

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

MARCO ANTONIO STIPKOVIC

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO  
FRESAMENTO DE ACABAMENTO DO AÇO  
AISI 4140 ENDURECIDO**

São Bernardo do Campo  
2012

MARCO ANTONIO STIPKOVIC

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO  
FRESAMENTO DE ACABAMENTO DO AÇO  
AISI 4140 ENDURECIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro  
Universitário da FEI como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica, orientada pelo Professor  
Dr. Sérgio Delijaicov.

São Bernardo do Campo  
2012

Stipkovic, Marco Antonio.

Análise da integridade superficial no fresamento de acabamento do aço AISI 4140 endurecido / Marco Antonio Stipkovic. São Bernardo do Campo, 2012.

135 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Delijaicov

1. Fresamento de acabamento. 2. Integridade superficial. 3. Tensão residual. 4. Aços endurecidos. I. Delijaicov, Sérgio, orient. II. Título.

CDU 621.7



Centro Universitário da **FEI**

# APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

## Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

**Aluno:** Marco Antonio Stipkovic

**Matrícula:** 211104-5

**Título do Trabalho:** Análise da integridade superficial no fresamento de acabamento do aço AISI4140 endurecido.

**Área de Concentração:** Materiais e Processos

**ORIGINAL ASSINADA**

**Orientador:** Prof. Dr. Sergio Delijaicov

**Data da realização da defesa:** 13/12/2012

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 13 de Dezembro de 2012.

### MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Sergio Delijaicov

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Éd Cláudio Bordinassi

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sérgio Luis Rabelo de Almeida

Ass.: \_\_\_\_\_

### VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS  
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

À minha esposa Andrea, pela compreensão e apoio, aos meus filhos Lucca e Mirella pela paciência e aos meus pais, Marco e Marinez, pelo grande incentivo recebido.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Sergio Delijaicov, pela orientação objetiva, apoio incondicional na fase dos ensaios e grande senso crítico durante todo o processo de aprendizado.

Ao professor Éd Claudio Bordinassi, pela contribuição positiva apresentada durante a banca de qualificação e por compor a banca avaliadora da minha dissertação.

Ao professor Sergio Luis Rabelo de Almeida, por compor a banca avaliadora da minha dissertação, com grande entusiasmo e contribuição técnica.

Ao professor Marcelo Neublum Capuano., pelos ricos comentários propostos durante minha apresentação de qualificação.

Ao colega de turma, Felipe Mariano Brandão, que por diversas vezes me ajudou durante a fase dos ensaios.

Aos professores do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Adriana Martinelli Catelli de Souza, Agenor de Toledo Fleury, Gustavo Henrique Bolognesi Donato, Roberto Bortolussi, Rodrigo Magnabosco e Sergio Delijaicov.

Agradeço também a equipe da Prensas Schuler, em particular ao engenheiro Ricardo Romero Codolo pelo apoio técnico e ao estagiário de engenharia Rodrigo Suzuki pela ajuda na realização dos ensaios mecânicos de tensão residual.

Por fim, um agradecimento especial a minha família, representada pela figura de meu pai, Marco Stipkovic Filho, por sempre servir como modelo e fonte de inspiração do meu desenvolvimento profissional e pessoal.

*“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”*

*José de Alencar*

## RESUMO

Este trabalho se fundamentou na análise da integridade superficial no fresamento de acabamento de um aço endurecido, AISI 4140 temperado e revenido com dureza de 58 HRC, realizada com a utilização de pastilhas de CBN (nitreto cúbico de boro), obtida através da variação de três parâmetros básicos de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte). A caracterização da integridade superficial foi obtida através da análise do comportamento da rugosidade, das tensões residuais e dos esforços de corte. O planejamento experimental adotado foi o composto central, muito utilizado em ensaios relacionados a experimentos de usinagem. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente pelo software “Statistica”, possibilitando a geração de uma equação matemática que visa a obtenção de um determinado valor de rugosidade superficial em função da otimização dos três parâmetros de corte adotados. As rugosidades encontradas, na faixa de  $R_a$  0,16 a 0,4  $\mu m$ , indicam claramente que é possível substituir o processo de retificação pelo de fresamento de acabamento com ferramentas de CBN, diminuindo o tempo de usinagem e consequentemente o custo da peça usinada. As tensões residuais superficiais geradas foram compressivas. O parâmetro de corte de maior influência na caracterização da integridade superficial no processo de fresamento de acabamento foi o avanço de corte.

.

Palavras chave: Fresamento de acabamento. Integridade superficial. Tensão residual. Aços endurecidos.

## **ABSTRACT**

This work is based on the surface integrity analysis of a hardened steel, AISI 4140 quenched and tempered with 58HRC, during an end milling process executed with CBN (cubic boron nitride) tool, obtained by varying three basic cutting parameters (cutting speed, feed and cutting depth). The surface integrity characterization was conducted by the behavior analysis of the roughness, residual stresses and cutting forces. For the experimental planning, it was decided to use a central composite design, widely applied in many researches related to machining experiments. The results were statistically processed by the software "Statistica", enabling the generation of a mathematical equation to predicted a surface roughness value due to the optimization of the three cutting parameters adopted. The surface roughness results are in the range of Ra 0,16 to 0,4, providing a clearly indication that it is possible to replace grinding process by end milling with CBN tools of hardened steels, reducing machining time and hence the machined part cost. It was generated compressive superficial residual stresses. The cutting parameter with major influence in the surface integrity, during the end milling process was the feed cutting.

**Keywords:** End Milling. Surface Integrity. Residual Stress. Hardened steel.

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**AISI:** American Iron and Steel Institute – Instituto americano do Ferro e do Aço

**ANSI:** American Nation Standards Institute – Instituto Americano de Normas

**CBN:** Nitreto Cúbico de Boro

**Cr:** Cromo

**DCC:** Delineamento Composto Central

**DIN:** Deutsches Institut für Normung – Instituto Alemão para Normalização

**FEI:** Faculdade de Engenharia Industrial

**HRC:** Rockwell C

**HSM:** High Speed Milling – Fresamento em altas velocidades

**HV:** Dureza Vickers

**IS:** Integridade superficial

**ISO:** International Organization for Standardization - Organização Internacional para Normalização

**JIS:** Japan Industrial Standard – Normas Industriais do Japão

**NBR:** Norma brasileira

**NLREG:** Nonlinear Regression Analysis Program – Programa de Análise de regressões não lineares

**PCBN:** Nitreto Cúbico de Boro Policristalino

**SAE:** Society of Automotive Engineers – Sociedade de Engenheiros da Mobilidade

**TiAlN:** Carbonitreto de Titânio Alumínio

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FIGURA 4.1:</b> Fresamento tangencial ou periférico.....                                                                                                 | 25 |
| <b>FIGURA 4.2:</b> Fresamento frontal.....                                                                                                                  | 25 |
| <b>FIGURA 4.3.1:</b> Fresamento plano.....                                                                                                                  | 26 |
| <b>FIGURA 4.3.2:</b> Fresamento circular.....                                                                                                               | 26 |
| <b>FIGURA 4.3.3:</b> Fresamento de forma.....                                                                                                               | 27 |
| <b>FIGURA 4.3.4:</b> Fresamento de geração (engrenagens).....                                                                                               | 27 |
| <b>FIGURA 4.3.5:</b> Fresamento de perfil.....                                                                                                              | 27 |
| <b>FIGURA 4.4:</b> Fresamento Concordante e Discordante.....                                                                                                | 28 |
| <b>FIGURA 4.5:</b> Grandezas de fresamento frontal, ferramenta de oito arestas.....                                                                         | 30 |
| <b>FIGURA 4.6:</b> Decomposição das forças de usinagem no fresamento.....                                                                                   | 31 |
| <b>FIGURA 4.7:</b> Decomposição das forças de usinagem no dinamômetro.....                                                                                  | 32 |
| <b>FIGURA 4.8:</b> Diagrama com as propriedades de diversos materiais para ferramentas de corte.....                                                        | 37 |
| <b>FIGURA 4.9:</b> Comparação das faixas de desgaste de ferramenta na usinagem de quatro diferentes aços endurecidos com CBN.....                           | 39 |
| <b>FIGURA 4.10:</b> Distribuição das camadas superficiais de corpos usinados.....                                                                           | 40 |
| <b>FIGURA 4.11:</b> Efeito da vida a fadiga de um aço AISI 4340 temperado e revenido com 51HRC, retificado em condições de pequenos e grandes esforços..... | 41 |
| <b>FIGURA 4.12:</b> Elementos da textura de uma superfície.....                                                                                             | 43 |
| <b>FIGURA 4.13:</b> Modo de determinação da rugosidade Ra.....                                                                                              | 43 |
| <b>FIGURA 4.14:</b> Modo de determinação da rugosidade Rt.....                                                                                              | 44 |
| <b>FIGURA 4.15:</b> Representação esquemática do estado de tensões residuais em um aço duplex, segundo a escola alemã.....                                  | 46 |
| <b>FIGURA 4.16:</b> Geração de tensão residual no torneamento.....                                                                                          | 47 |
| <b>FIGURA 4.17:</b> Mecanismo de tensão residual.....                                                                                                       | 47 |
| <b>FIGURA 4.18:</b> Espalhamento e difração de raios X num arranjo cristalino.....                                                                          | 48 |
| <b>FIGURA 4.19:</b> Representação da roseta tipo M062 utilizada nos ensaios de tensão residual.....                                                         | 49 |
| <b>FIGURA 4.20:</b> Superfície usinada com PCBN do aço X38CrMoV5 com formação de camada branca.....                                                         | 51 |
| <b>FIGURA 4.21:</b> Cavaco gerado com formação de camada branca na usinagem com PCBN do aço 35NiCrMo16.....                                                 | 52 |

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FIGURA 4.22:</b> Delineamento Composto Central para três fatores.....                                                                                                | 53 |
| <b>FIGURA 5.1:</b> Desenho do Corpo de prova de AISI 4140 forjado, com a superfície superior temperada e revenida para $58\pm 2$ HRC e profundidade de $3\pm 1$ mm..... | 55 |
| <b>FIGURA 5.2:</b> Corpos de prova de AISI 4140 utilizados nos ensaios de fresamento.....                                                                               | 56 |
| <b>FIGURA 5.3:</b> Foto da placa rígida de fixação dos corpos de prova no dinamômetro.....                                                                              | 57 |
| <b>FIGURA 5.4:</b> Montagem dos corpos de prova no dinamômetro através de uma placa rígida.....                                                                         | 57 |
| <b>FIGURA 5.5:</b> Corpo de prova em operação de acabamento.....                                                                                                        | 60 |
| <b>FIGURA 5.6:</b> Porta ferramenta de diâmetro 80mm montado com os insertos de desbaste..                                                                              | 60 |
| <b>FIGURA 5.7:</b> Porta ferramenta de diâmetro.63mm montado com os insertos de CBN para operação de acabamento.....                                                    | 61 |
| <b>FIGURA 5.8:</b> Geometria do Inserto de CBN tipo R245 12T3 E CB50 da SANDVIK.....                                                                                    | 61 |
| <b>FIGURA 5.9:</b> Foto do inserto utilizado nos ensaios de CBN tipo R245 12T3 E CB50, de duas arestas cortantes da SANDVIK.....                                        | 62 |
| <b>FIGURA 5.10:</b> Fresadora vertical convencional Sanches Blanes, modelo FU-1 (ISO 40).....                                                                           | 62 |
| <b>FIGURA 5.11:</b> Dinamômetro utilizado para medições dos esforços de usinagem.....                                                                                   | 63 |
| <b>FIGURA 5.12:</b> Distribuição das células de carga em forma de anel.....                                                                                             | 63 |
| <b>FIGURA 5.13:</b> Rugosímetro Mitutoyo SJ-301 utilizado para medição da rugosidade dos ensaios de usinagem de acabamento.....                                         | 64 |
| <b>FIGURA 5.14:</b> Fresadora pneumática específica para medir tensão residual pela técnica do furo cego.....                                                           | 65 |
| <b>FIGURA 5.15:</b> Esquema do sistema integrado para medição de tensão residual pela técnica do furo cego aplicado.....                                                | 66 |
| <b>FIGURA 5.16:</b> Roseta tipo PA-06-062RE-120, empresa Excel Sensores.....                                                                                            | 66 |
| <b>FIGURA 5.17:</b> Microscópio Olympus GX-51 utilizado para verificar a existência de camada branca .....                                                              | 67 |
| <b>FIGURA 5.18:</b> Durômetro.....                                                                                                                                      | 68 |
| <b>FIGURA 6.1:</b> Pareto da influência dos parâmetros de corte na força tangencial.....                                                                                | 71 |
| <b>FIGURA 6.2:</b> Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a força tangencial adotando $V_c$ de 225m/min.....                                                                 | 71 |
| <b>FIGURA 6.3:</b> Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força tangencial adotando $a_p$ de 0,15mm.....                                                                   | 72 |
| <b>FIGURA 6.4:</b> Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a força tangencial adotando $f_z$ de 0,1mm/rev.....                                                                | 73 |
| <b>FIGURA 6.5:</b> Pareto da influência dos parâmetros de corte na força radial.....                                                                                    | 75 |
| <b>FIGURA 6.6:</b> Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a força radial adotando $V_c$ de 225m/min.....                                                                     | 76 |
| <b>FIGURA 6.7:</b> Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força radial adotando $a_p$ de 0,15mm.....                                                                       | 76 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FIGURA 6.8:</b> Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a força radial adotando $f_z$ de 0,1mm/rev.....                      | 77 |
| <b>FIGURA 6.9:</b> Pareto da influência dos parâmetros de corte na força passiva.....                                     | 79 |
| <b>FIGURA 6.10:</b> Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a força passiva adotando $V_c$ de 225m/min.....                     | 80 |
| <b>FIGURA 6.11:</b> Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força passiva adotando $a_p$ de 0,15mm.....                       | 81 |
| <b>FIGURA 6.12:</b> Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a força passiva adotando $f_z$ de 0,1mm/rev.....                    | 81 |
| <b>FIGURA 6.13:</b> Pareto da influência dos parâmetros de corte na força resultante.....                                 | 83 |
| <b>FIGURA 6.14:</b> Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força passiva adotando $a_p$ de 0,15mm.....                       | 83 |
| <b>FIGURA 6.15:</b> Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a força resultante adotando $V_c$ de 225m/min.....                  | 84 |
| <b>FIGURA 6.16:</b> Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a força passiva adotando $f_z$ de 0,1mm/rev.....                    | 84 |
| <b>FIGURA 6.17:</b> Pareto da influência dos parâmetros de corte na rugosidade.....                                       | 86 |
| <b>FIGURA 6.18:</b> Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a rugosidade adotando $a_p$ de 0,15mm.....                          | 87 |
| <b>FIGURA 6.19:</b> Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a rugosidade adotando $V_c$ de 225m/min.....                        | 87 |
| <b>FIGURA 6.20:</b> Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a rugosidade adotando $f_z$ de 0,1mm/rev.....                       | 88 |
| <b>FIGURA 6.21:</b> Gráfico do NLREG, relação não linear da rugosidade em função de $a_p$ , $f_z$ e $V_c$ .....           | 89 |
| <b>FIGURA 6.22:</b> Gráfico do NLREG, relação linear da rugosidade em função de $a_p$ , $f_z$ e $V_c$ .....               | 90 |
| <b>FIGURA 6.23:</b> Gráfico das tensões residuais X e Y em função da profundidade da superfície do corpo de prova 01..... | 92 |
| <b>FIGURA 6.24:</b> Pareto da influência dos parâmetros de corte na Tensão residual.....                                  | 92 |
| <b>FIGURA 6.25:</b> Gráfico das tensões residuais X e Y em função da profundidade da superfície do corpo de prova 12..... | 93 |
| <b>FIGURA 6.26:</b> Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a tensão residual adotando $a_p$ de 0,15mm.....                     | 94 |
| <b>FIGURA 6.27:</b> Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a tensão residual adotando $f_z$ de 0,10mm/rev.....                 | 94 |
| <b>FIGURA 6.28:</b> Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a tensão residual adotando $V_c$ de 225m/min.....                   | 95 |
| <b>FIGURA 6.29:</b> Micrografia corpo de prova 04. Aumento de 500x com ataque de Nital 2%.....                            | 96 |
| <b>FIGURA 6.30:</b> Micrografia corpo de prova 04. Aumento de 1000x com ataque de Nital 2%.....                           | 96 |

## LISTA DE FÓRMULAS

**Fórmula 4.1:** Velocidade de corte ( $V_c$ )

**Fórmula 4.2:** Velocidade de avanço ( $V_f$ )

**Fórmula 4.3:** Avanço por dente ( $f_z$ )

**Fórmula 4.4:** Avanço de corte ( $f_c$ )

**Fórmula 4.5:** Força tangencial ativa ( $F_t$ )

**Fórmula 4.6:** Força de usinagem ( $F_u$ )

**Fórmula 6.1:** Rugosidade teórica não linear em função de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$  ( $R_a$ )

**Fórmula 6.2:** Rugosidade real não linear em função de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$  ( $R_a$ )

**Fórmula 6.3:** Rugosidade teórica linear em função de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$  ( $R_a$ )

**Fórmula 6.4:** Rugosidade real linear em função de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$  ( $R_a$ )

**Fórmula 6.5:** Força resultante em função de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$  ( $R$ )

**Fórmula 6.6:** Rugosidade em função de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$  ( $R_a$ )

**Fórmula 6.7:** Tensão residual em função de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$  ( $T_{res}$ )

**Fórmula 7.1:** Rugosidade não linear em função de  $f_z$  e  $a_p$  ( $R_a$ )

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>TABELA 4.1:</b> Características gerais das materiais de corte.....            | 35  |
| <b>TABELA 4.2:</b> Origens de Tensões Residuais.....                             | 45  |
| <b>TABELA 5.1:</b> Composição química dos corpos de prova.....                   | 54  |
| <b>TABELA 5.2:</b> Parâmetros de corte utilizados para operação de desbaste..... | 58  |
| <b>TABELA 5.3:</b> Parâmetros de corte adotados para operação de acabamento..... | 59  |
| <b>TABELA 6.1:</b> Resultados obtidos para a força tangencial.....               | 70  |
| <b>TABELA 6.2:</b> Resultados obtidos para a força radial.....                   | 74  |
| <b>TABELA 6.3:</b> Resultados obtidos para a força passiva.....                  | 78  |
| <b>TABELA 6.4:</b> Resultados obtidos para a força resultante.....               | 82  |
| <b>TABELA 6.5:</b> Resultados obtidos para a rugosidade.....                     | 85  |
| <b>TABELA 6.6:</b> Resultados obtidos para a tensão residual.....                | 91  |
| <b>TABELA 6.7:</b> Otimização 1.....                                             | 98  |
| <b>TABELA 6.8:</b> Otimização 2.....                                             | 99  |
| <b>TABELA 6.9:</b> Otimização 3.....                                             | 100 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas maiúsculas

|          |                                                                                             |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| CM       | Camada branca                                                                               |
| $F_{ap}$ | Força de apoio [N]                                                                          |
| $F_c$    | Força de corte [N]                                                                          |
| $F_f$    | Força de avanço [N]                                                                         |
| $F_p$    | Força passiva de usinagem [N]                                                               |
| $F_u$    | Força total de usinagem [N]                                                                 |
| $F_t$    | Força tangencial ou ativa de usinagem [N]                                                   |
| $F_x$    | Força de usinagem no eixo X                                                                 |
| $F_y$    | Força de usinagem no eixo Y                                                                 |
| $F_z$    | Força de usinagem no eixo Z                                                                 |
| R        | Força resultante de corte [N]                                                               |
| $R^2$    | Medida do quanto uma equação de regressão múltipla explica variações da variável dependente |
| Ra       | Média aritmética das alturas da rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]                                |
| Rt       | Rugosidade máxima [ $\mu\text{m}$ ]                                                         |
| Rz       | Rugosidade total [ $\mu\text{m}$ ]                                                          |
| Rq       | Rugosidade quadrática média [ $\mu\text{m}$ ]                                               |
| Tres     | Tensão residual máxima nas direções principais X ou Y [MPa]                                 |
| $V_c$    | Velocidade de corte [m/min]                                                                 |
| $V_f$    | Velocidade de avanço [mm/min]                                                               |
| X        | Orientação no eixo longitudinal, coordenada no eixo X [mm]                                  |
| Y        | Orientação no eixo transversal, coordenada no eixo Y [mm]                                   |
| Z        | Orientação no eixo das elevações no plano XY [mm]                                           |

### Letras romanas minúsculas

|       |                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------|
| $a_e$ | Penetração de trabalho [mm]                                     |
| $a_p$ | Profundidade ou largura de usinagem ou penetração de corte [mm] |
| d     | diâmetro da ferramenta [mm]                                     |

|       |                                                           |
|-------|-----------------------------------------------------------|
| $d$   | parâmetro do reticulado da lei de Braag [ $\mu\text{m}$ ] |
| $f$   | Avanço [mm/volta]                                         |
| $f_z$ | avanço por dente ou faca [mm/dente/volta]                 |
| $f_c$ | Avanço de corte [mm]                                      |
| $n$   | Rotação [volta/min]                                       |
| $z$   | Número de dentes da fresa                                 |

### **Letras gregas**

|            |                                                                                                                   |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\pi$      | Perímetro da circunferência dividido pelo diâmetro da mesma                                                       |
| $\theta$   | Ângulo de refração da lei de Braag [graus]                                                                        |
| $\lambda$  | Comprimento de onda dos raios-x da lei de Braag [ $\mu\text{m}$ ]                                                 |
| $\sigma_1$ | Macrotensões [MPa]                                                                                                |
| $\sigma_2$ | Pseudo-Macrotensões [MPa]                                                                                         |
| $\sigma_3$ | Microtensões [MPa]                                                                                                |
| $\varphi$  | Ângulo de contato do dente da ferramenta com a peça [graus]                                                       |
| $\psi$     | Ângulo entre a reta normal à superfície da peça e a reta normal ao plano de parâmetro “d” da lei de Braag [graus] |

## SUMÁRIO

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                      | <b>20</b> |
| <b>2 JUSTIFICATIVAS.....</b>                                  | <b>22</b> |
| <b>3 OBJETIVOS.....</b>                                       | <b>23</b> |
| <b>4 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>                           | <b>24</b> |
| <b>4.1 Fresamento.....</b>                                    | <b>24</b> |
| 4.1.1 Introdução.....                                         | 24        |
| 4.1.2 Parâmetros de Fresamento.....                           | 29        |
| 4.1.3 Esforços de Fresamento.....                             | 30        |
| 4.1.4 Ferramentas de corte.....                               | 33        |
| 4.1.5 Ferramentas de corte de CBN.....                        | 36        |
| 4.1.6 Desgaste das Ferramentas de corte.....                  | 37        |
| <b>4.2 Integridade Superficial.....</b>                       | <b>39</b> |
| 4.2.1 Causas de mudanças da integridade superficial.....      | 41        |
| 4.2.2 Acabamento superficial, textura.....                    | 42        |
| <b>4.3 Tensão residual.....</b>                               | <b>44</b> |
| 4.3.1 Métodos de medição de tensões residuais.....            | 47        |
| <b>4.4 Camada branca.....</b>                                 | <b>50</b> |
| <b>4.5 Planejamento experimental.....</b>                     | <b>51</b> |
| <b>5 METODOLOGIA.....</b>                                     | <b>54</b> |
| <b>5.1 Material.....</b>                                      | <b>54</b> |
| 5.1.1 Material AISI 4140.....                                 | 54        |
| 5.1.2 Corpo de prova.....                                     | 55        |
| <b>5.2 Métodos.....</b>                                       | <b>56</b> |
| 5.2.1 Operação de desbaste.....                               | 57        |
| 5.2.2 Operação de acabamento.....                             | 58        |
| 5.2.3 Ferramentas de corte.....                               | 60        |
| 5.2.4 Fresadora.....                                          | 62        |
| 5.2.5 Dinamômetro para medição dos esforços de usinagem.....  | 63        |
| 5.2.6 Rugosímetro para medição do acabamento superficial..... | 64        |

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.7 Fresadora pneumática para medição das tensões residuais.....                   | 65         |
| 5.2.8 Microscópio para medição da camada branca.....                                 | 67         |
| 5.2.9 Durômetro.....                                                                 | 67         |
| <b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                | <b>69</b>  |
| <b>6.1 Esforços de usinagem.....</b>                                                 | <b>69</b>  |
| 6.1.1 Força tangencial ( $F_t$ ).....                                                | 69         |
| 6.1.2 Força radial ( $F_r$ ).....                                                    | 74         |
| 6.1.3 Força passiva ( $F_p$ ).....                                                   | 77         |
| 6.1.4 Força resultante ( $R$ ) .....                                                 | 82         |
| <b>6.2 Rugosidade.....</b>                                                           | <b>85</b>  |
| <b>6.3 Tensão residual.....</b>                                                      | <b>91</b>  |
| <b>6.4 Camada branca.....</b>                                                        | <b>95</b>  |
| <b>6.5 Otimização do desempenho operacional da peça e do processo de corte .....</b> | <b>97</b>  |
| 6.5.1 Otimização 1 .....                                                             | 97         |
| 6.5.2 Otimização 2 .....                                                             | 98         |
| 6.5.3 Otimização 3 .....                                                             | 99         |
| <b>7 CONCLUSÕES.....</b>                                                             | <b>101</b> |
| <b>7.1 Conclusões sobre os esforços de usinagem.....</b>                             | <b>101</b> |
| <b>7.2 Conclusões sobre a rugosidade.....</b>                                        | <b>102</b> |
| <b>7.3 Conclusões sobre a tensão residual.....</b>                                   | <b>102</b> |
| <b>7.4 Conclusões sobre a camada branca.....</b>                                     | <b>103</b> |
| <b>7.5 Conclusões gerais.....</b>                                                    | <b>103</b> |
| <b>8 SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....</b>                                         | <b>104</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                              | <b>105</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>                                                                   | <b>110</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Em função da constante busca em reduzir os custos de fabricação de componentes mecânicos no segmento de máquinas e equipamentos, há uma tendência cada vez maior em substituir o processo de retificação de aços endurecidos na faixa de 45 a 65 HRC, pelos processos de torneamento e de fresamento com ferramentas de nitreto cúbico de boro CBN, que permitem trabalhos com maiores velocidades de corte e altas taxas de remoção de material (LAHIFF; GORDON; PHELAN, 2007).

Grande parte dos trabalhos científicos, que abordam o tema de fresamento de aços endurecidos, versam sobre aplicações na indústria de matrizes e moldes, e utilizam como matéria prima os aços AISI D2 de alto teor de carbono e cromo, de alta temperabilidade e resistências mecânica e ao desgaste, ou AISI H13 ligado ao cromo, molibdênio e vanádio, de excelente tenacidade e de boa resistência mecânica, ao desgaste e à fadiga térmica. Entretanto, o presente trabalho utiliza como matéria prima o aço para construção mecânica AISI 4140 forjado e posteriormente temperado e revenido a 58 HRC, utilizado para fabricação de eixos, pinos, grampos e guias lineares na indústria de máquinas e equipamentos, que apresenta alta temperabilidade, má soldabilidade, e boa resistência mecânica à torção e à fadiga.

A integridade superficial é influenciada por fatores dependentes do material, como a composição química e tratamento térmico aplicado, mas principalmente pela variação dos diversos parâmetros relacionados ao processo de fresamento como a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, características da ferramenta e utilização de fluídos refrigerantes. Ainda deve-se ressaltar que com o aumento das velocidades, profundidades e avanços de corte, propiciadas pelo progresso tecnológico das ferramentas de corte, a importância da rigidez das máquinas operatrizes e o modo de fixação das peças e porta ferramentas, também influenciam a integridade superficial da peça e consequentemente a vida do componente fabricado (POULACHON et al., 2003).

Além da caracterização da integridade superficial pelas análises de acabamento superficial e da microestrutura do aço endurecido, faz-se necessário a análise das tensões residuais, medidas pelo processo de furo cego, as quais somadas com as tensões oriundas dos esforços gerados pelo componente durante o seu funcionamento, tem grande relevância na vida a fadiga. Normalmente, a geração de tensões residuais superficiais compressivas tendem a ser benéficas enquanto que as tratativas prejudiciais (FALLBOEHMER et al., 2000). Experimentos de fresamento de acabamento a altas velocidades (HSM – High speed

Machining), realizados no AISI 4140 com dureza na faixa de 175HV, utilizando-se ferramenta de metal duro revestida com TiAlN, apresentaram tensões residuais superficiais de tração que tendem a ser compressivas no interior do material. A razão principal deste gradiente de tensão é atribuída às altas temperaturas ocorridas durante o processo de corte, pois a superfície usinada acabou temperada em função do rápido processo de aquecimento e resfriamento causado pelo contato da ferramenta na superfície da peça (CHEVRIER, P., et al., 2003).

## 2 JUSTIFICATIVAS

Visando a diminuição dos custos de fabricação de superfícies planas de componentes usinados, aliados a necessidade crescente de obtenção de produtos de qualidade superior, necessários para manter a competitividade das indústrias de máquinas e equipamentos num mundo altamente globalizado, se faz necessário o uso de conceitos inovativos e muitas vezes combinados, como a aplicação de novas ferramentas de corte com materiais endurecidos em substituição a processos mais lentos ou materiais não disponíveis em certos mercados.

Diante deste cenário, o tema desenvolvido neste trabalho mostra-se bastante alinhado ao cenário industrial brasileiro, pois os experimentos propostos de fresamento de acabamento com ferramentas de CBN no aço AISI 4140 endurecido, podem propiciar a eliminação do processo de retificação, o qual implica num tempo maior de usinagem e na necessidade de troca de máquina (fresadora para retífica), aumentando o tempo morto de setup de máquina, sem nenhum detrimento à rugosidade superficial e com a possibilidade de geração de tensões residuais compressivas.

Também vale a pena ressaltar a vantagem da possível eliminação do uso de fluido refrigerante, que além de tornar o processo mais barato, traz o benefício de minimizar os prejuízos ao meio-ambiente, facilitando o enquadramento do processo produtivo às exigências da norma ISO 14000, que estabelece diretrizes sobre a área de gestão ambiental no âmbito industrial.

### 3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é verificar a influência da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na integridade superficial de um aço endurecido, mensurada através dos valores encontrados de rugosidade superficial, que se posicionados na faixa de  $R_a$  0,2 a 0,4  $\mu m$ , permitirão a eliminação do processo de retificação e do uso de fluidos refrigerantes.

Como objetivos concorrentes, destacam-se:

- a) A geração de equações otimizadas da rugosidade para o processo de fresamento de acabamento com ferramentas de CBN em função dos parâmetros de corte investigados, através do estudo estatístico das possíveis interações entre os parâmetros adotados, visando a busca dos menores tempos de usinagem;
- b) A análise das tensões residuais em função dos parâmetros de corte que podem propiciar a geração de tensões residuais superficiais compressivas, benéficas quando geradas sob superfícies planas expostas a esforços de contato cíclicos, como é o caso das pistas de contato de guias roletadas;
- c) A verificação da existência de camada branca na superfície usinada, que pode acelerar o processo de propagação de micro-trincas, abreviando a vida útil do componente.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

### 4.1 Fresamento

#### 4.1.1 Introdução

O processo de usinagem denominado fresamento é largamente utilizado na fabricação de peças para os mais diversos segmentos industriais, e consiste basicamente na remoção de uma grande quantidade de material metálico ou não, num reduzido espaço de tempo.

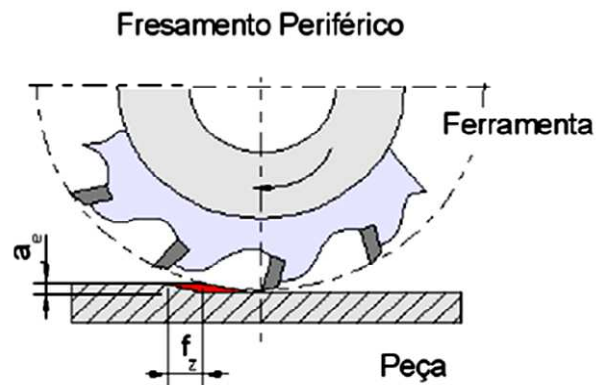
É um processo muito versátil, capaz de transformar superfícies bidimensionais em superfícies tridimensionais complexas, pois apresenta uma vasta diversidade de ferramentas com diferentes geometrias de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Segundo Tschaetsch (1980), o fresamento é um processo de usinagem executado por ferramentas de múltiplas arestas de corte. A ferramenta realiza o movimento de corte, rotacionando sobre seu eixo, seja na vertical ou horizontal, enquanto a peça, fixada à mesa da fresadora, realiza o movimento de avanço. O movimento de avanço é, normalmente executado em três direções perpendiculares geradas ou pela ferramenta, ou pela peça ou por uma combinação das duas.

Quanto a classificação, costuma-se caracterizar o processo de fresamento em função do eixo da ferramenta em relação a superfície usinada, gerando o fresamento horizontal, vertical ou inclinado.

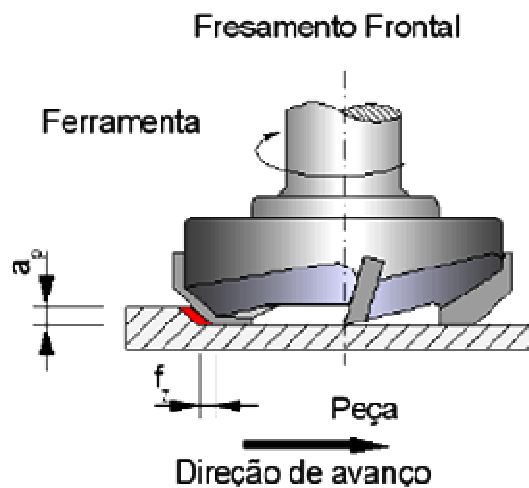
Kalpakjian (1995), classificou os três principais processos de fresamento como:

- **Fresamento Tangencial ou periférico.** Neste processo o eixo de giro de corte é paralelo a superfície a ser usinada da peça. As ferramentas de corte utilizadas no fresamento tangencial podem ter dentes de corte retos ou helicoidais, produzindo cortes ortogonais ou oblíquos. Dentes helicoidais são preferidos aos dentes retos, pois geram menores esforços nos dentes, resultando em usinagens suaves e forças reduzidas na ferramenta. A figura 4.1 exemplifica o fresamento tangencial de uma superfície plana.
- **Fresamento Frontal.** Diferentemente do fresamento tangencial, o eixo de corte é perpendicular à superfície usinada, logo os dentes de corte encontram-se dispostos na superfície frontal da ferramenta. Como existe um movimento relativo entre os dentes de corte e a peça, o fresamento frontal deixa marcas de avanço na superfície usinada mais significativas do que nas operações de torneamento. A figura 4.2 apresenta o fresamento frontal de uma superfície plana.



**Figura 4.1:** Fresamento Tangencial ou Periférico.

Fonte: Stoeterau (2007)



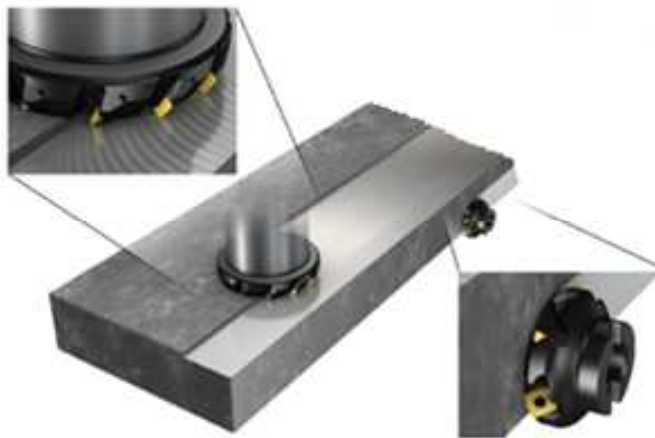
**Figura 4.2:** Fresamento Frontal.

Fonte: Stoeterau (2007)

- **Fresamento de Acabamento.** Neste processo, usualmente a ferramenta de corte gira num eixo perpendicular a superfície usinada, mas pode ser angulada para gerar superfícies inclinadas. A face inferior da ferramenta de corte pode ter dentes ativos, propiciando operações de furação antes do início do comando de avanço. O fresamento de acabamento também pode utilizar ferramentas com ponta esférica, possibilitando a geração de superfícies curvas. Segundo Koshy (2002), são características deste fresamento, o uso de velocidades de corte elevadas, traduzidas em rotações acima de 10.000 rpm para ferramentas de diâmetros inferiores a 20 mm, combinadas com avanço de corte por dente próximo de 0,1 mm/rev/dente e profundidades de corte na faixa de 0,2 a 1 mm.

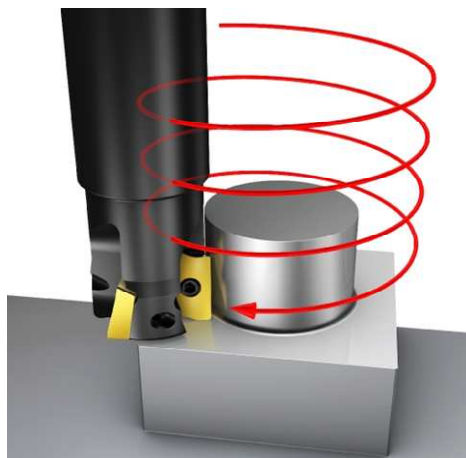
Outra caracterização importante e completa do processo de fresamento é a descrita pela Norma DIN 8589, que classifica o processo não em função da posição do eixo da ferramenta com relação a peça, mas sim a forma da superfície gerada:

- Fresamento plano, vide figura 4.3.1;
- Fresamento circular, vide figura 4.3.2;
- Fresamento de forma, vide figura 4.3.3;
- Fresamento de geração, vide figura 4.3.4 (engrenagens);
- Fresamento de perfil, vide figura 4.3.5



**Figura 4.3.1:** Tipo de Fresamento plano, segundo DIN8589.

Fonte: Sandvik (catálogo eletrônico), 2002.



**Figura 4.3.2:** Tipo de Fresamento circular, segundo DIN8589.

Fonte: Sandvik (catálogo eletrônico), 2002.



**Figura 4.3.3:** Tipo de Fresamento de forma, segundo DIN8589.

Fonte: Sandvik (catálogo eletrônico), 2002.



**Figura 4.3.4:** Tipo de Fresamento de geração, segundo DIN8589.

Fonte: Sandvik (catálogo eletrônico), 2002.

