | 0,85   | 0,74   | 0,86      |
| 3                         | 0,4              | 280         | 0,05         | 0,14          | 0,34   | 0,21   | 0,23      |
| 4                         | 0,4              | 280         | 0,10         | 0,99          | 0,98   | 0,88   | 0,95      |
| 5                         | 0,8              | 220         | 0,05         | -0,015        | -0,19  | 0,11   | -0,03     |
| 6                         | 0,8              | 220         | 0,10         | 0,41          | 0,44   | 0,22   | 0,36      |
| 7                         | 0,8              | 280         | 0,05         | 0,65          | 1,1    | 1,6    | 1,12      |
| 8                         | 0,8              | 280         | 0,10         | 0,62          | 0,73   | 0,7    | 0,68      |
|                           |                  |             |              | Desvio Padrão |        |        | 0,41      |

| Teste com MQF transversal de vibração |                  |             |              |                  |        |        |           |
|---------------------------------------|------------------|-------------|--------------|------------------|--------|--------|-----------|
| Teste                                 | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | RMS ( vibração ) |        |        | RMS médio |
|                                       |                  |             |              | Teste            | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                                     | 0,4              | 220         | 0,05         | 7,03             | 8,65   | 9,05   | 8,24      |
| 2                                     | 0,4              | 220         | 0,10         | 11,70            | 12,46  | 12,19  | 12,12     |
| 3                                     | 0,4              | 280         | 0,05         | 8,09             | 8,04   | 8,32   | 8,15      |
| 4                                     | 0,4              | 280         | 0,10         | 10,30            | 10,00  | 10,02  | 10,11     |
| 5                                     | 0,8              | 220         | 0,05         | 8,34             | 11,70  | 9,94   | 9,99      |
| 6                                     | 0,8              | 220         | 0,10         | 8,62             | 8,83   | 8,51   | 8,65      |
| 7                                     | 0,8              | 280         | 0,05         | 7,46             | 7,45   | 7,78   | 7,56      |
| 8                                     | 0,8              | 280         | 0,10         | 7,62             | 7,33   | 7,05   | 7,33      |
|                                       |                  |             |              | Desvio Padrão    |        |        | 1,61      |

### TERCEIRO ESTUDO DE CASO

As tabelas abaixo, apresenta as condições de corte empregadas no teste a **Seco radial** ( perpendicular à direção de avanço ), profundidade de corte  $a_p = 1,0$  mm e diâmetro da peça  $\varnothing = 94$  mm.

| Teste a Seco radial |                |             |              |                |        |        |          |
|---------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste               | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ra [ $\mu$ m ] |        |        | Ra médio |
|                     |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                   | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,23           | 0,26   | 0,24   | 0,24     |
| 2                   | 0,4            | 220         | 0,10         | 0,23           | 0,26   | 0,23   | 0,24     |
| 3                   | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,23           | 0,23   | 0,24   | 0,23     |
| 4                   | 0,4            | 280         | 0,10         | 0,24           | 0,25   | 0,24   | 0,24     |
| 5                   | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,23           | 0,24   | 0,23   | 0,23     |
| 6                   | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,24           | 0,23   | 0,23   | 0,23     |
| 7                   | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,24           | 0,24   | 0,23   | 0,24     |
| 8                   | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,23           | 0,24   | 0,23   | 0,23     |
|                     |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,00     |

| Teste a Seco radial |                |             |              |                |        |        |          |
|---------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste               | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ry [ $\mu$ m ] |        |        | Ry médio |
|                     |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                   | 0,4            | 220         | 0,05         | 1,2            | 1,6    | 1,2    | 1,33     |
| 2                   | 0,4            | 220         | 0,10         | 1,1            | 1,8    | 1,1    | 1,33     |
| 3                   | 0,4            | 280         | 0,05         | 1,2            | 1,1    | 1,2    | 1,17     |
| 4                   | 0,4            | 280         | 0,10         | 1,2            | 1,6    | 1,4    | 1,40     |
| 5                   | 0,8            | 220         | 0,05         | 1,1            | 1,2    | 1,3    | 1,20     |
| 6                   | 0,8            | 220         | 0,10         | 1,3            | 1      | 1,1    | 1,13     |
| 7                   | 0,8            | 280         | 0,05         | 1,1            | 1,1    | 1,1    | 1,10     |
| 8                   | 0,8            | 280         | 0,10         | 1,2            | 1,1    | 1,2    | 1,17     |
|                     |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,11     |

| Teste a Seco radial |                |             |              |                |        |        |          |
|---------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste               | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rq [ $\mu$ m ] |        |        | Rq médio |
|                     |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                   | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,27           | 0,32   | 0,28   | 0,29     |
| 2                   | 0,4            | 220         | 0,10         | 0,27           | 0,31   | 0,27   | 0,28     |
| 3                   | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,27           | 0,27   | 0,28   | 0,27     |
| 4                   | 0,4            | 280         | 0,10         | 0,28           | 0,31   | 0,3    | 0,30     |
| 5                   | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,27           | 0,28   | 0,28   | 0,28     |
| 6                   | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,28           | 0,27   | 0,27   | 0,27     |
| 7                   | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,28           | 0,28   | 0,28   | 0,28     |
| 8                   | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,27           | 0,28   | 0,28   | 0,28     |
|                     |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,01     |

| Teste a Seco radial |                  |             |              |               |        |        |          |
|---------------------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|--------|----------|
| Teste               | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rku           |        |        | Ra médio |
|                     |                  |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                   | 0,4              | 220         | 0,05         | 2             | 2,6    | 2      | 2,20     |
| 2                   | 0,4              | 220         | 0,10         | 1,9           | 4      | 2      | 2,63     |
| 3                   | 0,4              | 280         | 0,05         | 2             | 2      | 2,1    | 2,03     |
| 4                   | 0,4              | 280         | 0,10         | 2             | 2,7    | 2,4    | 2,37     |
| 5                   | 0,8              | 220         | 0,05         | 2             | 2      | 2,1    | 2,03     |
| 6                   | 0,8              | 220         | 0,10         | 2,1           | 1,9    | 2      | 2,00     |
| 7                   | 0,8              | 280         | 0,05         | 2,1           | 2      | 2      | 2,03     |
| 8                   | 0,8              | 280         | 0,10         | 2             | 1,9    | 2,1    | 2,00     |
|                     |                  |             |              | Desvio Padrão |        |        | 0,23     |

| Teste a Seco radial |                  |             |              |               |        |         |          |
|---------------------|------------------|-------------|--------------|---------------|--------|---------|----------|
| Teste               | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rsk           |        |         | Ra médio |
|                     |                  |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2  |          |
| 1                   | 0,4              | 220         | 0,05         | -0,023        | 0,22   | 0,051   | 0,08     |
| 2                   | 0,4              | 220         | 0,10         | -0,012        | -0,62  | -0,058  | -0,23    |
| 3                   | 0,4              | 280         | 0,05         | -0,19         | 0,049  | -0,0073 | -0,05    |
| 4                   | 0,4              | 280         | 0,10         | 0,12          | -0,15  | -0,012  | -0,01    |
| 5                   | 0,8              | 220         | 0,05         | 0,033         | -0,086 | 0,071   | 0,01     |
| 6                   | 0,8              | 220         | 0,10         | -0,091        | 0,062  | -0,02   | -0,02    |
| 7                   | 0,8              | 280         | 0,05         | 0,053         | 0,13   | 0,079   | 0,09     |
| 8                   | 0,8              | 280         | 0,10         | 0,088         | 0,063  | -0,023  | 0,04     |
|                     |                  |             |              | Desvio Padrão |        |         | 0,10     |

| Teste a Seco radial de vibração |                  |             |              |                  |        |        |           |
|---------------------------------|------------------|-------------|--------------|------------------|--------|--------|-----------|
| Teste                           | $r_{\xi}$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | RMS ( vibração ) |        |        | RMS médio |
|                                 |                  |             |              | Teste            | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                               | 0,4              | 220         | 0,05         | 8,24             | 9,57   | 10,32  | 9,38      |
| 2                               | 0,4              | 220         | 0,10         | 13,69            | 14,08  | 13,67  | 13,81     |
| 3                               | 0,4              | 280         | 0,05         | 9,12             | 9,09   | 9,18   | 9,13      |
| 4                               | 0,4              | 280         | 0,10         | 11,47            | 11,12  | 11,25  | 11,28     |
| 5                               | 0,8              | 220         | 0,05         | 9,11             | 13,69  | 10,40  | 11,07     |
| 6                               | 0,8              | 220         | 0,10         | 10,50            | 10,83  | 10,77  | 10,70     |
| 7                               | 0,8              | 280         | 0,05         | 8,93             | 9,04   | 9,26   | 9,08      |
| 8                               | 0,8              | 280         | 0,10         | 8,97             | 9,14   | 9,02   | 9,04      |
|                                 |                  |             |              | Desvio Padrão    |        |        | 1,66      |

### QUARTO ESTUDO DE CASO

As tabelas abaixo, apresenta as condições de corte empregadas no teste com **MQF radial** ( perpendicular à direção de avanço ), profundidade de corte  $a_p = 1,0$  mm e diâmetro da peça  $\varnothing = 94$  mm.

| Teste com MQF radial |                |             |              |                |        |        |          |
|----------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste                | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ra [ $\mu$ m ] |        |        | Ra médio |
|                      |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                    | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,23           | 0,23   | 0,23   | 0,23     |
| 2                    | 0,4            | 220         | 0,10         | 0,23           | 0,23   | 0,23   | 0,23     |
| 3                    | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,23           | 0,24   | 0,23   | 0,23     |
| 4                    | 0,4            | 280         | 0,10         | 0,24           | 0,23   | 0,23   | 0,23     |
| 5                    | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,23           | 0,24   | 0,24   | 0,24     |
| 6                    | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,23           | 0,23   | 0,24   | 0,23     |
| 7                    | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,24           | 0,23   | 0,24   | 0,24     |
| 8                    | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,23           | 0,23   | 0,24   | 0,23     |
|                      |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,00     |

| Teste com MQF radial |                |             |              |                |        |        |          |
|----------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste                | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Ry [ $\mu$ m ] |        |        | Ry médio |
|                      |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                    | 0,4            | 220         | 0,05         | 1,1            | 1      | 1,1    | 1,07     |
| 2                    | 0,4            | 220         | 0,10         | 1              | 1      | 1      | 1,00     |
| 3                    | 0,4            | 280         | 0,05         | 1,2            | 1,3    | 1,1    | 1,20     |
| 4                    | 0,4            | 280         | 0,10         | 1,3            | 1,1    | 1,1    | 1,17     |
| 5                    | 0,8            | 220         | 0,05         | 1,3            | 1,2    | 1,2    | 1,23     |
| 6                    | 0,8            | 220         | 0,10         | 1,1            | 1,2    | 1,3    | 1,20     |
| 7                    | 0,8            | 280         | 0,05         | 1,3            | 1,2    | 1,1    | 1,20     |
| 8                    | 0,8            | 280         | 0,10         | 1,1            | 1,1    | 1,2    | 1,13     |
|                      |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,08     |

| Teste com MQF radial |                |             |              |                |        |        |          |
|----------------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------|--------|----------|
| Teste                | $r_\xi$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rq [ $\mu$ m ] |        |        | Rq médio |
|                      |                |             |              | Teste          | Rep. 1 | Rep. 2 |          |
| 1                    | 0,4            | 220         | 0,05         | 0,27           | 0,27   | 0,27   | 0,27     |
| 2                    | 0,4            | 220         | 0,10         | 0,27           | 0,27   | 0,27   | 0,27     |
| 3                    | 0,4            | 280         | 0,05         | 0,27           | 0,28   | 0,27   | 0,27     |
| 4                    | 0,4            | 280         | 0,10         | 0,28           | 0,28   | 0,27   | 0,28     |
| 5                    | 0,8            | 220         | 0,05         | 0,28           | 0,29   | 0,28   | 0,28     |
| 6                    | 0,8            | 220         | 0,10         | 0,28           | 0,27   | 0,28   | 0,28     |
| 7                    | 0,8            | 280         | 0,05         | 0,29           | 0,28   | 0,27   | 0,28     |
| 8                    | 0,8            | 280         | 0,10         | 0,27           | 0,27   | 0,28   | 0,27     |
|                      |                |             |              | Desvio Padrão  |        |        | 0,00     |

| Teste com MQF radial |              |             |              |               |        |        |           |
|----------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|--------|--------|-----------|
| Teste                | $r_z$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rku           |        |        | Rku médio |
|                      |              |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                    | 0,4          | 220         | 0,05         | 2             | 1,9    | 2      | 1,97      |
| 2                    | 0,4          | 220         | 0,10         | 1,9           | 1,9    | 1,9    | 1,90      |
| 3                    | 0,4          | 280         | 0,05         | 2,1           | 2,1    | 1,9    | 2,03      |
| 4                    | 0,4          | 280         | 0,10         | 2,1           | 2      | 1,9    | 2,00      |
| 5                    | 0,8          | 220         | 0,05         | 2,2           | 2,1    | 2,1    | 2,13      |
| 6                    | 0,8          | 220         | 0,10         | 2             | 2,1    | 2,1    | 2,07      |
| 7                    | 0,8          | 280         | 0,05         | 2,1           | 2,2    | 1,9    | 2,07      |
| 8                    | 0,8          | 280         | 0,10         | 2             | 1,9    | 2      | 1,97      |
|                      |              |             |              | Desvio Padrão |        |        | 0,07      |

| Teste com MQF radial |              |             |              |               |        |        |           |
|----------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|--------|--------|-----------|
| Teste                | $r_z$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | Rsk           |        |        | Rsk médio |
|                      |              |             |              | Teste         | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                    | 0,4          | 220         | 0,05         | -0,033        | 0,072  | 0,11   | 0,05      |
| 2                    | 0,4          | 220         | 0,10         | -0,0067       | -0,041 | 0,14   | 0,03      |
| 3                    | 0,4          | 280         | 0,05         | 0,0047        | 0,099  | -0,038 | 0,02      |
| 4                    | 0,4          | 280         | 0,10         | 0,025         | -0,04  | -0,015 | -0,01     |
| 5                    | 0,8          | 220         | 0,05         | 0,097         | -0,063 | -0,029 | 0,00      |
| 6                    | 0,8          | 220         | 0,10         | -0,0089       | 0,11   | 0,019  | 0,04      |
| 7                    | 0,8          | 280         | 0,05         | 0,13          | -0,12  | 0,091  | 0,03      |
| 8                    | 0,8          | 280         | 0,10         | -0,0075       | -0,044 | -0,14  | -0,06     |
|                      |              |             |              | Desvio Padrão |        |        | 0,04      |

| Teste com MQF radial de vibração |              |             |              |                  |        |        |           |
|----------------------------------|--------------|-------------|--------------|------------------|--------|--------|-----------|
| Teste                            | $r_z$ ( mm ) | Vc ( m/min) | f ( mm/min ) | RMS ( vibração ) |        |        | RMS médio |
|                                  |              |             |              | Teste            | Rep. 1 | Rep. 2 |           |
| 1                                | 0,4          | 220         | 0,05         | 7,03             | 8,65   | 9,05   | 8,24      |
| 2                                | 0,4          | 220         | 0,10         | 11,70            | 12,46  | 12,19  | 12,12     |
| 3                                | 0,4          | 280         | 0,05         | 8,09             | 8,04   | 8,32   | 8,15      |
| 4                                | 0,4          | 280         | 0,10         | 10,30            | 10,00  | 10,02  | 10,11     |
| 5                                | 0,8          | 220         | 0,05         | 8,34             | 11,70  | 9,94   | 9,99      |
| 6                                | 0,8          | 220         | 0,10         | 8,62             | 8,83   | 8,51   | 8,65      |
| 7                                | 0,8          | 280         | 0,05         | 7,46             | 7,45   | 7,78   | 7,56      |
| 8                                | 0,8          | 280         | 0,10         | 7,62             | 7,33   | 7,05   | 7,33      |
|                                  |              |             |              | Desvio Padrão    |        |        | 1,61      |

## ANEXO 2

As tabelas abaixo, mostram o quadro de análise de variância ( ANOVA ) para todos os resultados obtidos dos efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade superficial, confirmando ou não o efeito dos mesmos na rugosidade.