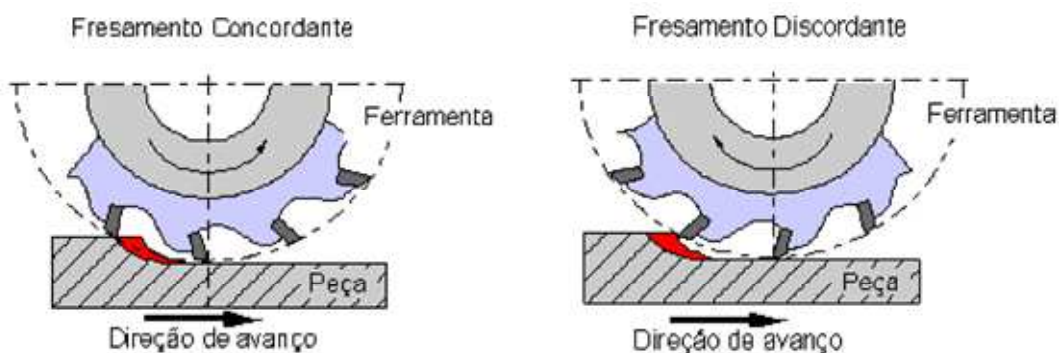


**Figura 4.3.5:** Tipo de Fresamento de perfil, segundo DIN8589.

Fonte: Sandvik (catálogo eletrônico), 2002

No fresamento tangencial, se o sentido de rotação da ferramenta é o mesmo do avanço da peça, tem-se o fresamento concordante, enquanto que se o sentido de rotação da ferramenta for contrário ou avanço da peça, tem-se o fresamento discordante.

No fresamento concordante, mostrado na figura 4.4, a espessura máxima do cavaco é obtida no início do corte e geralmente resulta em menor desgaste da ferramenta, melhor acabamento superficial, menor potência de corte e a força resultante empurra a peça contra a mesa da fresadora, diminuindo o efeito de vibração. Contudo o fresamento discordante é bastante utilizado, pois é indicado quando é necessário fresar peças em fresadoras com folga no fuso da mesa e peças que apresentam resíduos de processos anteriores de fabricação como areia de fundição ou imperfeições na superfície, caso de peças previamente forjadas.



**Figura 4.4:** Fresamento Concordante e Discordante.

Fonte: Stoeterau (2007)

No caso do fresamento frontal, se o diâmetro todo da fresa for utilizado, tem-se concomitantemente o fresamento concordante e discordante. O cavaco atinge a sua espessura máxima na linha de centro da ferramenta, sendo nulo nas extremidades de entrada e saída do processo. A presença de marcas de usinagem é uma constante e a rugosidade depende da geometria da ferramenta e do avanço por dente (KALPAKJIAN, 1995).

Com o avanço tecnológico das ferramentas de corte e das máquinas operatrizes, criou-se um novo processo de fresamento, denominado Fresamento em Altas Velocidades (High Speed Milling - HSM), que tem se mostrado economicamente produtivo nos processos de fabricação de peças de alta precisão e excelente acabamento superficial (CHEVRIER, P. et al., 2003). Neste processo a ferramenta de corte atinge rotações na faixa de 20.000 rpm, podendo causar problemas na geração e remoção dos cavacos.

#### 4.1.2 Parâmetros de fresamento

Os parâmetros fundamentais do processo de fresamento, apresentados na figura 4.5, diferem pouco dos parâmetros do torneamento, com a particularidade de que no fresamento a ferramenta é que rotaciona, portanto a velocidade de corte é caracterizada na periferia desta. As principais grandezas estão basicamente relacionados à velocidade e geometria da ferramenta assim como pela velocidade de movimentação da peça.

- a) Velocidade de corte ( $V_c$ ): é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (\text{m / min}) \quad (4.1)$$

Onde:  $d$  = diâmetro da fresa (mm);  $n$  = rotação (volta / min)

- b) Velocidade de avanço ( $V_f$ ): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção de avanço

$$V_f = f \cdot n \quad (\text{mm / min}) \quad (4.2)$$

Onde:  $f$  = avanço (mm / volta);  $n$  = rotação (volta / min)

- c) Avanço por dente ( $f_z$ ): é o percurso de avanço por dente e por volta ou curso da ferramenta, medido na direção do avanço.

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (\text{mm / dente / volta}) \quad (4.3)$$

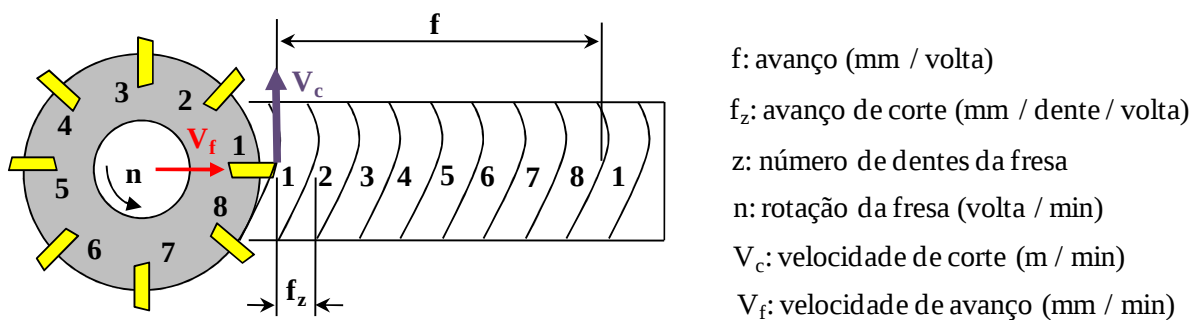
Onde:  $z$  = número de dentes da fresa

- d) Avanço de corte ( $f_c$ ): é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de corte. No fresamento essa variável muda constantemente durante o processo.

$$f_c = f_z \cdot \sin \varphi \quad (\text{mm}) \quad (4.4)$$

Onde:  $\varphi$  = ângulo entre as direções de avanço e de corte, medido no plano de trabalho

- e) Profundidade de penetração ( $a_p$ ): é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento frontal, “ $a_p$ ” é denominada profundidade de usinagem, porém no fresamento tangencial, “ $a_p$ ” é denominada largura de usinagem.
- f) Penetração de trabalho ( $a_e$ ): é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente à direção de avanço.



**Figura 4.5:** Grandezas de fresamento frontal, ferramenta de oito arestas.

Fonte: adaptação do site do Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM), 2012.

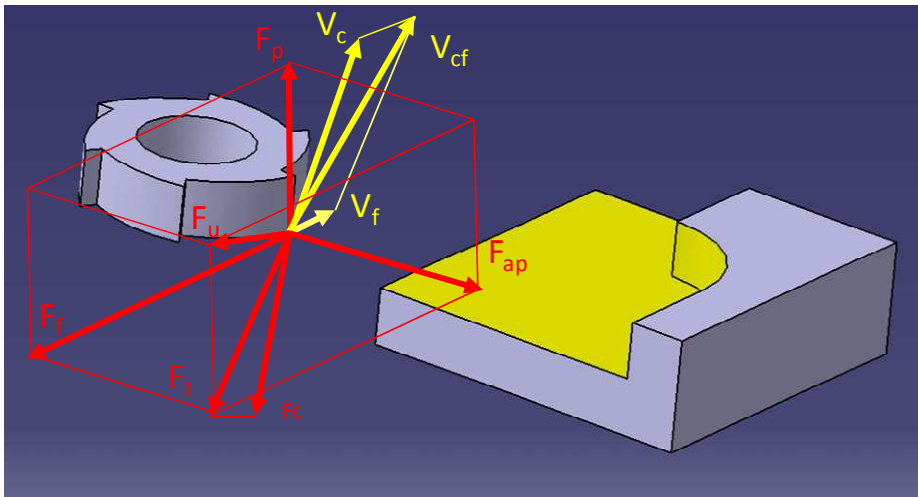
A escolha correta dos parâmetros de corte depende do tipo de fresamento a ser executado. Segundo a Sandvik, para um faceamento ou fresamento periférico, a velocidade de corte e o avanço devem ser os maiores possíveis, desde que o acabamento superficial se mantenha dentro das exigências de projeto da peça. Fresamento de perfis priorizam altas velocidades de corte enquanto que no fresamento pesado, caracterizado pela remoção de muito material, a profundidade de corte e o avanço por dente devem ser maximizados. Para operações de acabamento, o avanço por dente deve ser reduzido e a velocidade de corte aumentada.

#### 4.1.3 Esforços de fresamento

Com o objetivo de tornar os processos de fabricação mais rápidos, com menor gasto de energia, melhor acabamento e maior vida de ferramenta, a importância do estudo dos esforços no fresamento vem crescendo, buscando a otimização dos parâmetros de corte, visto que as forças de usinagem são determinantes para a obtenção de superfícies de boa qualidade geométrica e dimensional (RIBEIRO; ABRÃO; SALES, 2006).

Como os esforços de fresamento podem ser facilmente decompostos através de suas três componentes que atuam em planos perpendiculares entre si, outros autores tem realizado a medição das forças de usinagem, com o objetivo de aprimorar o entendimento do processo dinâmico e cinemático das máquinas-ferramenta (SCHROETER, 2001).

Adotando um sistema de planos cartesianos, demonstrado na figura 4.6, a força de fresamento  $F_u$  pode ser decomposta segundo a norma DIN 6584 (1982), através dos planos de trabalho definidos pelas força ativa ou tangencial  $F_t$ , e a força passiva  $F_p$ . A força ativa  $F_t$ , por se situar no plano onde os movimentos de usinagem são realizados, contribui fortemente para o cálculo da potência de usinagem. A força de corte  $F_c$  é resultado da projeção da força de usinagem  $F_u$  sobre a direção de corte e na força de avanço  $F_f$ . A norma também menciona a força de apoio  $F_{ap}$ , como sendo a projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.



**Figura 4.6:** Decomposição das forças de usinagem no fresamento.

Fonte: Ribeiro; Abrão; Sales, 2006

Como os planos envolvidos são perpendiculares entre si, e no fresamento o ângulo de direção de avanço  $\phi$  varia constantemente, a força ativa resultante  $F_t$  ou força tangencial, pode ser representada pela soma das resultantes  $F_{ap}$ ,  $F_c$  e  $F_f$ , pela expressão:

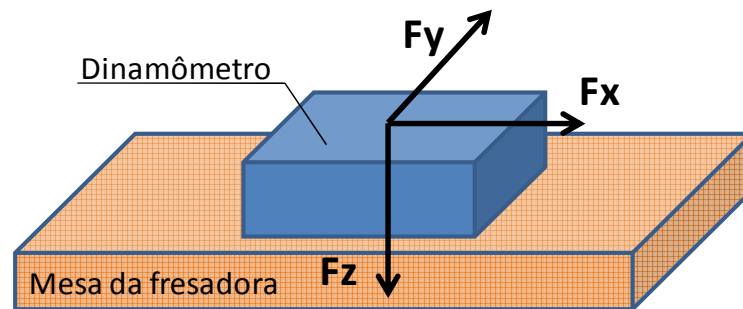
$$\overline{F_t} = \overline{F_{ap}} + \overline{F_f} + \overline{F_c} \quad (4.5)$$

Já a força passiva  $F_p$ , em função da disposição do seu plano de atuação, que é perpendicular ao plano de trabalho, não contribui para a potência gerada no processo de usinagem, mas influencia a deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, interferindo na variação geométrica e dimensional.

Logo a força de usinagem  $F_u$  será expressa pela seguinte equação:

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2} \quad (4.6)$$

Usualmente mede-se a força de usinagem resultante  $F_u$  pela análise vetorial das forças  $F_x$  e  $F_y$ , pois estas forças ativas podem ser facilmente determinadas através da utilização de dinamômetros, instalados sobre as mesas das fresadoras, capazes de medir as forças em três direções.



**Figura 4.7:** Decomposição das forças de usinagem no dinamômetro.

Conforme a figura 4.7, a força  $F_x$  representará a força de avanço  $F_f$ , a força  $F_y$  representará a força de corte  $F_c$  e a força  $F_z$  representará a força de profundidade de penetração  $F_p$ .

De acordo com a disposição das forças anteriormente apresentadas, pode-se deduzir que as forças de usinagem variam repetitivamente em função da rotação do eixo da ferramenta, e que cada aresta de corte exerce um esforço cíclico para cisalhar o material a cada rotação, logo um gráfico da força em função da posição angular da aresta de corte deveria gerar uma senóide. Entretanto, estudos realizados por Ko et al (2002), indicaram variações relevantes entre as forças  $F_x$  e  $F_y$  tanto em intensidade como também em relação ao ângulo de rotação da fresa, confirmando a complexidade da dinâmica de corte.

No fresamento de forma, a deflexão das ferramentas varia durante todo o ciclo de usinagem, incluindo os segmentos retos e os cantos (LAW et al, 1999), portanto a exatidão da usinagem dos cantos depende da rigidez da haste da fresa.

Estudos realizados por Liu et al (2002), sobre o prognóstico da distribuição das forças de corte nos eixos X e Y, a fim de prever a deflexão das ferramentas geraram gráficos que revelaram uma tendência de crescimento linear das forças  $F_x$  e  $F_y$  em função do aumento do avanço.

#### 4.1.4 Ferramentas de corte

A escolha correta de uma ferramenta de corte é determinada por um conjunto de fatores que devem ser criteriosamente analisados, como:

- a) Material usinado. Priorizando a dureza e qual o tipo de cavaco característico;
- b) Processo de usinagem. Torneamento, fresamento, operações de desbaste ou acabamento, corte contínuo ou interrompido;
- c) Condições da máquina operatriz. Potência instalada, faixa de rotação, rigidez e folgas dos diversos subconjuntos;
- d) Dimensões e geometria da peça;
- e) Melhor relação custo/benefício dos diversos tipos de ferramentas disponíveis no mercado.

Um dos maiores fatores para obtenção de usinagens de qualidade em tempos reduzidos se concentra na escolha correta dos diferentes materiais e geometrias das ferramentas de corte, portanto os materiais escolhidos para a fabricação das ferramentas de corte devem apresentar as seguintes propriedades mecânicas (KALPAKJIAN, 1995):

- a) Dureza a altas temperaturas, assim a ferramenta manterá sua boa capacidade de corte;
- b) Tenacidade alta, principalmente em operações de corte interrompido, muito característico em operações de fresamento, evitando trincas na ferramenta;
- c) Resistência ao desgaste, prolongando o uso da ferramenta e possibilitando re-afiações antes de atingir sua vida útil.
- d) Estabilidade química, evitando que a ferramenta reaja quimicamente com o material a ser usinado e provoque um desgaste prematuro na ferramenta.

Existem diversos modos de classificação dos materiais de corte, como os baseados nas características mecânicas, nas limitações associadas aos diferentes processos de usinagem, na ordem cronológica e também com relação às características químicas, priorizando a resistência ao desgaste, sugeridas por Diniz et al. (2000):

- a) Aços rápidos;
- b) Aços rápidos com revestimento;
- c) Metal duro;
- d) Metal duro com revestimento;

- e) Cerâmica;
- f) Nitreto cúbico de boro;
- g) Diamante

A tabela 4.1, mostra as principais características dos diversos materiais de corte e suas interações com o custo, acabamento superficial, método de processamento e processo de usinagem recomendado.

**Tabela 4.1:** Características gerais das materiais de corte.

Fonte: Kalpakjian, 1995

| Ligas de baixo e médio teor de carbono |                     | Aços rápidos                                                       | Liga fundida de cobalto                                   | Carbonetos sem revestimento      | Carbonetos revestidos                                                   | Cerâmicos                                                                         | PCBN                                             | Diamante                                         |
|----------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Características mecânicas              |                     |                                                                    |                                                           |                                  |                                                                         |                                                                                   |                                                  |                                                  |
| Dureza a quente                        | —                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | ↑                                                |
| Tenacidade                             | ↓                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | —                                                |
| Resistência ao impacto                 | ↓                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | —                                                |
| Resistência ao desgaste                | —                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | ↑                                                |
| Resistência ao lascamento              | ↓                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | —                                                |
| Velocidade de corte                    | —                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | ↑                                                |
| Resistência ao choque térmico          | ↓                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | —                                                |
| Custo do material                      | —                   | —                                                                  | Aumentando                                                | —                                | —                                                                       | —                                                                                 | —                                                | ↑                                                |
| Profundidade de corte                  | baixa p/ média      | baixa p/ alta                                                      | baixa p/ alta                                             | baixa p/ alta                    | baixa p/ alta                                                           | baixa p/ alta                                                                     | baixa p/ alta                                    | muito baixo para diamantes de cristal único.     |
| Qualidade do acabamento                | rugoso              | rugoso                                                             | rugoso                                                    | bom                              | bom                                                                     | muito bom                                                                         | muito bom                                        | excelente                                        |
| Modo de processamento                  | forjado             | forjado, fundido e sinterização por prensagem isostática a quente. | fundido e sinterização por prensagem isostática a quente. | Estampagem a frio e sinterização | Deposição Química de vapores (CVD) ou Deposição Física de vapores (PVD) | Estampagem a frio, sinterização e sinterização por prensagem isostática a quente. | Sinterização de alta pressão e alta temperatura. | Sinterização de alta pressão e alta temperatura. |
| Fabricação                             | usinagem e retífica | usinagem e retífica                                                | retífica                                                  | retífica                         | retífica                                                                | retífica                                                                          | retifica e polimento                             | retifica e polimento                             |

#### 4.1.5 Ferramentas de corte de CBN

Com dureza inferior ao diamante, cerca de  $4800 \text{ kgf/mm}^2$  (escala Knoop), mas acima de todos os demais materiais utilizados como ferramentas de corte, o nitreto cúbico de boro tem sido empregado na fabricação de ferramentas de corte voltada para a usinagem de aços endurecidos, segundo Lin et al. (1995) de até 70 HRC, como os aços para moldes, rolamentos, ferramentas de altas velocidades, além do ferro fundido branco e ferro fundido ligado (AOUICI et al., 2012).

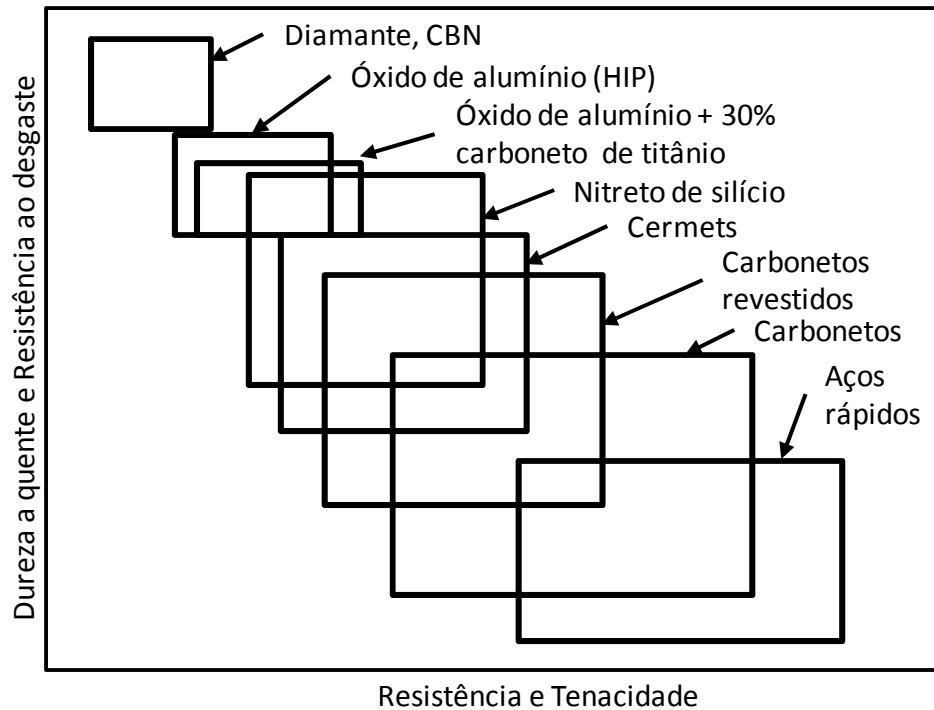
Além da alta dureza, que não sofre alteração mesmo em altas temperaturas, e da razoável tenacidade, importante à resistência ao choque, pois possibilita a utilização em processos de usinagem de corte interrompido, conforme ilustra a figura 4.8, o CBN apresenta outras propriedades mecânicas e químicas de grande relevância para a usinagem de aços endurecidos, como boa estabilidade térmica, pois se mantém estável até  $1300^\circ\text{C}$ , dificuldade em reagir quimicamente (só é reativo a partir de  $1050^\circ\text{C}$ ), e grande resistência a abrasão (TREVELIN, 2011; OKADA et al., 2011).

A variação das propriedades das ferramentas a base de CBN, podem ser associadas ao tamanho do grão, a porcentagem de CBN empregada e pela composição da fase ligante, normalmente cerâmica ou metálica (ABRÃO et al., 1996; citado por TREVELIN, 2011).

Comercialmente, caracterizam-se duas famílias de ferramentas de corte de CBN, a primeira destinada a operações de desbaste de aços endurecidos na faixa de 45 a 65 HRC, com profundidades de corte variando na faixa de 0,5 a 1,0 mm e a segunda para operações de acabamento, com profundidades menores de corte, da ordem de 0,1 a 0,2 mm, que resultarão num melhor acabamento superficial.

O fresamento de aços endurecidos com a utilização de pastilhas de CBN dispensa, na grande maioria dos casos, a utilização de fluidos refrigerantes, propiciando uma vantagem sobre os demais materiais empregados na fabricação das ferramentas de corte, pois elimina o custo destinado ao refrigerante e facilita a adequação dos processos de usinagem às normas ambientais vigentes em diversos países, inclusive o Brasil através da ISO 14000. O uso de refrigerante na usinagem com CBN só é indicado para proteger a peça de alterações superficiais geradas pela dissipação de calor ou dilatação térmica (AMORIM, 2003).

Estudos realizados por Diniz (1999) e citado por Pereira (2006), comparando operações de torneamento com CBN versus retificação, demonstraram que o torneamento com CBN pode substituir com muito sucesso o processo de retificação, pois atinge a mesma qualidade superficial só que num tempo significativamente menor.



**Figura 4.8:** Diagrama com as propriedades de diversos materiais para ferramentas de corte.

Fonte: Kalpakjian, 1995

#### 4.1.6 Desgaste das ferramentas de corte

O desgaste das ferramentas de corte, geralmente acontece de forma gradual e está associado aos materiais da ferramenta e da peça usinada, a geometria da ferramenta, aos fluidos refrigerantes adotados, aos diversos parâmetros do processo de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e também as características construtivas das máquinas ferramentas.

Segundo Kalpakjian (1995), existem duas disposições típicas de desgaste nas ferramentas de corte, o desgaste de flanco e o desgaste de cratera.

O desgaste de flanco se dá na superfície de folga da ferramenta, sendo gerado pelo contato da ferramenta com superfície usinada. Os mecanismos causadores deste fenômeno são a aderência, relacionada às altas temperaturas e pressões ou a abrasão, manifestada na região de contato através de mecanismos de micro-corte, sulcamento e trincamentos. O desgaste de flanco é o principal agente causador da redução da vida das ferramentas de corte.

Já o desgaste de cratera se situa na superfície de saída da ferramenta, é oriundo do efeito das elevadas temperaturas e da atividade química gerada pelo atrito da ferramenta com o cavaco. Este fenômeno muda a geometria da interface ferramenta/cavaco e está fortemente relacionado ao mecanismo de difusão, ou seja, através do movimento dos átomos na interface

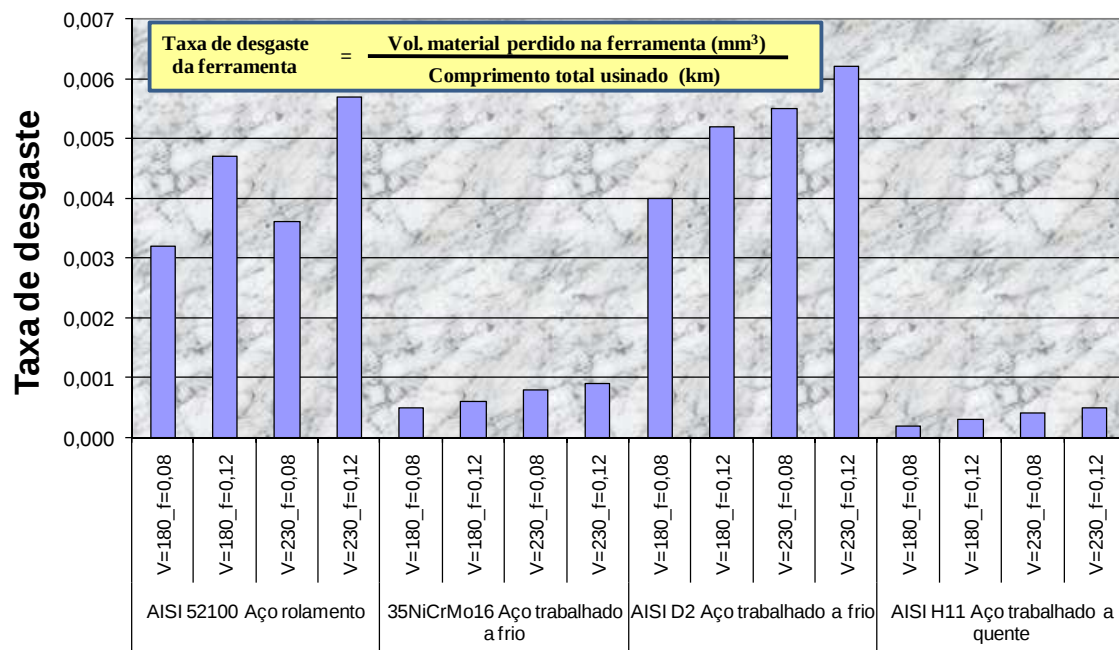
de contato entre ferramenta e cavaco. Como o processo de difusão é acelerado em função do aumento da temperatura, o desgaste de cratera sofrerá o mesmo comportamento.

Outras literaturas como a descrita por Diniz, Marcondes e Coppini (2001), classificam ainda outros tipos de desgaste de ferramenta como:

- a) Deformação plástica da aresta de corte. Oriunda das altas pressões e temperaturas presentes na ponta da ferramenta. Por não suportarem elevadas temperaturas, as ferramentas de aço rápido, comumente sofrem este tipo de desgaste.
- b) Trincas. Estão associadas as alternâncias das pressões mecânicas atuando em parceria ou não com bruscas variações de temperatura que provocam uma rápida propagação de descontinuidade longitudinal ou transversal com conseqüente ruptura.
- c) Lascamento. Caracterizado pelo arrancamento de partículas de proporções macroscópicas. É freqüente em ferramentas com arestas de corte de baixa rigidez ou de metal frágil.
- d) Quebras. Geralmente relacionadas a escolha errada da geometria de corte da ferramenta, como ferramentas com raios ou ângulos de ponta muito pequenos, ou a erros de operação através do ajuste incorreto dos parâmetros de usinagem que podem causar cargas excessivas na ferramenta.

Diversos pesquisadores têm estudado o desgaste das ferramentas de corte. Poulachon (2003), dividiu os mecanismos de desgaste em quatro, denominados abrasão, aderência, fadiga de superfície e reações tribo-químicas e concluiu que o parâmetro de maior influência no desgaste das ferramentas de CBN é a presença de carbonetos na microestrutura do aço, assim como para aços com apenas grãos martensíticos, o aumento da velocidade de corte tem um grande impacto no desgaste da ferramenta. A figura 4.9 apresenta os ensaios que comprovam a citação acima, através da usinagem de quatro aços diferentes, com diferentes velocidades de corte e avanço. Já König et al. (1984), descobriram que a vida da ferramenta pode variar amplamente para diferentes aços endurecidos e tratados termicamente para uma mesma dureza e usinados sob as mesmas condições de corte, concluindo que a dureza da peça não é um parâmetro confiável para avaliar o desgaste da ferramenta.

### Taxa de desgaste da ferramenta x Velocidade de corte



**Figura 4.9:** Comparação das faixas de desgaste de ferramenta na usinagem de quatro diferentes aços endurecidos com CBN.

Fonte: Poulachon, 2003

## 4.2 Integridade Superficial

Os diversos efeitos mecânicos, físicos, químicos e térmicos gerados pelos processos de usinagem, podem modificar as propriedades e o comportamento da superfície de um componente, tornando-as diferentes das encontradas no núcleo e consequentemente afetar a performance da peça, quando exposta as condições de trabalho (KALPAKJIAN, 1995), agindo diretamente:

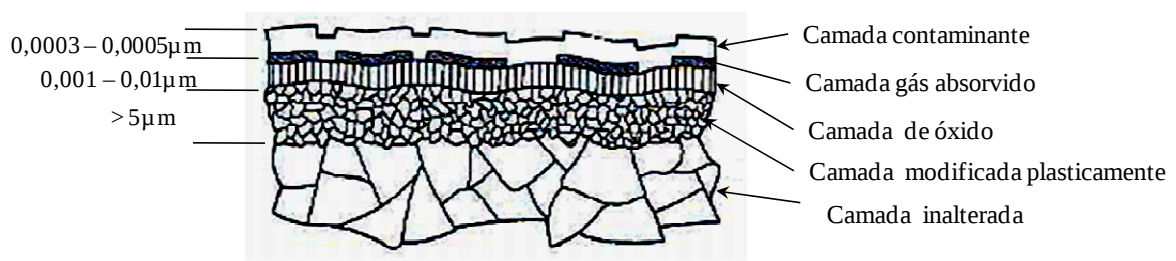
- No desgaste gerado pelo atrito do componente em uso, agravados pela utilização, nas diversas fases do processo de fabricação, por diferentes ferramentas e processos de usinagem;
- Na efetividade dos lubrificantes presentes durante o processo de fabricação e também no uso do componente;
- Nas características geométricas e de aparência visual do componente e nos subseqüentes processos que poderão se suceder como pintura, recobrimento, solda e na resistência à corrosão;

- d) Na iniciação de trincas, devido a imperfeições na rugosidade da peça, que fragilizam o componente e levando-o a fadiga.
- e) Na condutividade elétrica e térmica das superfícies de contato. Exemplificando, superfícies rugosas produzem maiores resistências térmicas e elétricas do que superfícies lisas.

Diante da importância das condições superficiais das peças, diversos pesquisadores decidiram estudar as características das superfícies usinadas, através da análise da rugosidade e das propriedades químicas e mecânicas, classificando este tipo de estudo como estudo da integridade superficial.

A primeira definição do termo Integridade da Superfície (IS) data de 1964 e segundo Field e Kahles (1971), constitui-se como a condição inerente de uma superfície produzida através de um processo de usinagem ou qualquer outro processo de geração de superfície que será avaliada através das características mecânicas, metalúrgicas, químicas e topológicas da superfície manufaturada. Em 2001, Griffiths aprimorou a definição relacionando as características mencionadas com a performance operacional do componente. Estes estados são medidos pela variação da dureza, tensões residuais, rugosidade, mudanças estruturais, resistência a corrosão, etc (JANG et al., 1995).

Após o processo de usinagem, um exame microscópico da superfície usinada, geralmente apresentará diferentes camadas de espessuras micrométricas, de diferentes composições e comportamento mecânico, usualmente resultantes de deformações plásticas e endurecimento. A figura 4.10 mostra como estas camadas se localizam na superfície usinada de um componente.



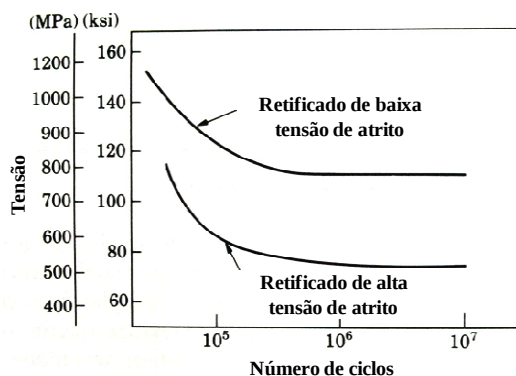
**Figura 4.10:** Distribuição das camadas superficiais de corpos usinados.

Fonte: Kalpakjian, 1995

#### 4.2.1 Causas de mudanças da Integridade Superficial

Superfícies, caracterizadas como de baixa qualidade de integridade superficial, podem ser resultado de diferentes defeitos oriundos da combinação do processo de fabricação com problemas no material e da possível falta de controle dos parâmetros de processo, que originam altas temperaturas e níveis de tensão. Muitos pesquisadores (KALPAKJIAN, 1995; DEONISIO, 2004), classificaram os principais defeitos de superfície como:

- a) Trincas ou microtrincas;
- b) Crateras, depressões de baixa profundidade, que podem ser resultado de ataques químicos ou físicos;
- c) Dobras, frequentemente causadas pela sobreposição de material durante a usinagem;
- d) Zonas afetadas termicamente, parte do material submetido a ciclos térmicos sem fusão;
- e) Inclusões, elementos não metálicos inseridos no metal, típicos em fundidos;
- f) Ataque intergranular, enfraquecimento do contorno dos grãos pela fragilização e corrosão do metal líquido;
- g) Transformações metalúrgicas, incluindo as transformações de fase, resolidificação, decarbonetação, etc;
- h) Deformações plásticas, causadas por altas tensões geradas pelo atrito, geometria e temperatura da ferramenta, ou pelo método de processo. A figura 4.11, mostra a influência da deformação plástica na vida a fadiga de um aço AISI 4340 retificado em condições de baixa e alta tensões;
- i) Tensões residuais superficiais de compressão ou tração, geralmente causadas por deformação não uniforme ou diferentes distribuições de temperatura;



**Figura 4.11:** Efeito da vida a fadiga de um aço AISI 4340 temperado e revenido com 51 HRC, retificado em condições de pequenos e grandes esforços.

Fonte: Kalpakjian, 1995

Segundo Smith et al. (2007), a vida à fadiga de um aço AISI 52100 endurecido (60-62HRC), é fortemente influenciada pela rugosidade obtida, pois os corpos de prova, quando usinados pelo processo de super-acabamento (superfinishing) Ra de 0,1  $\mu\text{m}$ , apresentaram um aumento no número de ciclos da ordem de 470% (de 56.867 para 323.897 ciclos), comparados as superfícies usinadas com Ra de 0,66  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.2 Acabamento superficial, textura.

A descrição da textura, independentemente do processo de fabricação aplicado, é complexa de ser analisada em função das suas propriedades geométricas. A American National Standards Institute (ANSI), abordou e normatizou as características geométricas das superfícies de materiais sólidos e dos seus equipamentos de medição. A definição se baseia nos parâmetros de rugosidade, ondulação, posicionamento e falhas e leva em consideração as seguintes grandezas dimensionais:

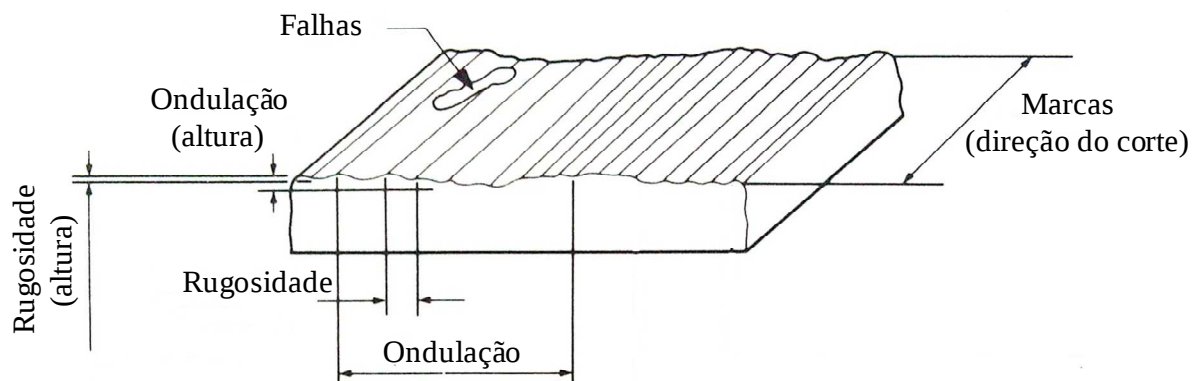
- a) Comprimento transversal típico;
- b) Defeito;
- c) Posicionamento;
- d) Espaçamento na ondulação;
- e) Profundidade de ondulação;
- f) Espaçamento da rugosidade;
- g) Comprimento de corte freqüente da rugosidade;
- h) Vales;
- i) Picos.

A ABNT também normatizou o tema através da ABNT NBR ISO 4287:2002, que define a rugosidade como o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície.

Além da rugosidade, definida no parágrafo anterior, a textura de uma superfície, caracterizada na figura 4.12, é ainda composta de:

- a) Falhas ou defeitos, que são irregularidades esporádicas como trincas, inclusões, furos e depressões;
- b) Marcas de direcionamento, resultantes do sentido e direção empregados nos processos de fabricação e visíveis a olho nu.
- c) Ondulações, ou textura secundária, fruto do conjunto das irregularidades repetitivas em forma de ondas de comprimento muito superior aos da sua amplitude. A

freqüência destas ondas é baixa. As ondulações das peças podem ter origem nas deflexões das ferramentas de corte, empenamentos resultantes de altas temperaturas e esforços aplicados, falta de lubrificação e vibrações inerentes ao processo de fabricação empregado.

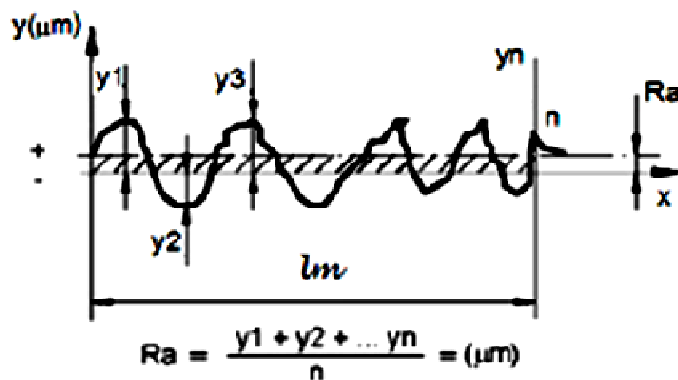


**Figura 4.12:** Elementos da textura de uma superfície.

Fonte: Kalpakjian, 1995

A rugosidade é quantificada por diferentes métodos de medição, como:

- a)  $R_a$  (rugosidade aritmética ou média), estabelecida em função da linha média que divide as áreas do perfil de rugosidade, conforme figura 4.13. É o processo mais utilizado no Brasil e nos congressos internacionais;

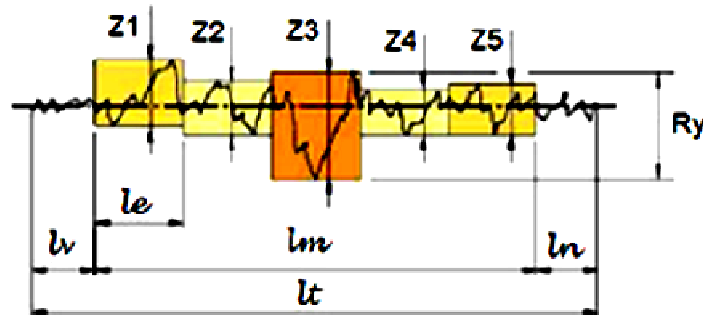


**Figura 4.13:** Modo de determinação da rugosidade  $R_a$ .

Fonte: Piratelli, 2011

- b)  $R_t$  (rugosidade máxima), ou  $R_y$  é definida como o maior valor das rugosidades parciais encontradas nos cinco trechos de medição que totalizam o percurso de medição. A figura 4.14 apresenta o terceiro trecho de medição como o determinante

para o valor de  $R_t$ . Complementa as informações levantadas pela  $R_a$ , é bastante aplicada e utilizada para a medição de superfícies de vedação, ou de deslizamento.