Tabela 1. Quadro de ANOVA para o teste **Ra** a **SECO Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| 1 e 2                  | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| 1 e 3                  | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| 2 e 3                  | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| Erro                   | 0,000112 | 1   | 0,000112 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,000187 | 7   |          |          |          |

Tabela 2. Quadro de ANOVA para o teste **Rq** a **SECO Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,000013 | 1   | 0,000013 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| 1 e 2                  | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| 1 e 3                  | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| 2 e 3                  | 0,000013 | 1   | 0,000013 | 0,111111 | 0,795167 |
| Erro                   | 0,000112 | 1   | 0,000112 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,000187 | 7   |          |          |          |

Tabela 3. Quadro de ANOVA para o teste **Ry** a **SECO Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,005000 | 1   | 0,005000 | 1,000000 | 0,500000 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 1,000000 | 1,000000 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 1,000000 | 1,000000 |
| 1 e 2                  | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 1,000000 | 1,000000 |
| 1 e 3                  | 0,020000 | 1   | 0,020000 | 1,000000 | 0,295167 |
| 2 e 3                  | 0,005000 | 1   | 0,005000 | 1,000000 | 0,500000 |
| Erro                   | 0,005000 | 1   | 0,005000 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,035000 | 7   |          |          |          |

Tabela 4. Quadro de ANOVA para o teste **Rku** a **SECO Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,001250 | 1   | 0,001250 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,001250 | 1   | 0,001250 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,001250 | 1   | 0,001250 | 1,000000 | 0,795167 |
| 1 e 2                  | 0,001250 | 1   | 0,001250 | 0,111111 | 0,795167 |
| 1 e 3                  | 0,001250 | 1   | 0,001250 | 0,111111 | 0,795167 |
| 2 e 3                  | 0,001250 | 1   | 0,001250 | 0,111111 | 0,795167 |
| Erro                   | 0,011250 | 1   | 0,011250 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,028750 | 7   |          |          |          |

Tabela 5. Quadro de ANOVA para o teste **Rsk** a **SECO Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,006728 | 1   | 0,006728 | 2,74612  | 0,345653 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,003362 | 1   | 0,003362 | 1,37224  | 0,449845 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,004418 | 1   | 0,004418 | 1,80327  | 0,407493 |
| 1 e 2                  | 0,026220 | 1   | 0,026220 | 10,70224 | 0,188858 |
| 1 e 3                  | 0,021013 | 1   | 0,021013 | 8,57653  | 0,209480 |
| 2 e 3                  | 0,006844 | 1   | 0,006844 | 2,79367  | 0,343241 |
| Erro                   | 0,002450 | 1   | 0,002450 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,071035 | 7   |          |          |          |

Tabela 6. Quadro de ANOVA para o teste **RMS de vibração a SECO Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 10,65465 | 1   | 10,65465 | 27,57355 | 0,119802 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 1,16709  | 1   | 1,16709  | 3,02034  | 0,332403 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 3,14227  | 1   | 3,14227  | 8,13200  | 0,214715 |
| 1 e 2                  | 2,46642  | 1   | 2,46642  | 6,38294  | 0,239937 |
| 1 e 3                  | 5,07562  | 1   | 5,07562  | 13,13537 | 0,171390 |
| 2 e 3                  | 0,01600  | 1   | 0,01600  | 0,04141  | 0,872191 |
| Erro                   | 0,38641  | 1   | 0,38641  |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 22,90846 | 7   |          |          |          |

Tabela 7. Quadro de ANOVA para o teste **Ra com MQF Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 0,000000 | 1,000000 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000050 | 1   | 0,000050 | 1,000000 | 0,500000 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 0,000000 | 1,000000 |
| 1 e 2                  | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 0,000000 | 1,000000 |
| 1 e 3                  | 0,000050 | 1   | 0,000050 | 1,000000 | 0,500000 |
| 2 e 3                  | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 0,000000 | 1,000000 |
| Erro                   | 0,000050 | 1   | 0,000050 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,000150 | 7   |          |          |          |

Tabela 8. Quadro de ANOVA para o teste **Rq com MQF Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 1,000000 | 0,500000 |
| 1 e 2                  | 0,000012 | 1   | 0,000012 | 0,111111 | 0,795167 |
| 1 e 3                  | 0,000112 | 1   | 0,000112 | 1,000000 | 0,500000 |
| 2 e 3                  | 0,000013 | 1   | 0,000013 | 0,111111 | 0,795167 |
| Erro                   | 0,000112 | 1   | 0,000112 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,000387 | 7   |          |          |          |

Tabela 9. Quadro de ANOVA para o teste **Ry** com **MQF Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,020000 | 1   | 0,020000 | 4,000000 | 0,295167 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,020000 | 1   | 0,020000 | 4,000000 | 0,295167 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,005000 | 1   | 0,005000 | 1,000000 | 0,500000 |
| 1 e 2                  | 0,005000 | 1   | 0,005000 | 1,000000 | 0,500000 |
| 1 e 3                  | 0,020000 | 1   | 0,020000 | 4,000000 | 0,295167 |
| 2 e 3                  | 0,020000 | 1   | 0,020000 | 4,000000 | 0,295167 |
| Erro                   | 0,005000 | 1   | 0,005000 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,095000 | 7   |          |          |          |

Tabela 10. Quadro de ANOVA para o teste **Rku** com **MQF Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F | P |
|------------------------|----------|-----|----------|---|---|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,020000 | 1   | 0,020000 | - | - |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,005000 | 1   | 0,005000 | - | - |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,005000 | 1   | 0,005000 | - | - |
| 1 e 2                  | 0,005000 | 1   | 0,005000 | - | - |
| 1 e 3                  | 0,005000 | 1   | 0,005000 | - | - |
| 2 e 3                  | 0,020000 | 1   | 0,020000 | - | - |
| Erro                   | 0,000000 | 1   | 0,000000 |   |   |
| <b>TOTAL</b>           | 0,060000 | 7   |          |   |   |

Tabela 11. Quadro de ANOVA para o teste **Rsk** com **MQF Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,004841 | 1   | 0,004841 | 59,09777 | 0,082350 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,001347 | 1   | 0,001347 | 16,4405  | 0,153936 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,006083 | 1   | 0,006083 | 74,2559  | 0,073549 |
| 1 e 2                  | 0,000177 | 1   | 0,000177 | 2,1572   | 0,380545 |
| 1 e 3                  | 0,010512 | 1   | 0,010512 | 128,3264 | 0,056053 |
| 2 e 3                  | 0,000153 | 1   | 0,000153 | 1,8692   | 0,402031 |
| Erro                   | 0,000082 | 1   | 0,000082 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,023195 | 7   |          |          |          |

Tabela 12. Quadro de ANOVA para o teste **RMS de vibração** com **MQF Radial**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 6,715929 | 1   | 6,715929 | 9,786208 | 0,196969 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,619663 | 1   | 0,619663 | 0,902950 | 0,516241 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 3,226435 | 1   | 3,226435 | 4,701444 | 0,275099 |
| 1 e 2                  | 0,847277 | 1   | 0,847277 | 1,234621 | 0,466518 |
| 1 e 3                  | 5,171167 | 1   | 5,171167 | 7,535237 | 0,222404 |
| 2 e 3                  | 0,297645 | 1   | 0,297645 | 0,433717 | 0,629247 |
| Erro                   | 0,686265 | 1   | 0,686265 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 17,56438 | 7   |          |          |          |

Tabela 13. Quadro de ANOVA para o teste **Ra a SECO Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F         | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|-----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,088200 | 1   | 0,088200 | 49,000000 | 0,090334 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000450 | 1   | 0,000450 | 0,2500000 | 0,704833 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,036450 | 1   | 0,036450 | 20,50000  | 0,139209 |
| 1 e 2                  | 0,002450 | 1   | 0,002450 | 1,361110  | 0,451125 |
| 1 e 3                  | 0,061250 | 1   | 0,061250 | 34,02778  | 0,108084 |
| 2 e 3                  | 0,001800 | 1   | 0,001800 | 1,000000  | 0,500000 |
| Erro                   | 0,001800 | 1   | 0,001800 |           |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,192400 | 7   |          |           |          |

Tabela 14. Quadro de ANOVA para o teste **Rq a SECO Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F         | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|-----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,090312 | 1   | 0,090312 | 16,38322  | 0,154195 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000112 | 1   | 0,000112 | 0,020410  | 0,909666 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,040612 | 1   | 0,040612 | 7,367350  | 0,224721 |
| 1 e 2                  | 0,000613 | 1   | 0,000613 | 0,111111  | 0,795167 |
| 1 e 3                  | 0,074112 | 1   | 0,074112 | 13,444444 | 0,169501 |
| 2 e 3                  | 0,002812 | 1   | 0,002812 | 0,510200  | 0,605137 |
| Erro                   | 0,005513 | 1   | 0,005513 |           |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,214087 | 7   |          |           |          |

Tabela 15. Quadro de ANOVA para o teste **Ry** a **SECO Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 0,000000 | 1,000000 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,180000 | 1   | 0,180000 | 0,360000 | 0,655958 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,980000 | 1   | 0,980000 | 1,960000 | 0,394863 |
| 1 e 2                  | 0,005000 | 1   | 0,005000 | 0,010000 | 0,936549 |
| 1 e 3                  | 0,605000 | 1   | 0,605000 | 1,210000 | 0,469708 |
| 2 e 3                  | 0,125000 | 1   | 0,125000 | 0,250000 | 0,704833 |
| Erro                   | 0,500000 | 1   | 0,500000 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 2,395000 | 7   |          |          |          |

Tabela 16. Quadro de ANOVA para o teste **Rku** a **SECO Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 3,380000 | 1   | 3,380000 | 8,345679 | 0,212150 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,500000 | 1   | 0,500000 | 1,234568 | 0,466525 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,845000 | 1   | 0,845000 | 2,086420 | 0,385502 |
| 1 e 2                  | 0,980000 | 1   | 0,980000 | 2,419753 | 0,363725 |
| 1 e 3                  | 0,845000 | 1   | 0,845000 | 2,086420 | 0,385502 |
| 2 e 3                  | 0,245000 | 1   | 0,245000 | 0,604938 | 0,579167 |
| Erro                   | 0,405000 | 1   | 0,405000 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 7,200000 | 7   |          |          |          |

Tabela 17. Quadro de ANOVA para o teste **Rsk** a **SECO Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,000800 | 1   | 0,000800 | 0,004596 | 0,956905 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,115200 | 1   | 0,115200 | 0,661879 | 0,565218 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,361250 | 1   | 0,361250 | 2,075553 | 0,386280 |
| 1 e 2                  | 0,092450 | 1   | 0,092450 | 0,531169 | 0,599055 |
| 1 e 3                  | 0,012800 | 1   | 0,012800 | 0,073542 | 0,831412 |
| 2 e 3                  | 0,045000 | 1   | 0,045000 | 0,258546 | 0,700531 |
| Erro                   | 0,174050 | 1   | 0,174050 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,801550 | 7   |          |          |          |

Tabela 18. Quadro de ANOVA para o teste **RMS** de vibração a **SECO Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 10,65465 | 1   | 10,65465 | 27,57355 | 0,119802 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 1,16709  | 1   | 1,16709  | 3,02034  | 0,332403 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 3,14227  | 1   | 3,14227  | 8,13200  | 0,214715 |
| 1 e 2                  | 2,46642  | 1   | 2,46642  | 6,38294  | 0,239937 |
| 1 e 3                  | 5,07562  | 1   | 5,07562  | 13,13537 | 0,171390 |
| 2 e 3                  | 0,01600  | 1   | 0,01600  | 0,04141  | 0,872191 |
| Erro                   | 0,38641  | 1   | 0,38641  |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 22,90846 | 7   |          |          |          |

Tabela 19. Quadro de ANOVA para o teste **Ra** com **MQF Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F         | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|-----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,156800 | 1   | 0,156800 | 64,000000 | 0,079167 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,014450 | 1   | 0,014450 | 5,897960  | 0,248668 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,033800 | 1   | 0,033800 | 13,795920 | 0,167428 |
| 1 e 2                  | 1,016200 | 1   | 1,016200 | 6,612240  | 0,236117 |
| 1 e 3                  | 0,068450 | 1   | 0,068450 | 27,938780 | 0,119035 |
| 2 e 3                  | 0,020000 | 1   | 0,020000 | 8,163270  | 0,214334 |
| Erro                   | 0,002450 | 1   | 0,002450 |           |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,312150 | 7   |          |           |          |

Tabela 20. Quadro de ANOVA para o teste **Rq** com **MQF Transversal**.

| FATOR                  | SQ              | GDL      | MQ              | F               | P               |
|------------------------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | <b>0,270112</b> | <b>1</b> | <b>0,270112</b> | <b>441,0000</b> | <b>0,030292</b> |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,010512        | 1        | 0,010512        | 17,1633         | 0,150783        |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,066613        | 1        | 0,066613        | 108,7551        | 0,060860        |
| 1 e 2                  | 0,040613        | 1        | 0,040613        | 66,3061         | 0,077792        |
| 1 e 3                  | <b>0,143113</b> | <b>1</b> | <b>0,143113</b> | <b>233,6531</b> | <b>0,041589</b> |
| 2 e 3                  | 0,043513        | 1        | 0,043513        | 71,0408         | 0,075180        |
| Erro                   | 0,000613        | 1        | 0,000613        |                 |                 |
| <b>TOTAL</b>           | 0,575088        | 7        |                 |                 |                 |

Tabela 21. Quadro de ANOVA para o teste **Ry** com **MQF Transversal**.

| FATOR                  | SQ        | GDL | MQ       | F         | P        |
|------------------------|-----------|-----|----------|-----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 5,281250  | 1   | 5,281250 | 86,224490 | 0,068296 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,781250  | 1   | 0,781250 | 12,755100 | 0,173803 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 1,201250  | 1   | 1,201250 | 19,612240 | 0,141382 |
| 1 e 2                  | 1,901250  | 1   | 1,901250 | 31,040820 | 0,113061 |
| 1 e 3                  | 4,351250  | 1   | 4,351250 | 71,040820 | 0,075180 |
| 2 e 3                  | 0,781250  | 1   | 0,781250 | 12,755100 | 0,173803 |
| Erro                   | 0,061250  | 1   | 0,061250 |           |          |
| <b>TOTAL</b>           | 14,358750 | 7   |          |           |          |

Tabela 22. Quadro de ANOVA para o teste **Rku** com **MQF Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F         | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|-----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,125000 | 1   | 0,125000 | 6,250000  | 0,242238 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 0,000000  | 1,000000 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,005000 | 1   | 0,005000 | 0,250000  | 0,704833 |
| 1 e 2                  | 0,020000 | 1   | 0,020000 | 1,000000  | 0,500000 |
| 1 e 3                  | 1,445000 | 1   | 1,445000 | 72,250000 | 0,074554 |
| 2 e 3                  | 0,000000 | 1   | 0,000000 | 0,000000  | 1,000000 |
| Erro                   | 0,020000 | 1   | 0,020000 |           |          |
| <b>TOTAL</b>           | 1,615000 | 7   |          |           |          |

Tabela 23. Quadro de ANOVA para o teste **Rsk** com **MQF Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 0,448878 | 1   | 0,448878 | 8,370200 | 0,211861 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,056953 | 1   | 0,056953 | 1,062001 | 0,490427 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 0,079003 | 1   | 0,079003 | 1,473166 | 0,438723 |
| 1 e 2                  | 0,008128 | 1   | 0,008128 | 0,151565 | 0,763649 |
| 1 e 3                  | 0,152628 | 1   | 0,152628 | 2,846046 | 0,340642 |
| 2 e 3                  | 0,144453 | 1   | 0,144453 | 2,693608 | 0,348378 |
| Erro                   | 0,053628 | 1   | 0,053628 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 0,943672 | 7   |          |          |          |

Tabela 24. Quadro de ANOVA para o teste **RMS de vibração** com **MQF Transversal**.

| FATOR                  | SQ       | GDL | MQ       | F        | P        |
|------------------------|----------|-----|----------|----------|----------|
| ( 1 ) f ( mm/volta )   | 6,715929 | 1   | 6,715929 | 9,786208 | 0,196969 |
| ( 2 ) Vc ( m/min)      | 0,619663 | 1   | 0,619663 | 0,902950 | 0,516241 |
| ( 3 ) $r_{\xi}$ ( mm ) | 3,226435 | 1   | 3,226435 | 4,701444 | 0,275099 |
| 1 e 2                  | 0,847277 | 1   | 0,847277 | 1,234621 | 0,466518 |
| 1 e 3                  | 5,171167 | 1   | 5,171167 | 7,535237 | 0,222404 |
| 2 e 3                  | 0,297645 | 1   | 0,297645 | 0,433717 | 0,629247 |
| Erro                   | 0,686265 | 1   | 0,686265 |          |          |
| <b>TOTAL</b>           | 17,56438 | 7   |          |          |          |

### ANEXO 3

As figuras abaixo mostram os gráficos de superfície, e destacando os parâmetros de corte (Avanço, velocidade de corte e raio de ponta da ferramenta ) e suas influências na rugosidade superficial.

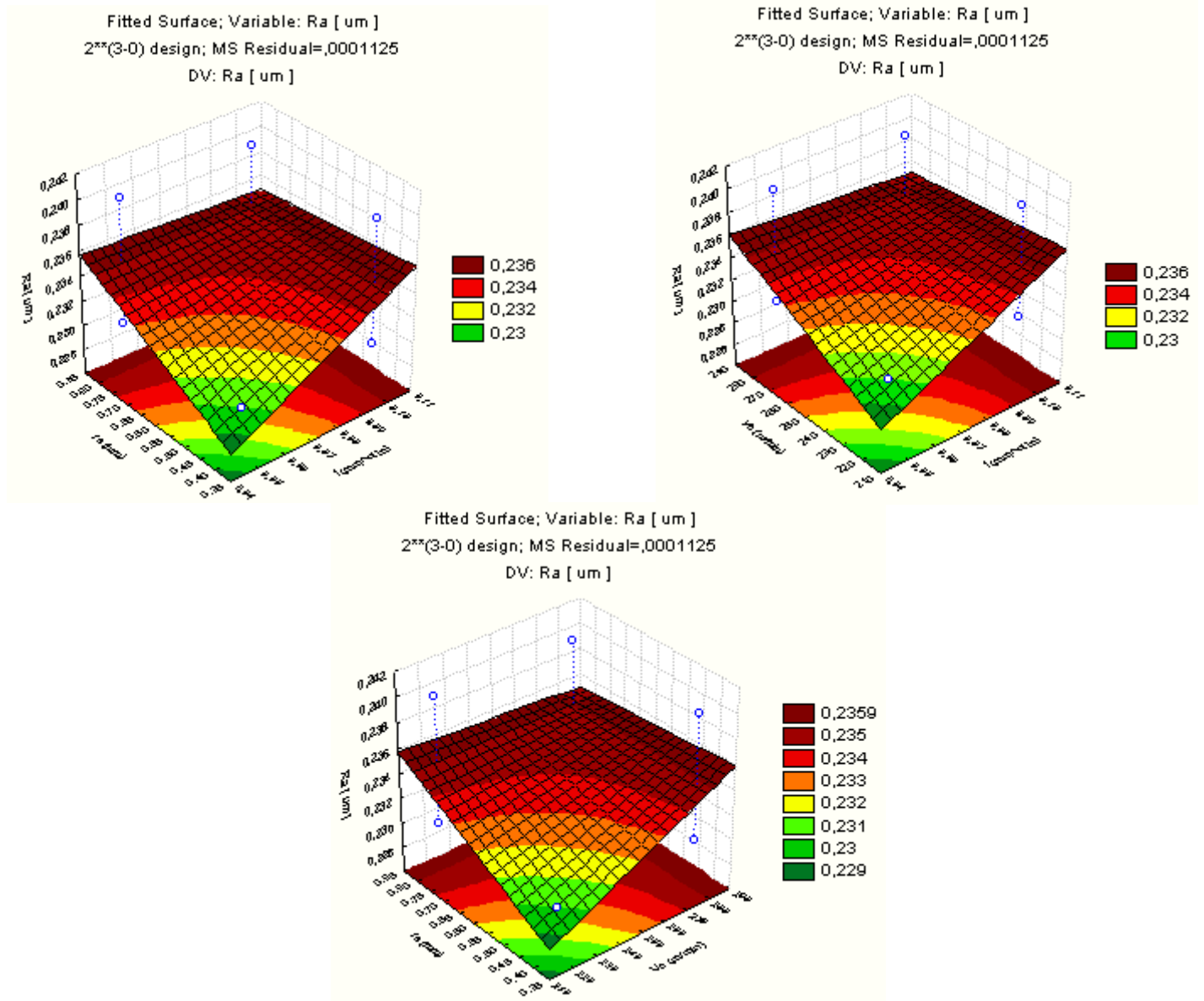


Figura 1: Influência dos parâmetros de corte na rugosidade **Ra a Seco** ( direção radial ).