**Figura 4.14:** Modo de determinação da rugosidade  $R_t$ , ou  $R_y$ .

Fonte: Piratelli, 2011

- c)  $R_z$  (rugosidade total), definida pela distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo encontrado no percurso de medição.
- d)  $R_q$  ou RMS (rugosidade quadrática média), bastante utilizada nos EUA, onde o efeito dos valores do perfil que se afastam da média são acentuados.

#### 4.3 Tensões residuais

De maneira mais abrangente, as tensões residuais são decorrentes de processos de deformação não uniforme ocorridos durante uma ou mais fases do processo de fabricação de um componente, conforme ilustrada a tabela 4.2. Quando relacionadas exclusivamente aos processos de usinagem, as tensões residuais são produzidas em consequência das deformações plásticas não homogêneas induzidas por eventos mecânicos e térmicos associados ao processo de formação de cavaco e na interação existente entre a ponta da ferramenta de corte e a superfície imediatamente usinada da peça. Deformações plásticas oriundas de forças paralelas e perpendiculares à superfície usinada produzem tensões residuais compressivas, enquanto que as deformações plásticas, fruto do aquecimento localizado, desloca o equilíbrio, gerando tensões residuais trativas (ARUNACHALAM et al., 2004). Transformações de fase ajudam a suportar o desenvolvimento de tensões residuais compressivas e trativas, dependendo da variação relativa do volume e do desdobramento das deformações plásticas (EL-KHABEERY, 1989).

**Tabela 4.2:** Origens de Tensões Residuais.

Fonte: Campos; Machado; Hirsch, 2006

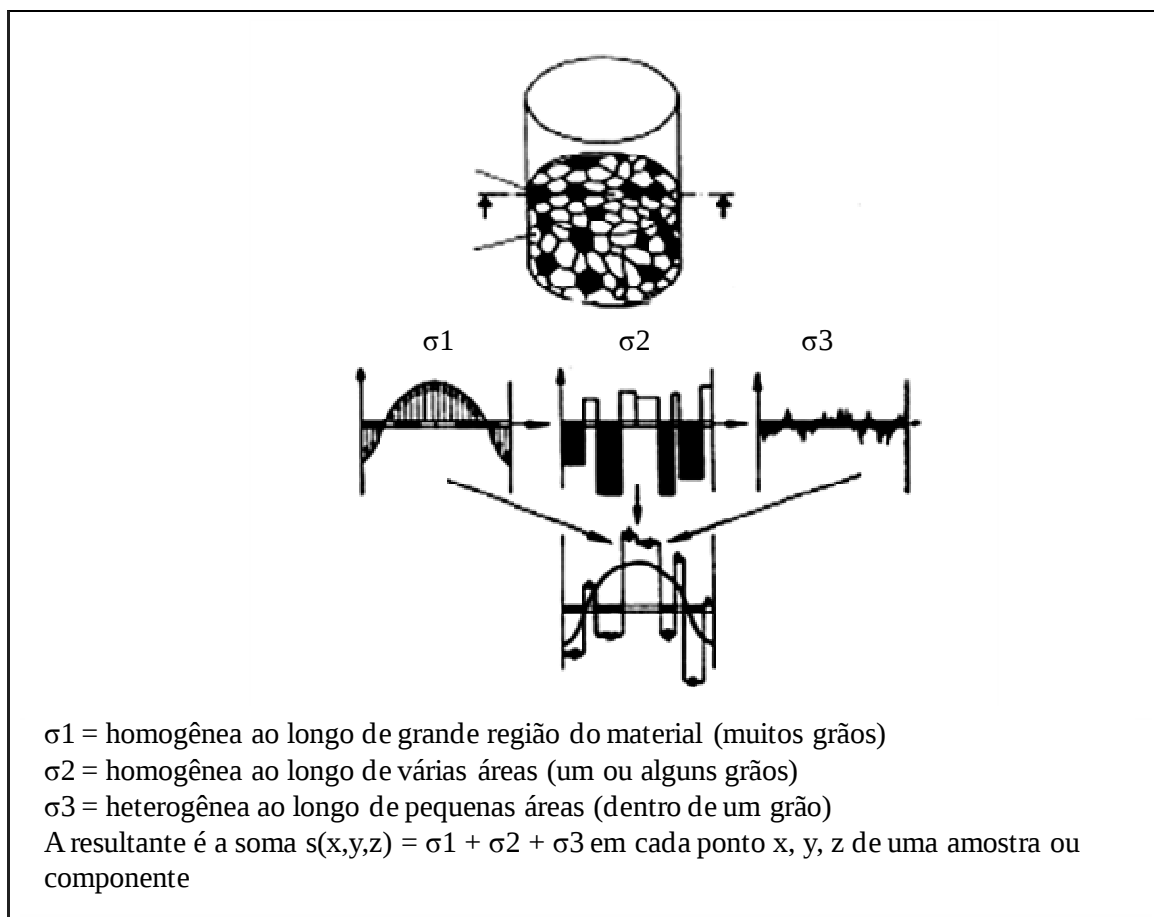
|     |                                                      |                                                                           |
|-----|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| (1) | Deformação plástica local                            | Compreende todos os processos de carregamento mecânico, moagem e usinagem |
| (2) | Fornecimento ou retirada de calor + (1)              | Soldagem, fundição, processos de tratamento térmico                       |
| (3) | Diferente expansão térmica de diferentes fases + (2) | Processos de recobrimento                                                 |
| (4) | Gradientes de composição química + (2)               | Tratamentos de superfície (carbonetação, nitretação) e recobrimento       |

Segundo Lu (1996), todo o sistema de tensões residuais está em equilíbrio, a somatória das forças resultantes e dos momentos produzidos é nula e o valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é o próprio limite de escoamento do material.

As tensões residuais, caracterizadas pela figura 4.15, podem ser descritas em três tipos (SOARES, 1998; DAMASCENO, 1993):

- a) Tensões residuais do tipo 1, chamadas de macroscópicas ou macro-tensões residuais, encontram-se presentes em vários grãos, ocupam grande área do componente. São normalmente originadas de fontes mecânicas, térmicas ou químicas e despertam grande interesse da engenharia, para a análise estrutural de componentes, pois podem comprometer ou aumentar a vida útil de um equipamento.
- b) Tensões residuais do tipo 2, chamadas de tensões microestruturais, apresentam-se em um grão ou parte dele, e são originadas por deformações plásticas microscópicas.
- c) Tensões residuais do tipo 3, chamadas de microtensões, encontram-se presentes em pequenas distâncias interatômicas, contidas em uma pequena região do grão, originadas por defeitos cristalinos como as discordâncias.

Ainda segundo Soares (1998), as microtensões residuais do tipo dois e três, não podem ser evitadas em materiais policristalinos, e são mais importantes para o estudo do comportamento microestrutural. Podem ser induzidas por tratamento térmico, resultando das mudanças de volume ocorridas pelas transformações de fase, reações de precipitação ou por deformações térmicas ocorridas em função da diferença existente entre os coeficientes de expansão térmica de uma partícula não metálica e a matriz metálica durante o resfriamento.



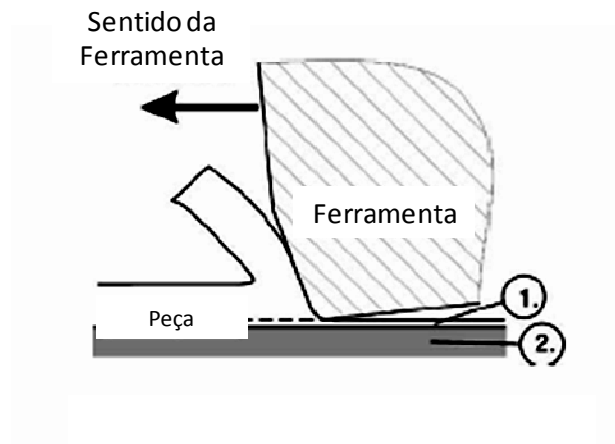
**Figura 4.15:** Representação esquemática do estado de tensões residuais em um aço duplex, segundo a escola alemã.

Fonte: Campos; Machado; Hirsch, 2006

Diversos trabalhos de análise da influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais geradas pelo torneamento de ligas metálicas endurecidas tem sido realizados.

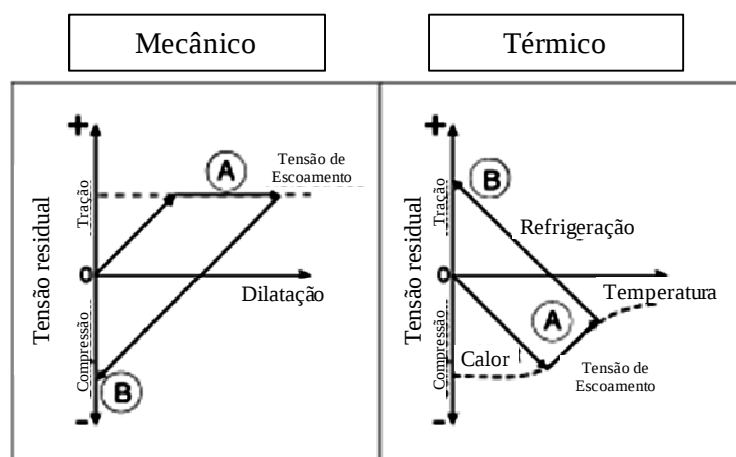
Segundo Gunnberg et al. (2006), estas influências podem ser explicadas, considerando-se o estado de tensões produzidas quando a ferramenta de corte desliza sobre a superfície da peça. O mecanismo de geração mecânica da tensão residual, mostrado no lado esquerdo da figura 4.17, durante o corte (A) é explicado pela deformação plástica na camada superficial (1) e a deformação elástica na camada sub-superficial (2). (vide figuras 4.16 e 4.17). Para atingir o equilíbrio de força e a compatibilidade geométrica após o corte, a dilatação elástica força a camada superficial num estado de tensão residual compressiva (B). O mecanismo térmico de tensão residual, mostrado no lado direito da figura 4.17, é imposto pelo aquecimento gerado no processo de corte, o qual expande a camada superficial, produzindo tensões compressivas (A). A peça é então resfriada (B) e contrações na camada

superficial (1) produzem tensões residuais de tração. O efeito térmico diminui ainda mais no interior da peça, ampliando o efeito da tensão de tração na camada superficial.



**Figura 4.16:** Geração de tensão residual no torneamento.

Fonte: Gunnberg, 2006



**Figura 4.17:** Mecanismo de tensão residual.

Fonte: Gunnberg, 2006

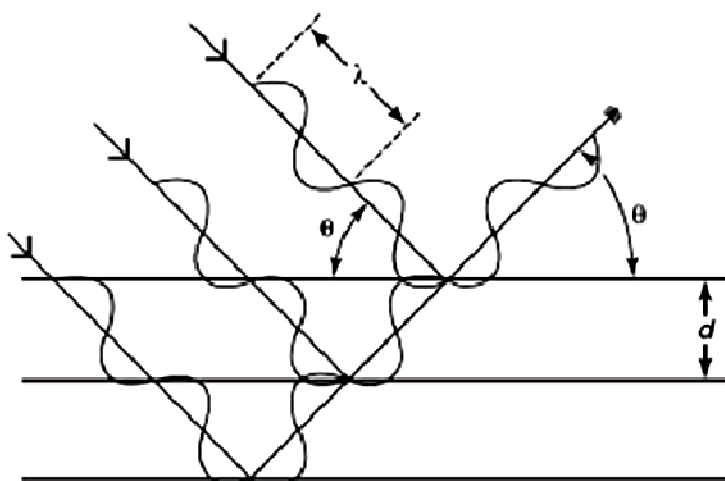
#### 4.3.1 Métodos de medição de tensões residuais

Existem diversos métodos para medição da intensidade e distribuição das tensões residuais de componentes. Estes métodos podem ser destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos, e estão baseados na obtenção de medidas de deformações, induzidas por tensões, que são então utilizadas para calcular as tensões residuais da região investigada (SOARES, 1998).

Dentre os métodos destrutivos, destacam-se o método de seccionamento e o método de retirada das camadas, mas que por serem destrutivos, são limitados às aplicações de corpos de prova cilíndricos ou planos ensaiados em laboratórios e muitas vezes de difícil adaptação a equipamentos reais (VISHAY, 1993).

Os métodos ultra-sônicos, magnéticos, difração de nêutrons e difração de raios X são os principais métodos não destrutivos, capazes de medir as micro e macro tensões residuais sem relaxação de tipo um, dois e três, citadas na figura 4.15. Martins et al. (2004), cita que o método por difração de raios X apresenta resultados de qualidade superior, quando comparados com os resultados obtidos pelos métodos micro-magnético e o do furo cego incremental.

A determinação de tensões residuais por difração de raios X baseia-se na avaliação precisa dos deslocamentos das linhas de difração ao longo da orientação macroscópica da amostra (CAMPOS; MACHADO; HIRSCH, 2006). As duas geometrias utilizadas são a geometria PSI e a OMEGA, que satisfazem o método de múltipla exposição, que consiste no registro de um conjunto de distâncias interplanares referenciadas à variação da inclinação da amostra com relação à sua normal. Utilizando a lei de Bragg ( $\lambda = 2d\sin\theta$ ), os espaçamentos do reticulado cristalino são medidos com precisão, sendo  $\lambda$  o comprimento de onda da radiação usada,  $\theta$  a metade do ângulo de espalhamento e “d” o espaçamento interplanar médio para uma determinada reflexão do material cristalino, conforme figura 4.18. (FITZPATRICK; LODINI, 2003, citado por ROCHA et al., 2009).



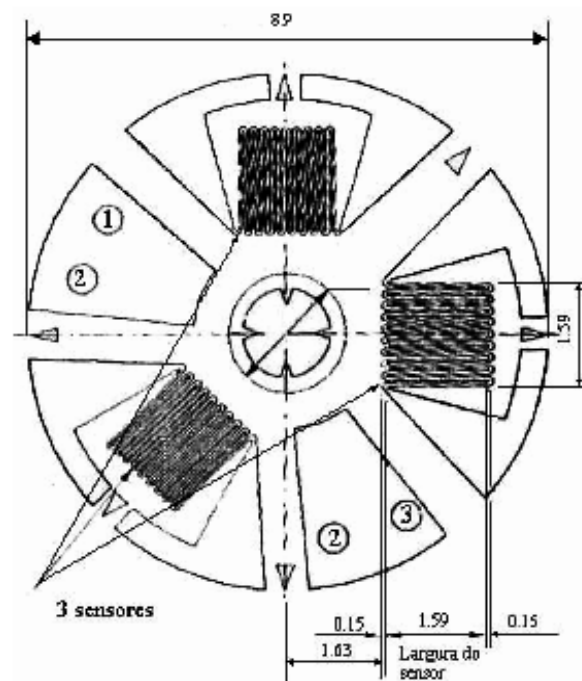
**Figura 4.18:** Espalhamento e difração de raios X num arranjo cristalino.

Fonte: Rocha et al., 2009

Segundo Bordinassi (2006), os principais métodos de cálculo de tensões residuais por difração de raios X são:

- a) Método do  $\text{sen}^2\psi$ ;
- b) Método de Glocker ou método do  $0 - 45^\circ$ ;
- c) Método de Schall ou método da única incidência;
- d) Método  $\theta - 2\theta$ ;
- e) Método  $\theta$  ou método do eixo fixo.

O método do furo cego é o processo de medição de tensões residuais mais difundido e aplicado, pois está muito bem fundamentado, é de baixo custo e de fácil manuseio. Em linhas gerais, o método se baseia na usinagem de um furo de diâmetro reduzido na superfície do material analisado. A execução do furo provoca alterações nos estados de deformação da região que o circunda, medidas através de extensômetros colados diretamente nesta região, conforme ilustra a figura 4.19. A furação ocorre em diversos estágios, intervalos de profundidades equidistantes que podem variar em média de 10 a 20  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.19:** Representação da roseta tipo M062 utilizada nos ensaios de tensão residual.

Fonte: PUC-Rio – Certificação Digital N°9916673/CA

#### 4.4 Camada Branca

Segundo Poulachon et al. (2004), a microestrutura da camada branca é reconhecida como uma “martensita anormal”, composta de nanomaterial parcialmente transformado com grande densidade de discordâncias, caracterizando-a como uma fina linha de martensita (células sem orientação de 30 a 100 nm), com pequena dispersão de carbonetos e grande quantidade de austenita retida.

Operações de usinagem de acabamento, como o fresamento ou torneamento de aços endurecidos, com dureza na faixa de 45 – 65 HRC, realizadas com ferramentas de CBN podem propiciar a geração da camada branca na superfície da peça. Portanto é importante estudar qual é o mecanismo que dispara o processo de geração desta camada e, principalmente, os efeitos provocados no componente.

Segundo Bosheh e Mantivega (2005), a ocorrência de camada branca nos diversos campos da engenharia podem ser divididas em três áreas. A primeira está relacionada a presença de camada branca nas superfícies de componentes retirados de operação, como as superfícies de contato de trilhos ou os rolamentos de rolos. A segunda está associada ao resultado de diversos processos de fabricação como torneamento, corte, retificação, mandrilamento, furação e fresamento. A terceira resulta de experimentos de desgaste normalmente realizados em laboratórios.

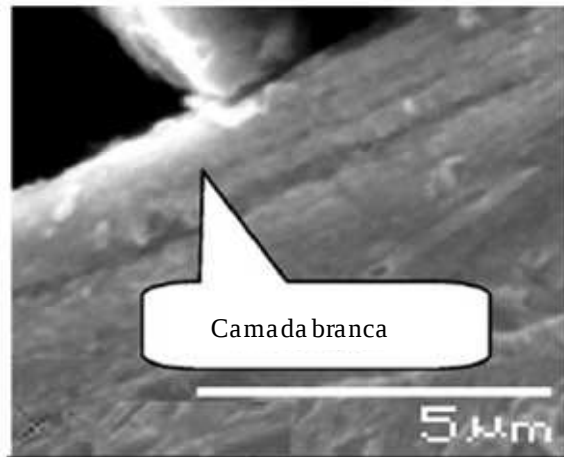
Quanto aos mecanismos de geração da camada branca, Griffiths (1987) associou-os do seguinte modo:

- a) Rápido aquecimento e revenimento, resultando na transformação do produto;
- b) Deformação plástica severa, capaz de produzir uma estrutura homogênea ou uma estrutura de grão fino;
- c) Reação da superfície com o meio ambiente, como a nitretação e carbontetação.

Uma nova hipótese para a geração da camada branca durante processos de usinagem de aços endurecidos foi postulada por Zurecki, Ghosh, e Frey (2003), que argumenta que existe uma dissolução quase que completa dos carbonetos em função das altas temperaturas geradas pela deformação plástica. Assim sendo, quanto maior é a presença dos carbonetos na matriz, mais o ponto de fusão do aço decresce. Quando a ferramenta deixa a superfície usinada, a camada branca resfria rapidamente induzindo a microestrutura da superfície.

As investigações experimentais realizadas por Poulachon et al. (2003 e 2005), sobre os efeitos na microestrutura do material resultado, da formação da camada branca durante o processo de torneamento de aços endurecidos com ferramentas de PCBN, mostra na figura

4.20 a presença de uma pequena camada branca na superfície usinada do aço X38CrMoV5 e na figura 4.22 a nítida presença da camada branca no cavaco gerado pela usinagem do aço 35NiCrMo16.



**Figura 4.20:** Superfície usinada com PCBN do aço X38CrMoV5 com formação de camada branca.

Fonte: Poulachon et al., (2005).



**Figura 4.21:** Cavaco gerado com formação de camada branca na usinagem com PCBN do aço 35NiCrMo16.

Fonte: Poulachon et al., (2003).

#### 4.5 Planejamento experimental

Este trabalho tem o objetivo de caracterizar os efeitos do fresamento durante o processo de acabamento com ferramentas de CBN, na integridade da superfície usinada do aço AISI 4140 endurecido. Portanto, faz-se necessário a utilização de um planejamento experimental que se inicia com a escolha das variáveis dependentes e independentes, passando pela adoção de diferentes níveis para os parâmetros definidos e de um processo de análise estatística.

Os processos de análise estatística são determinantes para a análise dos resultados de pesquisas experimentais, pois na presença de diversas variáveis de maior ou menor influência, facilitarão o entendimento das possíveis interações dos diversos fatores estudados de modo mais rápido e eficiente.

Segundo Button (2005), são vantagens do emprego de técnicas estatísticas de planejamento experimental:

- a) redução do número de ensaios, sem prejuízo da qualidade da informação;
- b) estudo simultâneo de diversos parâmetros, separando seus efeitos;
- c) determinação da confiabilidade dos resultados;
- d) realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- e) seleção das variáveis que influenciam o processo com reduzido número de ensaios;
- f) representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- g) elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Montgomery (1991), destacou os seguintes conceitos fundamentais para o bom entendimento de um planejamento experimental:

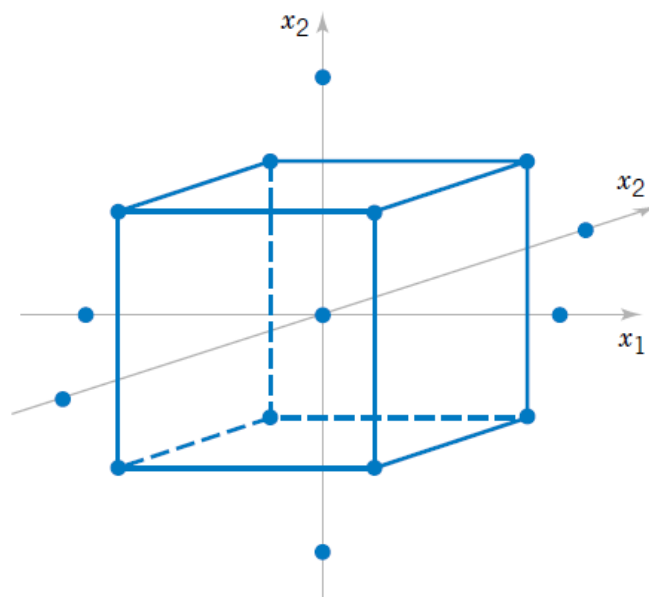
- a) Variáveis dependentes, definidas como variáveis de resposta das propriedades de interesse, no caso da análise da integridade superficial, os valores de rugosidade medidos.
- b) Variáveis independentes, definidos como parâmetros que alteram o resultado dos experimentos, no caso do presente trabalho, os parâmetros de corte como a velocidade, avanço e profundidade de corte.
- c) Níveis, que são os diferentes valores imputados aos diversos parâmetros adotados.
- d) Codificação de fatores. Ajudam a simplificar o planejamento dos experimentos e aumentar a precisão da análise experimental. É vantajoso codificar os fatores dentro de um sistema de coordenadas adimensionais.
- e) Delineamento de experimentos, organiza a sequência dos experimentos, gerando uma combinação racional dos diversos níveis dos parâmetros escolhidos.
- f) Aleatorização, execução dos experimentos sem uma ordem pré-estabelecida, visando a diminuição dos efeitos dos fatores não considerados no delineamento.
- g) Replicação, necessária para determinação de erros experimentais, e de uma estimativa mais precisa dos efeitos dos fatores.
- h) Blocagem, visa aumentar a precisão dos experimentos. Exemplificando, a blocagem pode ser usada no caso de experimentos executados em intervalos de tempo que

possam causar mudanças nas condições do teste, ou na presença de diferentes lotes de um mesmo material.

- i) Efeito de um fator, é a variação da grandeza da resposta em função dos diferentes níveis adotados de um fator, normalmente o inferior e o superior.
- j) Efeito principal, caracterizado como a média dos efeitos de um fator nos níveis de outro fator.
- k) Fatores significativos, parâmetros que influem diretamente nas respostas.
- l) Fatores não significativos, parâmetros que dentro das faixas estudadas, não afetam significativamente a qualidade das respostas.

Para o tratamento estatístico de ensaios de usinagem, que apresentam uma repetibilidade muito boa em função da estabilidade dos parâmetros adotados como velocidades de corte, avanço, profundidade de penetração e da rigidez do maquinário utilizado, o Delineamento Composto Central (DCC) é muito utilizado, pois pode-se abrir mão da realização de réplicas em todos os pontos, testando a estabilidade do processo através das réplicas concentradas apenas no ponto central.

A figura 4.22, exemplifica a distribuição no espaço de um DCC com três fatores referenciados aos eixos  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , produzindo um número mínimo de catorze ensaios e um ponto central, normalmente replicado seis vezes para averiguação das influências dos erros experimentais



**Figura 4.22:** Delineamento Composto Central para três fatores.

Fonte: Montgomery, (2003).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Material

#### 5.1.1 Material AISI 4140

O aço utilizado neste trabalho foi cedido pela Prensas Schuler já na forma de corpos de prova, extraídos do material utilizado na fabricação dos fusos dos pontos de pressão das prensas mecânicas, componentes de elevada solicitação mecânica, responsáveis pela transferência dos esforços gerados pela conformação das peças para o mecanismo de acionamento da prensa.

Trata-se de um aço AISI 4140 (DIN 42CrMo4) forjado, também caracterizado por ABNT 4140, SAE 4140, DIN 1.7225, JIS G 4105-79 tipo SCM440, temperado e revenido com dureza de  $58 \pm 2$  HRC e profundidade de  $3 \pm 1$  mm, de composição química atestada através de ensaio realizado conforme ilustra a tabela 5.1 abaixo e anexo I.

Tabela 5.1: Composição química dos corpos de prova.

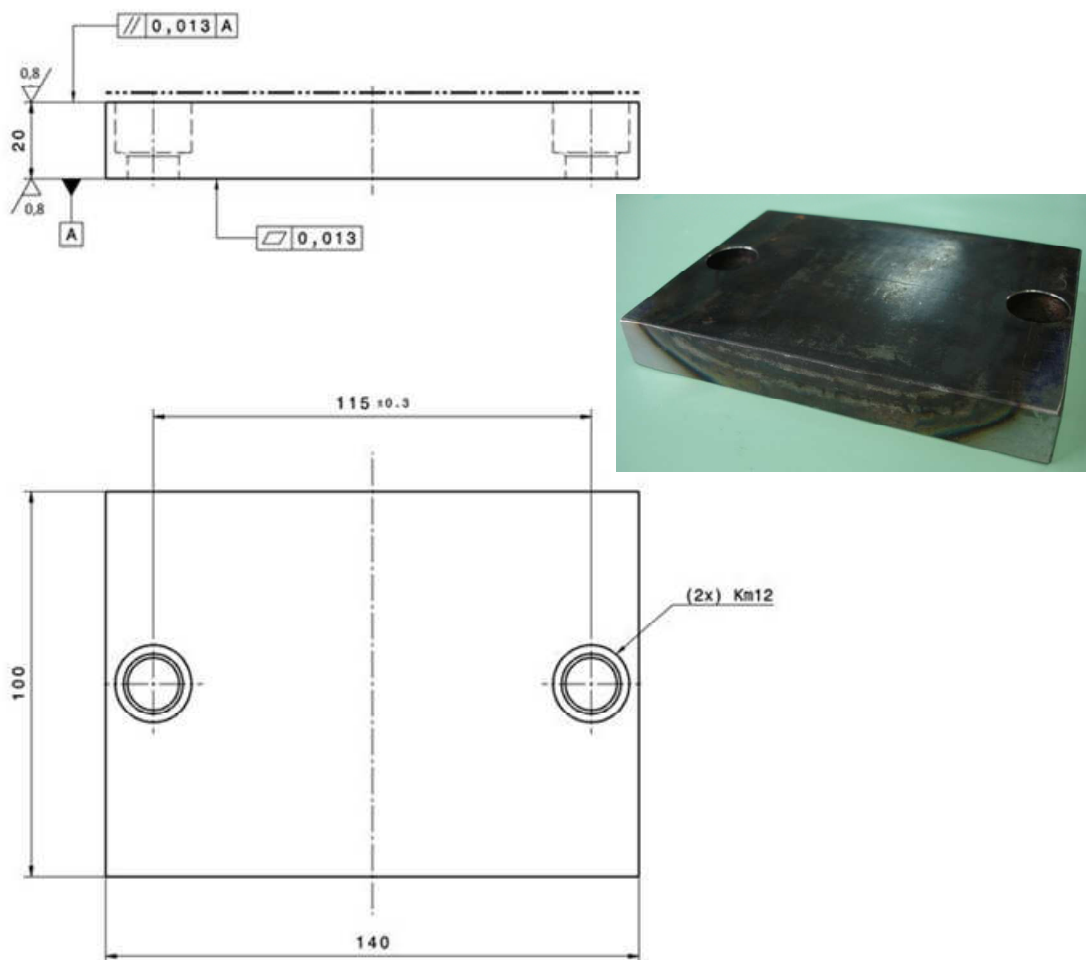
| Elementos em % |             |             |             |            |            |             |       |             |       |       |       |       |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Especificado   | C           | Mn          | Si          | P          | S          | Cr          | Ni    | Mo          | Al    | Cu    | Ti    | V     |
| SAE-4140       | 0,38 – 0,43 | 0,75 – 1,00 | 0,15 – 0,35 | MAX. 0,030 | MAX. 0,040 | 0,80 – 1,00 | -     | 0,15 – 0,25 | -     | -     | -     |       |
| Amostra        | C           | Mn          | Si          | P          | S          | Cr          | Ni    | Mo          | Al    | Cu    | Ti    | V     |
| 7284           | 0,413       | 0,842       | 0,241       | 0,013      | 0,012      | 0,904       | 0,045 | 0,181       | 0,030 | 0,063 | 0,002 | 0,004 |
| (S)            | 0,004       | 0,022       | 0,003       | 0,001      | 0,002      | 0,022       | 0,001 | 0,010       | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |

O AISI 4140 é classificado como um aço ligado para beneficiamento. Possui três elementos principais. O carbono é o principal elemento da liga, sendo responsável pela dureza, limite de resistência à tração e a temperabilidade, mas dificulta a soldabilidade e reduz a tenacidade. O cromo, favorecendo a formação de carbonetos, contribui com o aumento da dureza e da resistência a tração, mas diminui a resistência ao impacto. Já o Molibdênio, principal elemento formador dos carbonetos, na presença do níquel e cromo, aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento, melhorando a resistência a fadiga e as propriedades magnéticas.

Quanto a sua aplicação, é bastante usado na construção mecânica e automotiva em componentes de grande responsabilidade, que requerem elevada dureza, boa resistência ao desgaste e tenacidade como eixos, engrenagens e bielas. Também apresenta baixa soldabilidade, boa resistência a torção e fadiga.

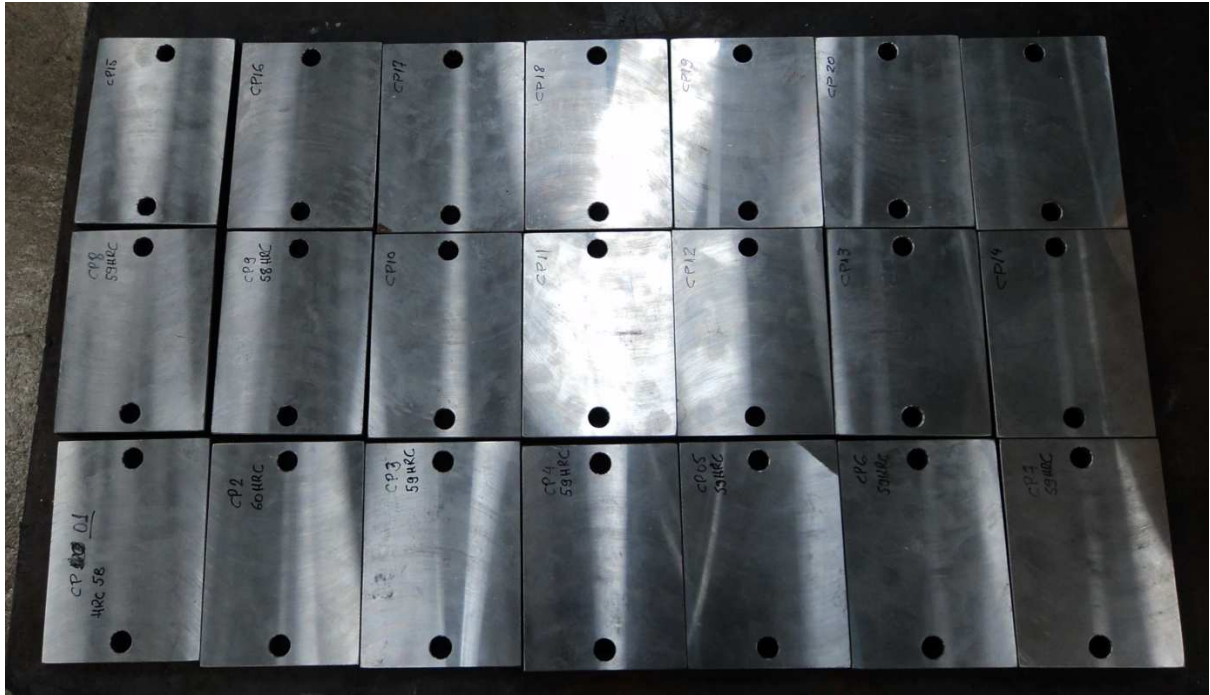
### 5.1.2 Corpo de prova

As dimensões do corpo de prova, foram determinadas em função da dimensão do porta ferramenta utilizado e dos meios de fixação junto ao dinamômetro, responsável pela medição dos esforços de corte. As placas tem 140mm de comprimento por 100mm de largura e 20mm de espessura e possuem dois furos rebaixados para fixação de parafusos de cabeça cilíndrica M12x30 DIN912. A rugosidade da superfície tratada termicamente é  $Ra\ 0,8\mu m$ . As figuras 5.1 e 5.2 abaixo mostram, primeiramente parte do desenho de fabricação com as principais informações para a execução desta pesquisa e uma foto com os verdadeiros corpos de prova utilizados.



**Figura 5.1:** Desenho do Corpo de prova de AISI 4140 forjado, com a superfície superior temperada e revenida para  $58\pm 2$  HRC e profundidade de  $3\pm 1$ mm.

Fonte: Desenho de fabricação Prensas Schuler id. 7C-004.973=2, (2012)

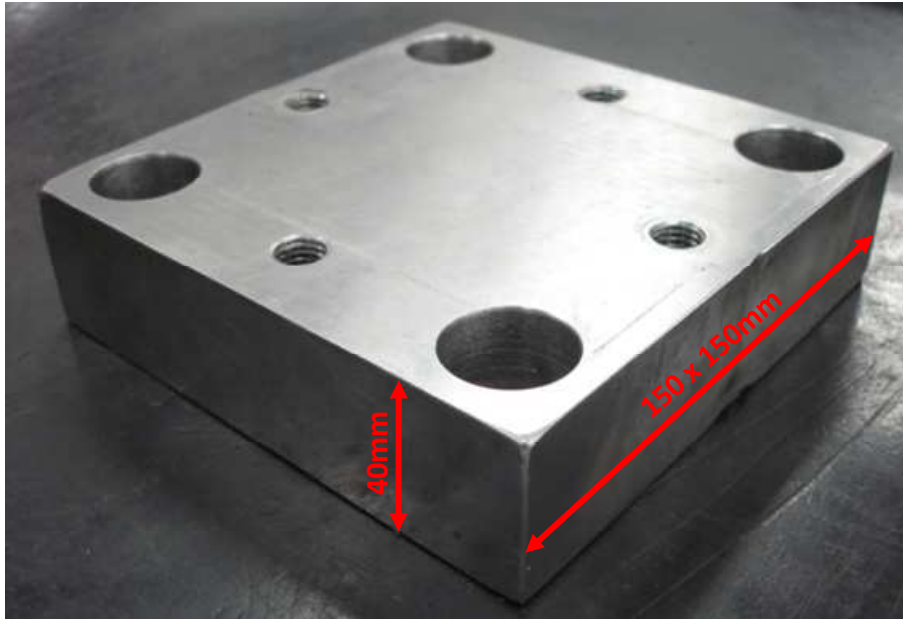


**Figura 5.2:** Corpos de prova de AISI 4140 utilizados nos ensaios de fresamento.

A dureza dos corpos de prova após a realização do tratamento térmico, mas antes da realização das operações de desbaste e acabamento foram medidas e apresentaram um valor médio de  $59 \pm 1$  HRC.

## 5.2 Métodos

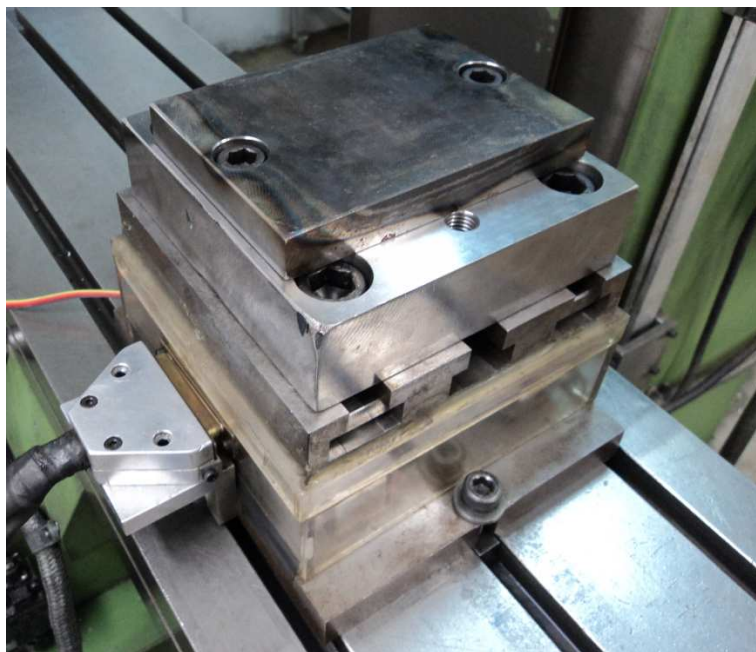
A partir da finalização dos vinte corpos de prova, necessários para execução de um planejamento experimental de delineamento central composto (DCC), com seis réplicas no ponto central, iniciou-se a preparação de fixação dos corpos de prova no dinamômetro e consequentemente desta à mesa da fresadora. Para facilitar a troca dos corpos de prova, foi fabricada uma placa de fixação de grande rigidez em substituição às tradicionais morsas, de acordo a figura 5.3.