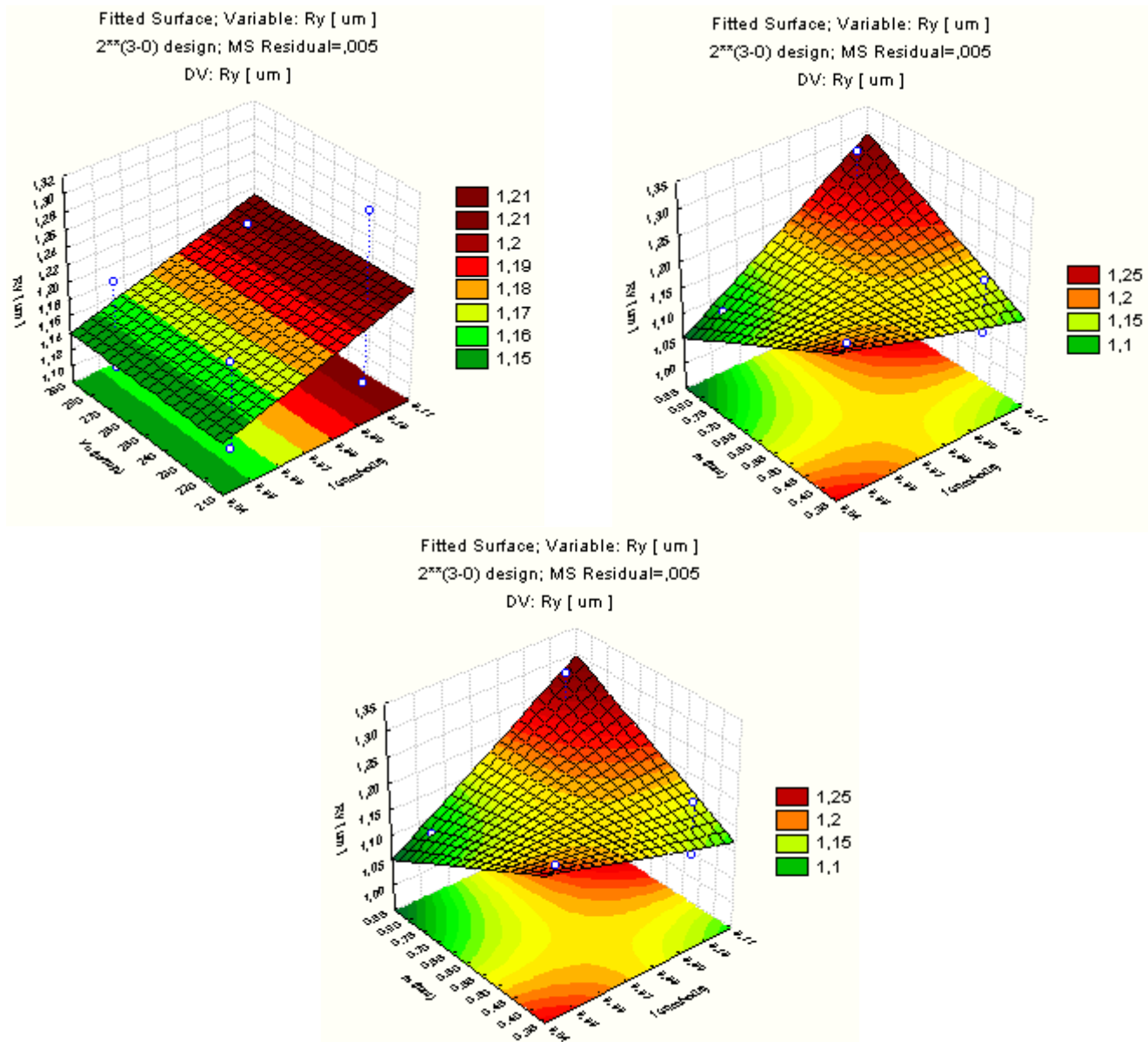


Figura 2: Influência dos parâmetros de corte na rugosidade **Ry a Seco** (direção radial).

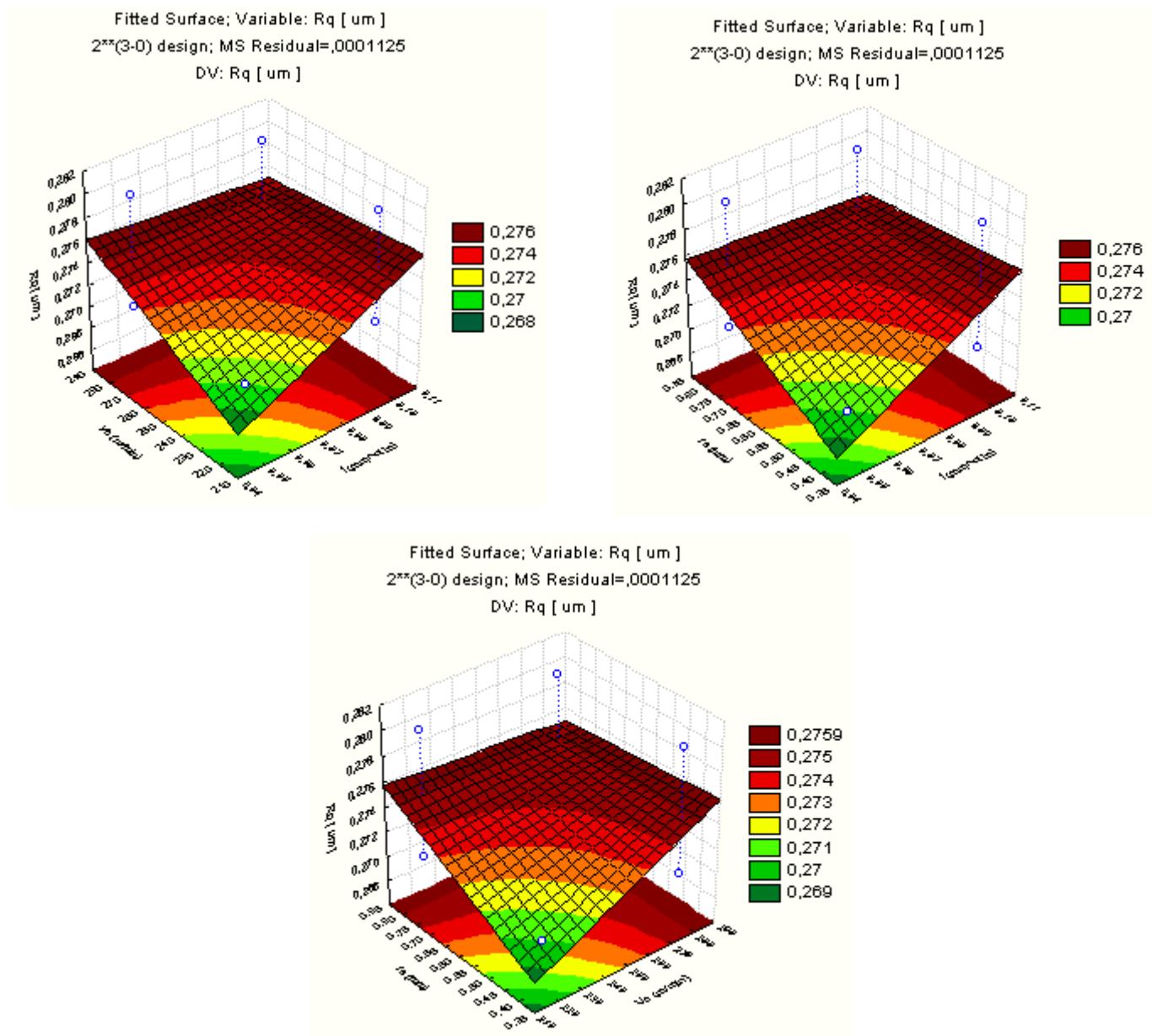


Figura 3: Influência dos parâmetros de corte na rugosidade  **$R_q$  a Seco** ( direção radial ).

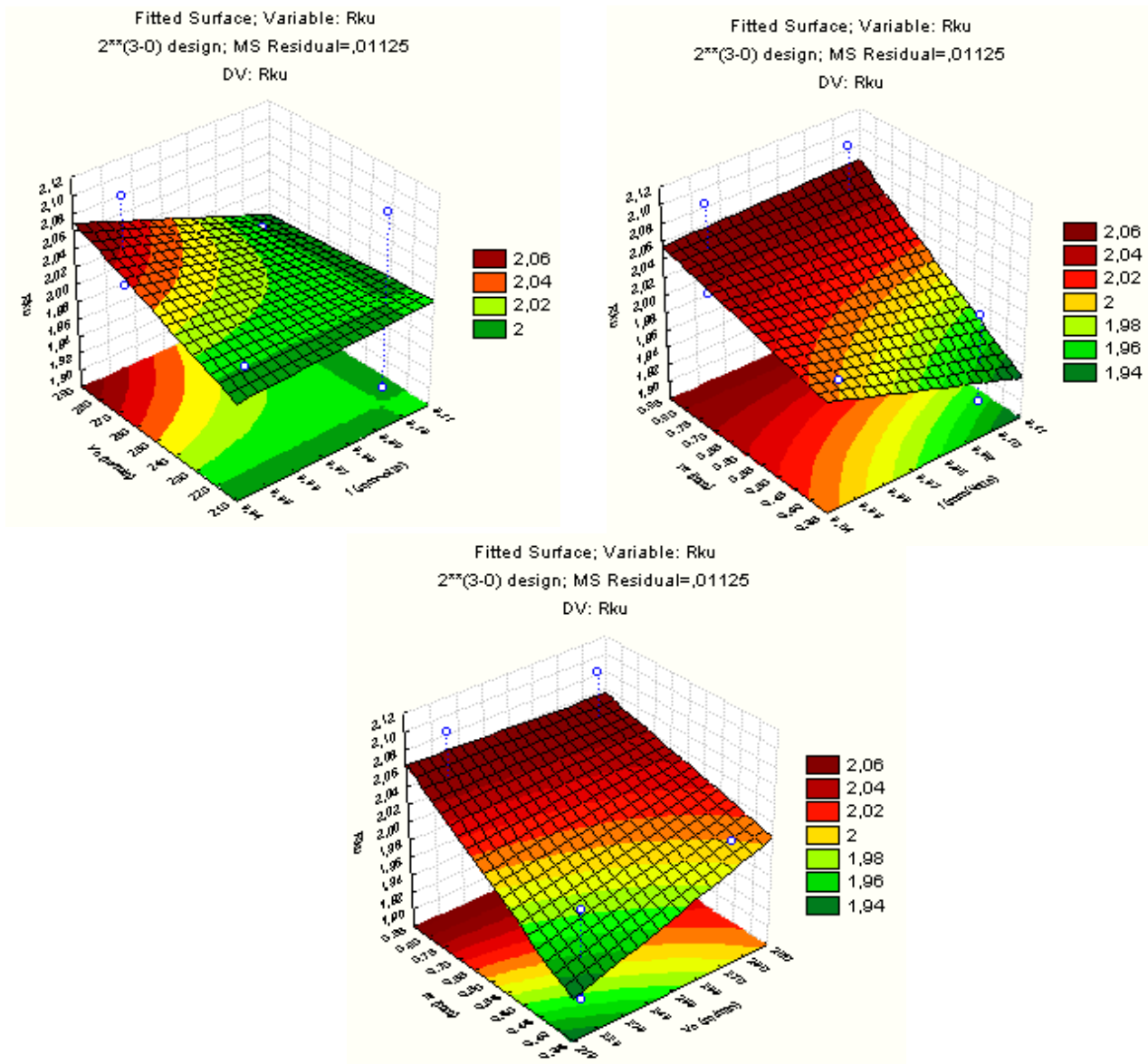


Figura 4: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **Rku a Seco** ( direção radial ).

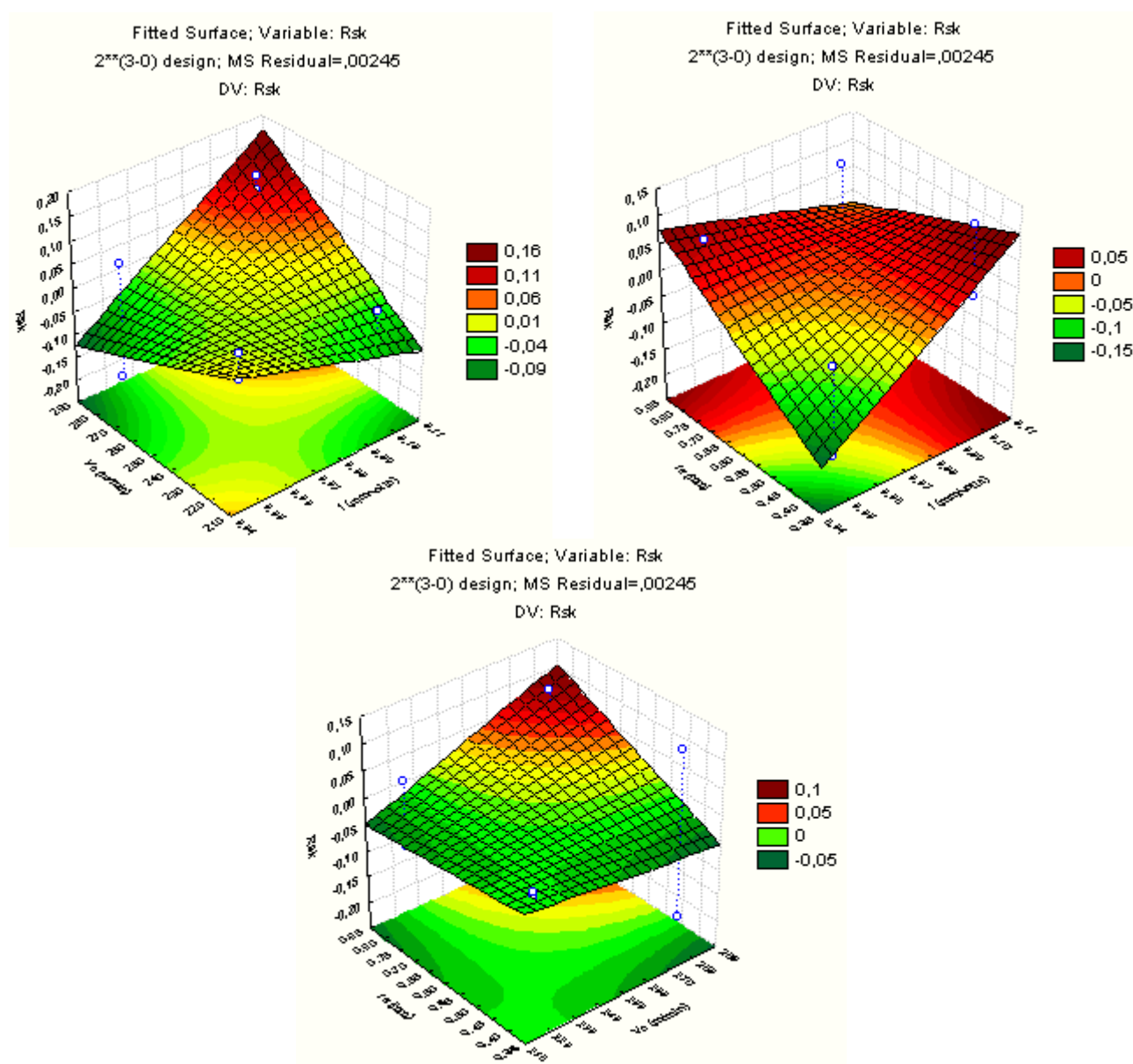


Figura 5: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **Rsk a Seco** ( direção radial ).

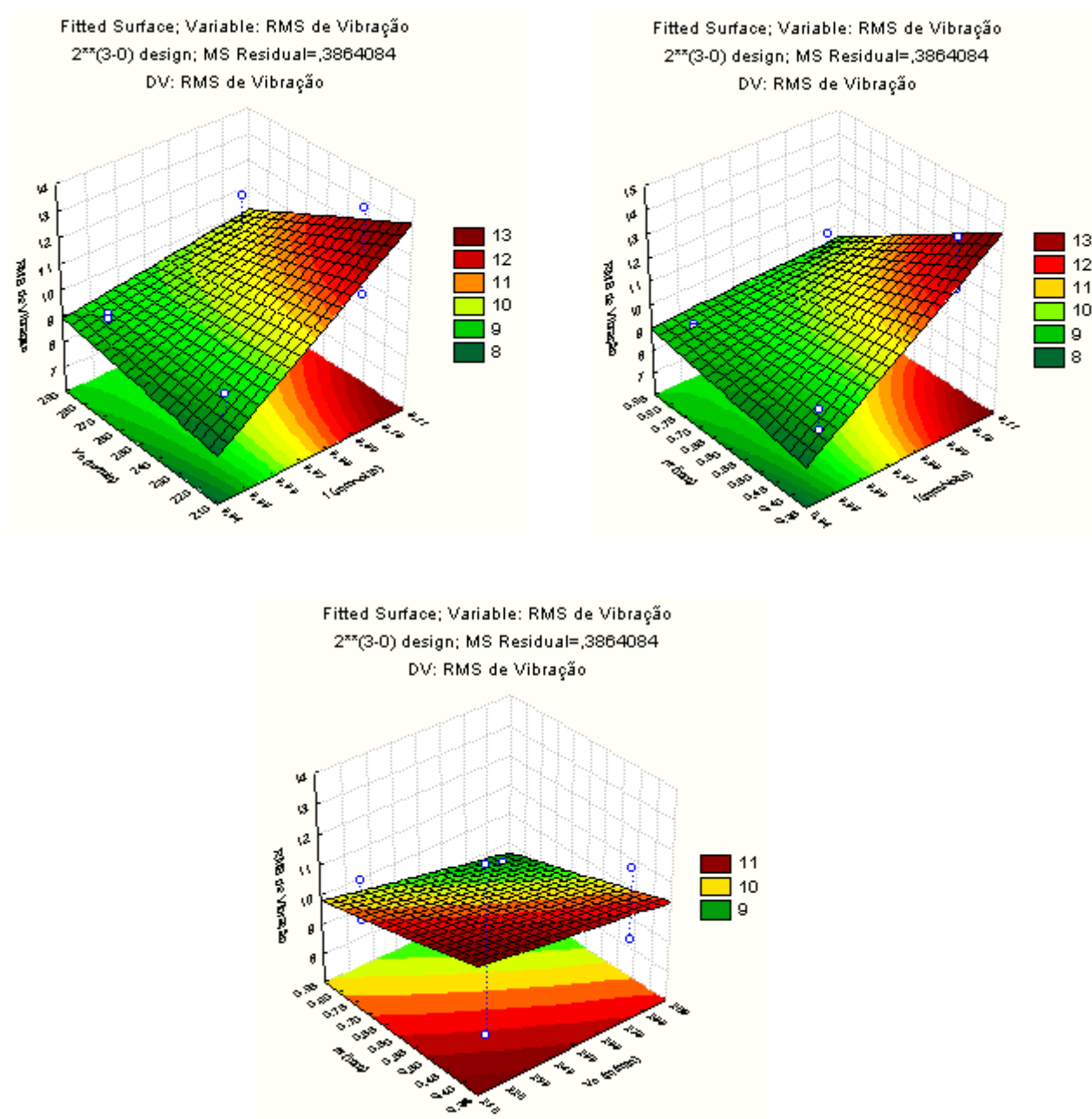


Figura 6: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **RMS a Seco** ( direção radial ).