**Figura 5.3:** Foto da placa rígida de fixação dos corpos de prova no dinamômetro.

#### 5.2.1 Operação de desbaste

A operação de desbaste foi necessária para corrigir qualquer desvio de paralelismo entre a mesa da fresadora e a superfície usinada dos corpos de prova, advindas da montagem em sanduíche do dinamômetro de medição e da placa de fixação dos corpos de prova, que se posicionam entre a mesa da fresadora e o corpo de prova como mostrado na figura 5.4.



**Figura 5.4:** Montagem dos corpos de prova no dinamômetro através de uma placa rígida.

Para a operação de desbaste foram utilizados os seguintes parâmetros de corte listados na tabela 5.2:

Tabela 5.2: Parâmetros de corte utilizados para operação de desbaste.

|                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| Velocidade de corte ( $v_c$ )   | 277 m/min                |
| Rotação (n)                     | 700 rpm                  |
| Velocidade de avanço ( $V_f$ )  | 250 mm/min               |
| Profundidade de corte ( $a_p$ ) | 0,1mm                    |
| Diâmetro da fresa               | 80 mm                    |
| Arestas de corte                | 6                        |
| Refrigeração                    | Sem uso de refrigerante  |
| Ferramenta de corte             | Coromill 245 M / Sandvik |

Após a conclusão da etapa de desbaste, mediu-se a rugosidade da superfície desbastada que apresentou um valor médio de  $R_a$  0,8  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.2 Operação de acabamento

Com a conclusão desta operação, analisou-se a integridade superficial do aço AISI 4140 endurecido, pois o produto já se encontrava no seu estado final. Durante a usinagem dos vinte corpos de prova, variaram-se os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de penetração), conforme a tabela 5.3, com o intuito de análise das forças de corte e de todas as outras características que definiriam a qualidade da integridade superficial das superfícies usinadas.

Tabela 5.3: Parâmetros de corte adotados para operação de acabamento.

| Exp. | PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO) |                |                         |           |                      |
|------|------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------|-----------|----------------------|
|      | Velocidade de corte                                                    | Avanço         | Profundidade Penetração | Rotação   | Velocidade de avanço |
|      | $V_c$ (m/min)                                                          | $f_z$ (mm/rev) | $a_p$ (mm)              | $n$ (rpm) | $V_f$ (mm/min)       |
| 1    | 150,0                                                                  | 0,050          | 0,10                    | 758       | 189,5                |
| 2    | 150,0                                                                  | 0,050          | 0,20                    | 758       | 189,5                |
| 3    | 150,0                                                                  | 0,150          | 0,10                    | 758       | 568,4                |
| 4    | 150,0                                                                  | 0,150          | 0,20                    | 758       | 568,4                |
| 5    | 300,0                                                                  | 0,050          | 0,10                    | 1516      | 378,9                |
| 6    | 300,0                                                                  | 0,050          | 0,20                    | 1516      | 378,9                |
| 7    | 300,0                                                                  | 0,150          | 0,10                    | 1516      | 1136,8               |
| 8    | 300,0                                                                  | 0,150          | 0,20                    | 1516      | 1136,8               |
| 9    | 98,9                                                                   | 0,100          | 0,15                    | 499       | 249,7                |
| 10   | 351,1                                                                  | 0,100          | 0,15                    | 1774      | 887,0                |
| 11   | 225,0                                                                  | 0,016          | 0,15                    | 1137      | 90,4                 |
| 12   | 225,0                                                                  | 0,184          | 0,15                    | 1137      | 1046,4               |
| 13   | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,07                    | 1137      | 568,4                |
| 14   | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,23                    | 1137      | 568,4                |
| 15©  | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,15                    | 1137      | 568,4                |
| 16©  | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,15                    | 1137      | 568,4                |
| 17©  | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,15                    | 1137      | 568,4                |
| 18©  | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,15                    | 1137      | 568,4                |
| 19©  | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,15                    | 1137      | 568,4                |
| 20©  | 225,0                                                                  | 0,100          | 0,15                    | 1137      | 568,4                |

© identificação das seis réplicas executadas no ponto central

Dentro dos parâmetros adotados, procurou-se trabalhar com valores bem diferentes, explorando ao máximo as situações limites da ferramenta de CBN fornecida pela Sandvik, sendo que a variação média percentual entre o mínimo e máximo de cada parâmetro foi da ordem de 400%.

A figura 5.5 mostra a fresadora realizando uma operação de acabamento em um dos vinte corpos de prova ensaiados. Como toda a fresa esteve em contato com os corpos de prova, utilizou-se concomitantemente o fresamento discordante e concordante, com a fresa centralizada em relação a linha de centro do corpo de prova e penetração de trabalho total ( $a_e = \phi 63$  mm). Para cada corpo de prova foi realizado apenas um passe de acabamento e em nenhum dos ensaios foi utilizado fluido refrigerante.



**Figura 5.5:** Corpo de prova em operação de acabamento.

### 5.2.3 Ferramentas de corte

Para a usinagem dos corpos de prova, foram usados dois modelos de ferramenta. Para execução das operações de desbaste, utilizou-se o modelo Coromill 245 M da empresa Sandvik, montadas em um cabeçote de 80 mm de diâmetro, apresentadas na figura 5.6.



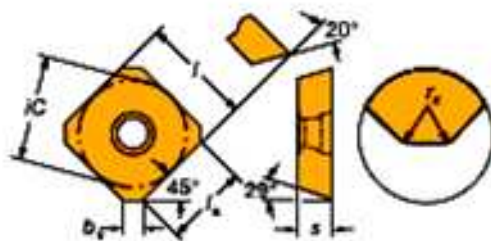
**Figura 5.6:** Porta ferramenta de diâmetro 80 mm montado com os insertos de desbaste.

Para as operações de acabamento, foco principal deste trabalho, utilizaram-se insertos de CBN de código R245 12T3 E CB50 de duas arestas cortantes, montados num cabeçote de 63mm de diâmetro da empresa SANDVIK conforme ilustração da figura 5.7.



**Figura 5.7:** Porta ferramenta de diâmetro.63mm montado com os insertos de CBN para operação de acabamento.

O inserto de CBN escolhido, segundo os dados do catálogo do fabricante, é bastante versátil e o mais indicado para a usinagem de aços endurecidos, sendo utilizado em processos de grande remoção de material assim como em operações de acabamento. Insertos de R245 12T3 E CB50 permitem trabalhos a elevadas velocidades de corte, avanços ( $f_z$ ) de até 0,21mm/rev e profundidade de corte ( $a_p$ ) máxima de 6mm. A geometria e uma foto dos insertos utilizados neste trabalho apresentam-se nas figuras 5.8 e 5.9.



$$\begin{aligned} IC &= 13,4\text{mm} \\ s &= 3,97\text{mm} \\ b_s &= 1,4\text{mm} \\ r_e &= 1,5\text{mm} \end{aligned}$$

**Figura 5.8:** Geometria do Inserto de CBN tipo R245 12T3 E CB50 da SANDVIK.



**Figura 5.9:** Foto do inserto utilizado nos ensaios de CBN tipo R245 12T3 E CB50, de duas arestas cortantes da Sandvik.

#### 5.2.4 Fresadora

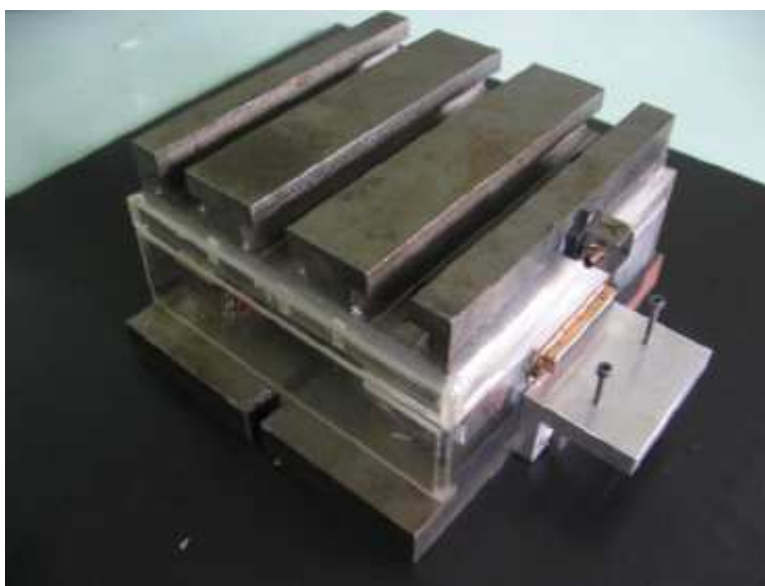
Em função dos parâmetros de corte escolhidos e da necessidade da usinagem com precisão sem vibração, os ensaios foram realizados numa fresadora de boa rigidez estrutural, com precisão de movimentos e folgas reduzidas, ilustrada na figura 5.10, de propriedade da FEI e fabricada pela Sanches Blanes, modelo FU-1 (ISO 40), com capacidade de rotação máxima de 6000rpm, avanço de até 1500mm/min e painel de operação digital para os três eixos principais, X, Y e Z.



**Figura 5.10:** Fresadora vertical convencional Sanches Blanes, modelo FU-1 (ISO 40).

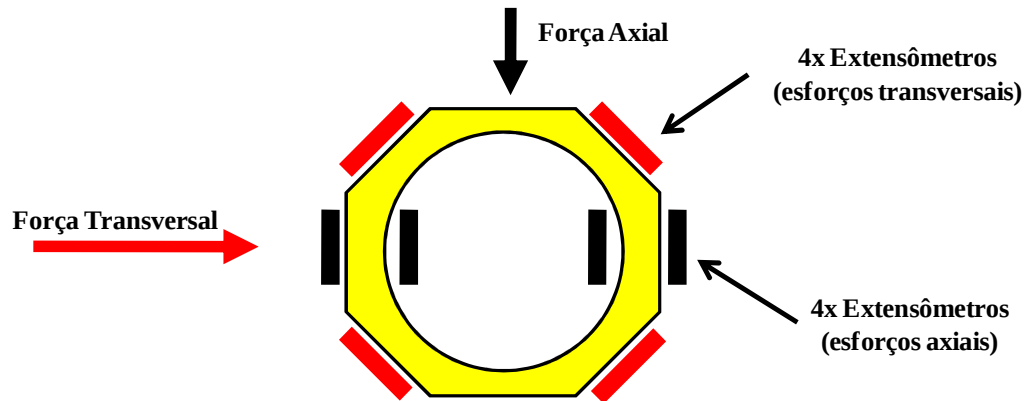
### 5.2.5 Dinamômetro para medição dos esforços de usinagem

Os esforços de usinagem foram mensurados através de um dinamômetro, desenvolvido na FEI, de estrutura robusta e estável afim de minimizar qualquer efeito que mascare os resultados obtidos por falta de rigidez e de sensibilidade coerente com o padrão adotado para células de carga que é de 2 mV/V para a carga de fundo de escala, ilustrado na figura 5.11. A aquisição dos dados se deu num intervalo de tempo definido de até 4s numa frequência de 1200 Hz, suficientes para registrar os dados com segurança, levando-se em consideração as diferentes velocidades de avanço e principalmente a experiência dos professores e especialistas em usinagem consultados.



**Figura 5.11:** Dinamômetro utilizado para medições dos esforços de usinagem.

O dinamômetro, comumente utilizado nos diversos experimentos de usinagem realizados pela FEI, é composto de quatro células de carga, distribuídas aos pares, em duas direções ortogonais, sendo que cada célula possui oito extensômetros elétricos, capazes de medir deformações nas direções axiais e transversais, caracterizadas pela figura 5.12, seguindo o princípio adotado no trabalho de Saglan em 2001.



**Figura 5.12:** Distribuição das células de carga em forma de anel.

### 5.2.6 Rugosímetro para medição do acabamento superficial

A rugosidade dos corpos de prova foi verificada através de um rugosímetro portátil Mitutoyo de modelo SJ-301, ajustado para um comprimento de amostragem de 0,8mm. As medições do acabamento superficial foram dispostas nas mesmas direções do avanço de corte. Para cada superfície medida, a rugosidade adotada foi uma média aritmética estabelecida por três leituras consecutivas. A figura 5.13 ilustra o aparelho utilizado medindo a rugosidade de um dos corpos de prova.



**Figura 5.13:** Rugosímetro Mitutoyo SJ-301 utilizado para medição da rugosidade dos ensaios de usinagem de acabamento.

### 5.2.7 Fresadora Pneumática para medição das tensões residuais

Em função do tamanho do corpo de prova e da necessidade de medir as tensões residuais desde a superfície da peça usinada até a profundidade de 0,4 mm, decidiu-se pela utilização da medição de tensão residual pelo método do furo cego.

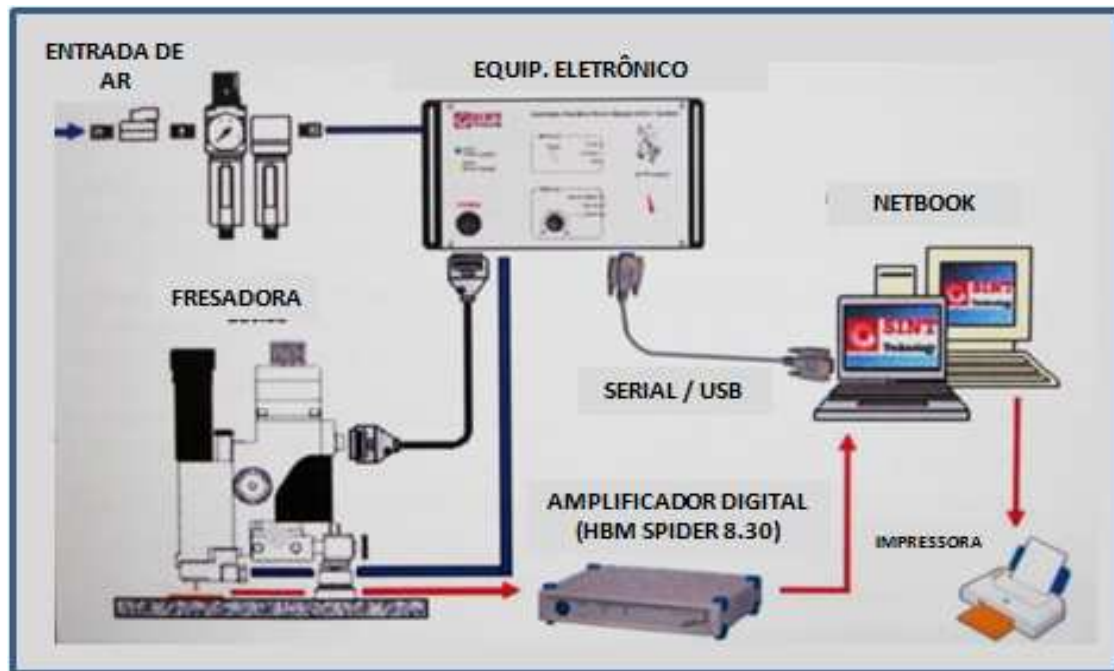
O equipamento escolhido, ilustrado na figura 5.14, é composto de uma fresadora de acionamento pneumático de fixação magnética, acoplada a um medidor de micro deformações que transmite os dados para um computador, registrados através do software H-Drill, configurando o sistema representado na figura 5.15.

Dados técnicos:

|                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| a) fabricante:               | Sint Technology / Itália;      |
| b) modelo:                   | RESTAN;                        |
| c) velocidade máxima:        | 400.000 rpm;                   |
| d) diâmetro máximo da broca: | 2,2 mm;                        |
| e) pressão de ar:            | 3,5 a 5 bar;                   |
| f) avanço vertical mínimo:   | intervalos de 10 $\mu\text{m}$ |

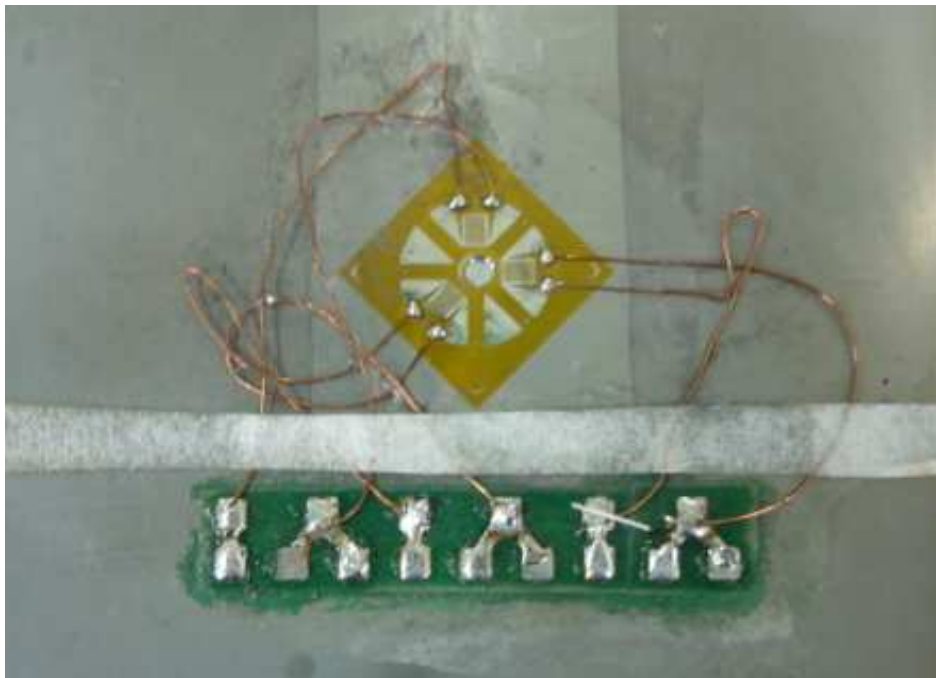


**Figura 5.14:** Fresadora pneumática específica para medir tensão residual pela técnica do furo cego.



**Figura 5.15:** Esquema do sistema integrado para medição de tensão residual pela técnica do furo cego aplicado.

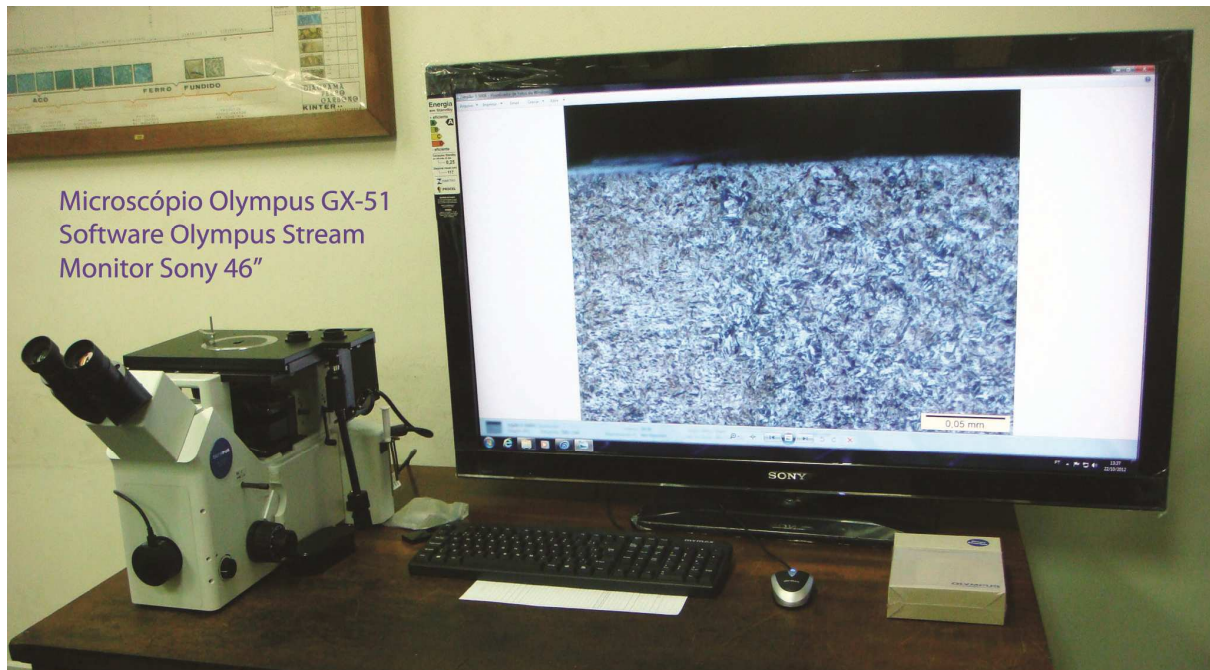
Os corpos de prova foram instrumentados com rosetas tipo M062, conforme ilustra a figura 5.16.



**Figura 5.16:** Roseta tipo PA-06-062RE-120, empresa Excel Sensores.

### 5.2.8 Microscópio para medição da camada branca

Para constatação da presença de camada branca nas superfícies usinadas, utilizou-se um microscópio óptico com ampliação de até 1000x, fabricado pela Olympus modelo GX-51, equipado com o software Olympus Stream e um monitor Sony de 46", ilustrado na figura 5.17.



**Figura 5.17:** Microscópio Olympus GX-51 utilizado para verificar a existência de camada branca.

#### 5.2.9 Durômetro

Para verificação da dureza dos corpos de prova, antes do início das operações de desbaste, e após o fresamento de acabamento com os insertos de CBN, utilizou-se o durômetro modelo RB2000 da empresa americana Instron, conforme ilustra a figura 5.18. Todas as medições foram registradas em HRC.



**Figura 5.18:** Durômetro para medição da dureza dos corpos de prova de AISI 4140.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Baseado no planejamento experimental, já mencionado no capítulo 4.5 deste trabalho, a análise dos dados se sucedeu com a ajuda de um software dedicado para análises estatísticas denominado STATISTICA, amplamente utilizado por pesquisadores em ensaios de usinagem.

Para o tratamento correto dos dados pelo software, fez-se necessária a identificação das variáveis independentes, definidas como:

- Velocidade de corte ( $V_c$ );
- Avanço por dente ( $f_z$ );
- Profundidade de penetração ( $a_p$ )

E das variáveis dependentes, definidas como:

- Esforços de corte ( $F_t$ ;  $F_r$ ;  $F_p$ ,  $R$ );
- Rugosidade ( $R_a$ );
- Tensões residuais ( $T_{res}$ )
- Camada Branca ( $CM$ )

### 6.1 Esforços de usinagem

Os esforços medidos de cada um dos vinte ensaios validados, foram analisados separadamente, seguindo a sequência abaixo disposta:

- $F_t$ , força tangencial;
- $F_r$ , força radial;
- $F_p$ , força passiva;
- $R$ , força resultante

#### 6.1.1 Força Tangencial ( $F_t$ )

A tabela 6.1, indica os valores da força tangencial em N, obtidos nos vinte ensaios executados com diferentes parâmetros de usinagem.

O software STATISTICA analisou os dados com um nível de confiança de 95%. No caso da força tangencial o  $R^2$  foi de 0,92 e o  $R^2_{aj}$  de 0,86.

**Tabela 6.1:** Resultados obtidos para a força tangencial.

| PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO) |                     |                |                         |                  |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|------------------|
| Exp.                                                                   | Velocidade de corte | Avanço         | Profundidade Penetração | Força Tangencial |
|                                                                        | $V_c$ (m/min)       | $f_z$ (mm/rev) | $a_p$ (mm)              | $F_t$ (N)        |
| 1                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,10                    | 82               |
| 2                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,20                    | 122              |
| 3                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,10                    | 128              |
| 4                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,20                    | 176              |
| 5                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,10                    | 62               |
| 6                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,20                    | 92               |
| 7                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,10                    | 125              |
| 8                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,20                    | 147              |
| 9                                                                      | 99                  | 0,100          | 0,15                    | 179              |
| 10                                                                     | 351                 | 0,100          | 0,15                    | 126              |
| 11                                                                     | 225                 | 0,016          | 0,15                    | 55               |
| 12                                                                     | 225                 | 0,184          | 0,15                    | 183              |
| 13                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,07                    | 75               |
| 14                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,23                    | 107              |
| 15©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 104              |
| 16©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 152              |
| 17©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 131              |
| 18©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 120              |
| 19©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 125              |
| 20©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 137              |

Analisando a figura 6.1, observou-se que a força tangencial, de direção igual à velocidade de avanço, foi influenciada pelos três parâmetros de corte caracterizados como variáveis independentes deste planejamento experimental, mas com maior relevância para o avanço  $f_z$  (avanços maiores, resultaram em esforços maiores). A segunda variável independente, que também influenciou a força tangencial, considerando um nível de confiança de 95% foi a profundidade de corte  $a_p$  (profundidades maiores, resultaram em esforços maiores). As interações encontradas estão em total acordo com a literatura de usinagem, e com o gráfico apresentado na figura 6.2 ( $a_p \times f_z$ ), pois um avanço maior, combinado com uma profundidade de corte também maior, se traduzem numa maior área de remoção de cavaco, que por sua vez é diretamente proporcional a força gerada para removê-la.

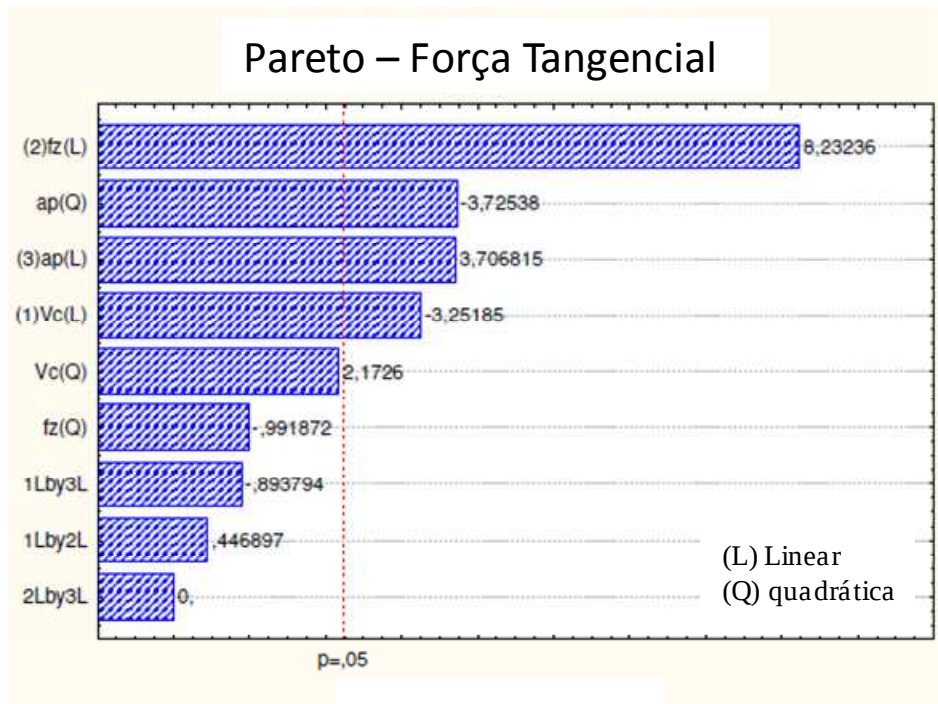


Figura 6.1: Pareto da influência dos parâmetros de corte na força tangencial.

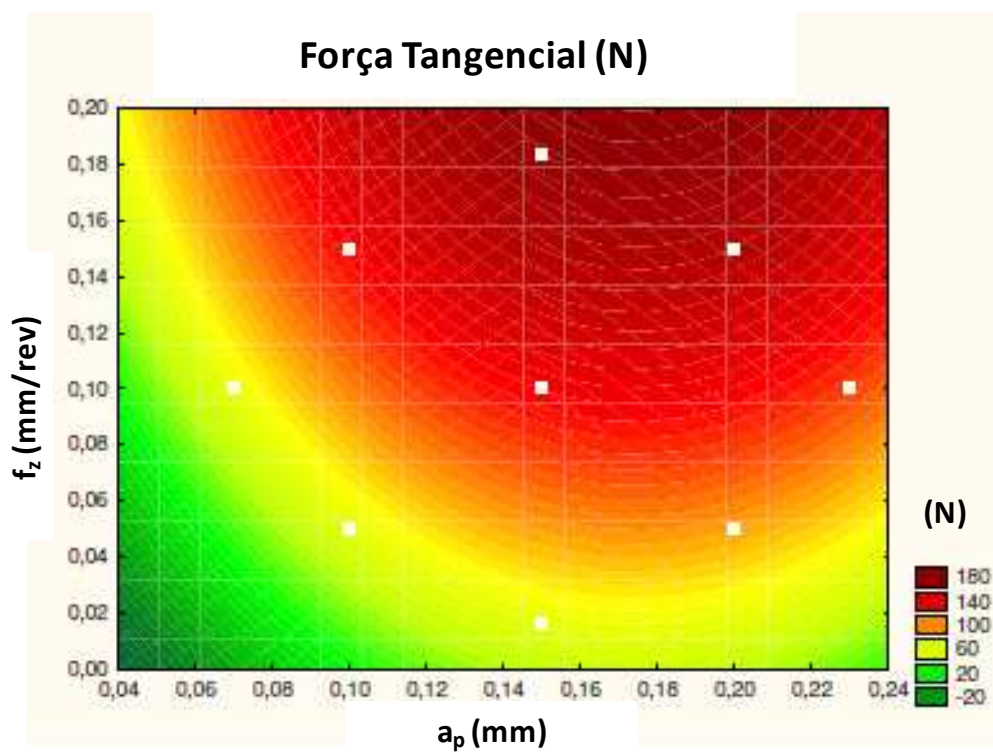
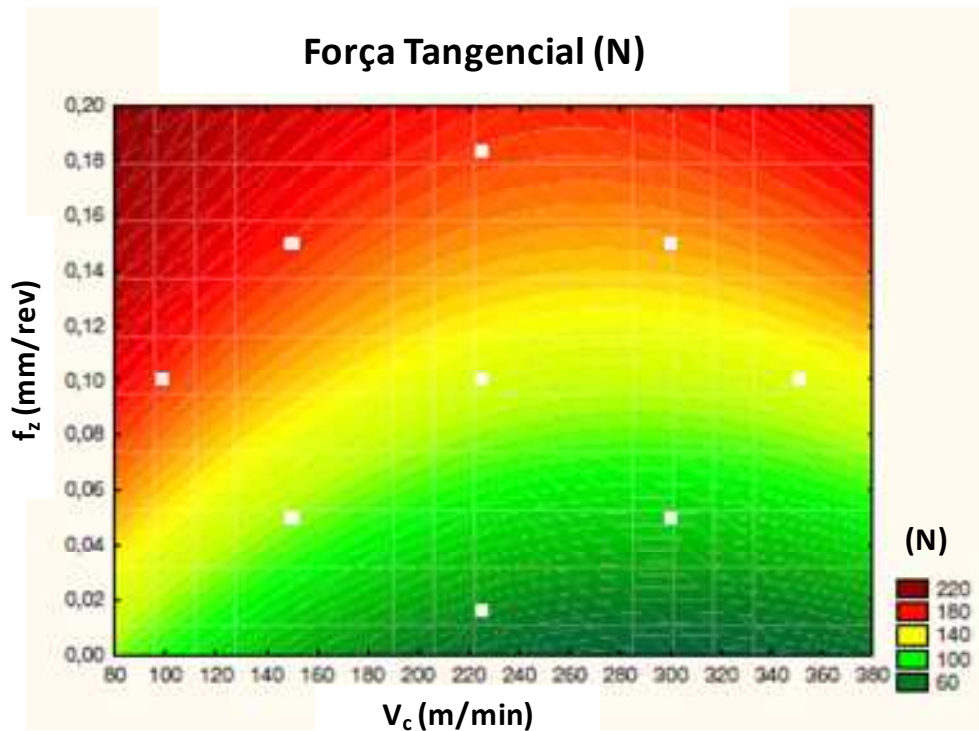


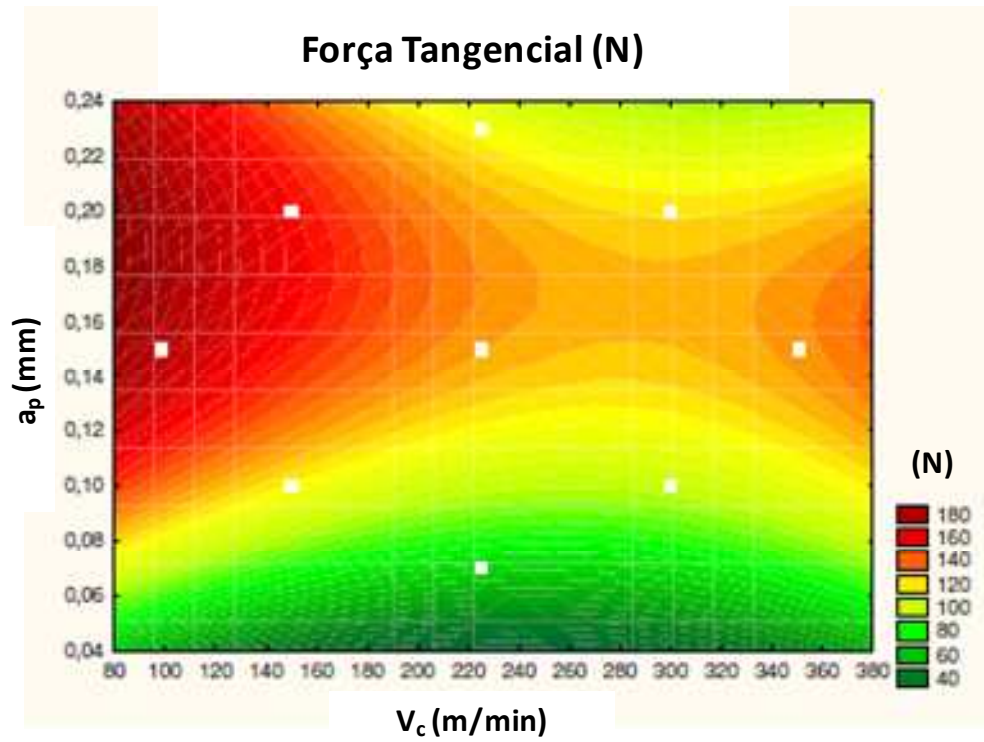
Figura 6.2: Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a força tangencial adotando  $V_c$  de 225 m/min.

Através da figura 6.3, que apresentou a variação da força tangencial em função das velocidades de corte  $V_c$  e do avanço por aresta  $f_z$ , verificou-se que dentro da faixa de valores ensaiados, os valores mínimos da força tangencial, ou força de avanço,  $F_t$  ocorreram com valores de  $f_z$  reduzidos e  $V_c$  médias altas, por sua vez, os valores máximos da força tangencial se revelaram altos, para avanços  $f_z$  elevados e  $V_c$  baixas, por volta de 80 a 100m/min ou altas, na ordem de 380m/min.

Da análise da figura 6.4, que apresentou a variação da força tangencial em função das velocidades de corte  $V_c$  e profundidade de penetração  $a_p$ , pode-se constatar que dentro da faixa de valores ensaiados, os valores mínimos da força tangencial, ou força de avanço,  $F_t$  ocorreram com valores  $a_p$  reduzidos e  $V_c$  médios, enquanto que os máximos foram obtidos com valores de  $a_p$  alto e  $V_c$  muito baixos ou elevados.



**Figura 6.3:** Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força tangencial adotando  $a_p$  de 0,15 mm.



**Figura 6.4:** Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a força tangencial adotando  $f_z$  de 0,1 mm/rev.

### 6.1.2 Força Radial ( $F_r$ )

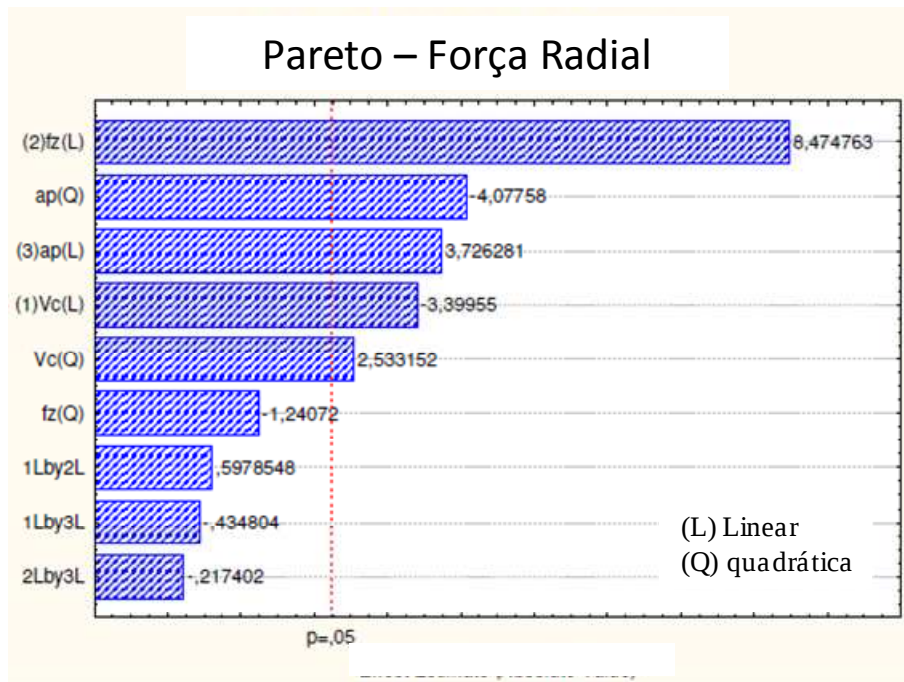
Os valores obtidos para a força radial, ou força de corte, encontram-se na tabela 6.2.

O software STATISTICA analisou os dados com um nível de confiança de 95%. No caso da força radial o  $R^2$  foi de 0,93 e o  $R^2_{aj}$  de 0,86.

**Tabela 6.2:** Resultados obtidos para a força radial.

| PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO) |                     |                |                         |              |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|--------------|
| Exp.                                                                   | Velocidade de corte | Avanço         | Profundidade Penetração | Força Radial |
|                                                                        | $V_c$ (m/min)       | $f_z$ (mm/rev) | $a_p$ (mm)              | $F_r$ (N)    |
| 1                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,10                    | 81           |
| 2                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,20                    | 122          |
| 3                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,10                    | 130          |
| 4                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,20                    | 164          |
| 5                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,10                    | 62           |
| 6                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,20                    | 92           |
| 7                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,10                    | 119          |
| 8                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,20                    | 148          |
| 9                                                                      | 99                  | 0,100          | 0,15                    | 178          |
| 10                                                                     | 351                 | 0,100          | 0,15                    | 126          |
| 11                                                                     | 225                 | 0,016          | 0,15                    | 55           |
| 12                                                                     | 225                 | 0,184          | 0,15                    | 176          |
| 13                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,07                    | 76           |
| 14                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,23                    | 102          |
| 15©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 101          |
| 16©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 138          |
| 17©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 132          |
| 18©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 124          |
| 19©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 124          |
| 20©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 138          |

Pode-se constatar que os valores encontrados para a força radial foram muito próximos dos encontrados para a força tangencial, anteriormente apresentada. Esta similaridade se dá em função do processo de fresamento, onde os insertos de CBN circulam toda a superfície plana usinada. Analisando a figura 6.5, observou-se que a força radial também foi influenciada pelos três parâmetros de corte e a maior relevância manteve-se associada ao  $f_z$  (avanços maiores, resultaram em esforços maiores). A segunda variável independente que também interagiu com a força radial foi a profundidade de corte  $a_p$  (profundidades maiores, resultaram em esforços maiores), e por fim a velocidade de corte  $V_c$ .