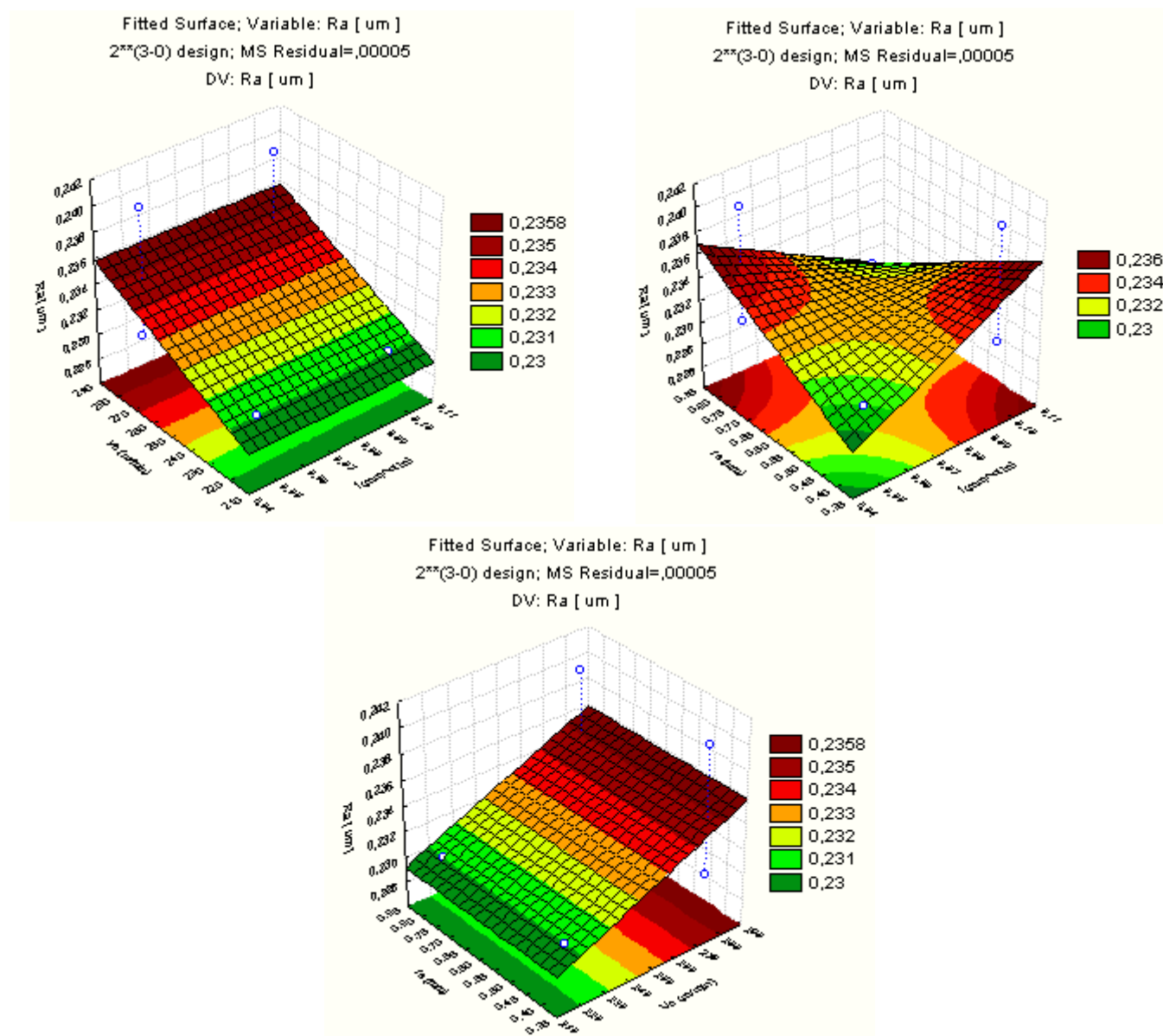


Figura 7: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **Ra** com **MQF** ( direção radial ).

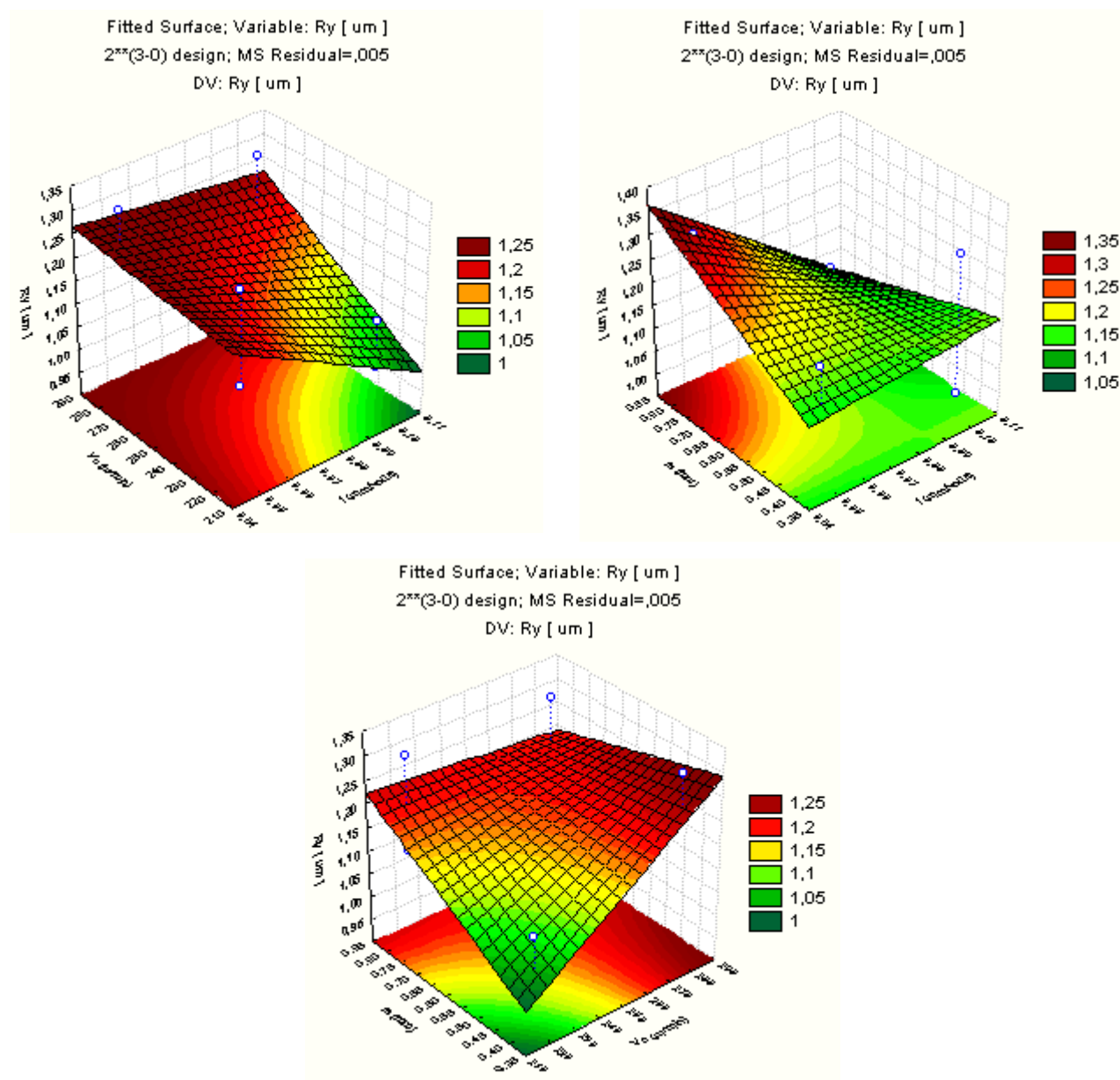


Figura 8: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro  $R_y$  com MQF ( direção radial ).

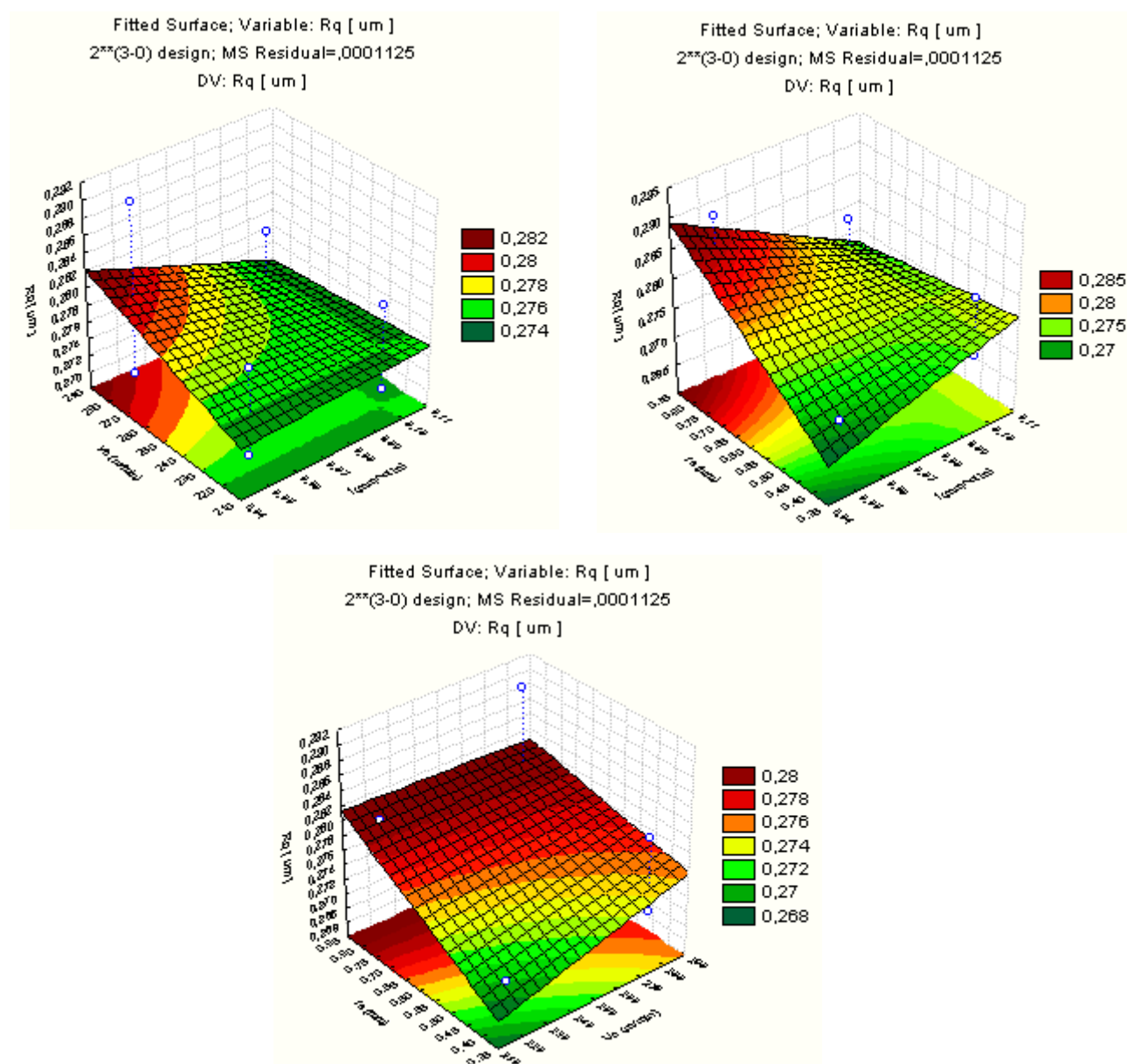


Figura 9: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **Rq** com **MQF** ( direção radial ).

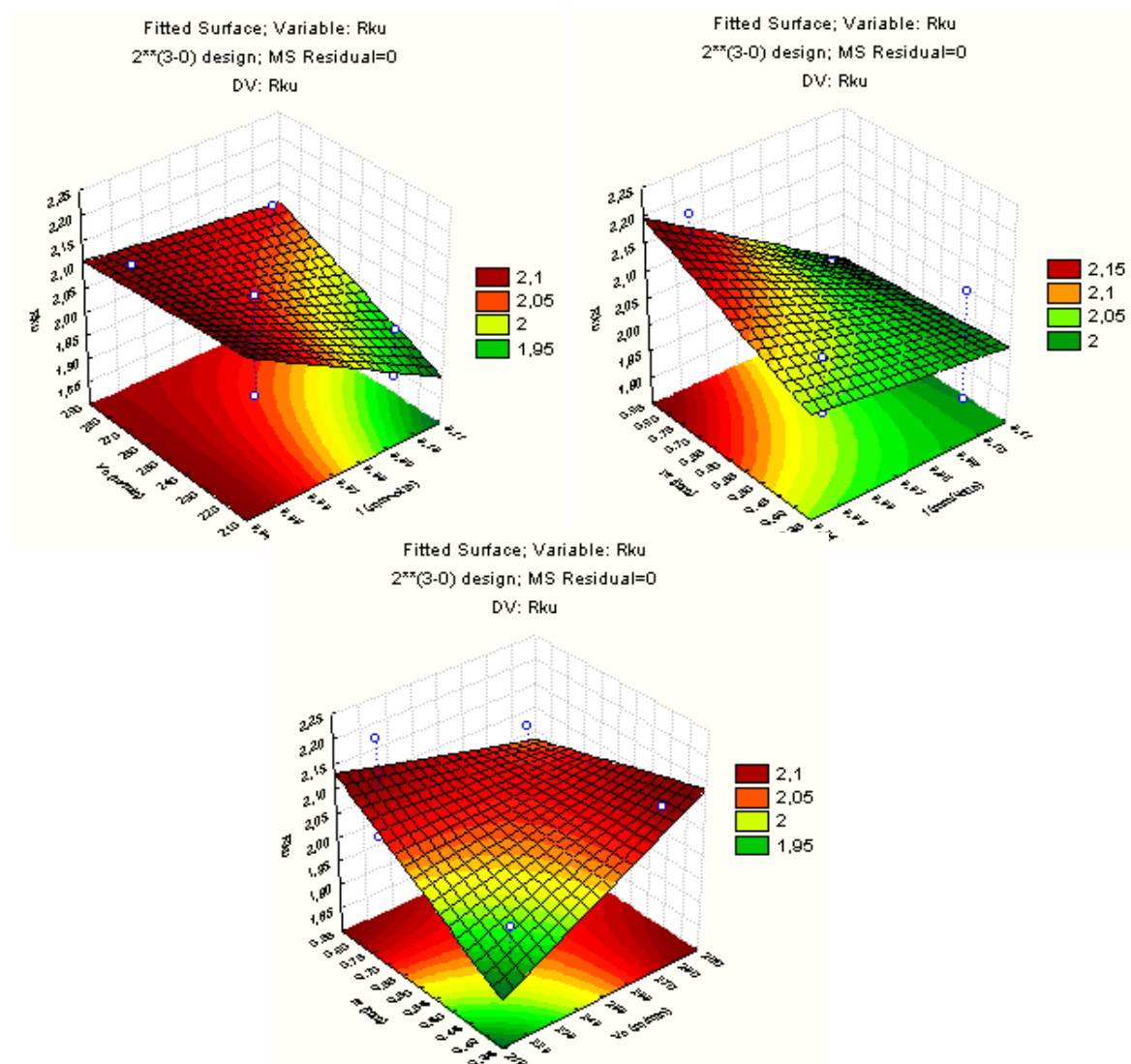


Figura 10: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **RKU** com **MQF** ( direção radial ).

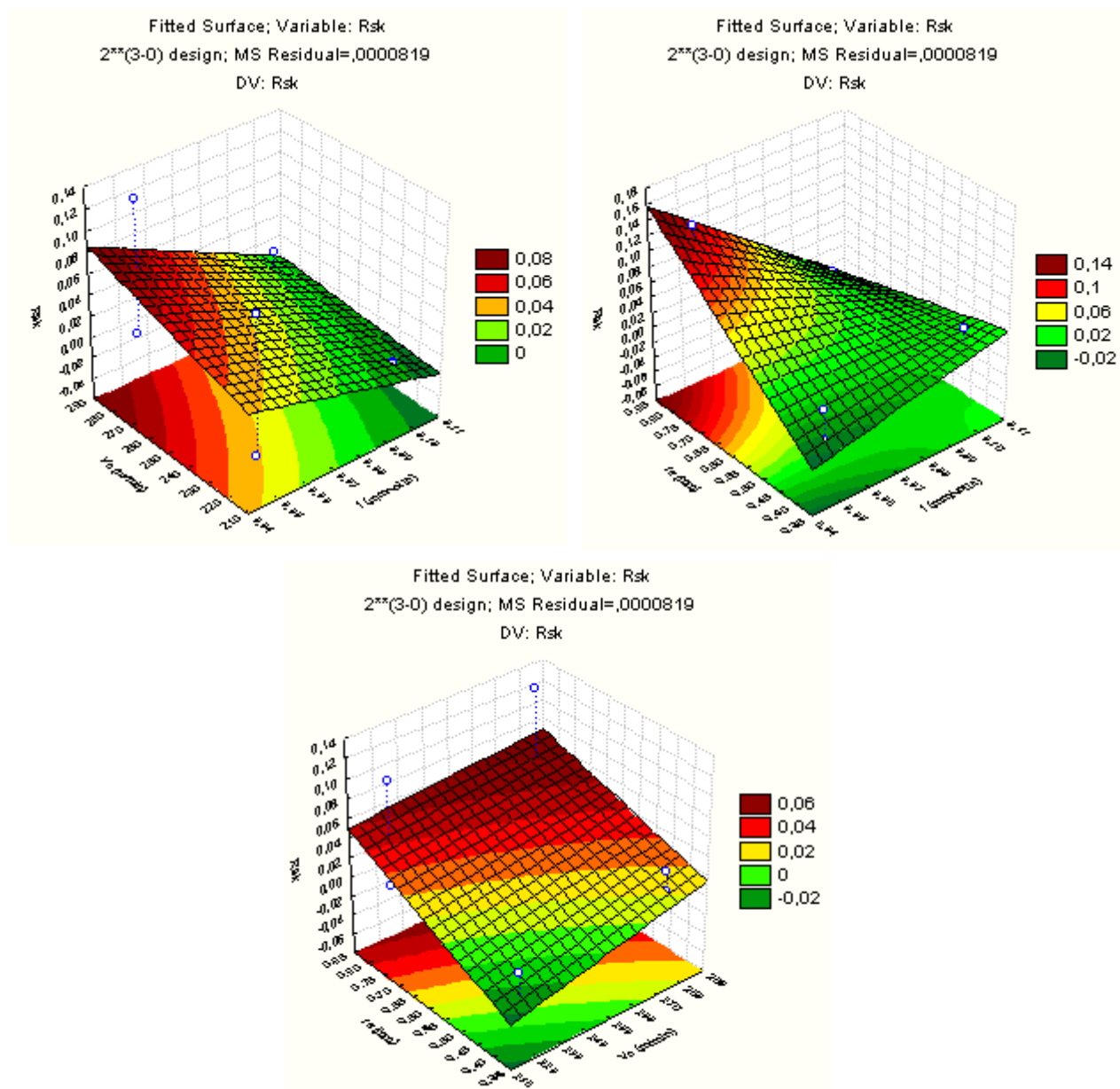


Figura 11: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **Rsk** com MQF ( direção radial ).

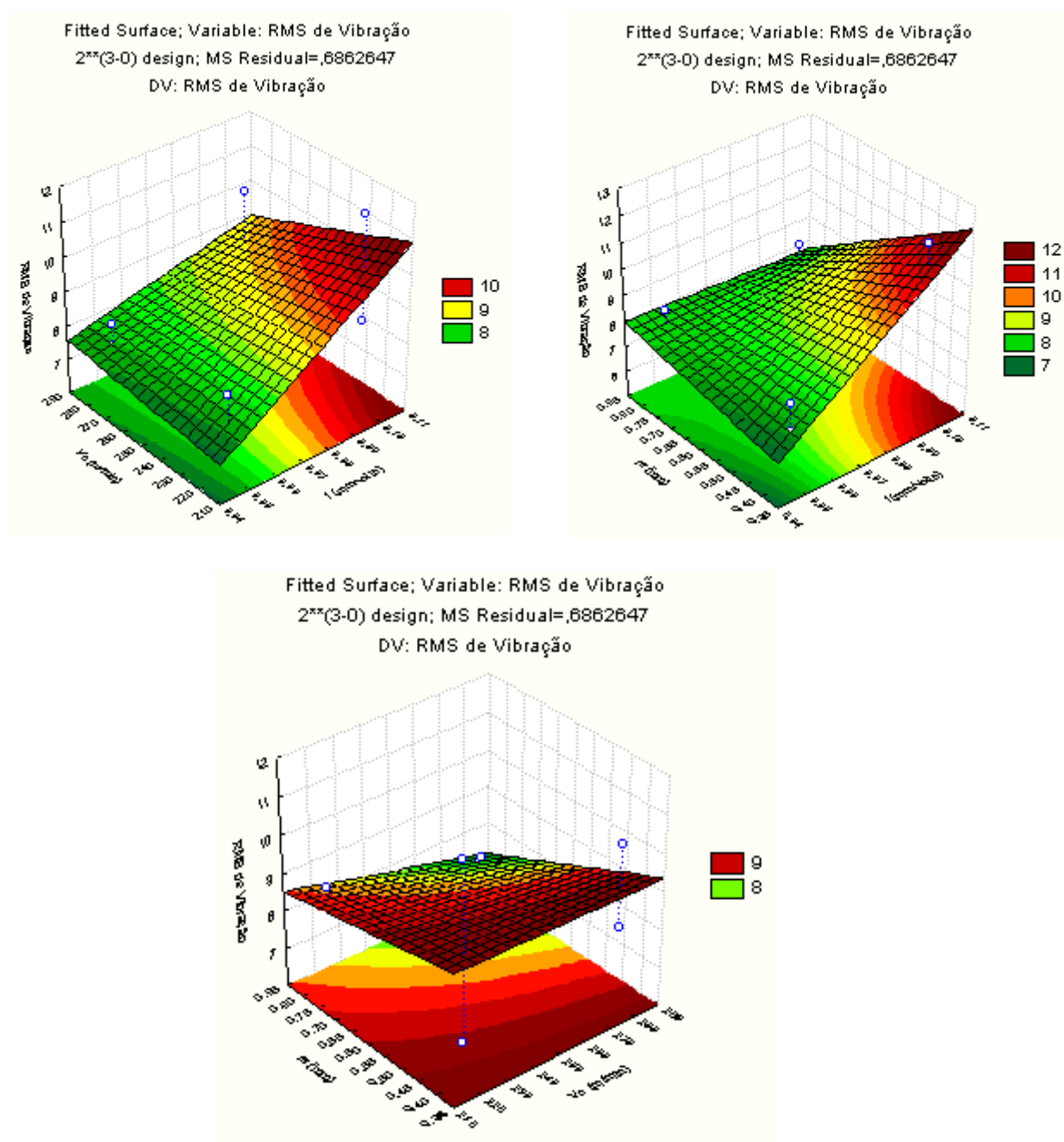


Figura 12 – Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **RMS com MQF** ( direção radial ).

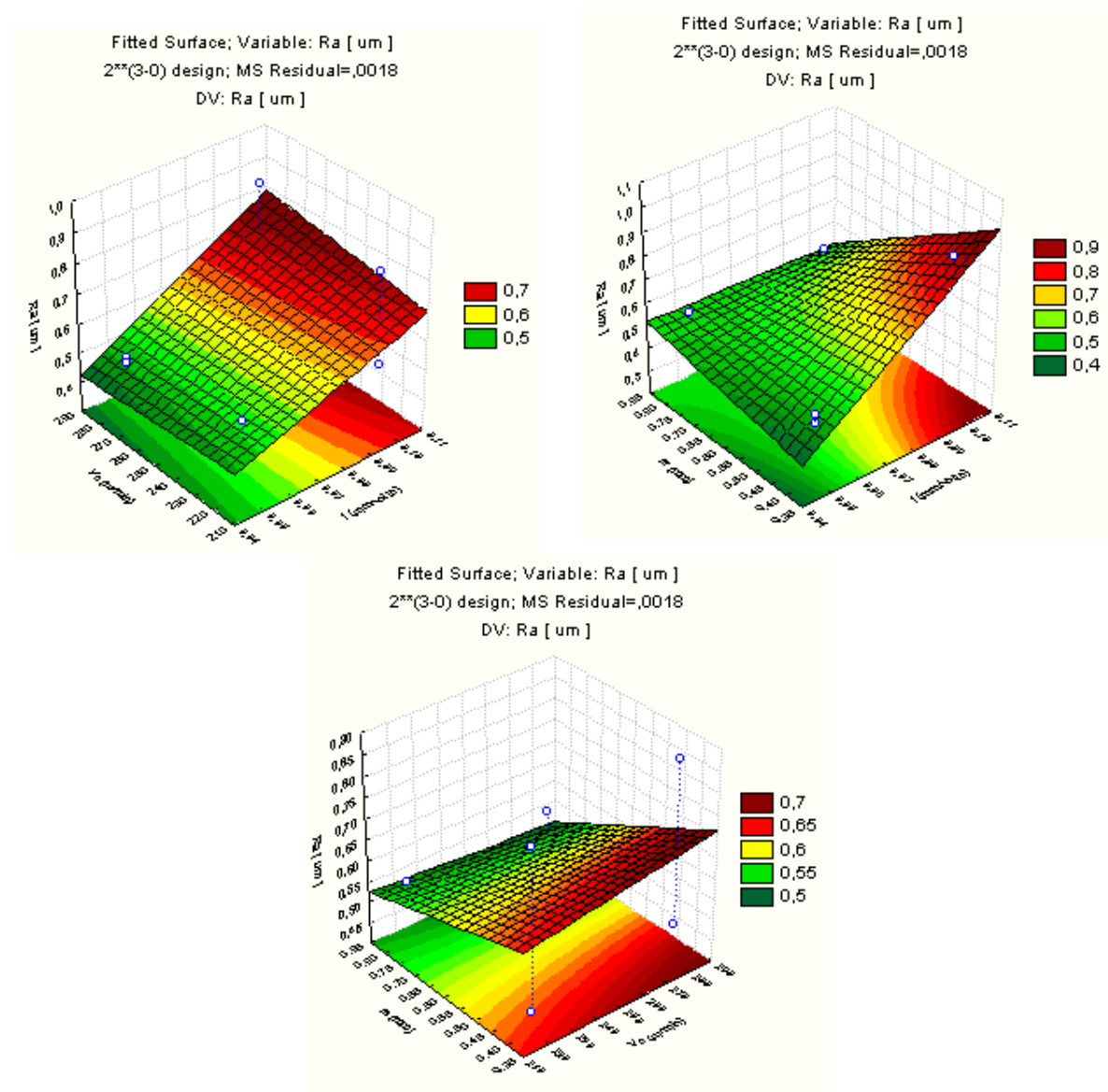


Figura 13 – Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **Ra a Seco** ( direção transversal ).

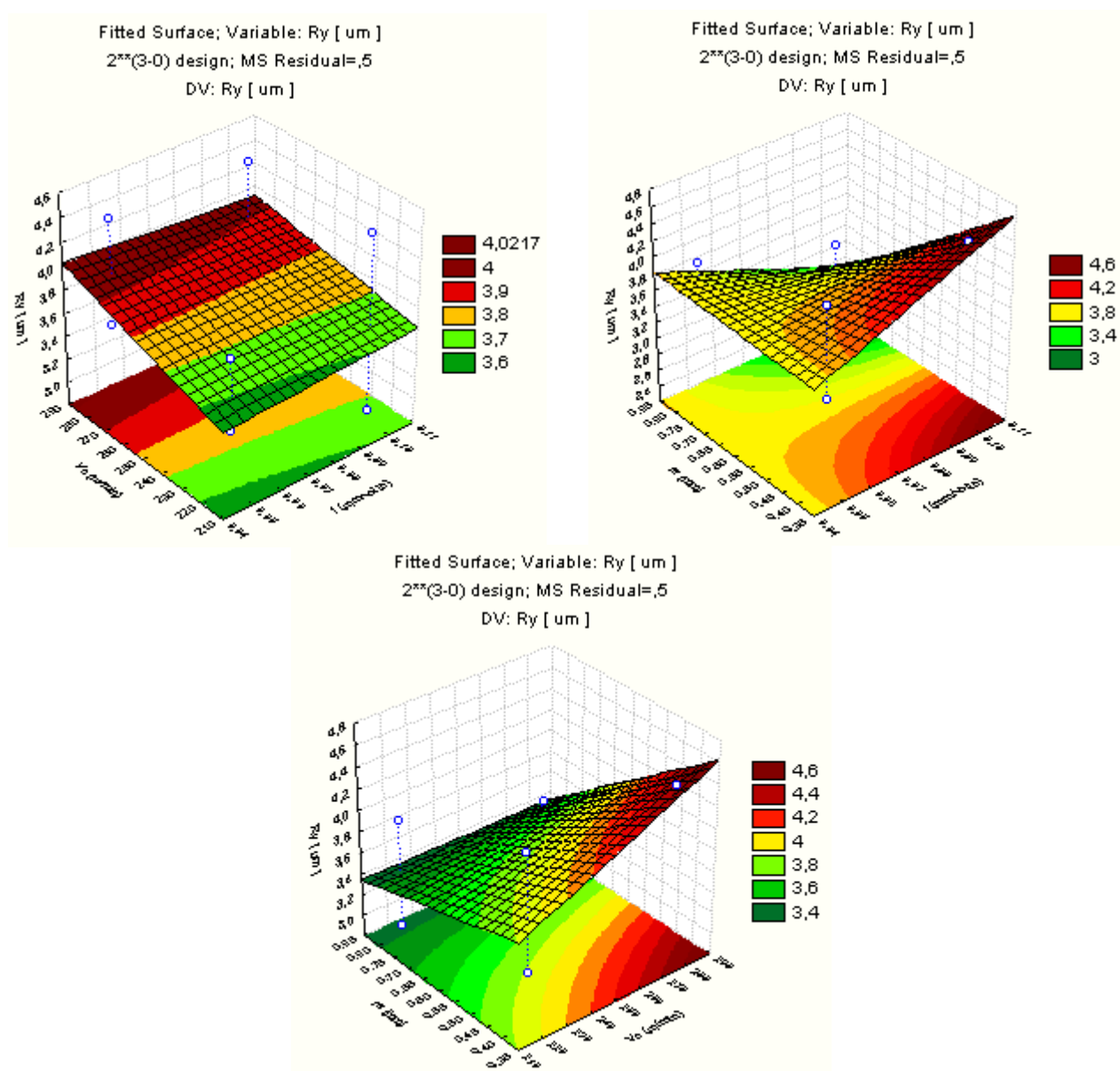


Figura 14 – Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **Ry a Seco** ( direção transversal ).

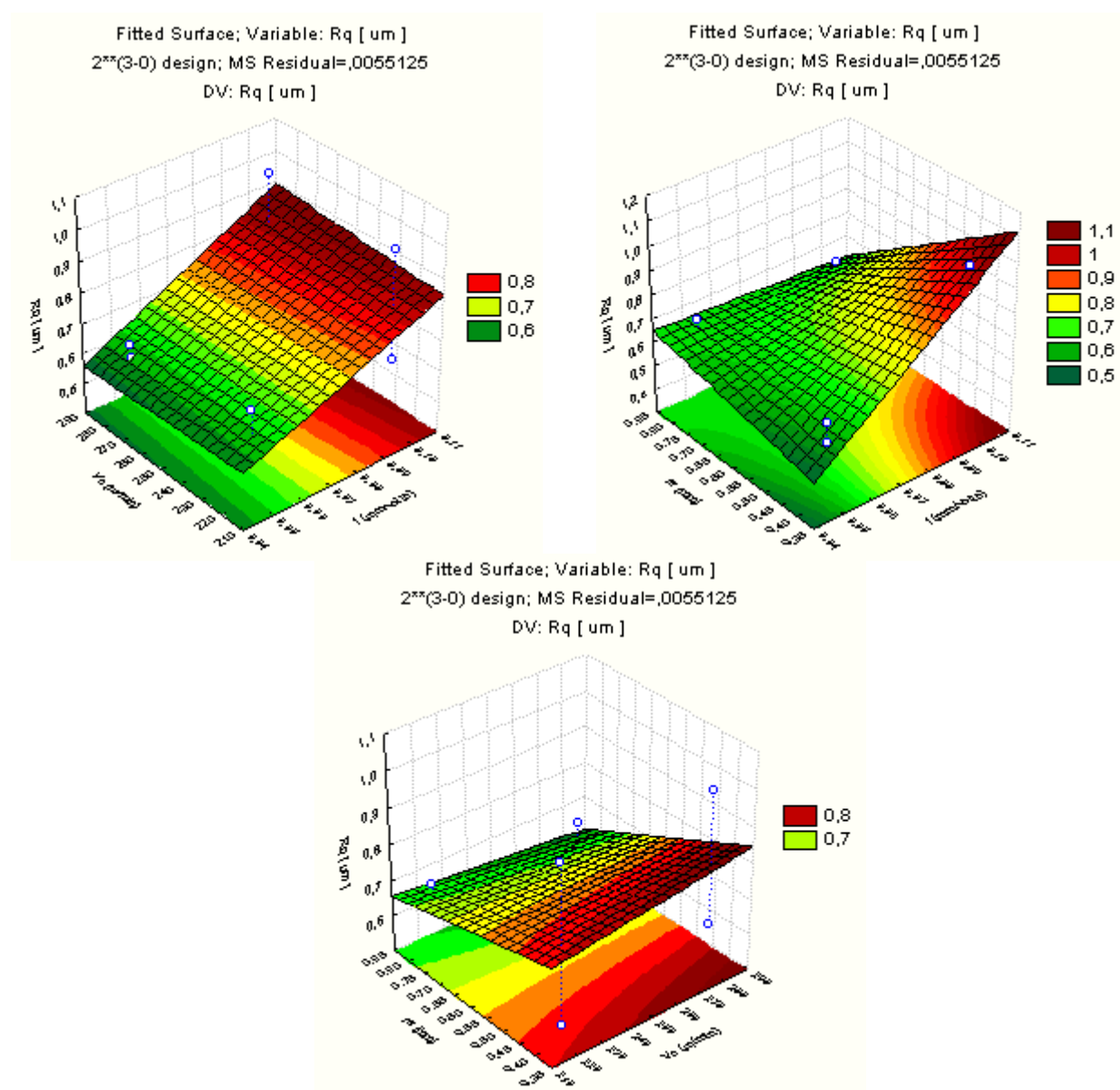


Figura 15 – Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **Rq** a **Seco** ( direção transversal ).