**Figura 6.5:** Pareto, da influência dos parâmetros de corte na força radial.

O gráfico da profundidade de corte em função do avanço ( $a_p \times f_z$ ), demonstrou que os valores mínimos da força radial ocorreram com baixos  $f_z$  e  $a_p$ , sendo que de modo oposto, os valores máximos da força radial se apresentaram com  $f_z$  e  $a_p$  elevados, conforme ilustra figura 6.6.

O comportamento do gráfico do avanço em função da velocidade de corte, também se mostrou muito similar ao encontrado na análise da força tangencial, com valores mínimos de força radial encontrados para baixos valores de  $f_z$  e médios altos de  $V_c$ , conforme mostra a figura 6.7.

Fixando avanço  $f_z$  em 0,1mm pode-se observar pelo gráfico ( $a_p \times V_c$ ), ilustrado através da figura 6.8, que a força radial se comportou exatamente como a força tangencial, onde os valores mínimos da força radial, ou força de corte,  $F_r$  ocorreram com valores de  $a_p$  reduzidos e  $V_c$  médias, enquanto que os máximos foram obtidos com valores de  $a_p$  alto e  $V_c$  muito baixa ou elevada.

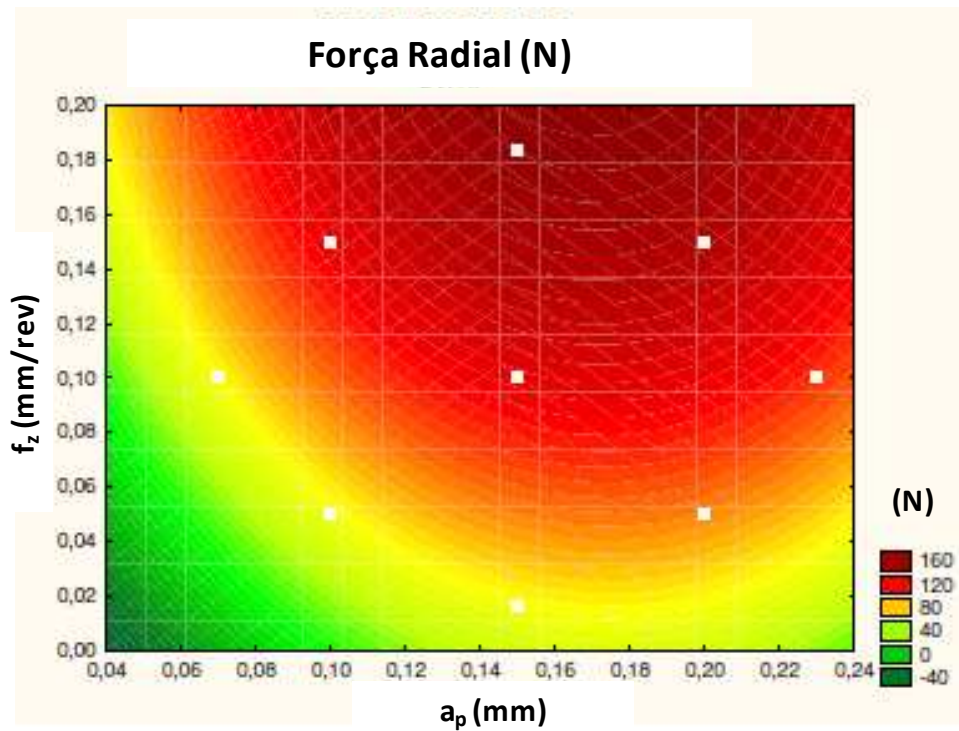


Figura 6.6: Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a força radial adotando  $V_c$  de 225 m/min.

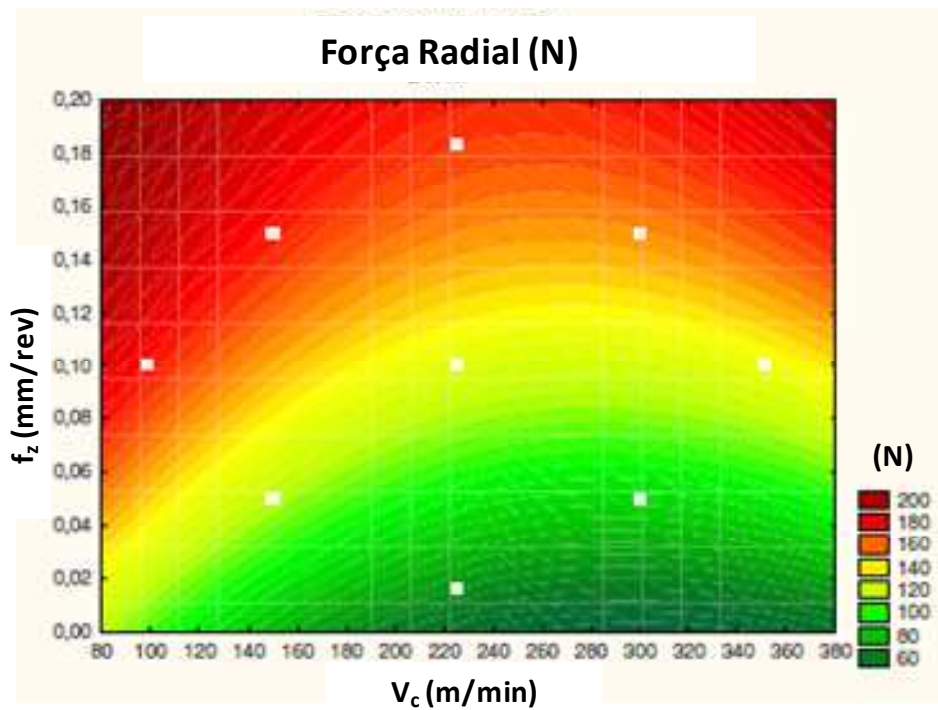
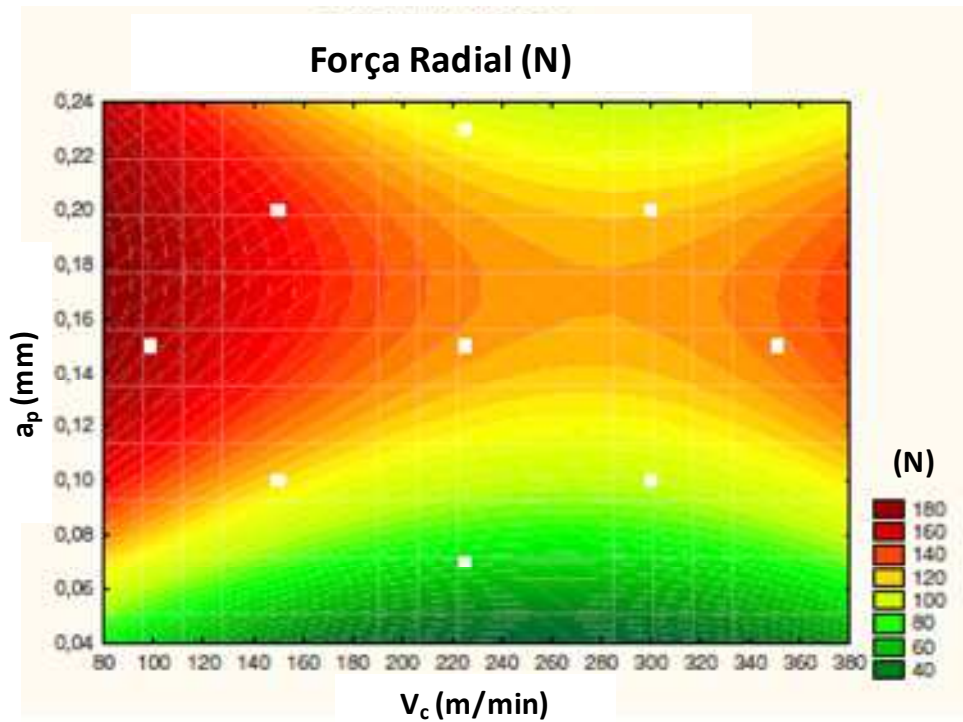


Figura 6.7: Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força radial adotando  $a_p$  de 0,15 mm.



**Figura 6.8:** Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a força radial adotando  $f_z$  de 0,1 mm/rev.

### 6.1.3 Força Passiva ( $F_p$ )

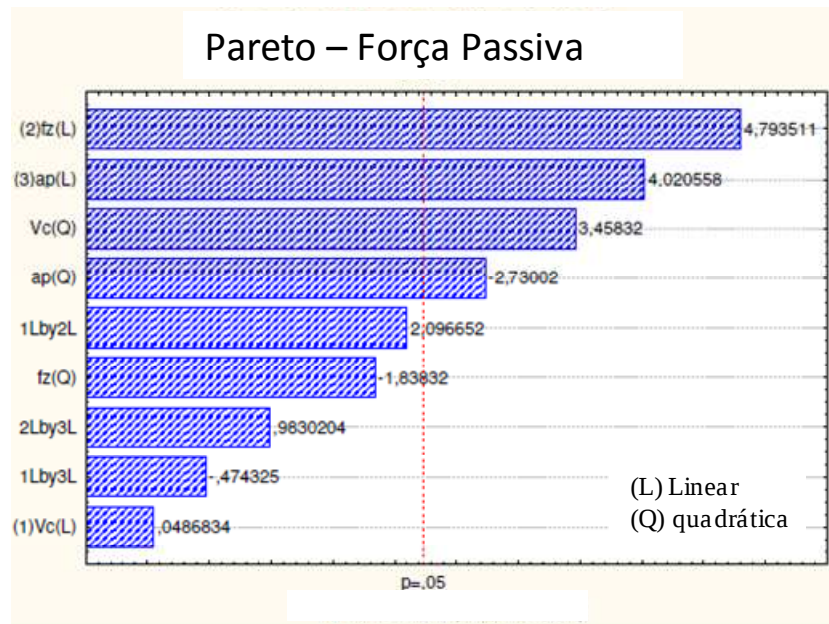
Os valores obtidos para a força passiva, encontram-se na tabela 6.3.

O software STATISTICA analisou os dados com um nível de confiança de 95%. No caso da força passiva o  $R^2$  foi de 0,87 e o  $R^2_{aj}$  de 0,76.

**Tabela 6.3:** Resultados obtidos para a força passiva.

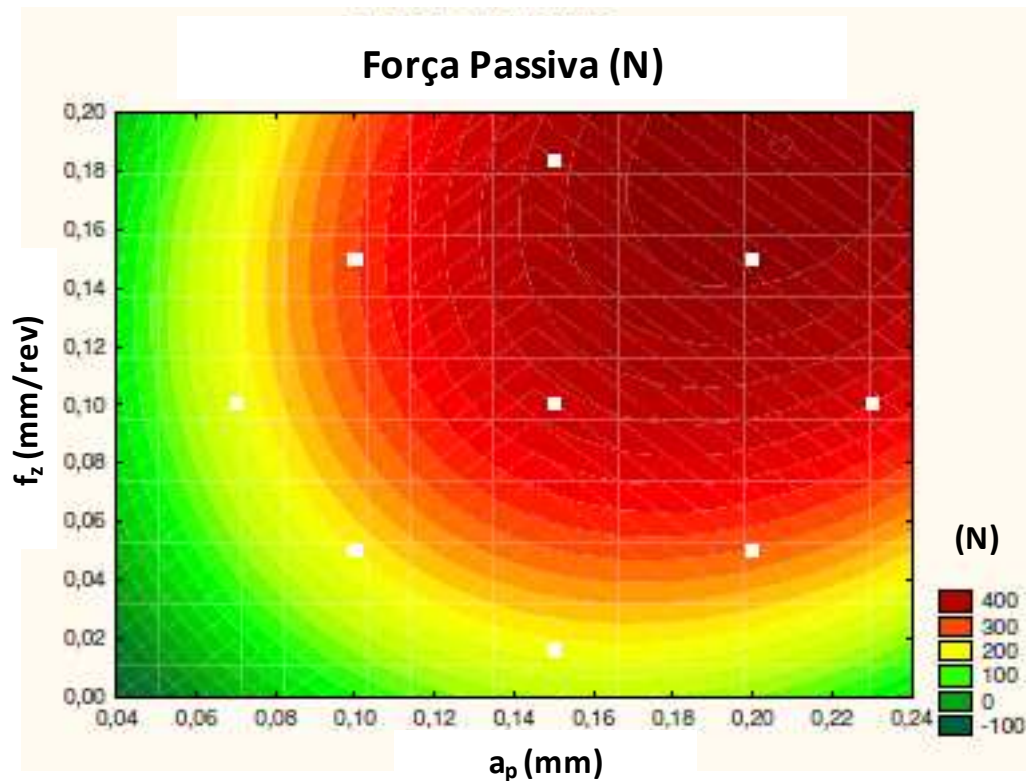
| PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO) |                     |                |                         |               |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|---------------|
| Exp.                                                                   | Velocidade de corte | Avanço         | Profundidade Penetração | Força Passiva |
|                                                                        | $V_c$ (m/min)       | $f_z$ (mm/rev) | $a_p$ (mm)              | $F_p$ (N)     |
| 1                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,10                    | 277           |
| 2                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,20                    | 392           |
| 3                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,10                    | 239           |
| 4                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,20                    | 417           |
| 5                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,10                    | 246           |
| 6                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,20                    | 318           |
| 7                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,10                    | 352           |
| 8                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,20                    | 504           |
| 9                                                                      | 99                  | 0,100          | 0,15                    | 543           |
| 10                                                                     | 351                 | 0,100          | 0,15                    | 492           |
| 11                                                                     | 225                 | 0,016          | 0,15                    | 127           |
| 12                                                                     | 225                 | 0,184          | 0,15                    | 503           |
| 13                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,07                    | 212           |
| 14                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,23                    | 357           |
| 15©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 347           |
| 16©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 391           |
| 17©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 362           |
| 18©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 374           |
| 19©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 368           |
| 20©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 377           |

De acordo com o Pareto da força passiva, levantado pelo software “Statistica”, e ilustrado na figura 6.9, constatou-se que a força passiva foi influenciada pelos três parâmetros de corte, mas a influência do avanço  $f_z$ , que ainda foi a mais relevante, diminuiu, apresentando um nível de interação muito próximo do ocorrido com a profundidade de penetração  $a_p$ .



**Figura 6.9:** Pareto da influência dos parâmetros de corte na força passiva.

O comportamento do gráfico da profundidade de corte em função do avanço ( $a_p \times f_z$ ), indicado na figura 6.10, foi muito similar aos encontrados para a força tangencial e radial, mas o que chamou a atenção foi a intensidade da força passiva, praticamente o dobro do valor das forças tangencial e radial, o que pode estar associado ao fato da ferramenta de CBN, que para garantir um  $a_p$  relevante, em função da grande área de contato da ferramenta, possui angulação negativa, exercendo um esforço de compressão muito elevado. Segundo Zhou, anderson e Stahl (2003), para processos de usinagem de acabamento de metais endurecidos, como o torneamento e o fresamento, a força passiva assume o papel de maior relevância em virtude das baixas profundidades de corte e velocidades de avanço adotadas, associadas a necessidade do grande ângulo negativo imposto a ferramenta. Também observou-se que há uma tendência, indicando que profundidades maiores de corte, combinadas com avanços maiores, resultam em esforços de corte maiores.



**Figura 6.10:** Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a força passiva adotando  $V_c$  de 225 m/min.

Através da figura 6.11, o comportamento do gráfico do avanço em função da velocidade de corte ( $f_z \times V_c$ ), se mostrou diferente da tendência apresentada para a força tangencial e radial, destacando a menor influência do avanço, principalmente quando combinado com velocidades de corte menores.

Quando se fez a análise do gráfico da profundidade de penetração em função da velocidade de corte ( $a_p \times V_c$ ), ilustrado na figura 6.12, ficou nítida a pouca influência da velocidade de corte sob a força passiva e comprovou-se a relação de proporcionalidade direta, da profundidade de penetração em função da força passiva, pois a maior parte da resistência sofrida pela ferramenta de corte está vinculada a profundidade de penetração.

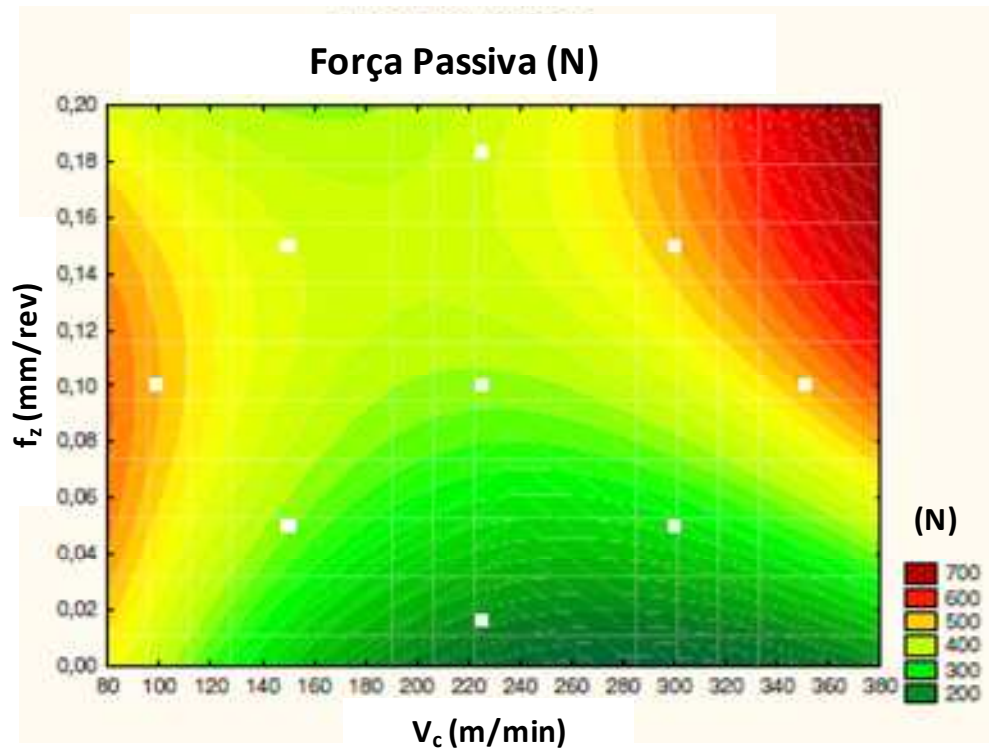


Figura 6.11: Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força passiva adotando  $a_p$  de 0,15 mm.

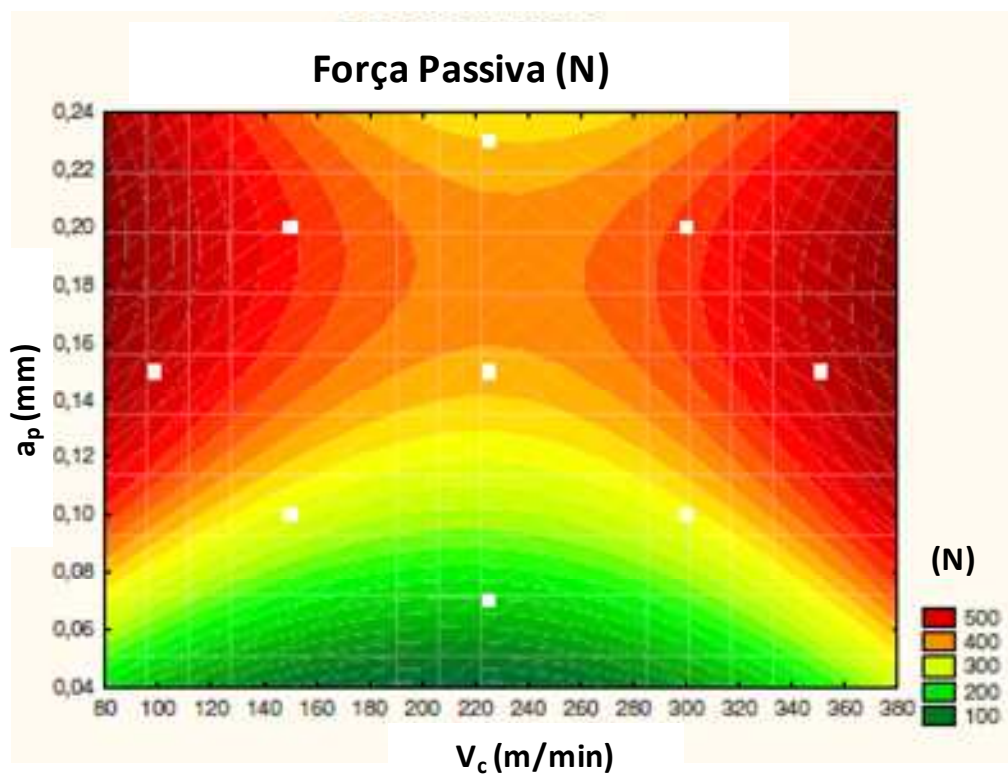


Figura 6.12: Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a força passiva adotando  $f_z$  de 0,1 mm/rev.

### 6.1.4 Força Resultante (**R**)

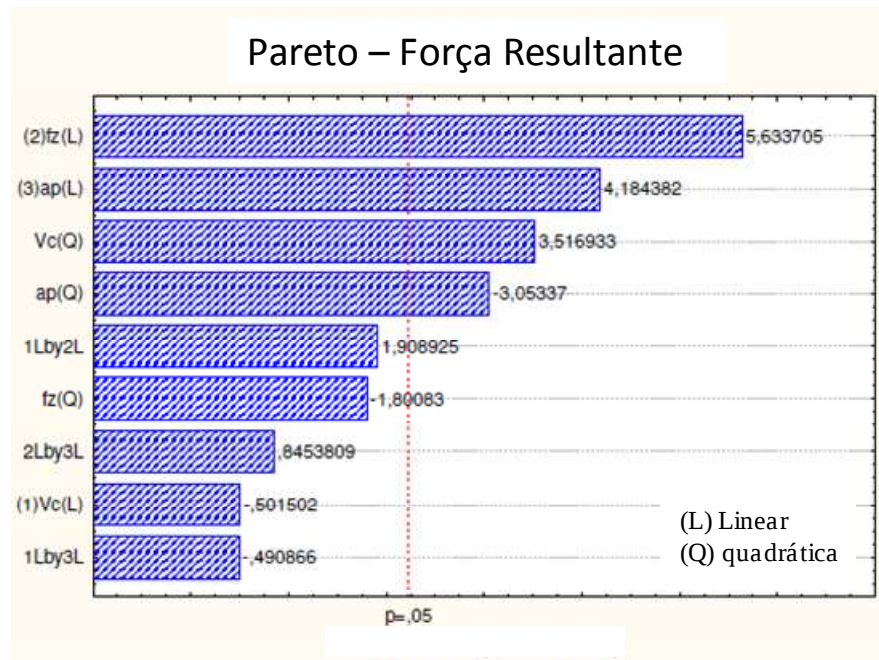
Os valores obtidos para a força resultante, encontram-se na tabela 6.4.

O software STATISTICA analisou os dados com um nível de confiança de 95%. No caso da força resultante o  $R^2$  foi de 0,89 e o  $R^2_{aj}$  de 0,79.

**Tabela 6.4:** Resultados obtidos para a força resultante.

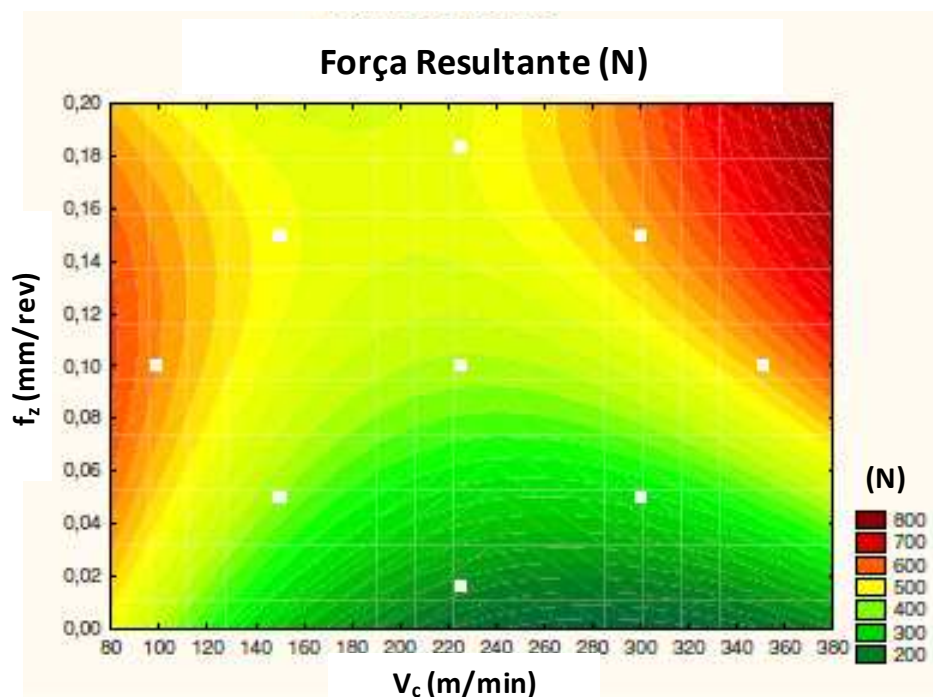
| PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO) |                     |                |                         |                  |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|------------------|
| Exp.                                                                   | Velocidade de corte | Avanço         | Profundidade Penetração | Força Resultante |
|                                                                        | $V_c$ (m/min)       | $f_z$ (mm/rev) | $a_p$ (mm)              | $R$ (N)          |
| 1                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,10                    | 301              |
| 2                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,20                    | 429              |
| 3                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,10                    | 300              |
| 4                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,20                    | 481              |
| 5                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,10                    | 261              |
| 6                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,20                    | 344              |
| 7                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,10                    | 391              |
| 8                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,20                    | 545              |
| 9                                                                      | 99                  | 0,100          | 0,15                    | 599              |
| 10                                                                     | 351                 | 0,100          | 0,15                    | 524              |
| 11                                                                     | 225                 | 0,016          | 0,15                    | 149              |
| 12                                                                     | 225                 | 0,184          | 0,15                    | 564              |
| 13                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,07                    | 237              |
| 14                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,23                    | 387              |
| 15©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 376              |
| 16©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 441              |
| 17©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 407              |
| 18©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 412              |
| 19©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 408              |
| 20©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 424              |

De acordo com o Pareto ilustrado na figura 6.13, confirmou-se que houve interação dos três parâmetros de corte, sob o esforço resultante, e notou-se a mesma tendência observada no comportamento da força radial, onde a influência do avanço não foi tão maior quando comparada a profundidade de penetração.



**Figura 6.13:** Pareto da influência dos parâmetros de corte na força resultante.

O comportamento do gráfico que mostrou a variação da força resultante em função das velocidades de corte e do avanço por aresta ( $f_z \times V_c$ ), ilustrado na figura 6.14, apresenta a mesma distribuição encontrada com a força passiva, os valores mínimos de **R** ocorrem com avanços pequenos e velocidades de corte médias a altas, na faixa de 260 m/min.



**Figura 6.14:** Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a força passiva adotando  $a_p$  de 0,15 mm.

Da análise das figuras 6.15 e 6.16, que indicam graficamente o comportamento da força resultante quando analisada em função de  $(f_z \times a_p)$  e  $(a_p \times V_c)$ , constata-se que a resultante apresenta a mesma tendência observada com a força passiva, fruto da interação da profundidade de penetração e do avanço. Os valores mínimos da força resultante se manifestam para valores baixos de avanço, de profundidade de penetração e velocidades de corte, da ordem de 220 a 260m/min.

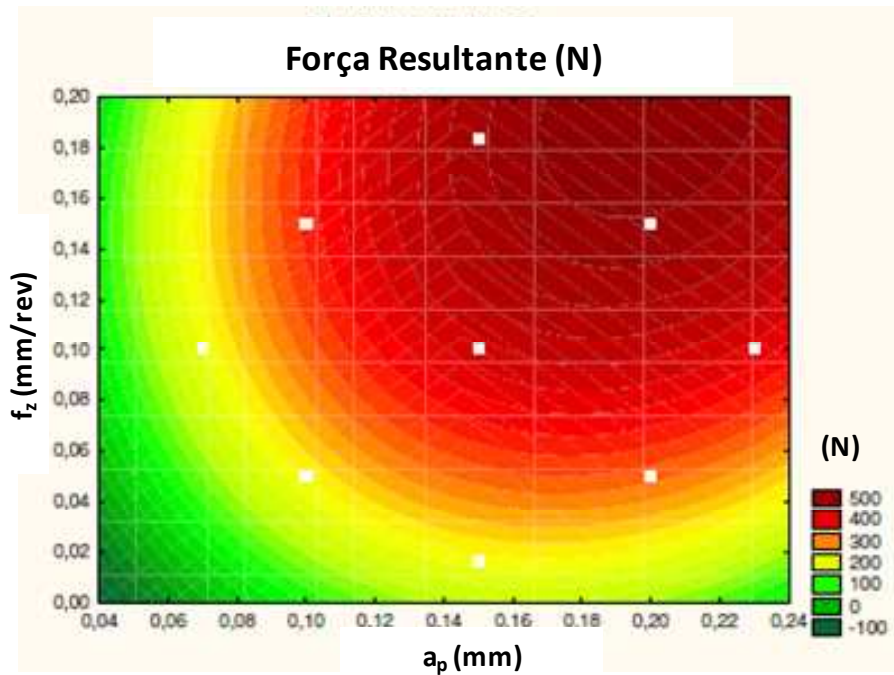


Figura 6.15: Gráfico  $(a_p \times f_z)$  para a força resultante adotando  $V_c$  de 225 m/min.

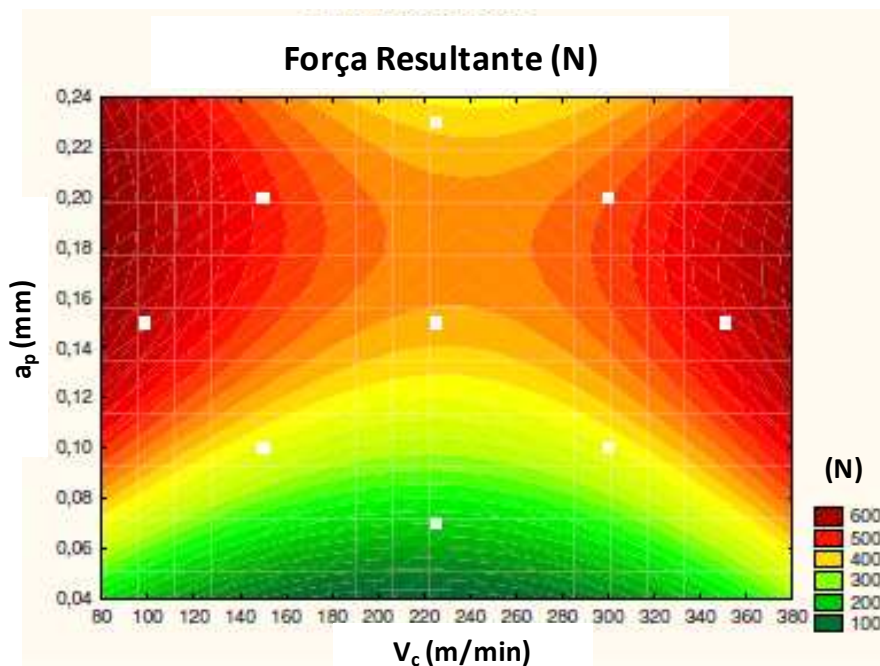


Figura 6.16: Gráfico  $(a_p \times V_c)$  para a força passiva adotando  $f_z$  de 0,1 mm/rev.

## 6.2 Rugosidade ( $R_a$ )

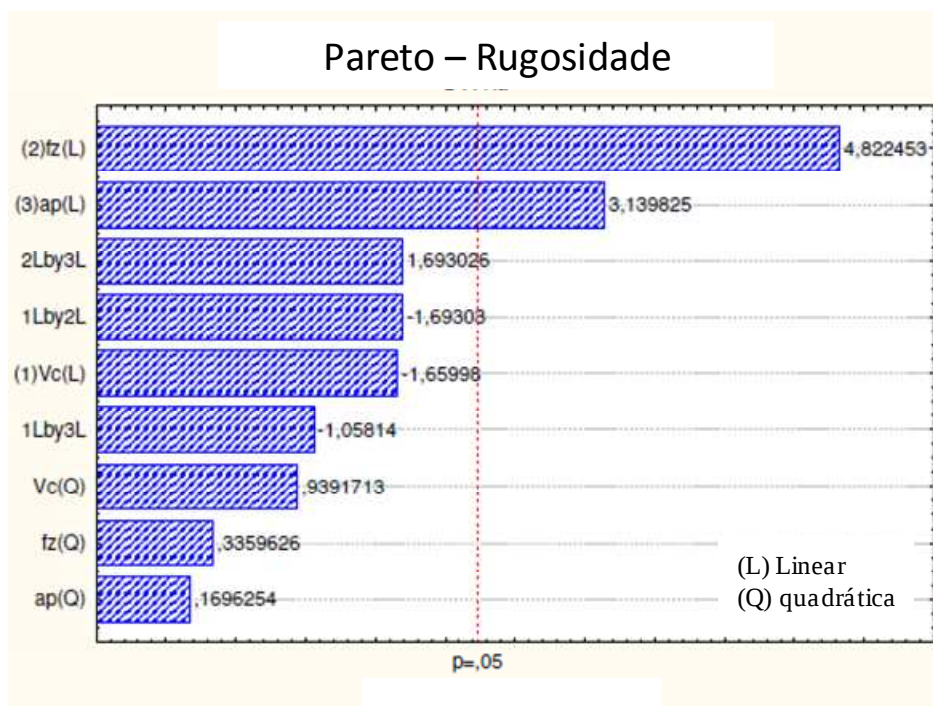
Os valores obtidos para rugosidade, que se encontram na tabela 6.5. representam a média de três medições realizadas na região central de cada corpo de prova, no sentido paralelo ao de avanço adotado no processo de usinagem.

O software STATISTICA analisou os dados com um nível de confiança de 95%. No caso da rugosidade o  $R^2$  foi de 0,81 e o  $R^2_{aj}$  de 0,64.

**Tabela 6.5:** Resultados obtidos para a rugosidade.

| PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO) |                     |                |                         |                  |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|------------------|
| Exp.                                                                   | Velocidade de corte | Avanço         | Profundidade Penetração | Rugosidade       |
|                                                                        | $V_c$ (m/min)       | $f_z$ (mm/rev) | $a_p$ (mm)              | $R_a$ ( $\mu$ m) |
| 1                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,10                    | 0,18             |
| 2                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,20                    | 0,19             |
| 3                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,10                    | 0,22             |
| 4                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,20                    | 0,41             |
| 5                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,10                    | 0,19             |
| 6                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,20                    | 0,25             |
| 7                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,10                    | 0,25             |
| 8                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,20                    | 0,29             |
| 9                                                                      | 99                  | 0,100          | 0,15                    | 0,30             |
| 10                                                                     | 351                 | 0,100          | 0,15                    | 0,19             |
| 11                                                                     | 225                 | 0,016          | 0,15                    | 0,16             |
| 12                                                                     | 225                 | 0,184          | 0,15                    | 0,30             |
| 13                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,07                    | 0,20             |
| 14                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,23                    | 0,25             |
| 15©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 0,21             |
| 16©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 0,24             |
| 17©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 0,25             |
| 18©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 0,23             |
| 19©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 0,22             |
| 20©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | 0,23             |

Os valores de rugosidade encontrados para os diversos ensaios, revelaram uma rugosidade apropriada para processos de usinagem de acabamento, variando de  $R_a$  0,16 até 0,41  $\mu$ m. A figura 6.17, indica através do diagrama de Pareto, que a rugosidade foi influenciada por dois dos três parâmetros de corte estudados, o avanço  $f_z$  com maior representatividade e a profundidade de penetração  $a_p$ .



**Figura 6.17:** Pareto da influência dos parâmetros de corte na rugosidade.

A influência do avanço na rugosidade ficou evidenciada através dos gráficos, conforme figuras 6.18 e 6.19, que mostram o comportamento do avanço em função da velocidade de corte ( $f_z \times V_c$ ), e do avanço em função da profundidade de penetração ( $f_z \times a_p$ ), onde é nítida a relação direta e crescente entre avanço e rugosidade, ou seja, baixas rugosidades são obtidas com avanços pequenos e altas rugosidades com grandes avanços.

A constatação de que avanços maiores prejudicam o acabamento superficial da peça, estão alinhados com o próprio processo de usinagem por fresamento, pois grandes avanços se combinados com ferramentas de pequena área de contato, podem propiciar a geração de ondulações na superfície da peça, piorando a sua rugosidade

Sobre o comportamento da profundidade de penetração na piora da rugosidade, em função direta da adoção de profundidades de penetração maiores, relaciona-se aos altos esforços de corte passivos gerados durante o processo de fresamento, que se aplicados em máquinas ferramenta e ou peças de baixa rigidez, ou até mesmo, em peças de difícil fixação à mesa da máquina, provocaram vibrações prejudiciais a rugosidade da superfície usinada.

Fazendo uma analogia com o processo de torneamento duro, Gaurav (2012) cita a importância de usar componentes endurecidos em máquinas de alta rigidez, de potência suficiente para manter as velocidades de corte e avanço constantes para garantir um bom acabamento superficial.