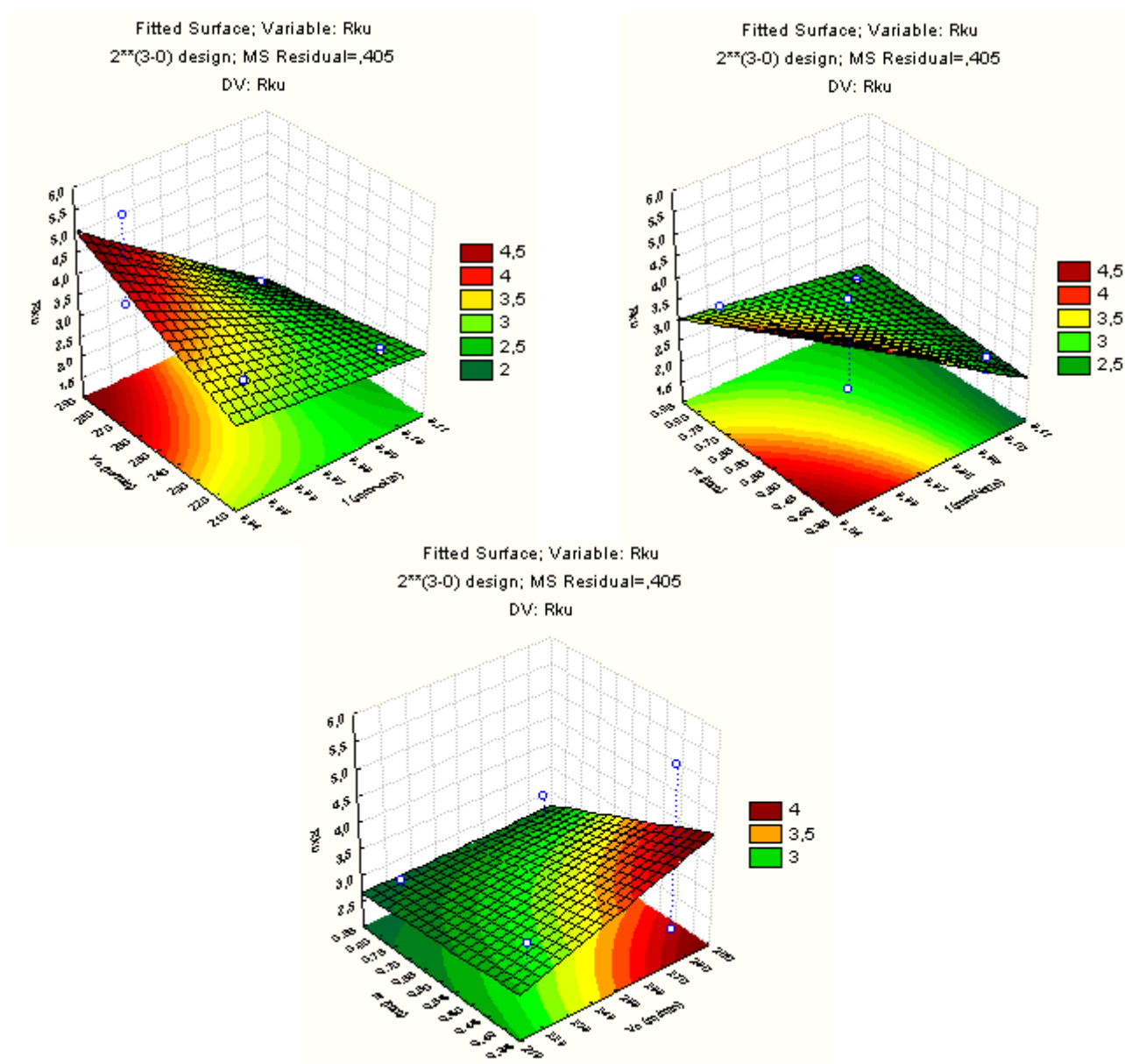


Figura 16 – Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **Rku** a **Seco** ( direção transversal ).

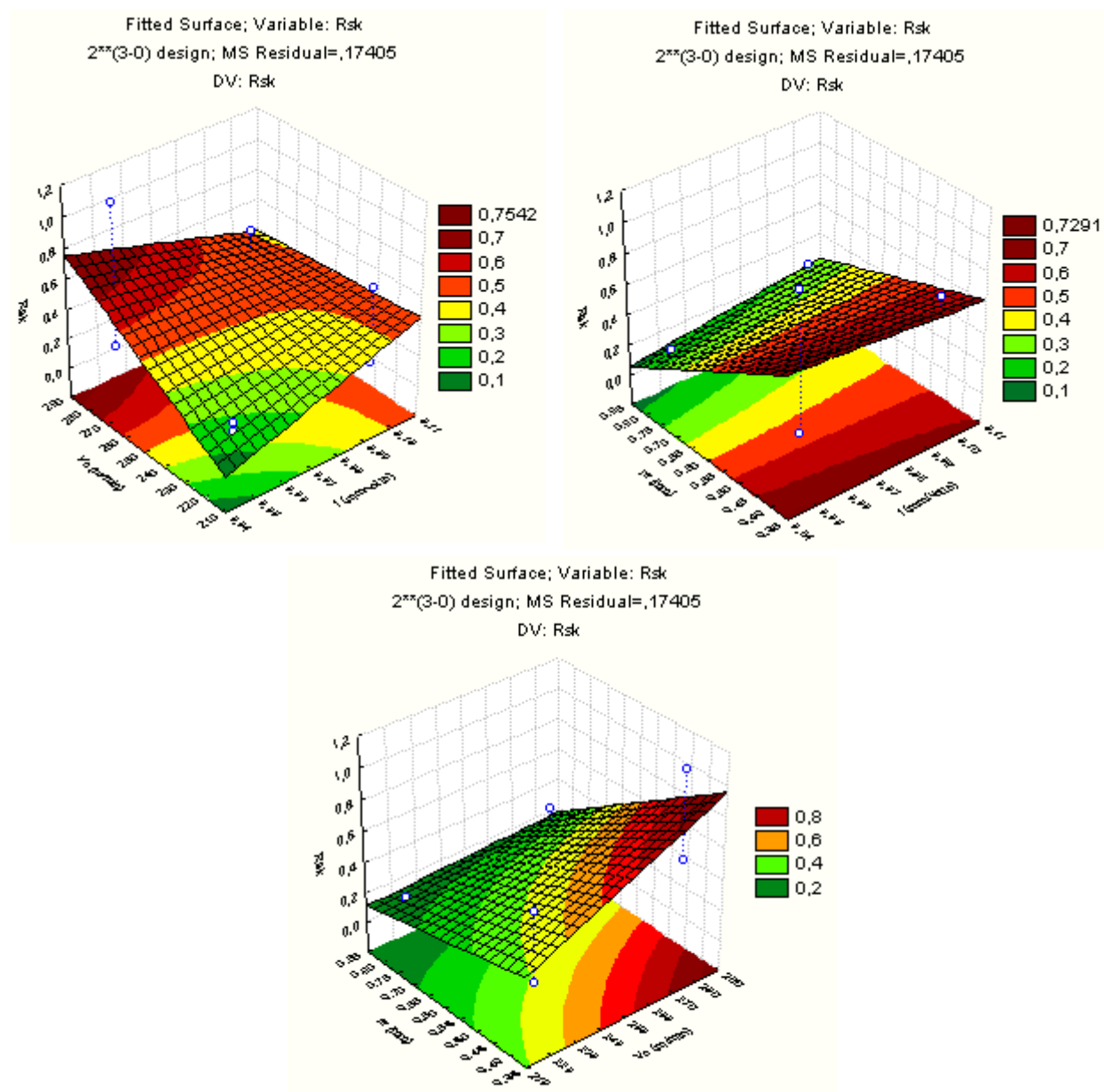


Figura 17 – Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria  **$R_{sk}$**  a **Seco** ( direção transversal ).

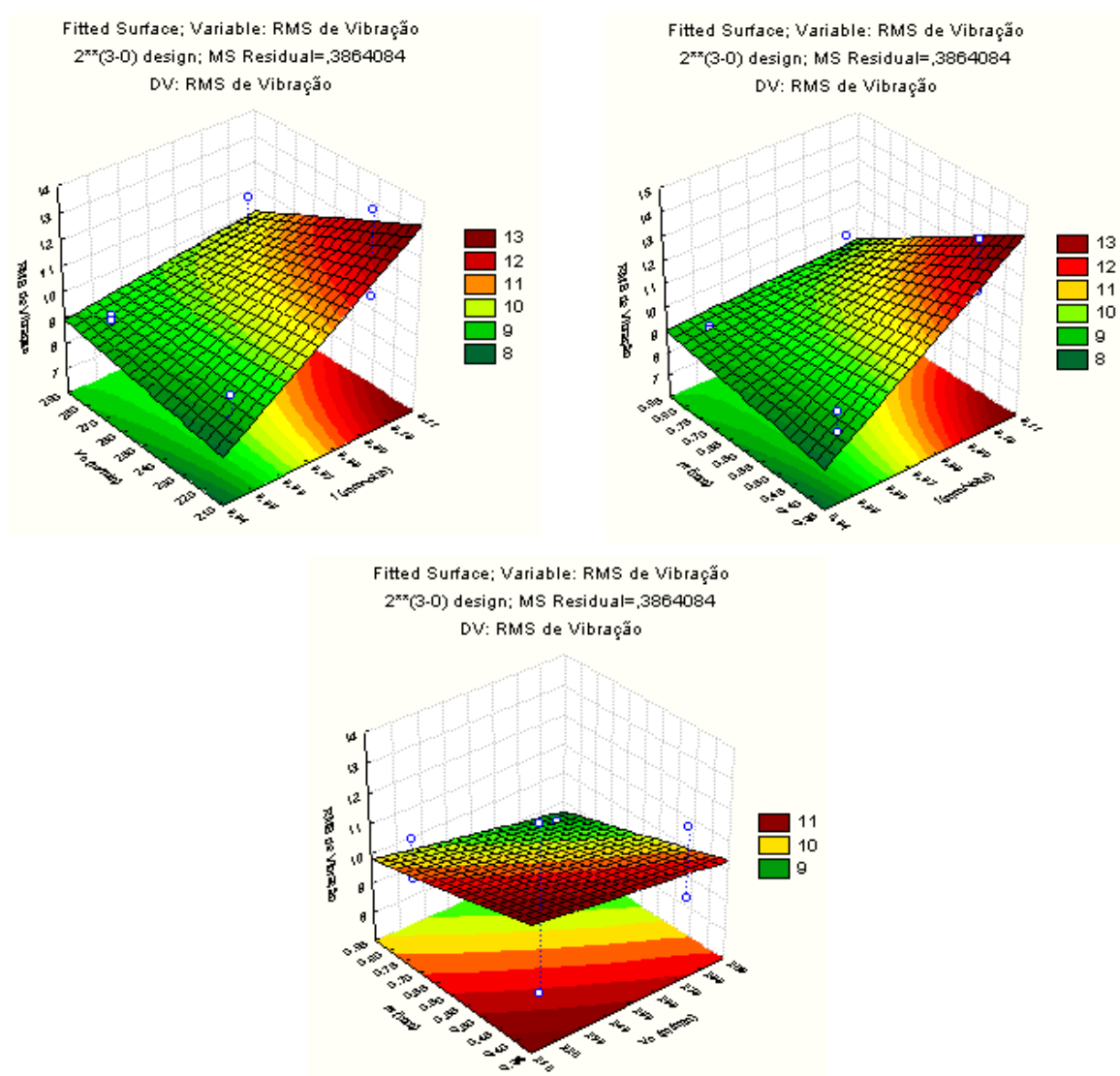


Figura 18 – Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **RMS a Seco** ( direção transversal).

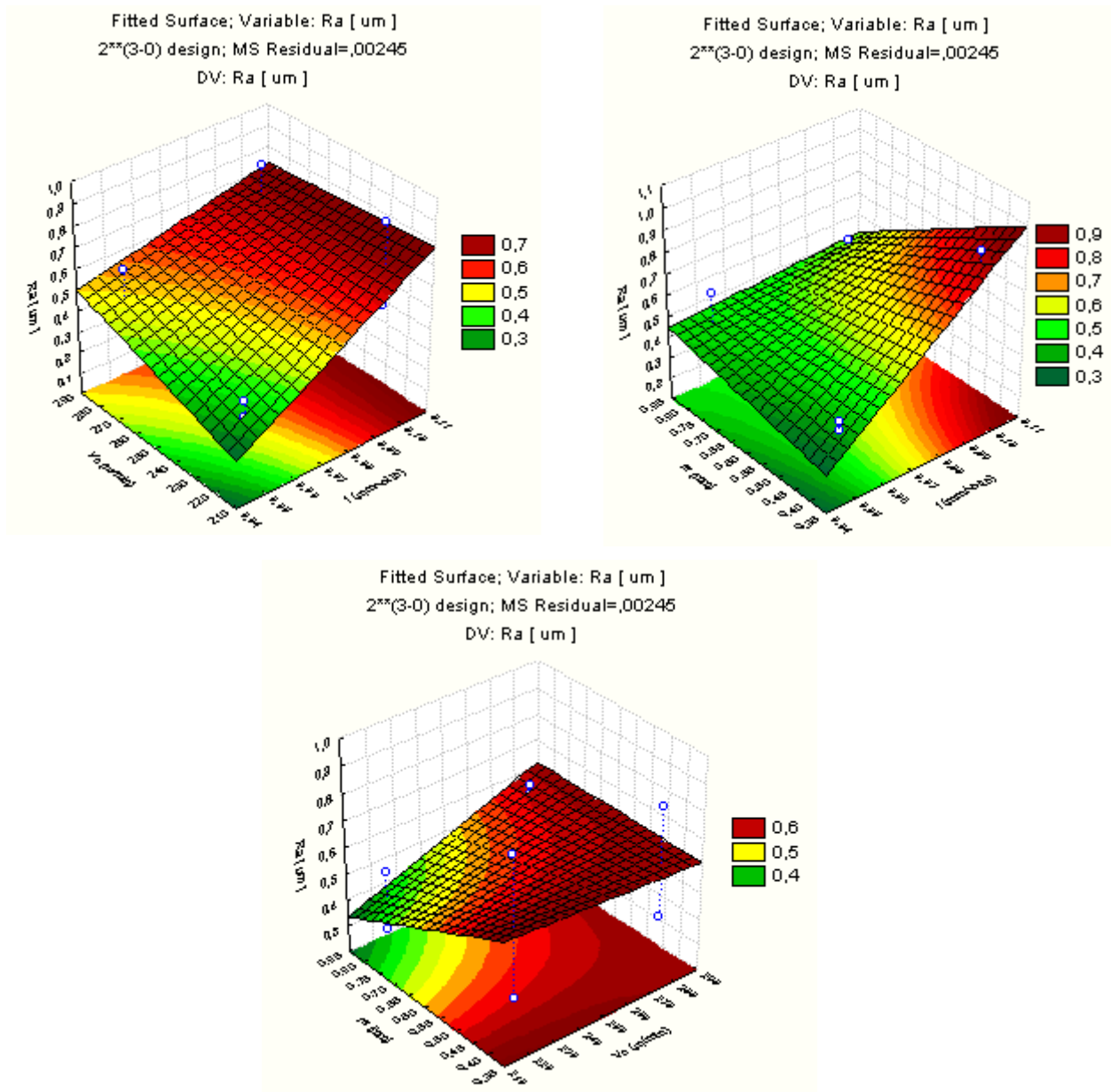


Figura 19: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **Ra** com **MQF** ( direção transversal ).

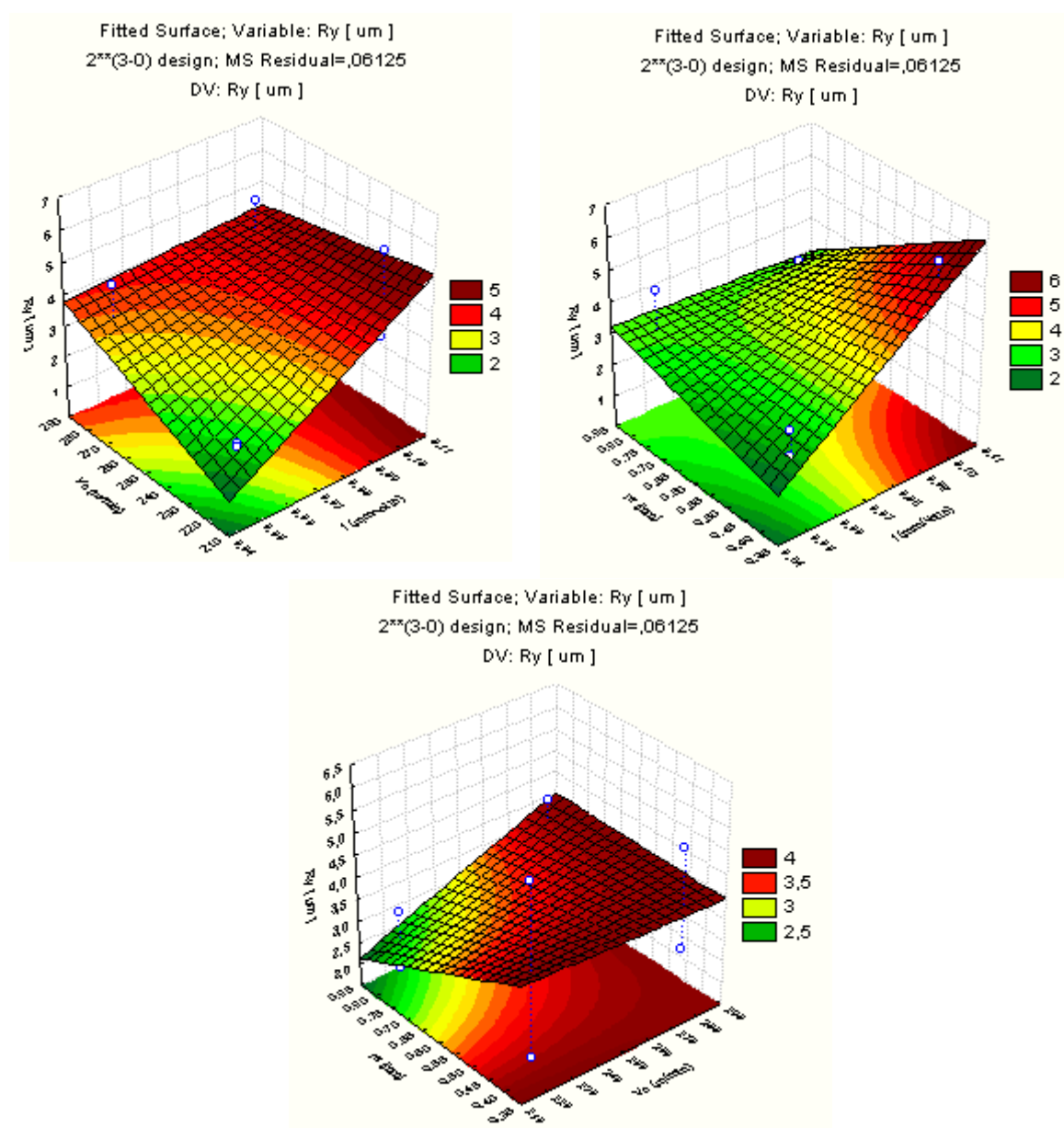


Figura 20: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro **Ry** com MQF ( direção transversal ).