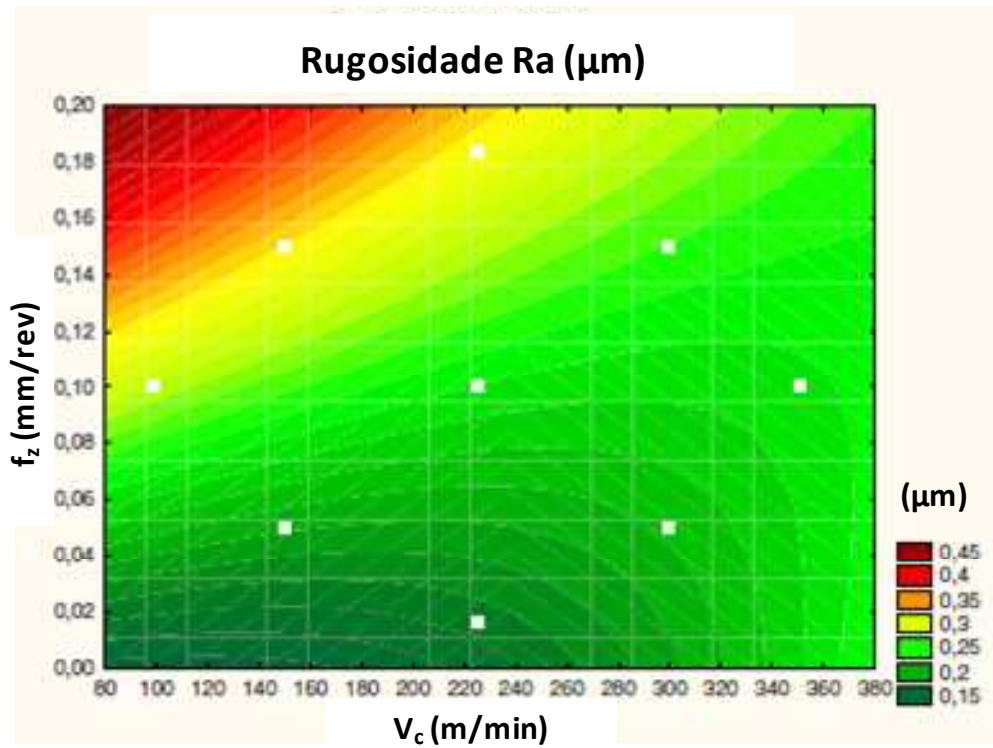


Figura 6.18: Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a rugosidade adotando  $a_p$  de 0,15 mm.

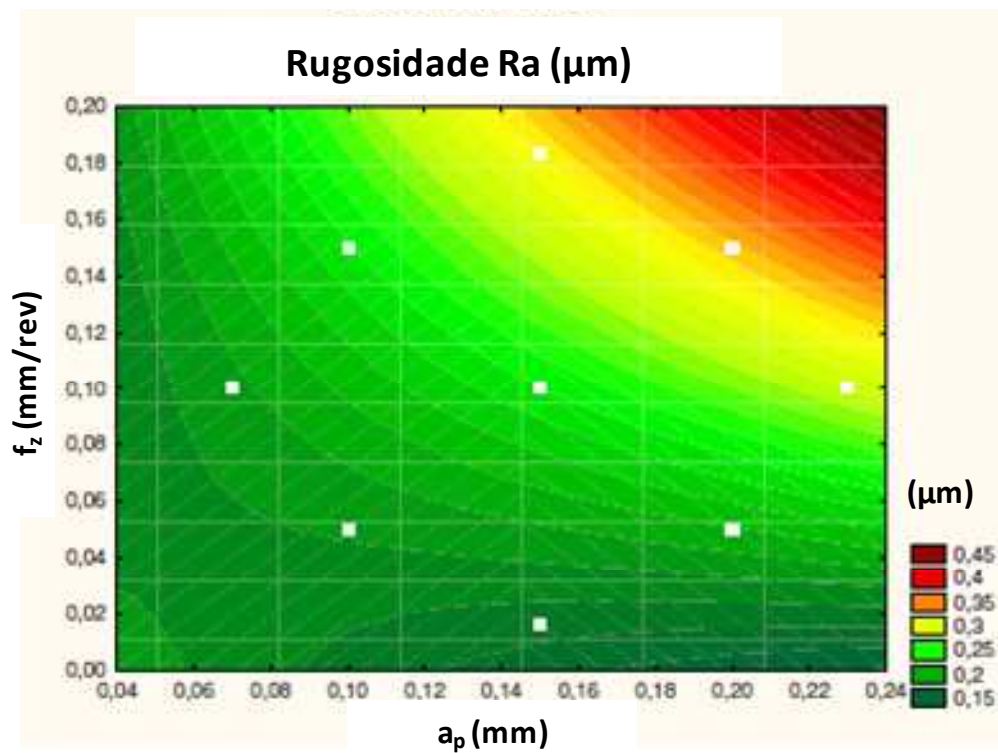
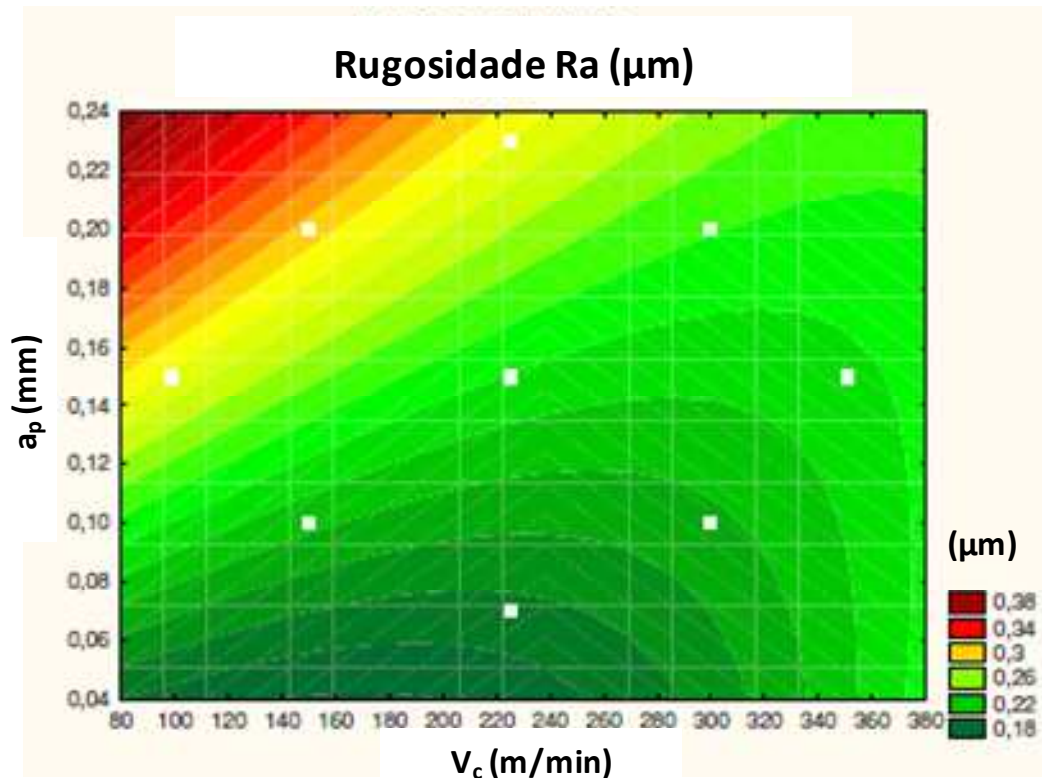


Figura 6.19: Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a rugosidade adotando  $V_c$  de 225 m/min.

Também através dos gráficos ( $f_z$  x  $V_c$ ) anteriormente mencionados, e do comportamento apresentado pelo gráfico da profundidade de penetração em função da velocidade de corte ( $a_p$  x  $V_c$ ), apresentado na figura 6.20, constata-se a pequena influência da velocidade de corte na qualidade do acabamento superficial, dentro da faixa de  $V_c$  estipulada no planejamento experimental deste trabalho .



**Figura 6.20:** Gráfico ( $a_p$  x  $V_c$ ) para a rugosidade adotando  $f_z$  de 0,1 mm/rev.

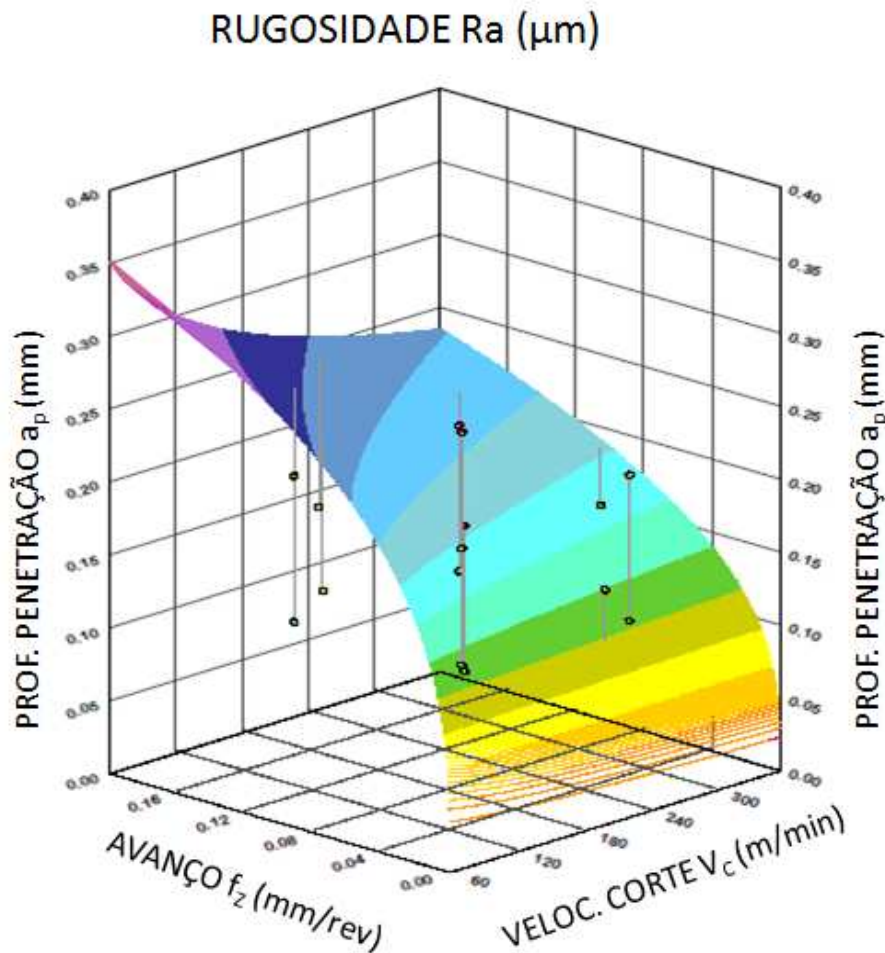
Baseado na literatura técnica de usinagem, que determina a rugosidade em função dos parâmetros de corte, e nos resultados dos ensaios que mostraram a interação simples de cada um dos três parâmetros de usinagem adotados com a rugosidade da superfície usinada, executou-se uma regressão não linear, mostrada em detalhes no anexo 4, através do software NLREG, segundo a equação:

$$Ra = k \cdot v_c^a \cdot f_z^b \cdot a_p^c \quad (6.1)$$

Como resultado da regressão não linear obteve-se a equação:

$$Ra = 3,48 \cdot v_c^{-0,228} \cdot f_z^{0,320} \cdot a_p^{0,373} \quad (6.2)$$

que apresenta um  $R^2$  de 69,44% ( $R^2_{aj} = 63,7\%$ ). A figura 6.21, mostra o gráfico da rugosidade em função dos três parâmetros de corte, extraído da equação acima proposta.



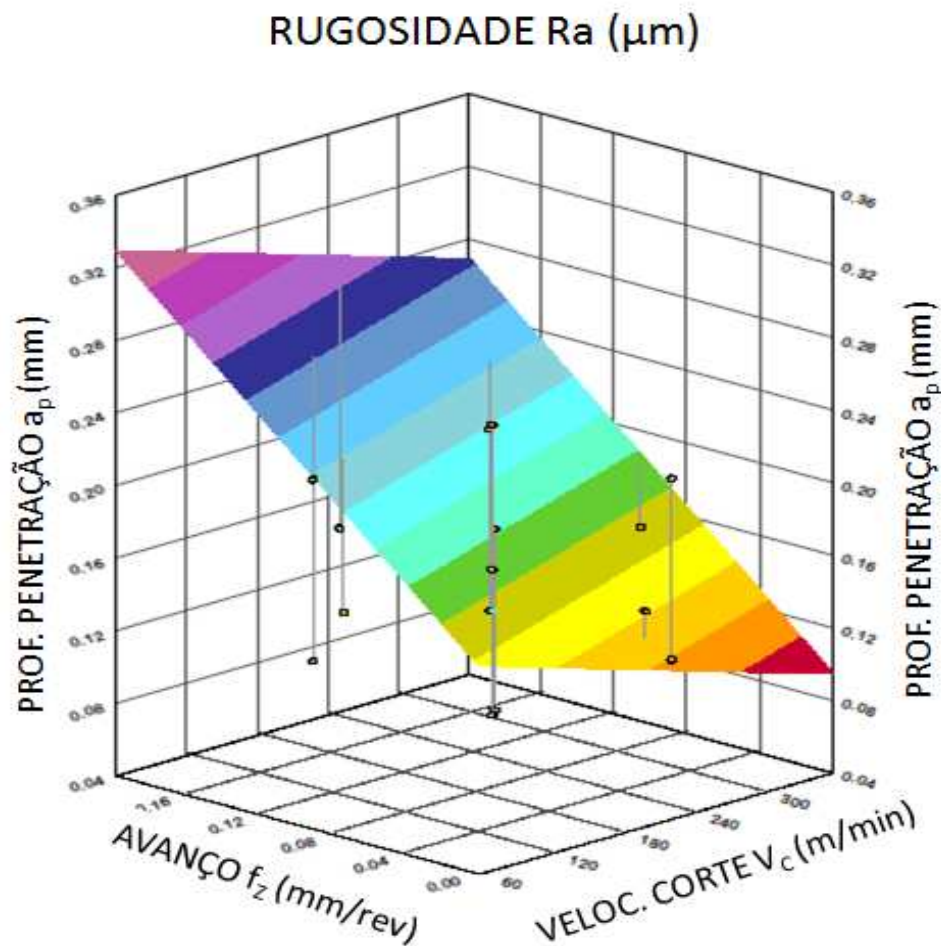
**Figura 6.21:** Gráfico do NLREG, relação não linear da rugosidade em função de  $a_p$ ,  $f_z$  e  $V_c$ .

Na busca de uma equação, mais precisa, tentou-se uma regressão linear da rugosidade em função dos parâmetros de corte, apoiando-se num trabalho desenvolvido por Batalha (2005), que visou estabelecer uma relação linear entre a rugosidade e os parâmetros de corte para operações de fresamento de topo, seguindo a expressão:

$$Ra = a \cdot v_c + b \cdot f_z + c \cdot a_p + k \quad (6.3)$$

Aplicada a regressão linear, através do mesmo software NLREG, constatou-se que a precisão desta equação foi um pouco menor do que a não linear, com  $R^2$  de 66,8% ( $R^2_{aj} = 60,1\%$ ). O gráfico, ilustrado conforme figura 6.22, apresenta como a rugosidade se comporta com relação aos três parâmetros de corte estudados.

$$Ra = -0,002 \cdot v_c + 0,872 \cdot f_z + 0,579 \cdot a_p + 0,1089 \quad (6.4)$$



**Figura 6.22:** Gráfico do NLREG, relação linear da rugosidade em função de  $a_p$ ,  $f_z$  e  $V_c$ .

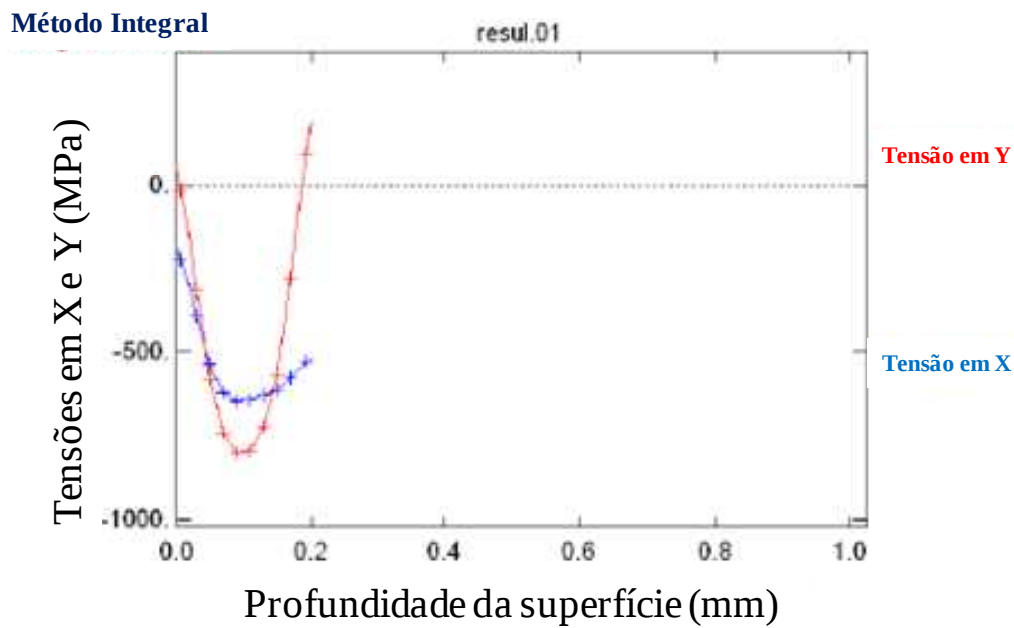
### 6.3 Tensão residual (**Tres**)

Os valores de tensão residual listados na tabela 6.7, representam o máximo valor obtido de tensão de compressão em cada corpo de prova ao longo das vinte medições efetuadas nos 0,4mm de furação realizada (intervalos de medição de 20 $\mu$ m), seja na direção do avanço (**X**), ou na direção perpendicular ao avanço (**Y**).

**Tabela 6.6:** Resultados obtidos para a tensão residual.

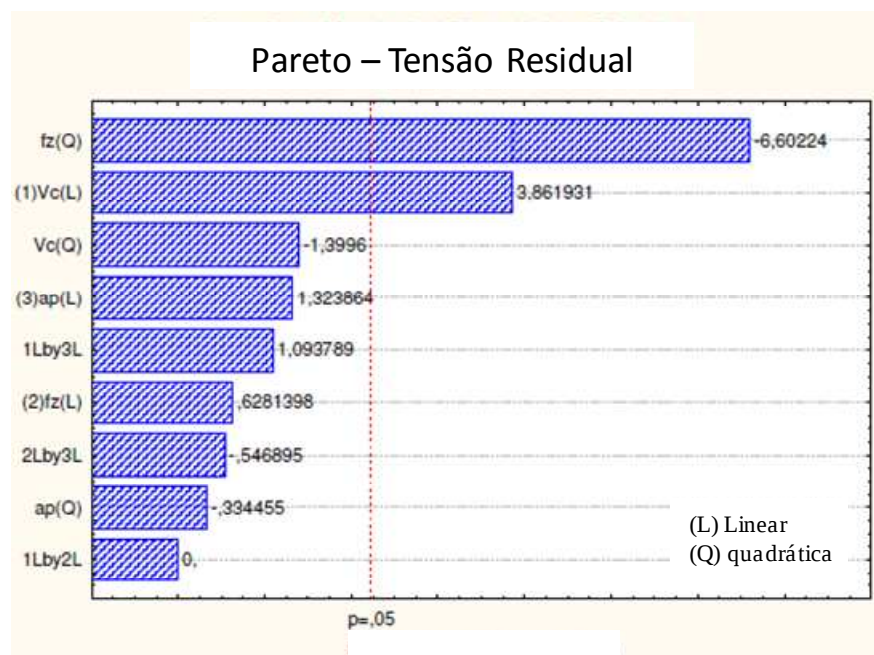
| PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO) |                     |                |                         |                 |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|-----------------|
| Exp.                                                                   | Velocidade de corte | Avanço         | Profundidade Penetração | Tensão Residual |
|                                                                        | $V_c$ (m/min)       | $f_z$ (mm/rev) | $a_p$ (mm)              | MPa             |
| 1                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,10                    | -800            |
| 2                                                                      | 150                 | 0,050          | 0,20                    | -800            |
| 3                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,10                    | -900            |
| 4                                                                      | 150                 | 0,150          | 0,20                    | -850            |
| 5                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,10                    | -800            |
| 6                                                                      | 300                 | 0,050          | 0,20                    | -1050           |
| 7                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,10                    | -950            |
| 8                                                                      | 300                 | 0,150          | 0,20                    | -1050           |
| 9                                                                      | 99                  | 0,100          | 0,15                    | -600            |
| 10                                                                     | 351                 | 0,100          | 0,15                    | -1400           |
| 11                                                                     | 225                 | 0,016          | 0,15                    | -500            |
| 12                                                                     | 225                 | 0,184          | 0,15                    | -500            |
| 13                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,07                    | -1000           |
| 14                                                                     | 225                 | 0,100          | 0,23                    | -1200           |
| 15©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | -1250           |
| 16©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | -1250           |
| 17©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | -1200           |
| 18©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | -1000           |
| 19©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | -1100           |
| 20©                                                                    | 225                 | 0,100          | 0,15                    | -1200           |

Os valores de tensão (**X**) e (**Y**), assumidos para cada ensaio, foram extraídos do gráfico de comportamento das tensões nos eixos **X** e **Y** em função da profundidade da superfície do furo cego realizado, conforme ilustra a figura 6.23, que representa o corpo de prova 01.



**Figura 6.23:** Gráfico das tensões residuais X e Y em função da profundidade da superfície do corpo de prova 01.

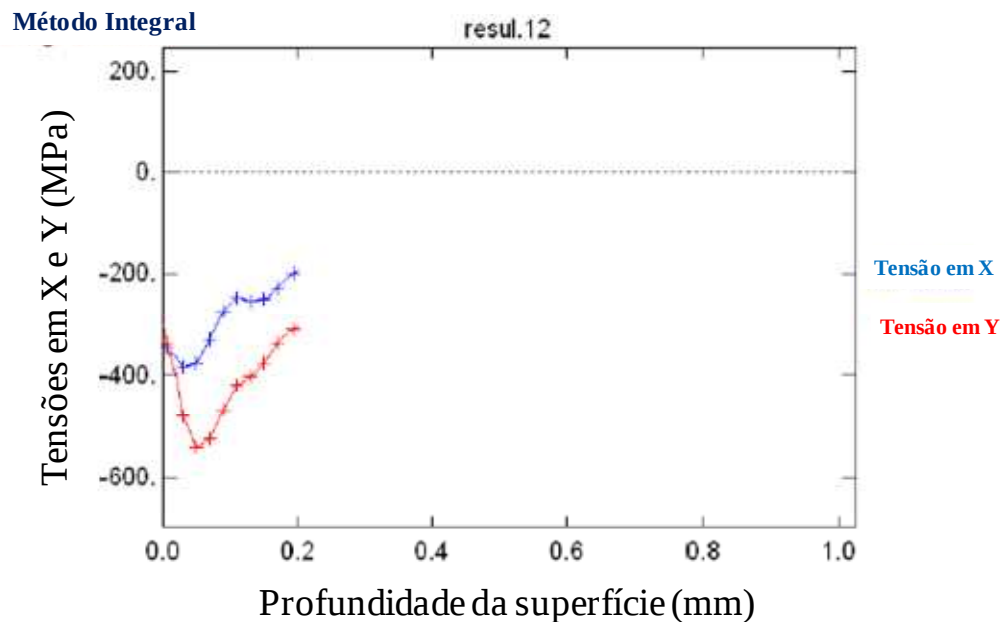
O software STATISTICA analisou os dados com um nível de confiança de 95%. No caso da tensão residual o  $R^2$  foi de 0,86 e o  $R^2_{aj}$  de 0,74, conforme ilustra a figura 6.24.



**Figura 6.24:** Pareto da influência dos parâmetros de corte na Tensão residual.

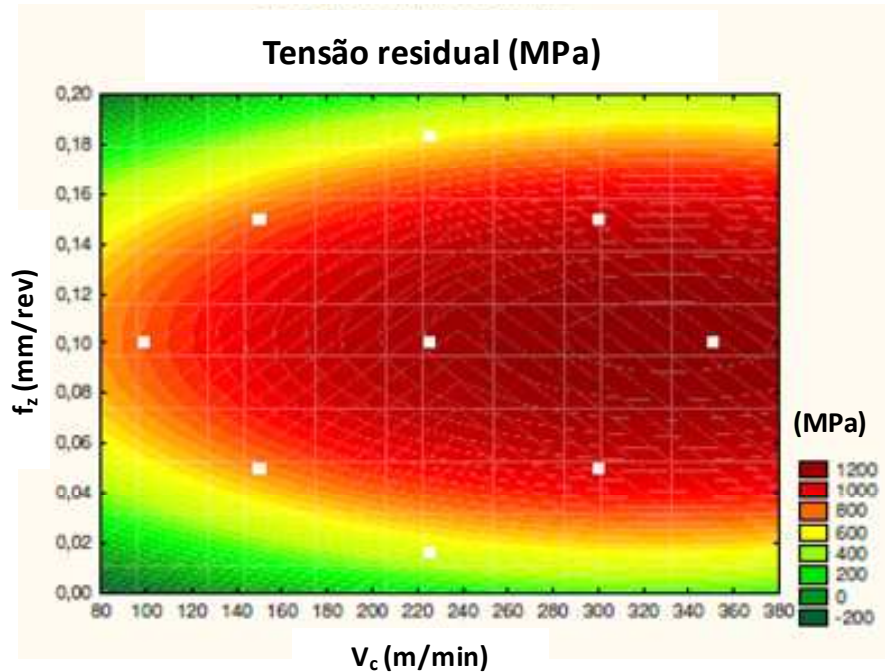
Os corpos de prova ensaiados apresentaram tensões compressivas localizadas na profundidade de 0,1 a 0,25 mm da superfície usinada. Os gráficos das tensões residuais versus a profundidade da superfície de todos os vinte corpos de prova ensaiados, encontram-se no anexo II.

As tensões de compressão encontradas variaram de 500 MPa até 1400 MPa. O corpo de prova doze, diferentemente dos demais, apresentou tensão compressiva já na superfície da peça, na ordem de 350 MPa, sendo que a máxima tensão compressiva de 500 MPa, foi obtida com  $60\mu\text{m}$ , conforme gráfico representado na figura 6.25. Se levado em consideração que o avanço foi o principal parâmetro que influenciou o resultado das tensões residuais e que neste corpo de prova, utilizou-se um avanço de 0,183 mm/rev, portanto o maior valor aplicado nos vinte experimentos, é possível entender porque ocorreram tais tensões compressivas já na superfície da peça, através do efeito mecânico de deformação plástica. Arunachalan, Mannan e Spowage (2004), obteve mesmo efeito quando analisou as tensões residuais superficiais geradas no corpo de prova de Inconel 718 usinado por insertos de CBN.



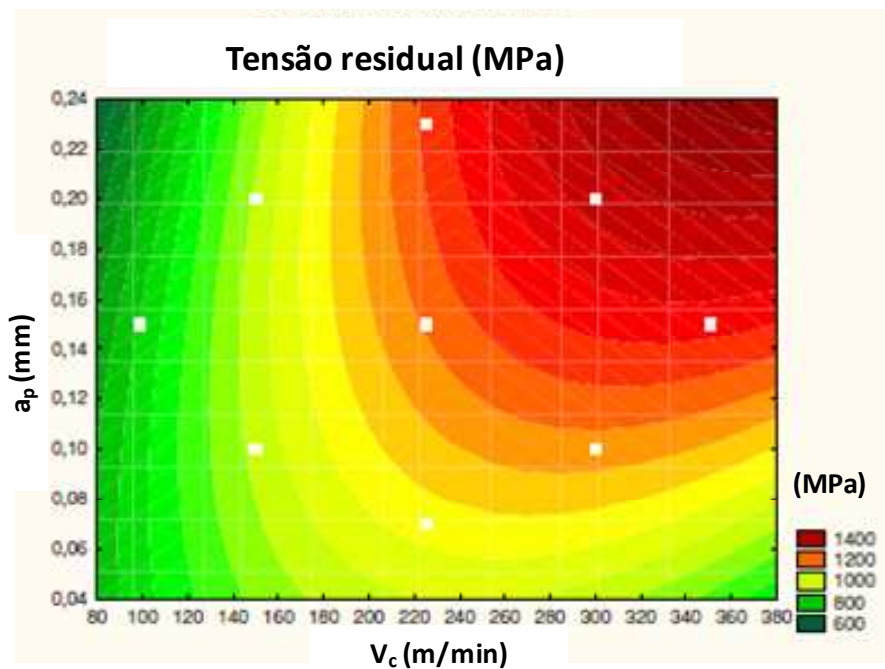
**Figura 6.25:** Gráfico das tensões residuais X e Y em função da profundidade da superfície do corpo de prova 12.

Através do gráfico, caracterizado pela figura 6.26, que mostra o comportamento da tensão residual em função do avanço e da velocidade de corte, verificou-se que a tensão residual máxima ocorreu com  $V_c$  acima de 300 m/min e  $f_z$  médio a alto.



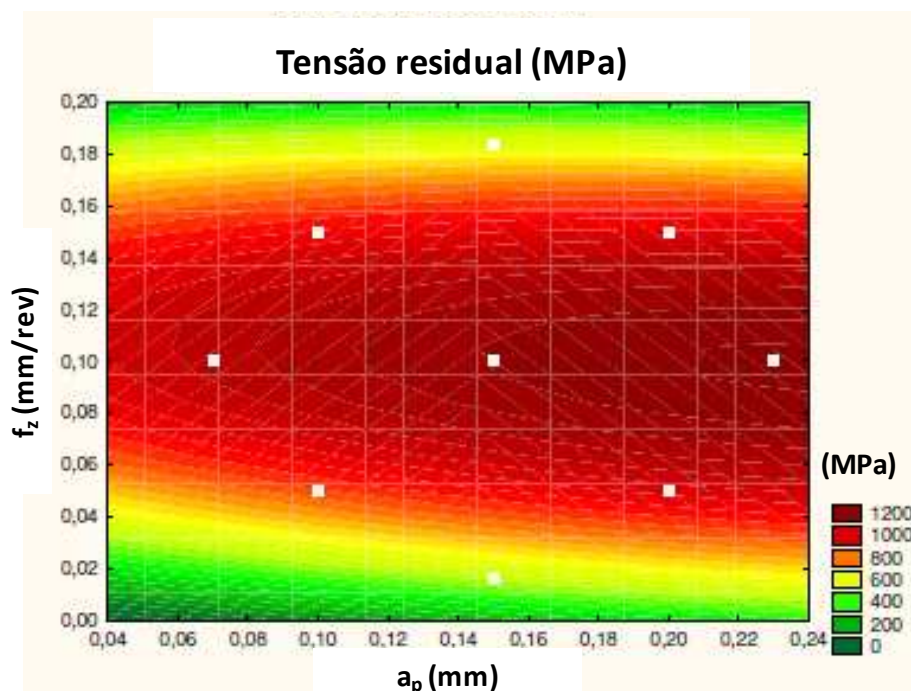
**Figura 6.26:** Gráfico ( $f_z \times V_c$ ) para a tensão residual adotando  $a_p$  de 0,15 mm.

O gráfico, ilustrado na figura 6.27, que mostra o comportamento da profundidade de penetração  $a_p$  relativa a velocidade de corte, comprova que a profundidade de penetração interagiu pouco com a tensão residual. A influência se tornou mais nítida a médias e altas profundidades quando combinadas com velocidades de corte  $V_c$  altas, que provocaram tensões residuais elevadas.



**Figura 6.27:** Gráfico ( $a_p \times V_c$ ) para a tensão residual adotando  $f_z$  de 0,10 mm/rev.

Na figura 6.28, que representa o comportamento do avanço em função da profundidade de corte, constatou-se como o avanço  $f_z$  interagiu com as tensões máximas de compressão obtidas nos vinte corpos de prova. Valores médios de avanço resultaram nas maiores tensões.



**Figura 6.28:** Gráfico ( $a_p \times f_z$ ) para a tensão residual adotando  $V_c$  de 225 m/min.

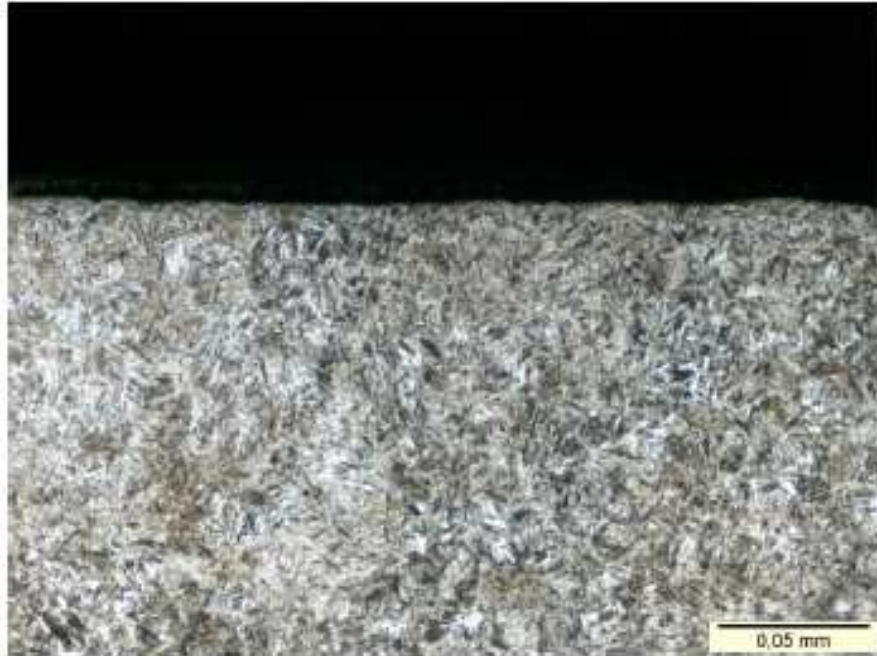
#### 6.4 Camada Branca

Os resultados das micrografias realizadas, contidas no anexo três, demonstraram que não houve formação de camada branca na superfície dos corpos de prova usinados conforme indica as figuras 6.29 e 6.30. A estrutura da superfície apresenta martensita revenida, característica do tratamento de tempera e revenimento aplicado.

Para diversos pesquisadores, a formação da camada branca está associada a um processo de re-têmpera, ocasionado por altas temperaturas de corte, provenientes do escoamento plástico do material, ou da própria utilização de insertos de corte bastante desgastados, gerando uma superfície de estrutura homogênea, estável termicamente, de dureza elevada e frágil.

Associando a ausência de camada branca para algumas aplicações do AISI 4140, como pistas de rolamento para guias roletadas, provavelmente obter-se-á um benefício ao

funcionamento do sistema, pois a fragilidade da camada branca pode acelerar o processo de propagação de microtrincas geradas pelo processo de fresamento.



**Figura 6.29:** Micrografia corpo de prova 04. Aumento de 500x com ataque de Nital 2%.



**Figura 6.30:** Micrografia corpo de prova 04. Aumento de 1000x com ataque de Nital 2%.

## 6.5 Otimização do desempenho operacional da peça e do processo de corte

Com os resultados obtidos, que revelaram uma boa interação das variáveis independentes com as variáveis dependentes, decidiu-se simular três situações combinando a busca por uma peça de excelente desempenho, ou seja, integridade superficial otimizada (valor mínimo de rugosidade e valor máximo de tensão residual compressiva), com a de um processo de usinagem que priorize esforços de corte menores (minimizando a potência consumida e as vibrações transmitidas para a fresadora), ou um tempo mínimo de usinagem, buscando um ganho de produtividade e provavelmente um custo menor.

As otimizações foram feitas pela função “Desirability” do software Statistica versão 10.0 (vide anexo 5), que produziu três superfícies de resposta em função de todas interações possíveis geradas pelos parâmetros de corte adotados, traduzidas por expressões matemáticas associadas ao esforço de corte resultante, rugosidade e tensão residual abaixo descritas:

$$R = 273,9 - 4,4v_c + 588,7f_z - 10123,6f_z^2 + 6014,3a_p - 16415,4a_p^2 + 9,3v_c.f_z - 2,4v_c.a_p + 6143f_z.a_p \quad (6.5)$$

$$Ra = 0,1 - 6,7 \times 10^{-5} v_c + 2 \times 10^{-6} v_c^2 + 0,5 f_z - 1,3 f_z^2 + 0,2 a_p + 0,6 a_p^2 - 5 \times 10^{-3} v_c.f_z - 3 \times 10^{-3} v_c.a_p + 8,1 f_z.a_p \quad (6.6)$$

$$T_{res} = 570,2 - 3,6v_c - 19925,6f_z + 89931,1f_z^2 - 455,6a_p + 5079a_p^2 - 13,3v_c.a_p + 10000f_z.a_p \quad (6.7)$$

### 6.5.1 Otimização 1

Para a primeira otimização, buscou-se parâmetros de corte ideais para obtenção da melhor condição de desempenho da peça, logo a menor rugosidade possível com a maior tensão residual compressiva, aumentando assim a vida útil do componente, e o menor nível de esforço de corte, representado pelo menor esforço resultante de corte **R**, que proporcionará uma menor potência consumida, diminuindo o desgaste da fresadora e o desgaste da ferramenta de corte.