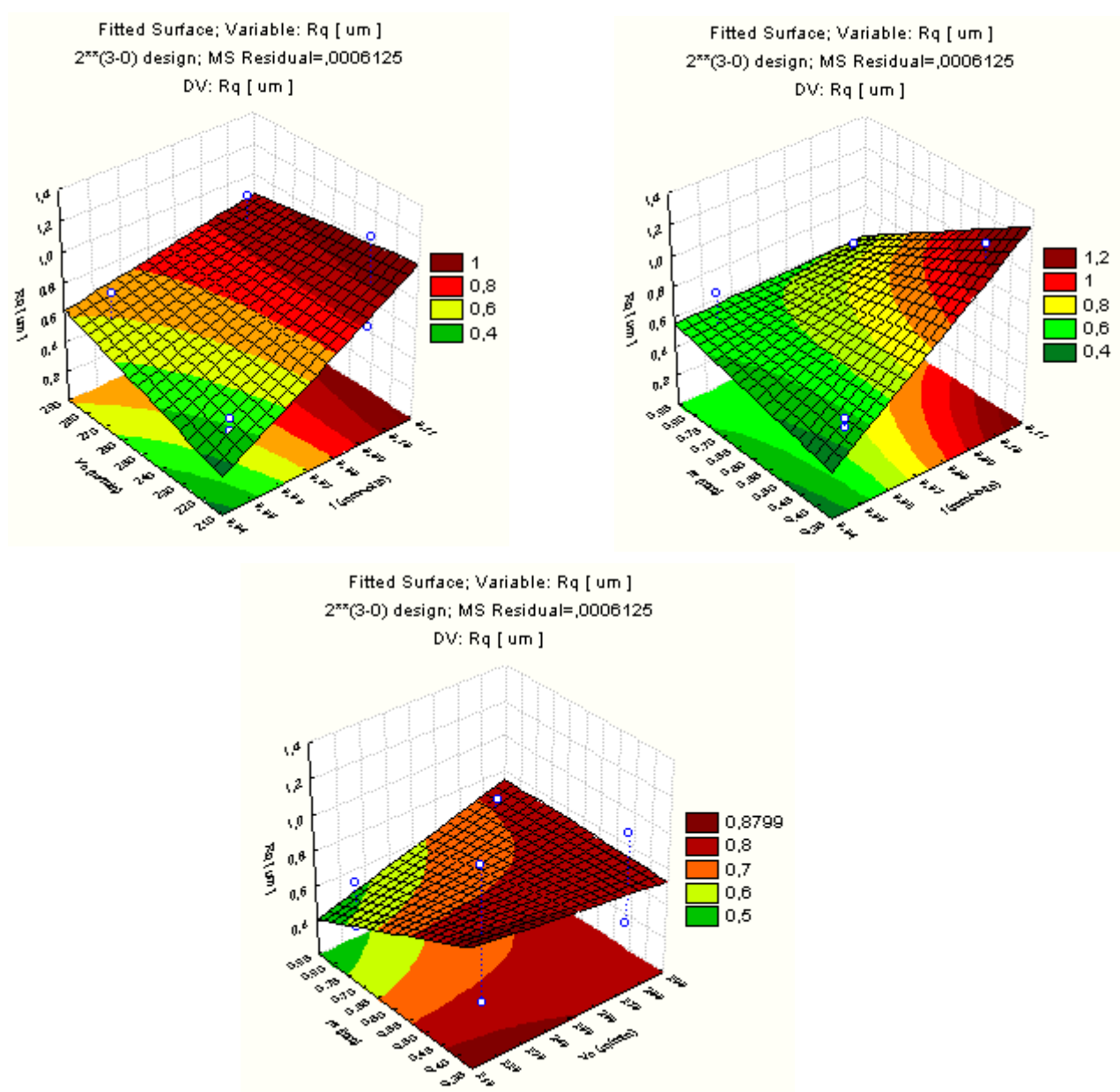


Figura 21: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro  $R_q$  com MQF ( direção transversal ).

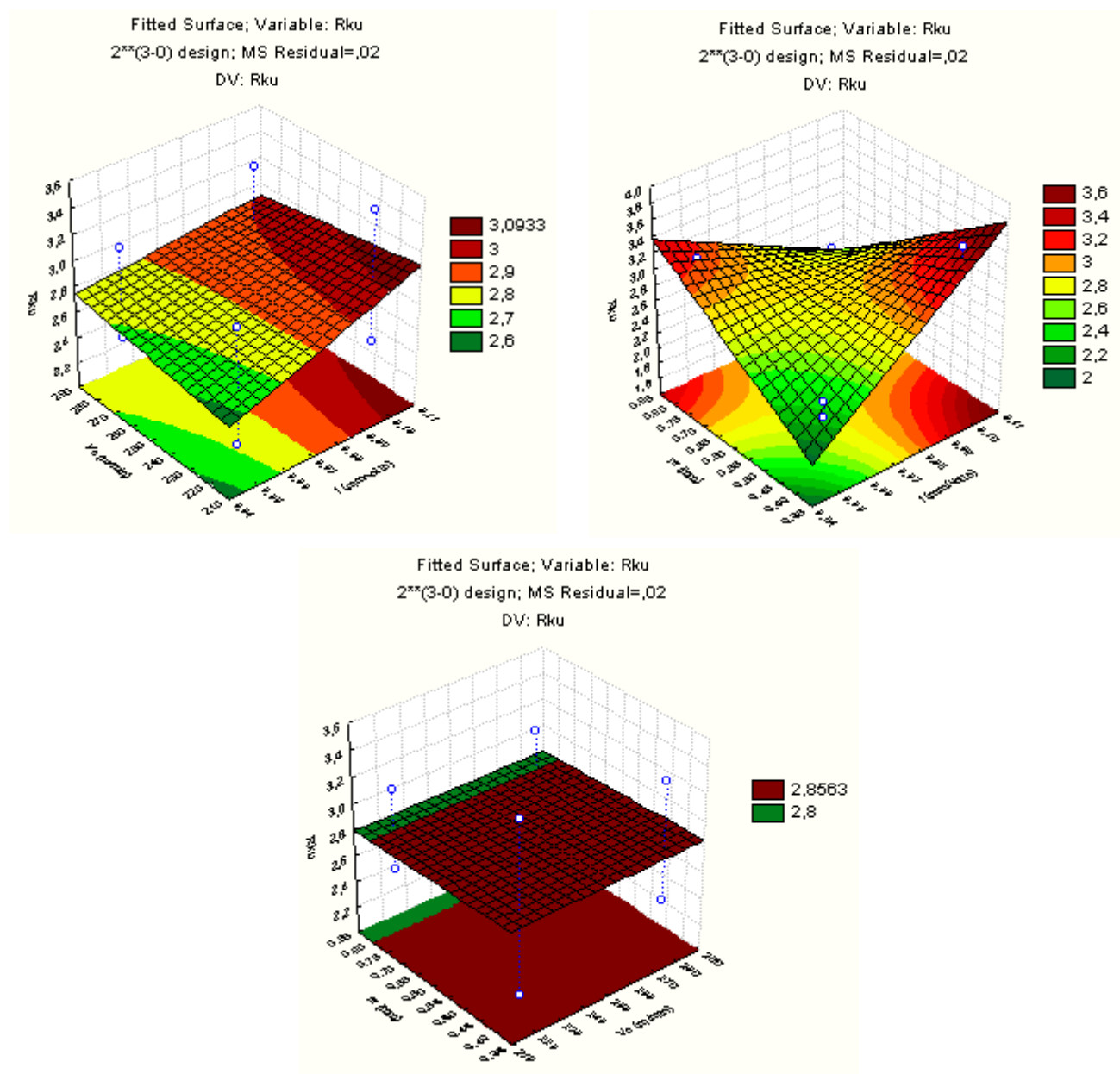


Figura 22 : Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **Rku** com **MQF**(direção transversal).

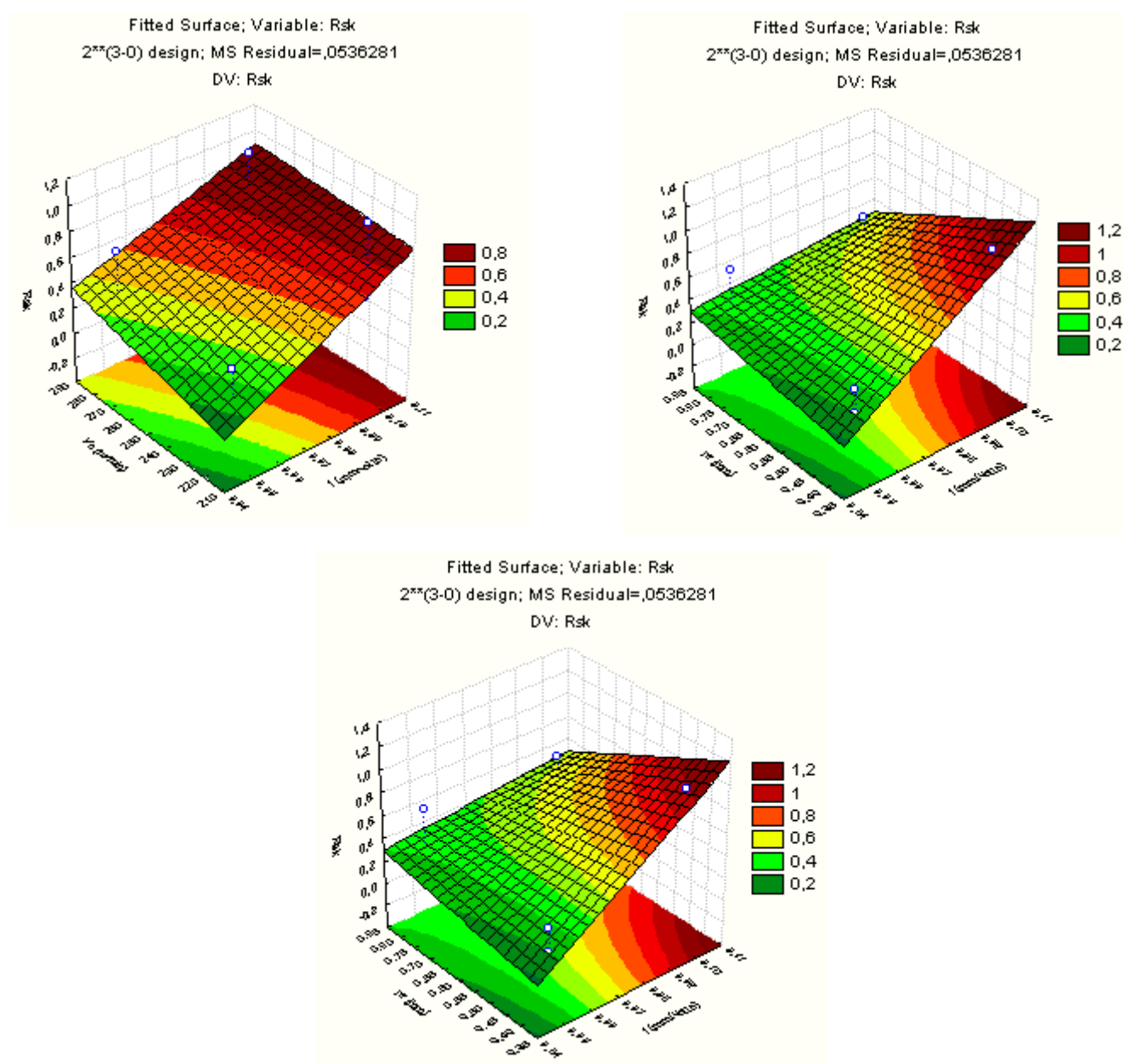


Figura 23: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **Rsk** com **MQF** (direção transversal).

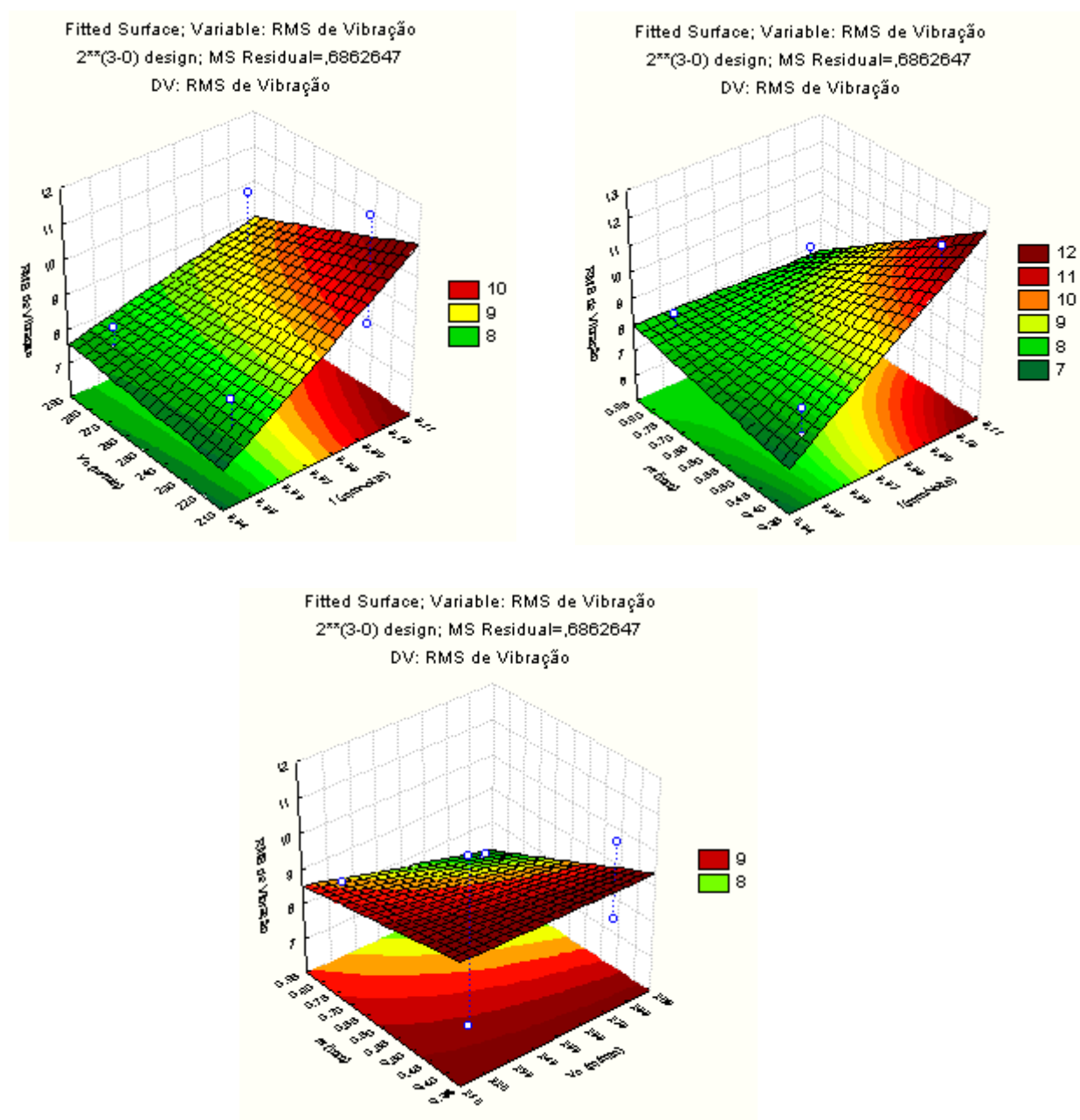


Figura24: Influência dos parâmetros de corte no parâmetro de assimetria **RMS** com **MQF** ( direção transversal).

## ANEXO 4

As figuras mostram os perfis de rugosidade com avanços de 0,05 mm e 0,10 mm respectivamente, obtidos após as leituras radial e transversal.

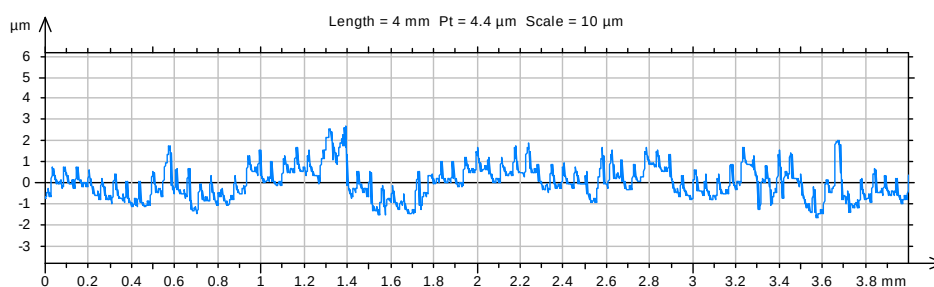


Figura 1 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

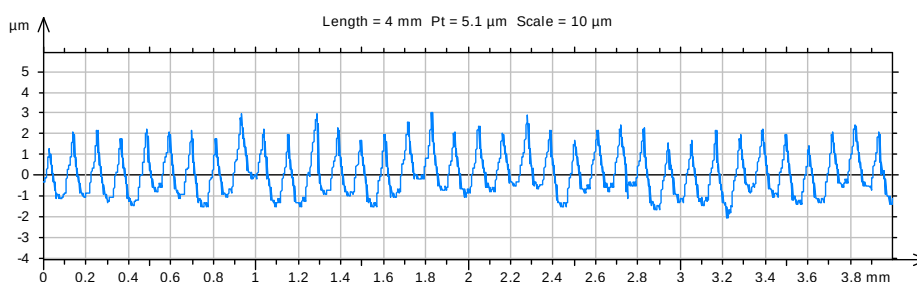


Figura 2 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

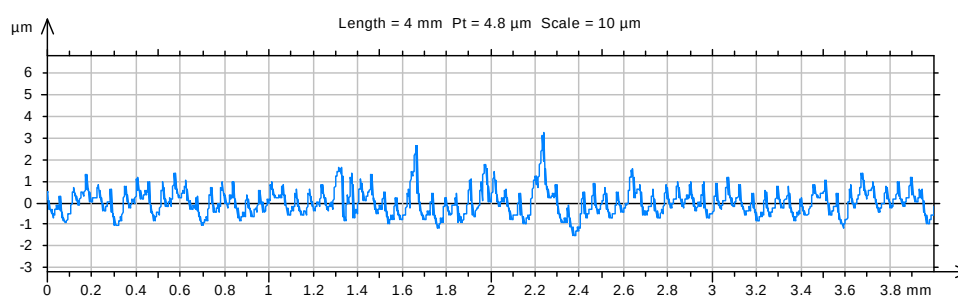


Figura 3 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

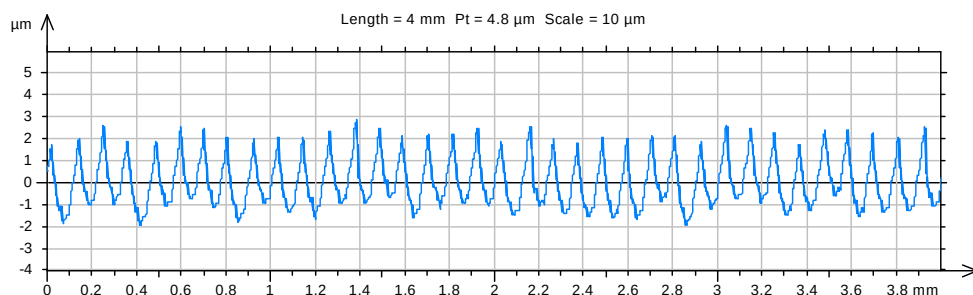


Figura 4 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

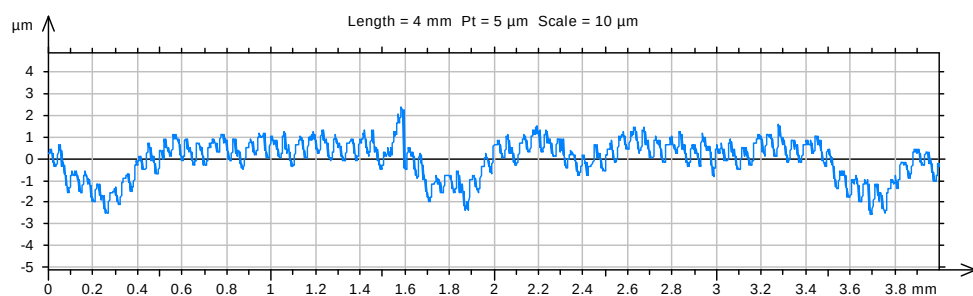


Figura 5 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

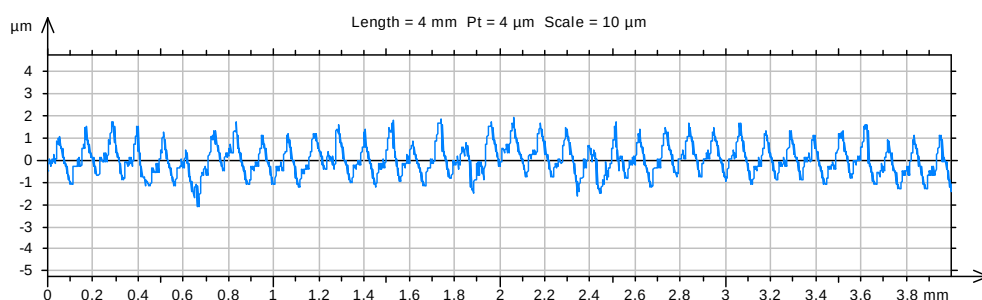


Figura 6 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

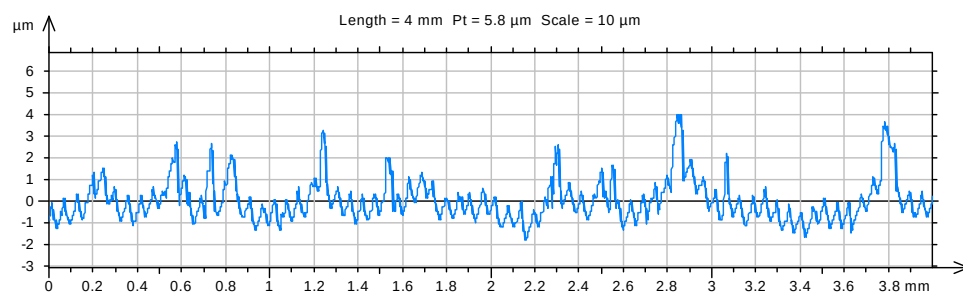


Figura 7 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

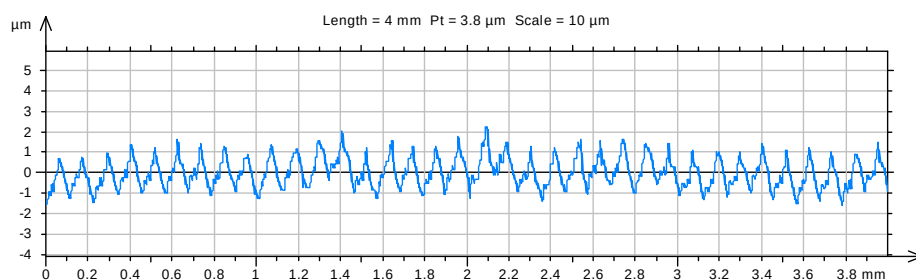


Figura 8 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção transversal** com  $r_\xi = 0,8$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

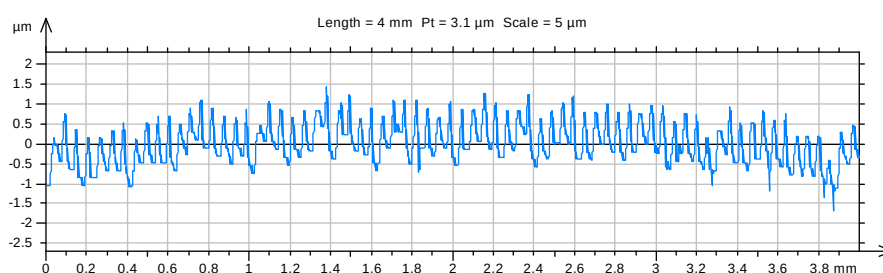


Figura 9 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF**, **direção transversal** com  $r_\xi = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

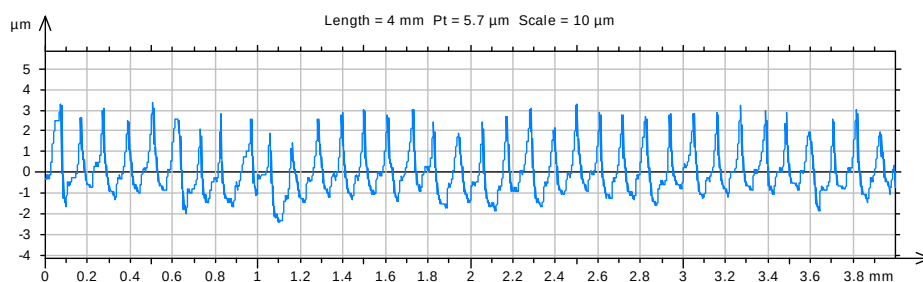


Figura 10 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF**, **direção transversal** com  $r_\xi = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

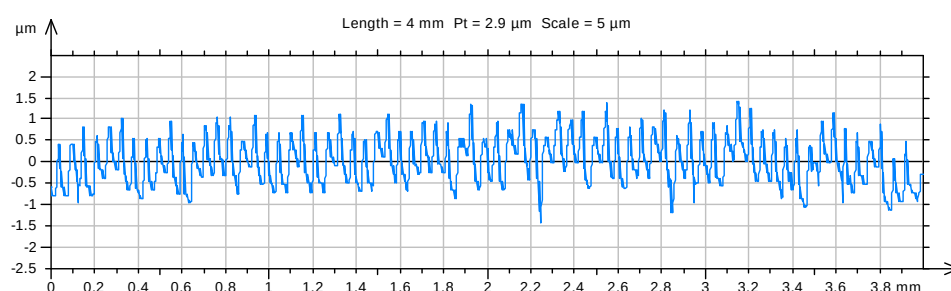


Figura 11 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF**, **direção transversal** com  $r_\xi = 0,4$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

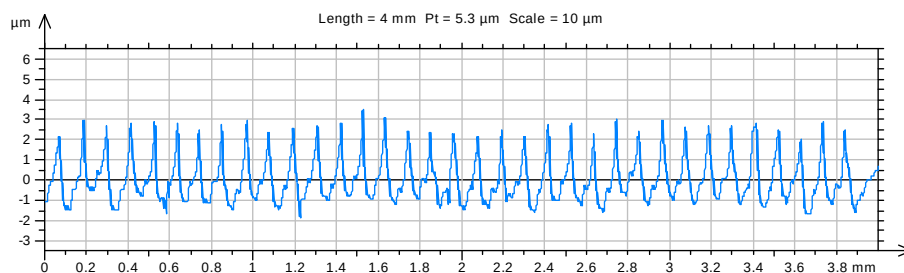


Figura 12 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

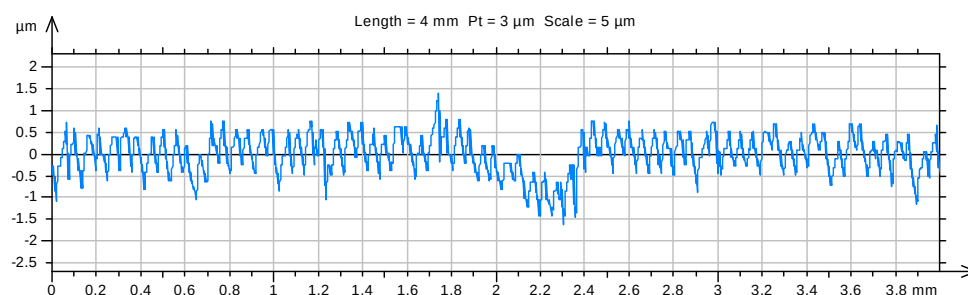


Figura 13 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

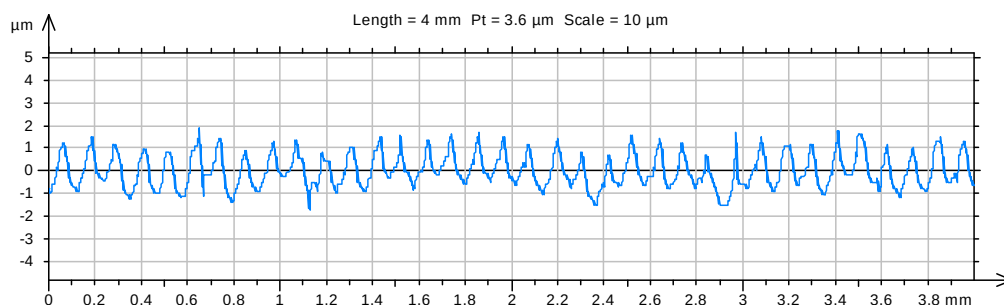


Figura 14 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

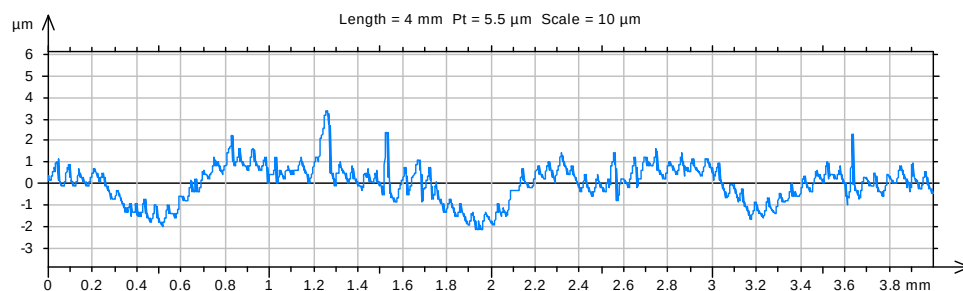


Figura 15 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF**, **direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

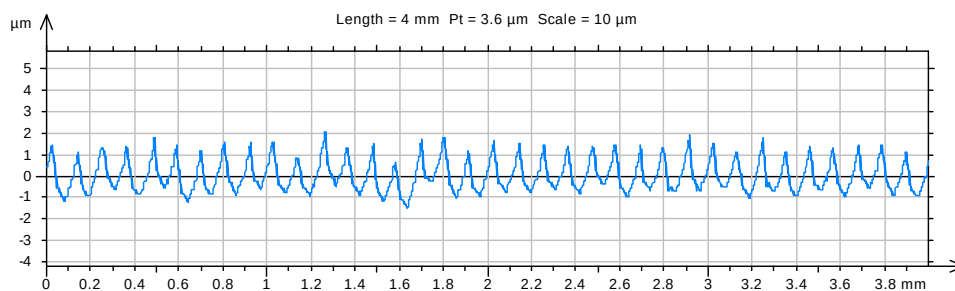


Figura 16 - Perfil de rugosidade para condição de corte com **MQF, direção transversal** com  $r_{\xi} = 0,8$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

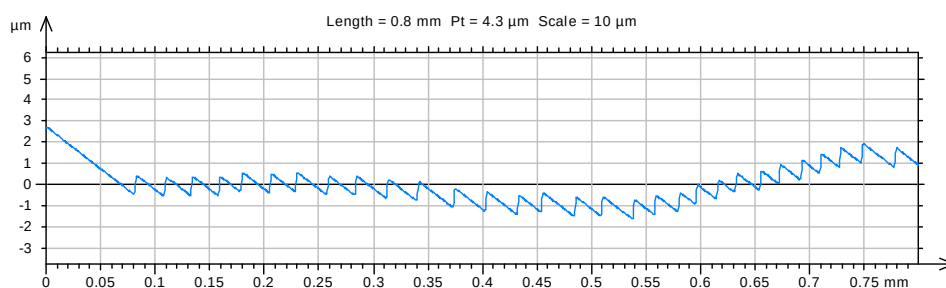


Figura 17 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco, direção radial** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

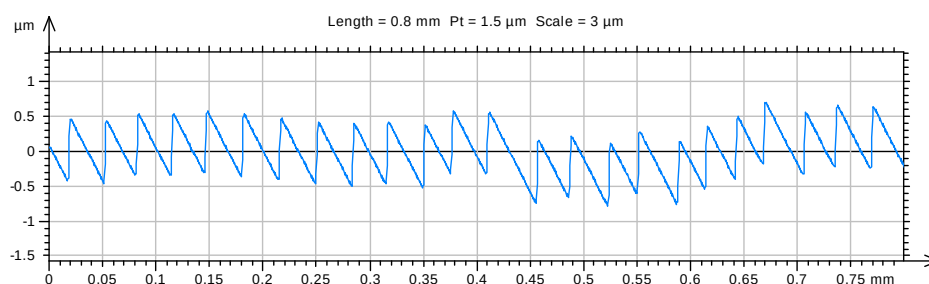


Figura 18 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco, direção radial** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 220$  m/min e  $f = 0,10$  mm/volta.

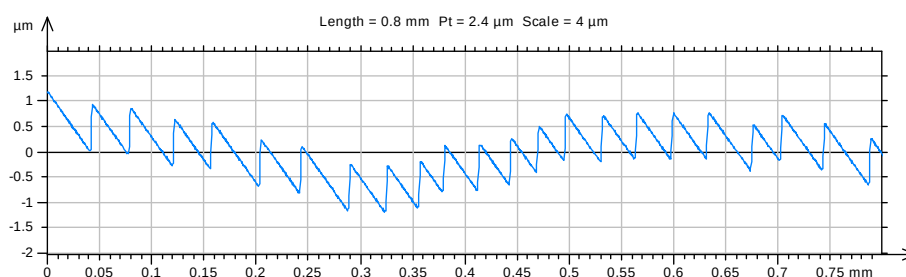


Figura 19 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco, direção radial** com  $r_{\xi} = 0,4$  mm;  $v_C = 280$  m/min e  $f = 0,05$  mm/volta.

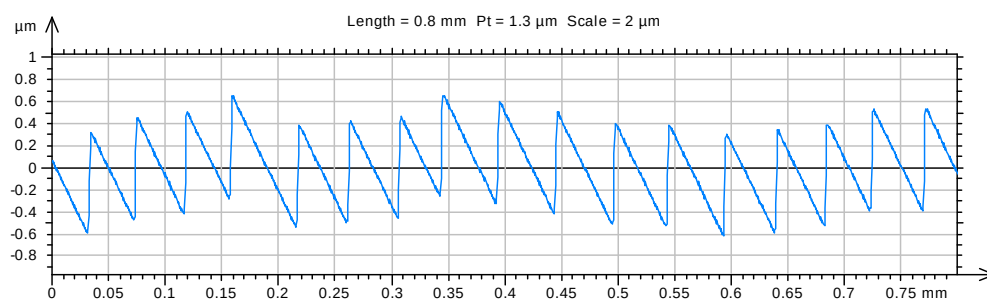


Figura 20 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção radial** com  $r_\xi = 0,4 \text{ mm}$ ;  $v_C = 280 \text{ m/min}$  e  $f = 0,10 \text{ mm/volta}$ .

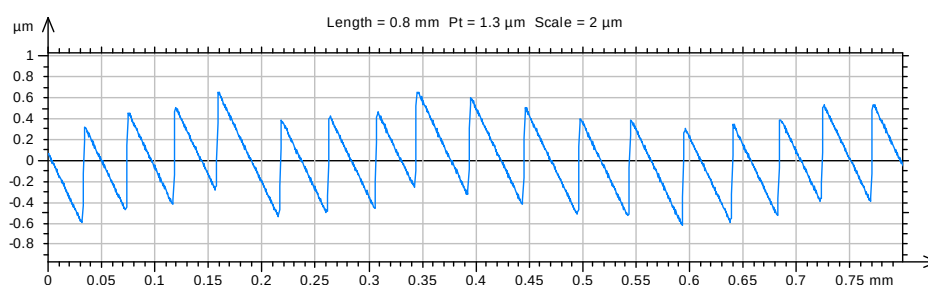


Figura 21 - Perfil de rugosidade para condição de corte a **seco**, **direção radial** com  $r_\xi = 0,8 \text{ mm}$ ;  $v_C = 220 \text{ m/min}$  e  $f = 0,05 \text{ mm/volta}$ .