Os dados de entrada no software STATISTICA para a função “Desirability” se resumiram em quantificar:

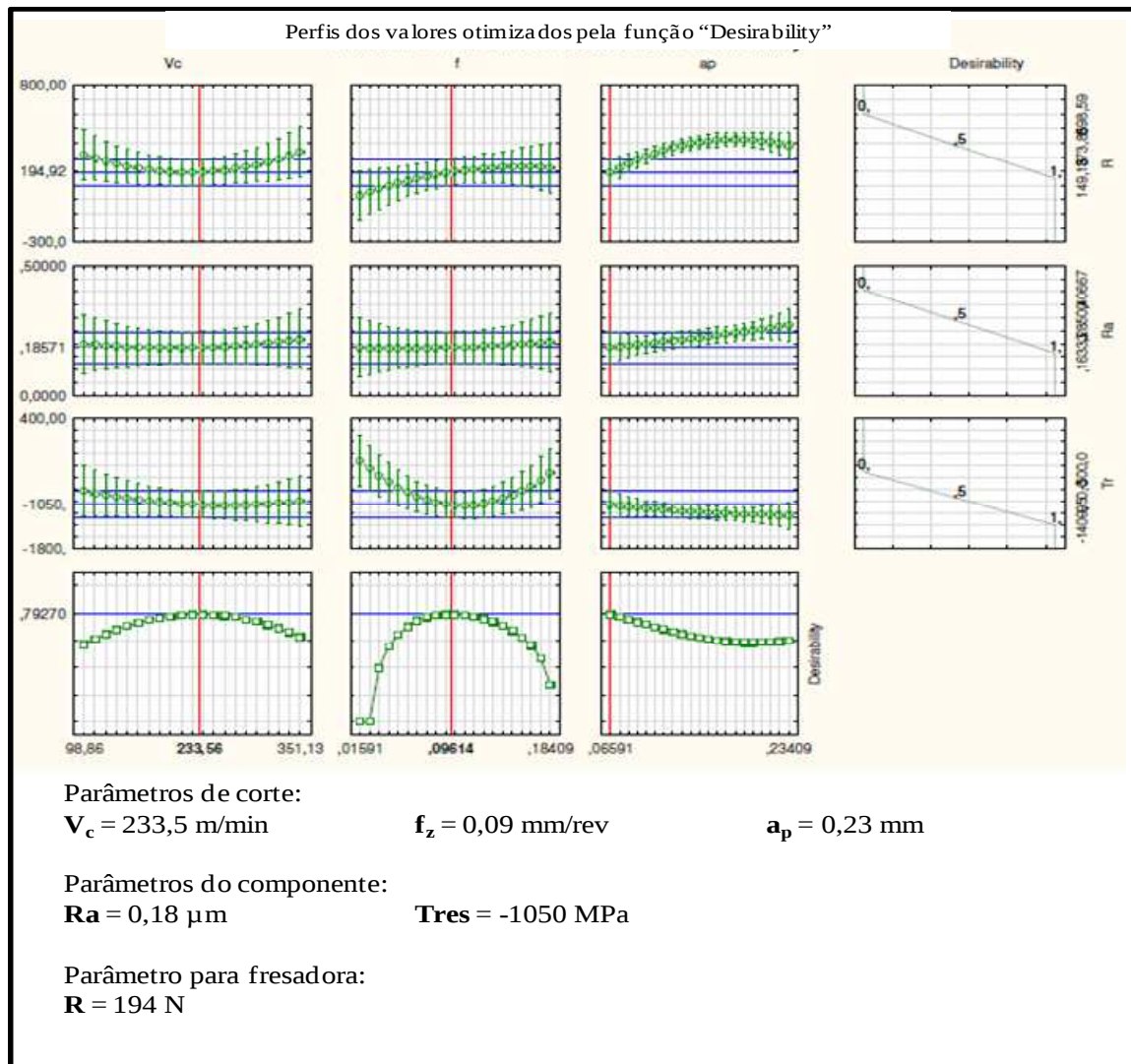
**R<sub>a</sub>** – mínima;

**T<sub>res</sub>** – compressiva máxima;

**R** – mínimo

No final da tabela 6.7, encontrar-se-ão os dados de entrada otimizados de **R<sub>a</sub>**, **T<sub>res</sub>** e **R**, assim como os parâmetros otimizados das variáveis independentes, no caso os parâmetros de corte **V<sub>c</sub>**, **f<sub>z</sub>** e **a<sub>p</sub>**.

**Tabela 6.7:** Otimização 1



### 6.5.2 Otimização 2

Na segunda otimização, buscou-se ainda a manutenção da melhor condição de desempenho da peça (menor rugosidade e maior tensão residual compressiva), maximizando a vida útil do componente, mas em contra-partida o menor tempo de usinagem, traduzido pela busca do maior esforço resultante de corte **R**, desprezando-se o desgaste da ferramenta de CBN e o aumento da potência consumida pela fresadora.

Os dados de entrada no software STATISTICA para a função “Desirability” se resumiram em quantificar:

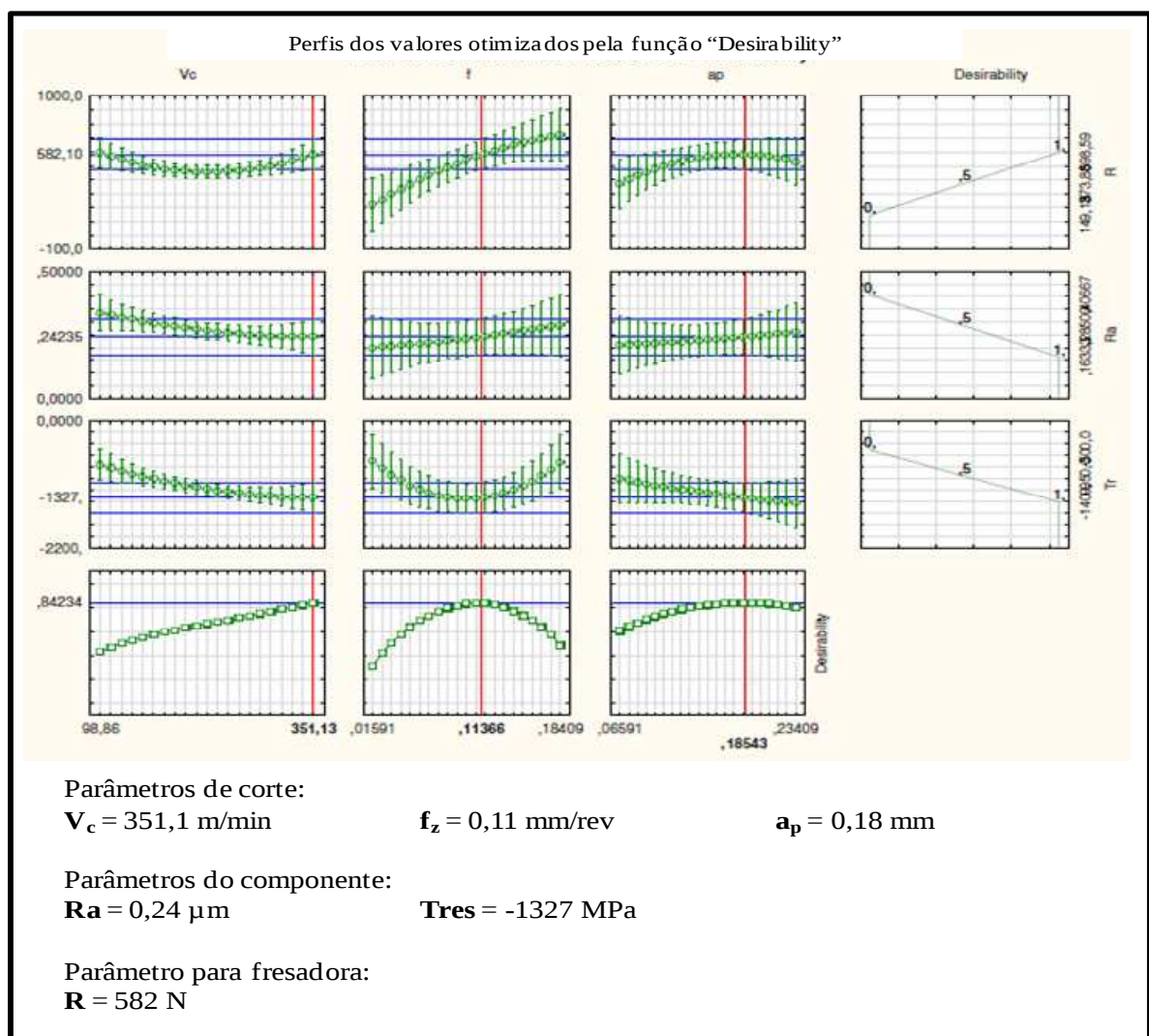
$R_a$  – mínima;

$T_{res}$  – compressiva máxima;

$R$  – máximo

No final da tabela 6.8, encontrar-se-ão os dados de entrada otimizados de  $R_a$ ,  $T_{res}$  e  $R$ , assim como os parâmetros otimizados das variáveis independentes, no caso os parâmetros de corte  $V_c$ ,  $f_z$  e  $a_p$ .

**Tabela 6.8:** Otimização 2



### 6.5.3 Otimização 3

Na terceira otimização, buscou-se o menor tempo possível de usinagem, fixando o máximo esforço resultante de corte  $R$ , com a condição limite de desempenho da peça, ou seja,

valores máximos aceitáveis para que a rugosidade e tensão residual, que não comprometam o bom funcionamento e conseqüente vida útil do componente.

Os dados de entrada no software STATISTICA para a função “Desirability” se resumiram em quantificar:

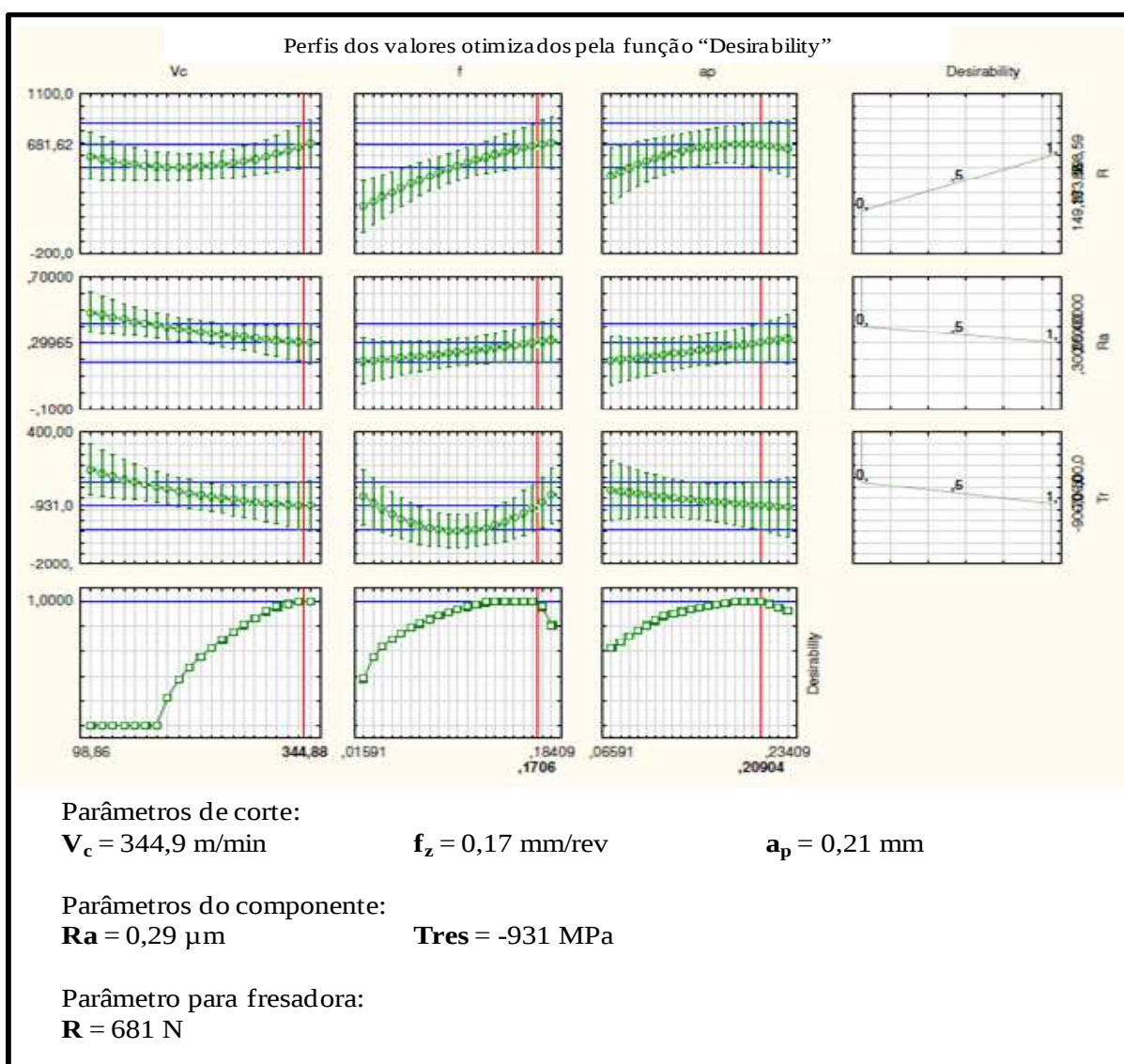
$R_a$  – máxima (para condição de trabalho);

$T_{res}$  – compressiva mínima (para não afetar a vida a fadiga);

$R$  – máximo

No final da tabela 6.9, encontrar-se-ão os dados de entrada otimizados de  $R_a$ ,  $T_{res}$  e  $R$ , assim como os parâmetros otimizados das variáveis independentes, no caso os parâmetros de corte  $V_c$ ,  $f_z$  e  $a_p$ .

Tabela 6.9: Otimização 3



## CONCLUSÕES

### 7.1 Conclusões sobre os esforços de corte

Em função dos diversos valores assumidos para os três parâmetros de corte adotados, constatou-se que houve interação de cada um deles com os esforços estudados, com maior relevância para o avanço por faca  $f_z$ , seguido da profundidade de penetração  $a_p$  e por fim a velocidade de corte  $V_c$ .

Os esforços tangenciais e radiais apresentaram valores muito próximos em todos os vinte experimentos realizados, com variação média de 2%, sendo que os esforços mais baixos foram encontrados com os menores valores de  $f_z$ ,  $a_p$  e  $V_c$ . De maneira oposta, o esforço mais elevado na faixa de 180 N, foi obtido com os valores máximo de avanço por faca de 0,184 mm/rev, profundidade de penetração 0,15 mm e velocidade de corte de 225 m/min, o que deixa clara a maior interação do avanço com os esforços tangenciais e radiais.

O esforço passivo, se mostrou quase tão sensível ao avanço por faca  $f_z$  como a profundidade de penetração  $a_p$ . Em média o esforço passivo foi o dobro dos esforços tangenciais e radiais. Os maiores esforços passivos ficaram na faixa de 500N e estão diretamente associados a elevados avanços e elevadas profundidades de penetração.

Através do software NLREG estabeleceu-se uma expressão matemática que relacionou a força passiva com o avanço por faca e a profundidade de penetração, com  $R^2$  de 62,6% ( $R^2_{aj} = 60,1\%$ ).

$$F_p = - 97,90 \cdot f_z^{-0,387} + 1052,24 \cdot a_p^{0,278} \quad (7.1)$$

O esforço resultante R apresentou as mesmas influências da força passiva, e variaram de 150 N até 550 N. De modo geral o esforço resultante sintetiza a influência dos três parâmetros de corte adotados onde o aumento da profundidade de corte, seguida do avanço por faca e da velocidade de corte resultaram em esforços de corte elevados.

## 7.2 Conclusões sobre a rugosidade

Os valores de rugosidade variaram de Ra 0,16 a 0,41  $\mu\text{m}$ .

A rugosidade interagiu com o avanço por faca e a profundidade de penetração, de tal maneira que grandes avanços combinados com grandes profundidades de penetração geraram um pior acabamento superficial.

Velocidades muito baixas prejudicaram o acabamento superficial.

A fresadora utilizada demonstrou ter rigidez estrutural suficiente para não influenciar os resultados da rugosidade dentro dos parâmetros de corte adotados.

Foi possível estabelecer uma expressão geométrica relacionando, avanço por faca  $f_z$ , profundidade de penetração  $a_p$  e velocidade de corte  $V_c$ , com a rugosidade através de uma regressão não linear.

$$R_a = 3,48 \cdot v_c^{-0,228} \cdot f_z^{0,320} \cdot a_p^{0,373}$$

Diante dos resultados obtidos pode-se afirmar que o fresamento de acabamento de aços endurecidos com ferramenta de CBN sem a presença de refrigerante, gera um acabamento superficial tão bom quanto aos encontrados pelo processo de retificação, com a vantagem de ser mais rápido e menos agressivo ao meio-ambiente pela eliminação do fluido refrigerante.

## 7.3 Conclusões sobre a tensão residual

Todos os corpos de prova usinados apresentaram tensão residual compressiva, numa profundidade de 0,1 a 0,25 mm da superfície.

As tensões sub-superficiais se mostraram compressivas variando de 500 MPa até 1400 MPa.

O avanço por faca  $f_z$  e a velocidade de corte  $V_c$  influenciaram a tensão residual. Em geral, avanços altos e velocidades de corte médias a altas resultaram em tensões residuais de maior intensidade.

Na superfície, medições executadas entre 0 e 20  $\mu\text{m}$ , apresentaram tensões residuais nulas ou minimamente compressivas. A única exceção se deu no corpo de prova doze, que em

função do elevado avanço de 0,183 mm/rev, já apresentou tensões superficiais compressivas da ordem de 350 MPa.

#### 7.4 Conclusões sobre a camada branca

Não se obteve formação de camada branca em nenhum dos vinte corpos de prova ensaiados. Tal fato pode estar relacionado a faixa de trabalho adotada para cada parâmetro de corte escolhido em combinação com o pequeno desgaste sofrido pelas pastilhas de CBN, que foram trocadas três vezes durante os ensaios, evitando assim a influência do desgaste da ferramenta, seja na geração de camada branca, seja na piora do acabamento superficial.

#### 7.5 Conclusões gerais

O material AISI4140 temperado e revenido com dureza de  $58 \pm 2\text{HRC}$  e profundidade de  $3 \pm 1\text{mm}$ , quando usinado com ferramenta de CBN, se mostrou bastante adequado em gerar superfícies de baixa rugosidade, através da correta otimização dos três parâmetros fundamentais de corte, com as seguintes vantagens;

- a) formação de tensões residuais superficiais compressivas;
- b) acabamento superficial compatível com processos de retificação, gerados com menores tempos de usinagem;
- c) eliminação de fluido refrigerante.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do trabalho realizado e das conclusões obtidas pode-se sugerir os seguintes temas para aprofundar a pesquisa iniciada:

- a) avaliar a influência do desgaste da ferramenta de CBN no fresamento do AISI4140, em função de parâmetros de corte pré-estabelecidos;
- b) avaliar a influência da presença de fluido refrigerante na qualidade do acabamento superficial e no mecanismo de geração de tensão residual;
- c) definir uma expressão matemática que represente a sensibilidade da tensão residual com os parâmetros de corte;
- d) comparar os tempos de usinagem e custos associados de um processo de retificação versus o de fresamento com insertos de CBN do aço endurecido AISI4140, para uma mesma faixa de rugosidade;
- e) estudar a influência da geometria da ferramenta de CBN na caracterização da integridade superficial do AISI4140 endurecido.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 4287, **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, 2002.

ABRAO, A. M.; ASPINWALL, D. K.; NG, E. Temperature evaluation when machining hardened hot work die steel PCBN tooling. **Industrial Diamond Review**, Londres, Reino Unido, v. 56, n. 569, p. 40-44, 1996.

AMORIM, H. **Processos de fabricação por usinagem, parte 7 – Materiais para ferramentas de corte**. Apostila - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

AOUICI, H.; YALLESE, M. A.; CHAOUI, K.; MABROUKI, T.; RIGAL, J., Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. **Journal of the International Measurement Confederation**, v.45, p.344 – 353, 2012.

ARUNACHALAN R. M.; MANNAN, M. A.; SPOWAGE, A. C. Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.44, 879 – 887, 2004.

BATALHA G. F.; ROSSI G. C.; KANENOBU A. A.. Relação entre os parâmetros de corte e a rugosidade da superfície usinada numa operação de fresamento de topo. **3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, v.3, p.1-10. Joinville, 2005.

BOSHEH, S. S.; MANTIVEGA, P. T. White layer formation in hard turning of H13 tool at high cutting speed using CBN tooling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.46 p.225 – 233, 2005.

BORDINASSI, E. C. **Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem**. Dissertação (Doutorado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Apostila da Universidade Estadual de Campinas, 2005.

CAMPOS, M. F.; MACHADO, R.; HIRSCH T. K. **Tensões residuais em aços avaliadas por difração de raios-X: Diferença entre micro e macro tensões residuais**. III Workshop sobre Textura. Escola Politécnica USP, CNPQ, IPT e IPEN, 2006.

**Fresamento, variáveis e parâmetros de corte**, Centro de Informação Metal Mecânica CIMM. Disponível em [www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br). Acesso em: 15 de junho de 2012.

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

DAMASCENO, D. **Análise das tensões residuais após torneamento e retificação do aço ABNT 52100 endurecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Campinas. Campinas, 1993.

DEONISIO, C. C. C. **Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campinas. Campinas, 2004.

DIN 6584, **Begriffe der Zerspantechnik; Kraefte, Energie, arbeit, Leistungen**, 1982.

DINIZ, A.; MATSUMOTO, H. Análise da vida das ferramentas no torneamento de aços endurecidos, **XV COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Águas de Lindóia, 1999.

DINIZ, A.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3 ed., São Paulo: Artliber Editora, 2001.

EL-KHABEERY, M M.; FATTOUH, M. Residual stress distribution caused by milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.29, p.391- 401, 1989.

FALLBOEHMER, P.; RODRIGUEZ, C. A.; OZEL, T.; ALTAN, T. High speed machining of cast iron and alloy steels for die mold manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v.98, p.104-115, 2000.

FIELD, M.; KAHLES, J. F. **Review of surface integrity of machined components**. Annals of the CIRP20 153-163, v.20, n.2, p.153-163, 1971.

FITZPATRICK, M. E.; LODINI, A. **Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**, London: Taylor&Francis, 2003.

GAURAV B.; CHOUDHURY S. K. State of the art in hard turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.53 p.1-14, 2012.

GRIFFITHS, B. J.; Tribological Advantages of White Layers Produced by Machining. **Journal of Tribology-transactions of The Asme**, vol.109, n.2, p.525-530, 1987.

GRIFFITHS, B. J.; **Manufacturing surface technology**. London: Penton, 2001.

GUNNBERG, F.; ESCURSELL, M.; JACOBSON, M. The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburized steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v.174, p.82-90, 2006.

JANG, D. Y.; LIOU, J. H.; WATKINS, T. R.; KOZACZEK, K. J.; HUBBARD, C. R. Characterization of s surface integrity in machined austenitic stainless steel. **Manufacturing Science and Engineering**, v.3, n.1, p.399-413, 1995.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Engineering and Technology**. 3 ed. New York: Addison-Wesley, 1995.

KO, J. H.; YUN, W-S; CHO, D-W; EHMAN, K. F. Development of a virtual machining system, part 1: approximation of the size effect for cutting force prediction. Pergamon. **Machine Tools and Manufacture**, v.42, p.1595-1605, 2002.

KÖNIG, W.; KOMANDURI, R.; TÖNSHOFF, H. K.; ACKERSHOTT, G. **Machining of hard materials**, Ann. CIRP33, v.2, p.417-427, 1984.

KOSHY P.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~58 HRC). **Journal of Materials Processing Technology**, v.127, p.266-273, 2002.

LAHIFF, C.; GORDON, S.; PHELAN, P. PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.23, p.638-644, 2007.

LAW, K. M. Y.; GEDDAM, A.; OSTAFIEV, V. A. A Process-design Approach to error Compensation in the End Milling of Pockets. **Journal of Materials Processing Technology**, v.89-90, p.238-244, 1999.

LIN, Z.-C.; CHEN, D.-Y., A study of cutting with a CBN tool. **Journal of Materials Processing Technology**, v.49, p.149-164, 1995.

LIU, X. W.; CHENG, K.; WEBB, D.; LUO, X. C. Prediction of Cutting Force Distribution and its Influence o Dimensional Accuracy in Peripheral Milling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** , v.42, p.791-800, 2002.

LU J. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**, Society for Experimental Mechanics, 1ed. Lilburn: Fairmont press, 1996.

MARTINS, C. O. D.; STROHAECKER, T. R.; ROCHA, A. S.; HIRSCH, T. K. Comparação entre técnicas de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100. **Revista Matéria**, v. 9, n.1, p.23-31, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, 3.ed. New York: John Wiley and Sons, 1991.

MONTGOMERY, D. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**, 3.ed. New York: John Wiley and Sons, 2003.

OKADA, M.; HOSOKAWA, A.; TANAKA, R.; UEDA, T. Cutting performance of PVD-coated carbide and CBN tools in hardmilling. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.51, p.127-132, 2011.

PEREIRA, J. C. C., **Determinação de modelos de vida de Ferramenta e Rugosidade no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando a metodologia de superfície de resposta (DOE)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica), Universidade Federal de Itajubá, MG, 2006.

PIRATELLI A. **Rugosidade Superficial**. Anais do 3º Seminário de Metrologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY, B.P.; JAWAHIR, I. S.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, E. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.43, p.139-144, 2003.

POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY, B.P.; JAWAHIR, I. S.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, E. Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels. **Elsevier, Wear**, v.256, p.302-310, 2004.

POULACHON, G.; ALBERT, A.; SCHLURAFF, M.; JAWAHIR, I. S. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning. . **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.45, p.211-218, 2005.

RIBEIRO, J. L.; ABRÃO, A. M.; SALES, W. F. **Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes**. 16º POSMEC Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

ROCHA, A. S.; NUNES, R. M.; HIRSCH, T. K. Comparação entre difração de raios X e “método do furo cego” para medição de tensões residuais em barras cilíndricas. **Revista Matéria**, v.14, n.3, p.965-976, 2009.

SAGLAM, H.; UNUVAR, A. Three component, strain gage based milling dynamometer design and manufacturing. **Journal of Integrated Design and Process Science**, v.5, n.2, 2001.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo eletrônico**. [www.sandvik.com](http://www.sandvik.com), 2012.

SMITH, S.; MELKOTE, S. N.; LARA-CURZIO, E.; WATKINS, T. R.; ALLARD, L.; RIESTER, L. Effect of surface integrity of hard turned AISI 52100 steel on fatigue performance. **Materials Science and Engineering**, v.459, p.337-346, 2007.

SCHROETER, R. B.; WEINGGAERTNER, W. L.; MACEDO, S. E. M., **Análise de forças no fresamento de topo reto**. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, v.427, p.130-139, 2001.

SOARES, M. C. B. V. **Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas**. Dissertação (Doutorado em Ciências na área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. São Paulo, 1998.

STOETERAU, R. L. **Processo de Fresamento**. Aula 08, UFSC, 2007.

TSCHAETSCH, H. **Taschenbuch spanende Formgebung: Verfahren und Werkzeuge Berechnung und Richtwerte**. Muenchen, Wien: Hanser, 1980.

TREVELIN, R. **Influência dos parâmetros do processo de fresamento sobre a integridade superficial e forças de corte do aço AISI H13 endurecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica), Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2011.

VISHAY Measurements Group – **Measurement of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method**. Tech Note TN 503-4, Raleigh, 1993.

ZHOU, J. M.; ANDERSON M.; STAHL, J. E. The monitoring of flank wear on the CBN tool in the hard turning process, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.22, p.697-702, 2003.

ZURECKI, Z.; GHOSH, R.; FREY, J. H. Investigation of white layers formed in conventional and cryogenic hard turning steels, **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, Washington, p.16-21, 2003.

## ANEXOS

Anexo 1 – Ensaio metalográfico do material utilizado nos corpos de prova

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                              |                       |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  <b>PROAQT</b> - Empreendimentos Tecnológicos Ltda.<br>Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010<br>Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br<br>Em Prol da Alta Qualidade e Tecnologia | CREA-SP nº 1137560<br>CRQ-IV nº 16915-F      |                       |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>RELATÓRIO DE ENSAIO</b><br>TESTING REPORT |                       |                                                                                     |
| INTERESSADO: <b>Prensas Schuler S/A.</b><br>Av. Fagundes de Oliveira, 1515 – Piraporinha – Diadema – SP.                                                                                                                                                                                                                      |                                              | Folha: 1 / 3<br>SHEET | LB. Nº 07284/12                                                                     |

### ENSAIOS QUÍMICO, FÍSICO E METALOGRAFICO

**1.0 Informações fornecidas pelo interessado para execução do ensaio:**

- Referência do Pedido do Cliente: e-mail 25/06/2012 (Amauri Delpino)
- Item: Amostra de Matéria Prima
- Material: SAE-4140
- Denominação: Análise Química, Física e Micrografia.

**1.1 Como recebido:**



Foto 1



**PROAQT** - Empreendimentos Tecnológicos Ltda.  
Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010  
Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br  
Em Prol da Alta Qualidade e Tecnologia

CREA-SP nº 1137560

CRQ-IV nº 16915-F



## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

Folha:  
SHEET

2 / 3

LB. Nº 07284/12

INTERESSADO: **Prensas Schuler S/A.**

CUSTOMER

Av. Fagundes de Oliveira, 1515 - Piraporinha - Diadema - SP.

### ENSAIOS QUÍMICO, FÍSICO E METALOGRAFICO

#### 2.0 Composição Química:

| Elementos em % |             |             |             |            |            |             |       |             |       |       |       |       |
|----------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Especificado   | C           | Mn          | Si          | P          | S          | Cr          | Ni    | Mo          | Al    | Cu    | Ti    | V     |
| SAE-4140       | 0,38 – 0,43 | 0,75 – 1,00 | 0,15 – 0,35 | MAX. 0,030 | MÁX. 0,040 | 0,80 – 1,00 | -     | 0,15 – 0,25 | -     | -     | -     | -     |
| Amostra        | C           | Mn          | Si          | P          | S          | Cr          | Ni    | Mo          | Al    | Cu    | Ti    | V     |
| 7284           | 0,413       | 0,842       | 0,241       | 0,013      | 0,012      | 0,904       | 0,045 | 0,181       | 0,030 | 0,063 | 0,002 | 0,004 |
| (S)            | 0,004       | 0,022       | 0,003       | 0,001      | 0,002      | 0,022       | 0,001 | 0,010       | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 |

- Ensaio realizado numa temperatura ambiente, através do aparelho Espectrômetro de emissão Ótica Marca ARL Modelo 3460 com certificado de calibração No. 2011-0823, utilizando-se da instrução Proaqt Nº LB 10257 – Revisão 1 conforme norma ASTM E-415-2008 ou ASTM E 1086-1994(2005).
- A incerteza dos resultados é igual ao valor do desvio padrão (S) de cada amostra multiplicado pelo constante 1,359; isto é,  $(I = \pm 1,359.S)$ . A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência  $k=2,4$  fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

#### 3.0 Ensaio de Tração:

| CP | Dimensões | Seção do CP        | Limite Resistência Tração |                      | Limite de Escoamento |                      | Alongamento |       | Redução de Área |
|----|-----------|--------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------|-----------------|
|    | {mm}      | {mm <sup>2</sup> } | {Carga Kgf}               | {N/mm <sup>2</sup> } | {Carga Kgf}          | {N/mm <sup>2</sup> } | {Lo mm}     | { % } | { % }           |
| 1  | Ø 12,48   | 122,33             | 9.978                     | 800                  | 6520                 | 523                  | 50          | 19    | 41              |

- Preparação do Corpo de Prova: Conforme ASTM A-370/12
- Método de Ensaio: Conforme ASTM A-370/12
- Ensaio realizado à temperatura ambiente de 24°C, na Máquina Universal de Ensaio Tinius Olsen MTR-006, certificado de calibração Nº DNTT-0548c/11, incerteza máxima expandida com fator de abrangência  $K=2$ .

#### 4.0 Ensaio de Impacto:

| Amostra | Localização do Entalhe | Resultado Obtido em JOULE |       |       |       |
|---------|------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
|         |                        | CP 01                     | CP 02 | CP 03 | Média |
| 7284    | Metal Base             | 9                         | 18    | 9     | 12    |

- Temperatura de Ensaio: 23°C
- Dimensões: 10,0 x 10,0 x 55 mm
- Tipo de Entalhe: U-NOTCH
- Preparação do Corpo de Prova: Conforme Norma ASTM E 23/07ae1 – Tipo C.
- Método de Ensaio: Conforme Norma ASTM E 23/07ae1
- Ensaio realizado no laboratório a temperatura ambiente de 23°C, através da Máquina de Ensaio de Impacto na marca "Tinius Olsen" MQI 004, Certificado 112763-101 em 11/10/2011.
- Incerteza de medição =  $\pm 0,2J$ .



**PROAQT** - Empreendimentos Tecnológicos Ltda.  
 Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010  
 Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br  
 Em Proi da Alta Qualidade e Tecnologia

CREA-SP n° 1137560



CRQ-IV n° 16915-F

## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

Folha:  
SHEET

3 / 3

LB. N° 07284/12

INTERESSADO: **Prensas Schuler S/A.**

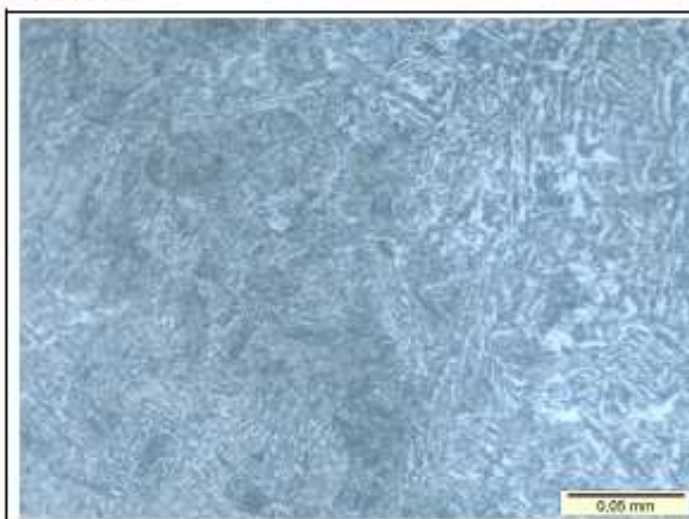
CUSTOMER

Av. Fagundes de Oliveira, 1515 - Piraporinha - Diadema - SP.

### ENSAIOS QUÍMICO, FÍSICO E METALOGRAFICO

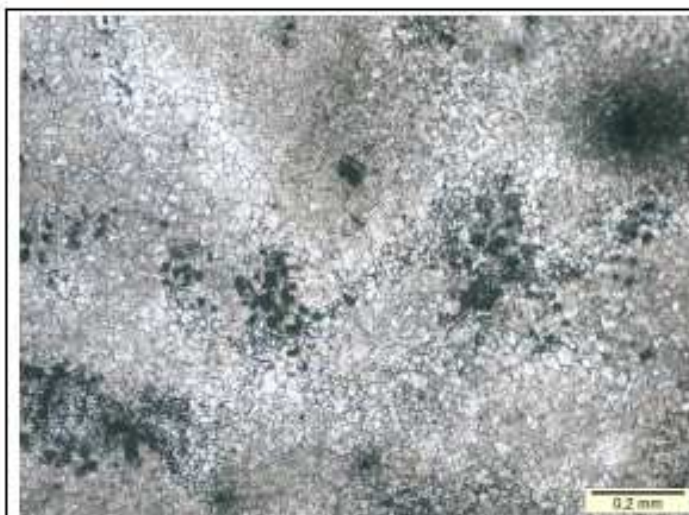
#### 5.0 Micrografia:

##### 5.1 Micro-Estrutura.



Microestrutura: Consiste de ferrita acicular, bainita e martensita revenida.  
 Ataque: Nital 2%  
 Aumento: 500x  
 Preparação do CP: Conforme ASTM E-3/2011  
 Seção: Longitudinal  
 Ensaios de acordo com ASTM E-7/09  
 Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51, certificado 100607003 de 08/07/2011.

##### 5.2 Tamanho de Grão.



Microestrutura: Matriz consiste de tamanho de grão austenítico nos. 7 a 8.  
 Ataque: HCl + H<sub>2</sub>O  
 Aumento: 100x  
 Preparação do CP: Conforme ASTM E-3/2011  
 Seção: Longitudinal  
 Ensaios de acordo com ASTM E-112/2010  
 Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51, certificado 100607003 de 08/07/2011.

#### 6.0 Observações:

6.1 Os resultados obtidos e apresentados no presente relatório tem significação restrita e se aplicam somente às amostras ensaiadas. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser feita mediante prévia autorização da Proaqt.

Ensaio realizado em 29 de Junho de 2012

&

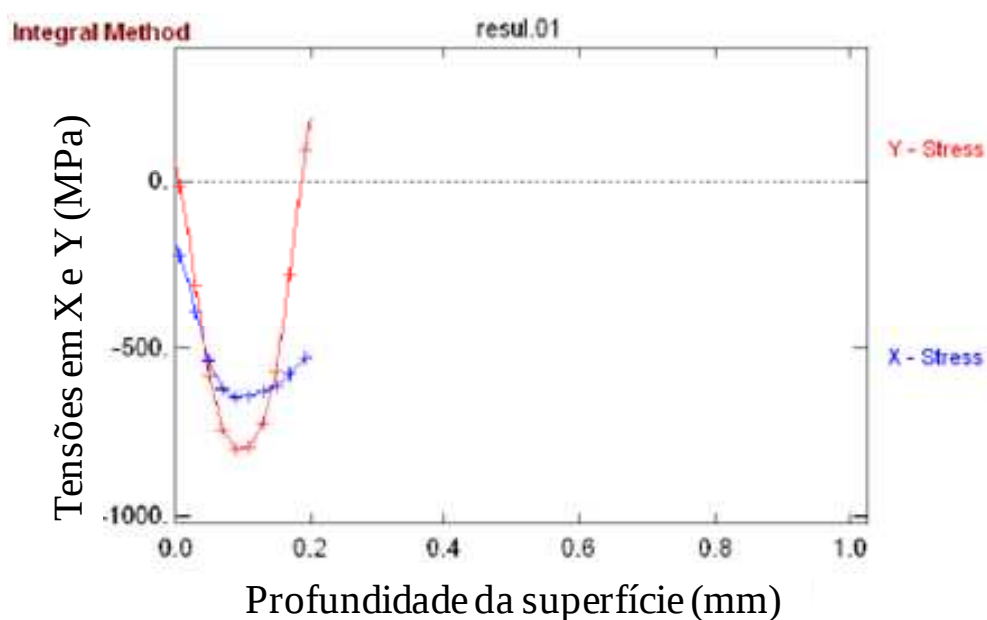
Emissão de relatório em 02 de Julho de 2012

Eng. Luiz S. M. Mikami  
 CREA n° 104.252

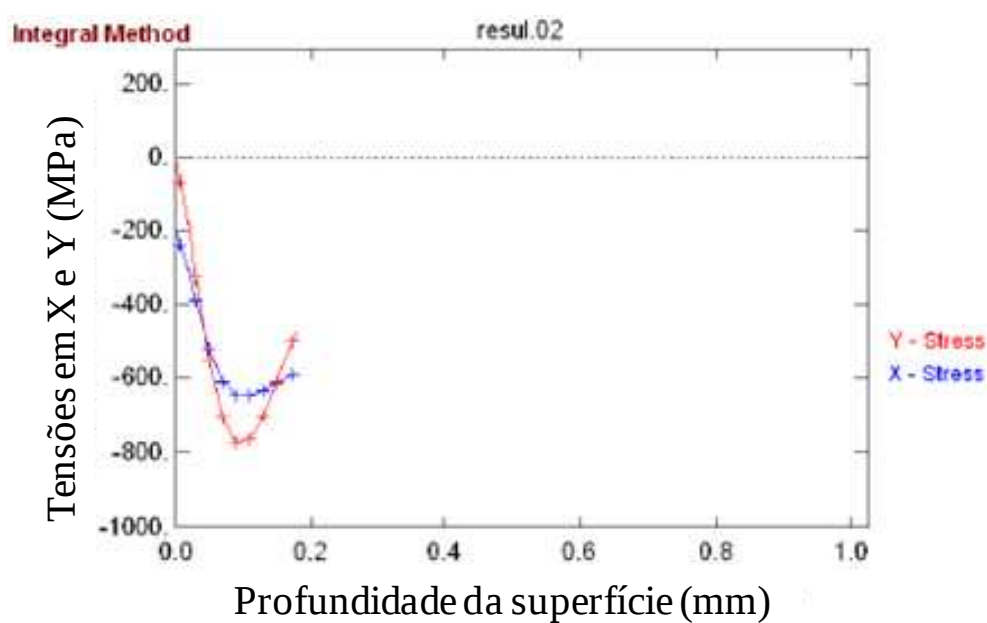
Selo  
 Setor de Metalografia  
**PROAQT**  
 Sérgio Calisto Gomes  
 Técnico Metalográfico

## Anexo 2 – Tensões residuais dos corpos de prova

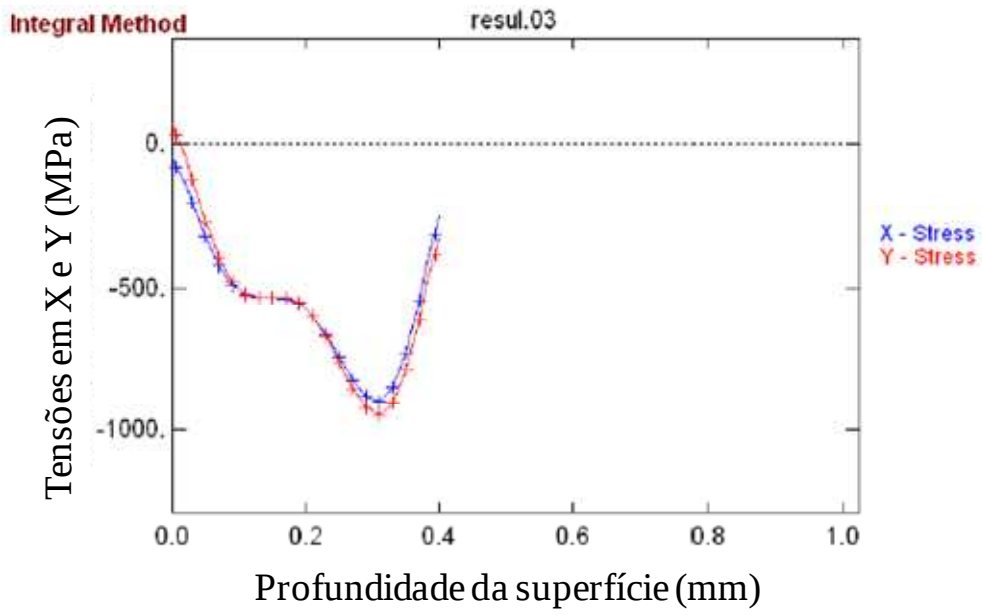
Corpo de prova 01



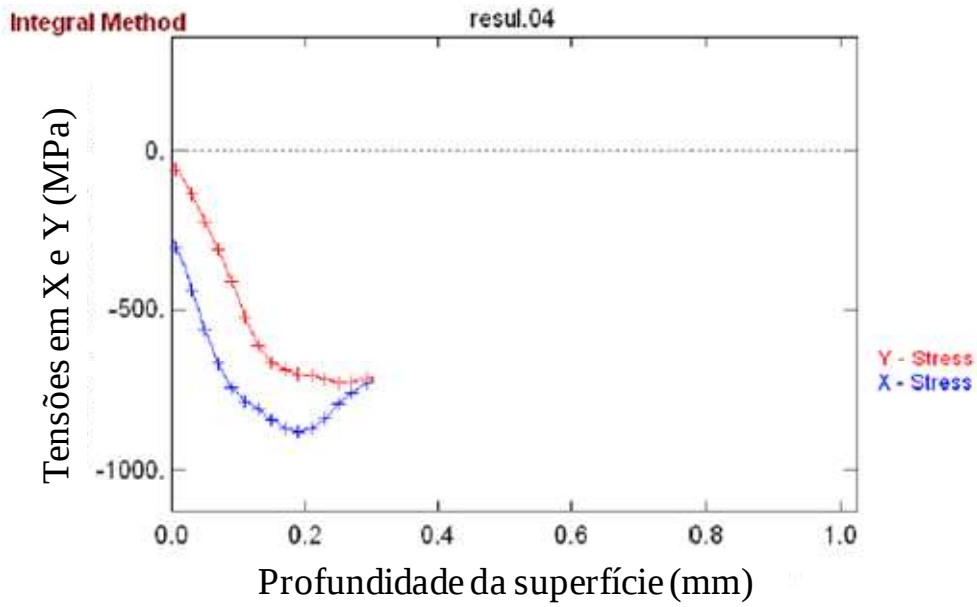
Corpo de prova 02



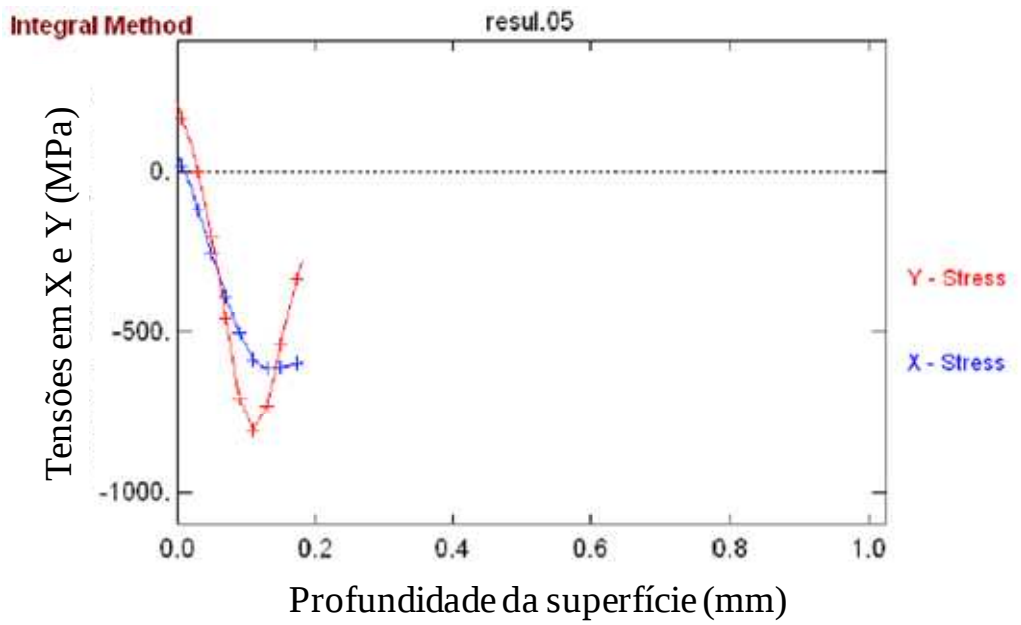
Corpo de prova 03



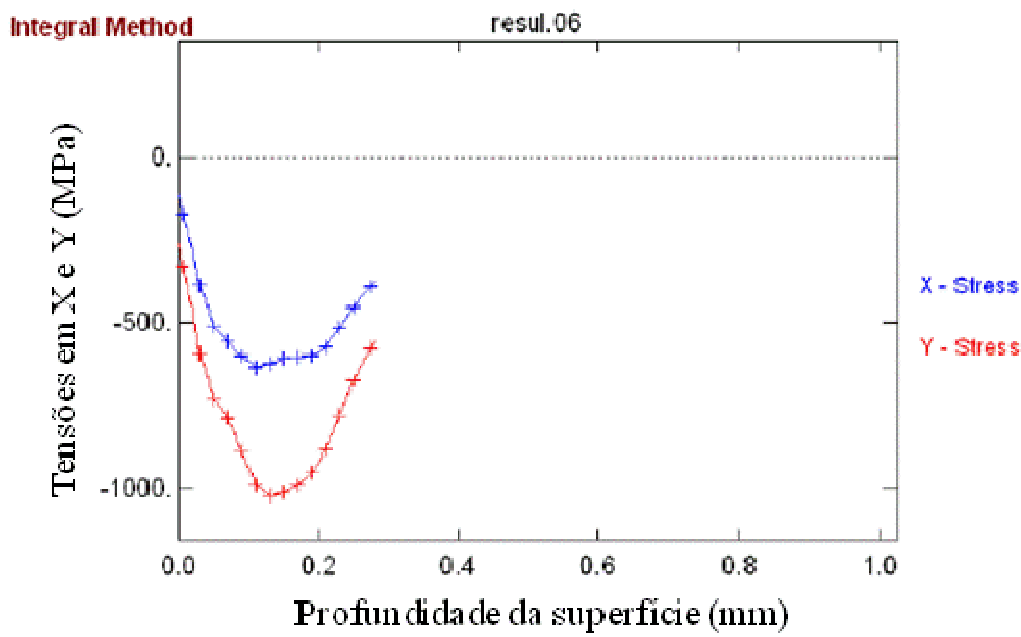
Corpo de prova 04



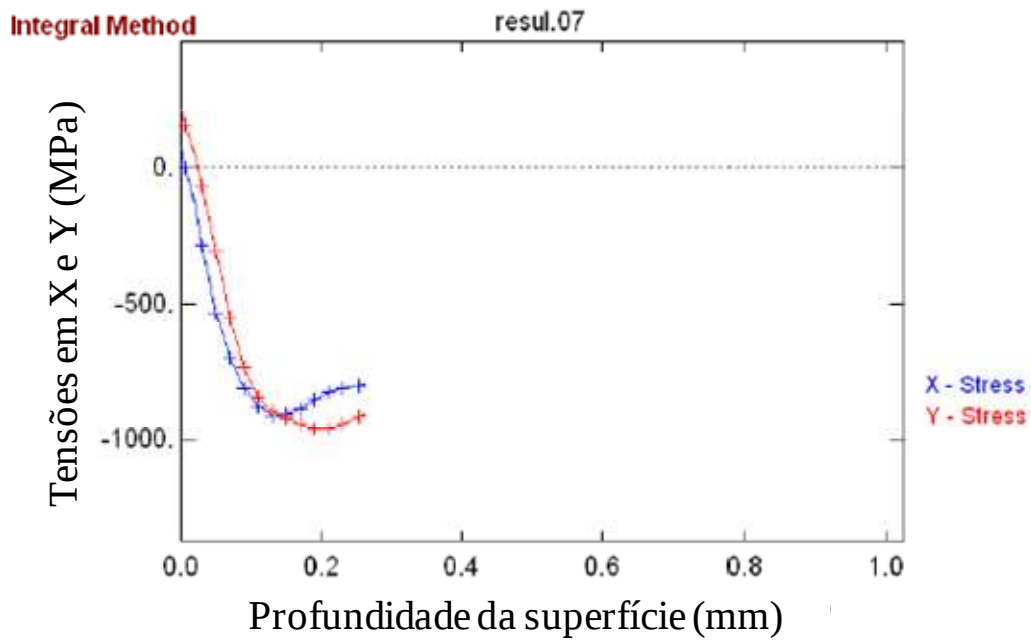
Corpo de prova 05



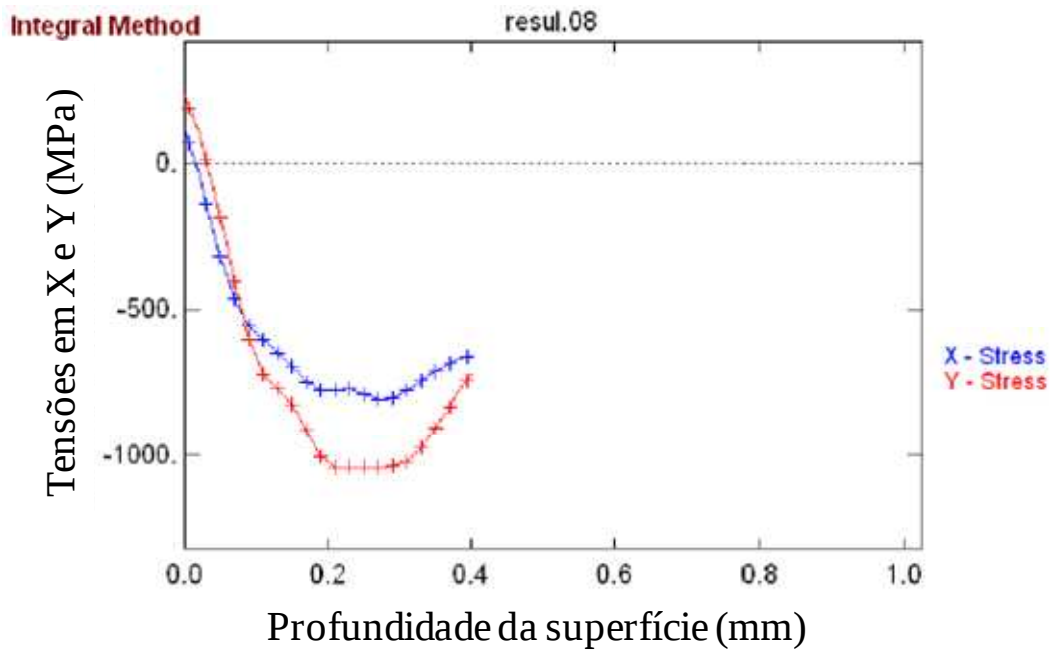
Corpo de prova 06



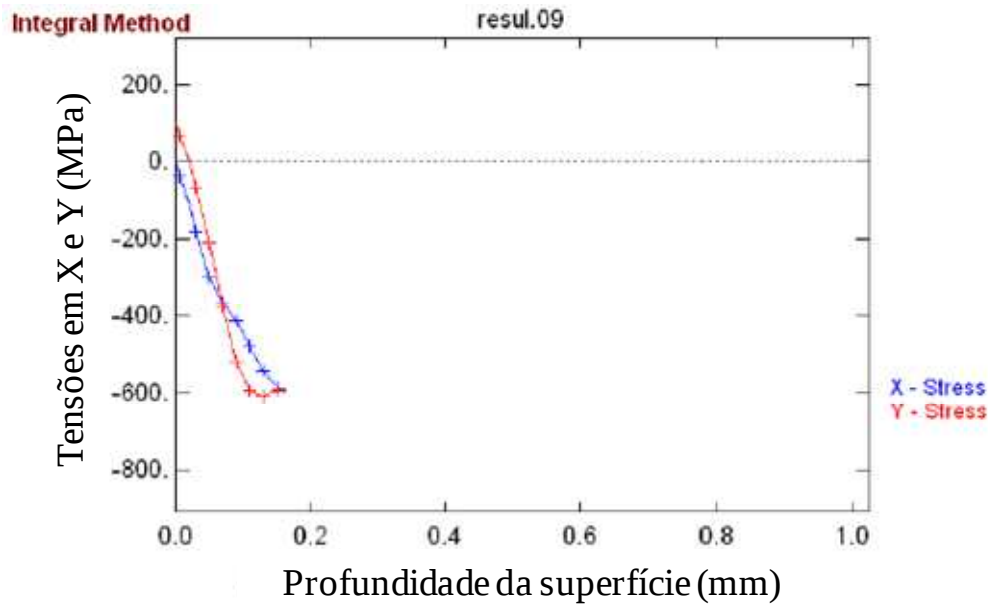
Corpo de prova 07



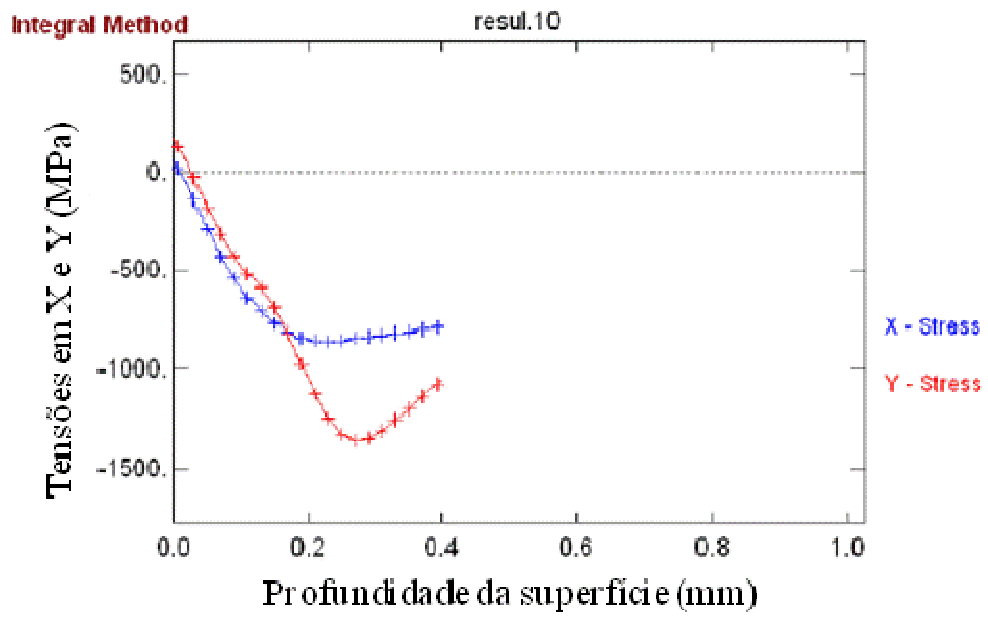
Corpo de prova 08



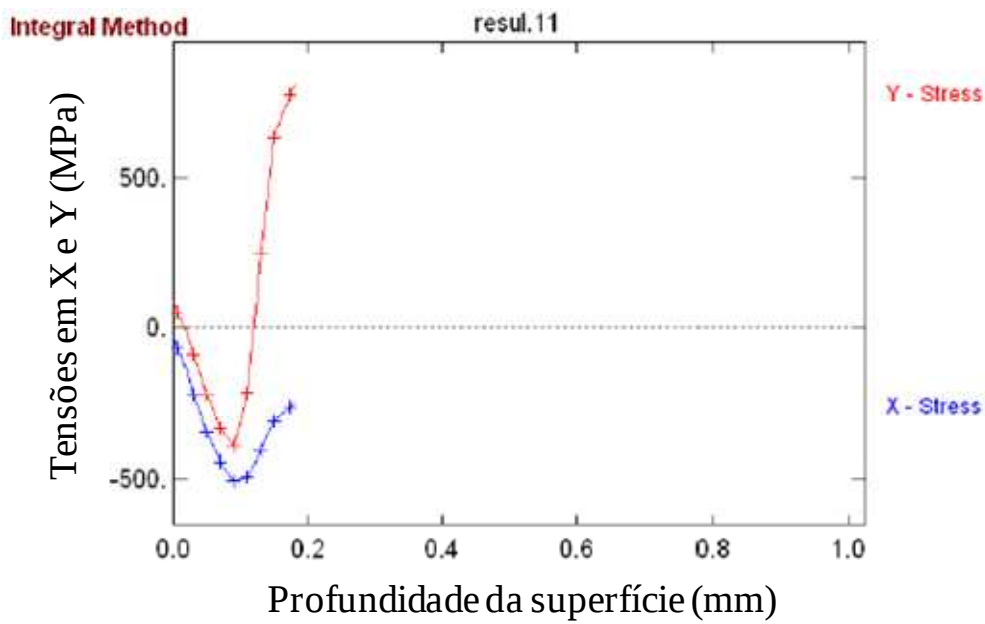
Corpo de prova 09



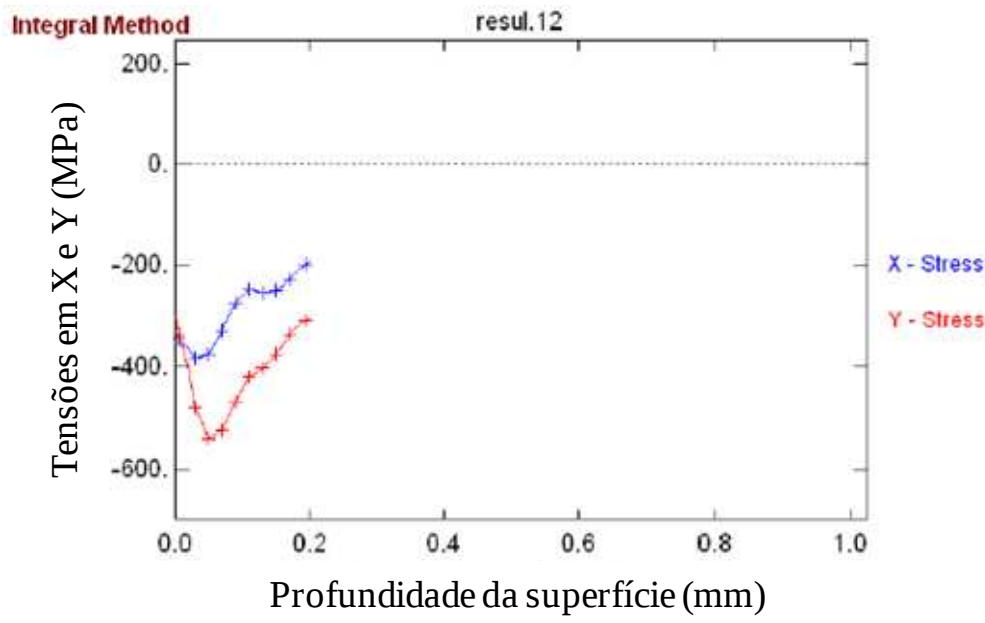
Corpo de prova 10



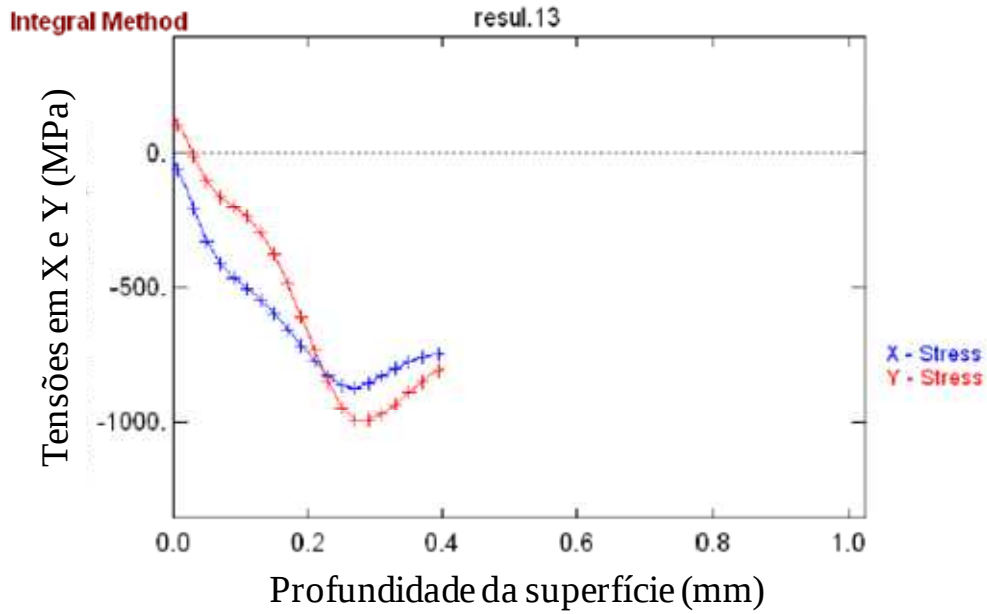
Corpo de prova 11



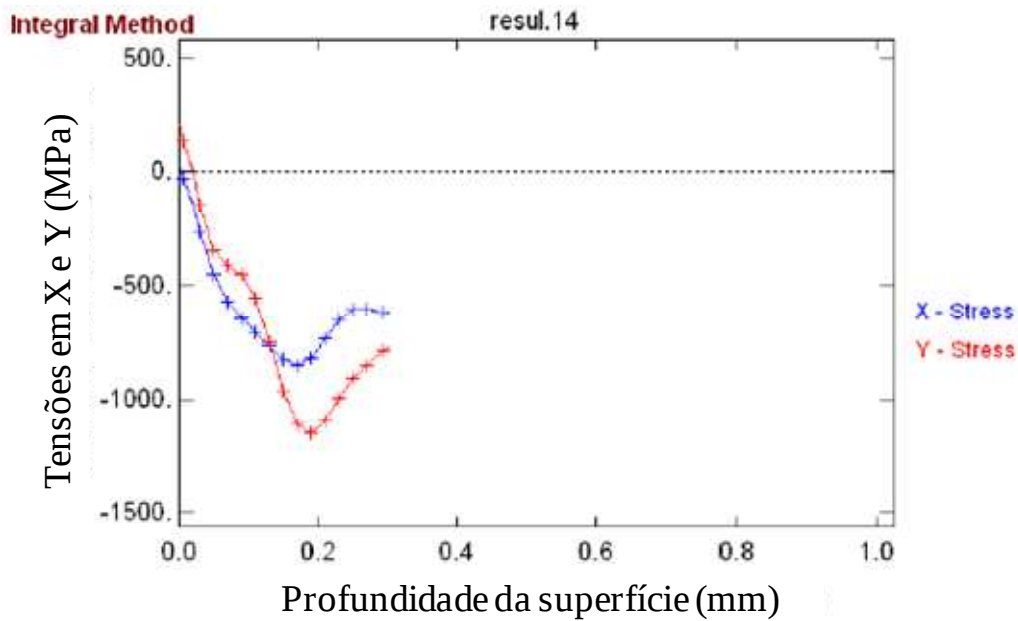
Corpo de prova 12



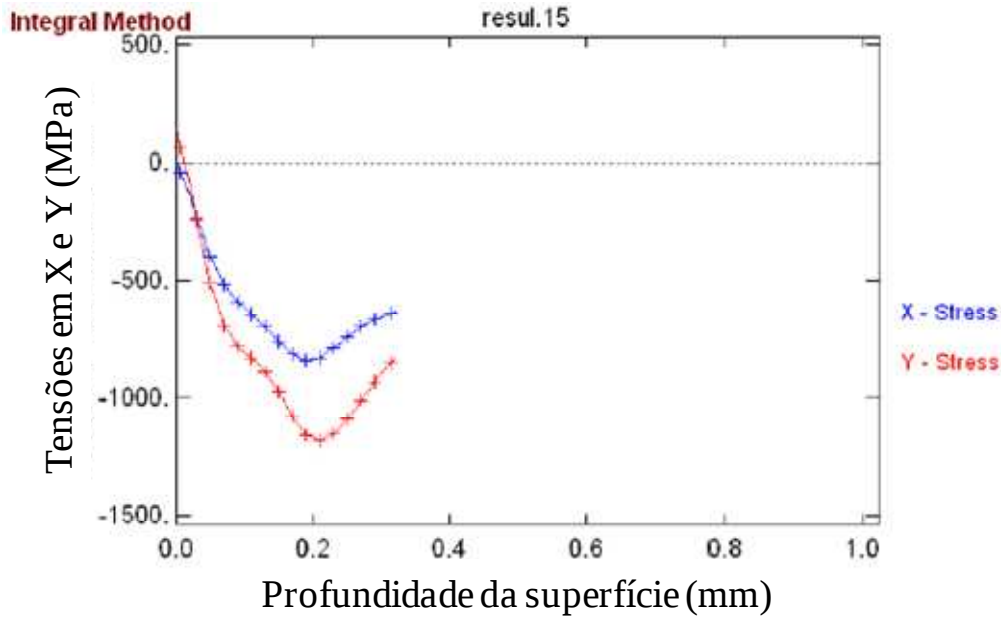
Corpo de prova 13



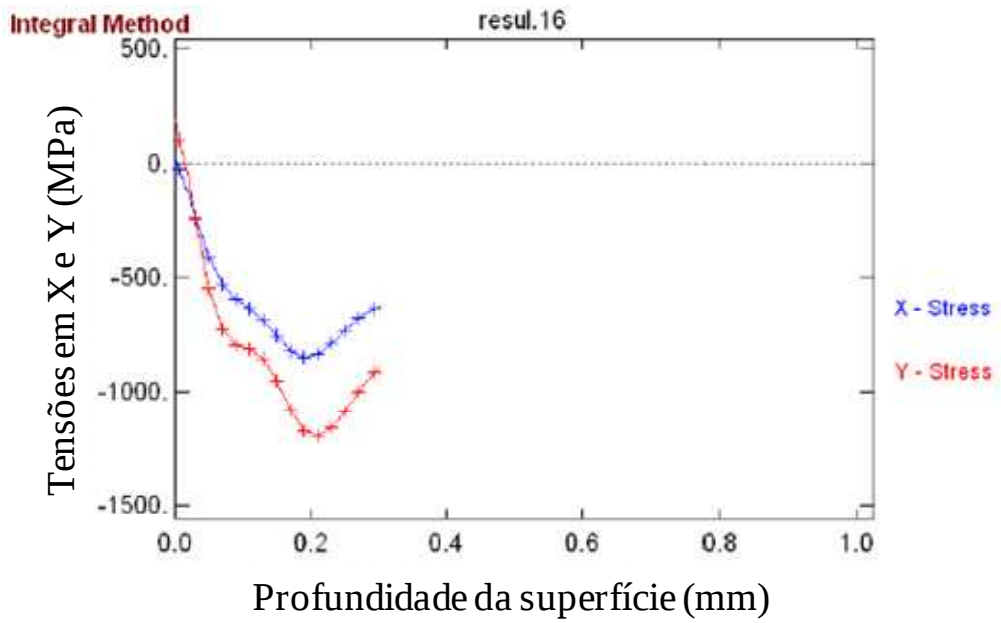
Corpo de prova 14



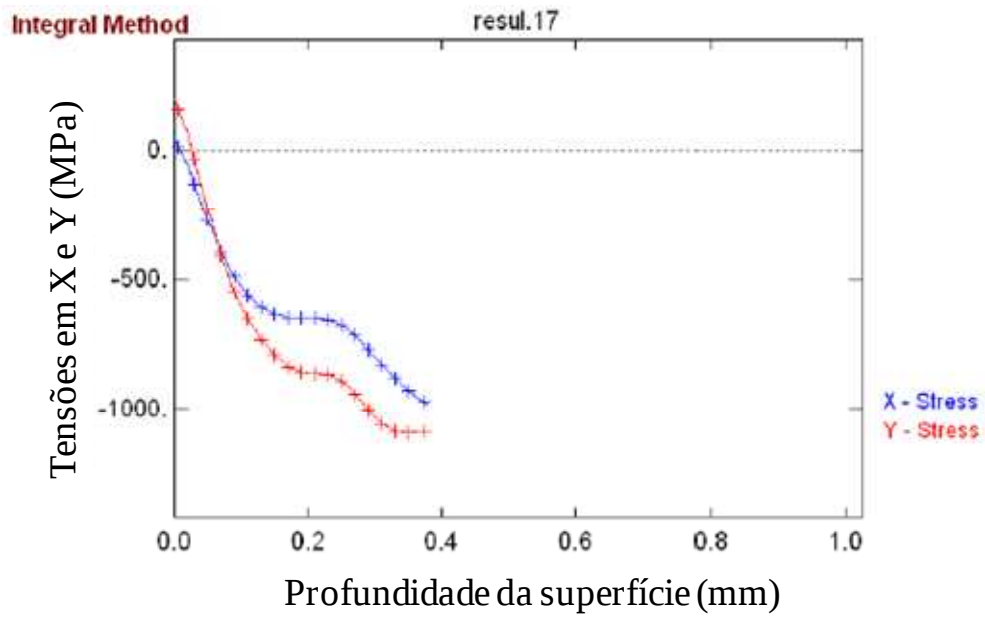
Corpo de prova 15



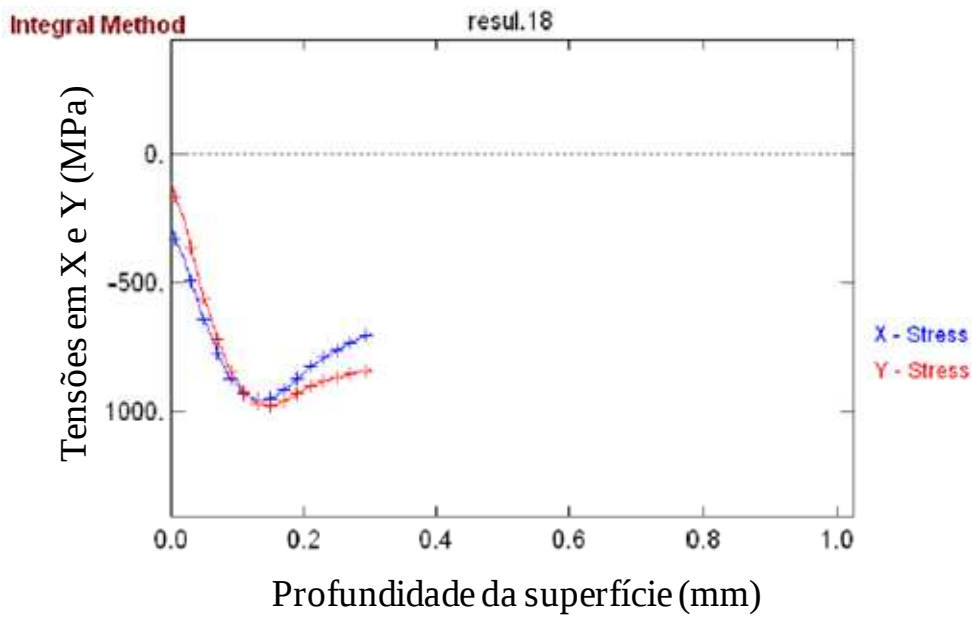
Corpo de prova 16



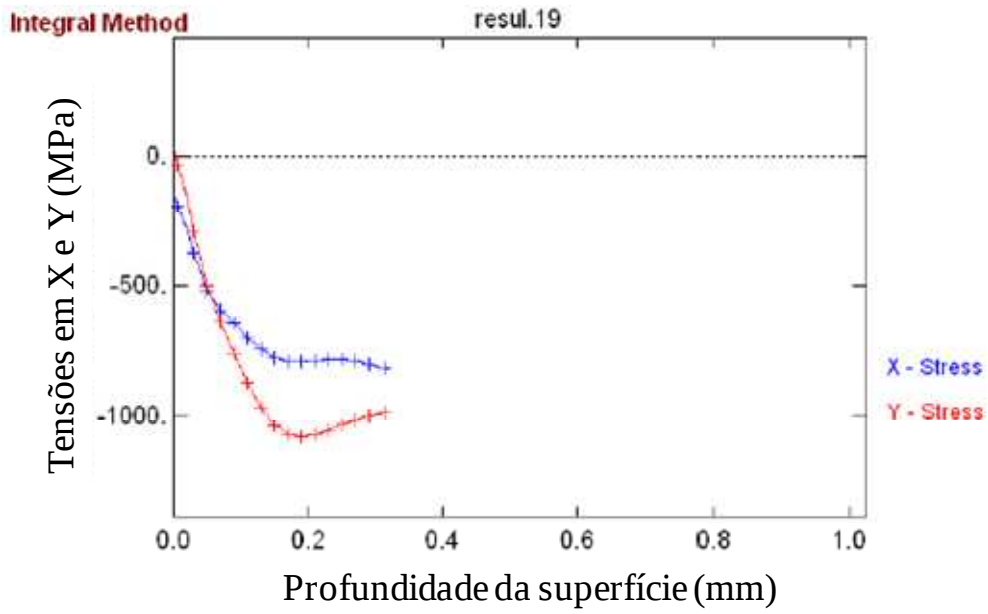
Corpo de prova 17



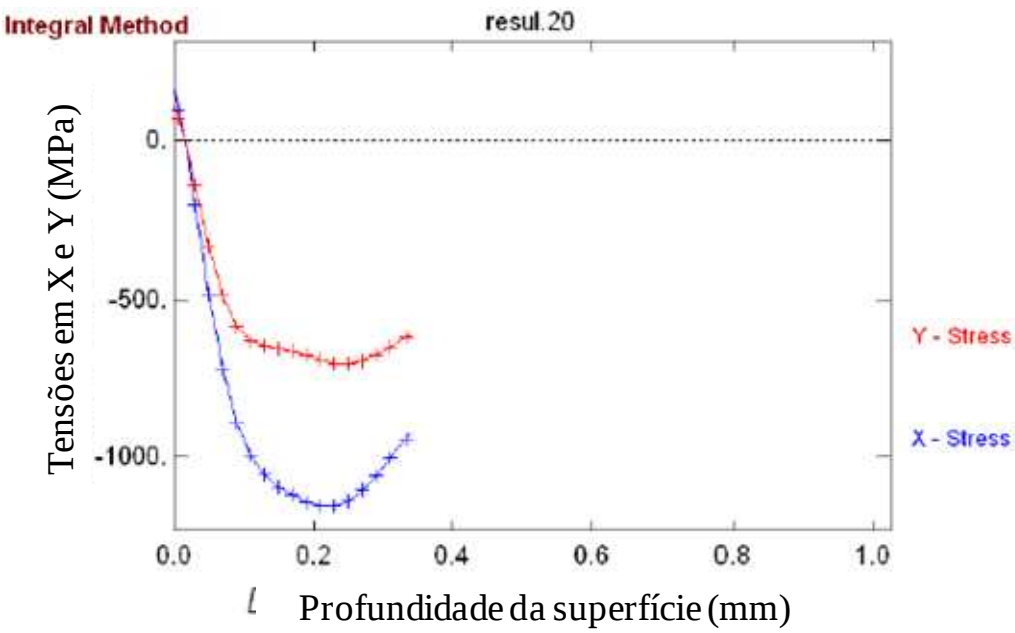
Corpo de prova 18



Corpo de prova 19



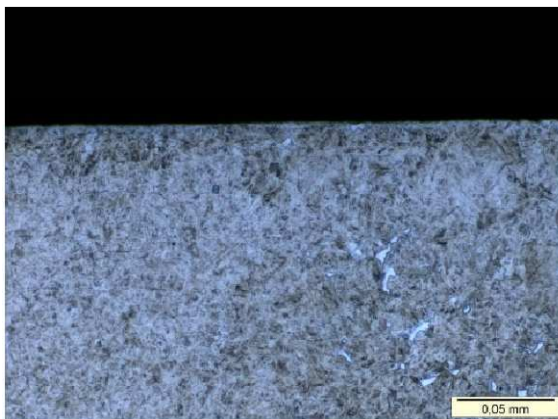
Corpo de prova 20



### Anexo 3 – Análise metalográfica para verificação de camada branca

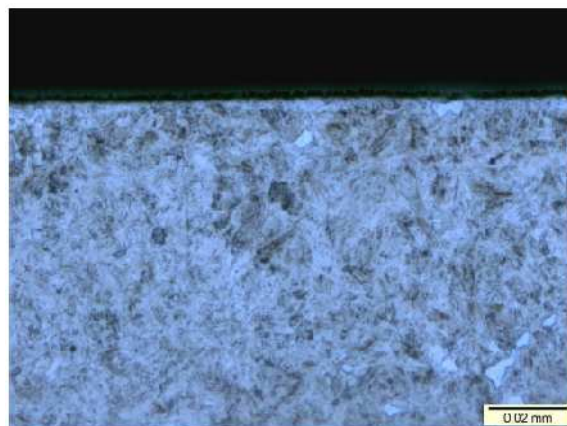
Corpo de prova 01 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x



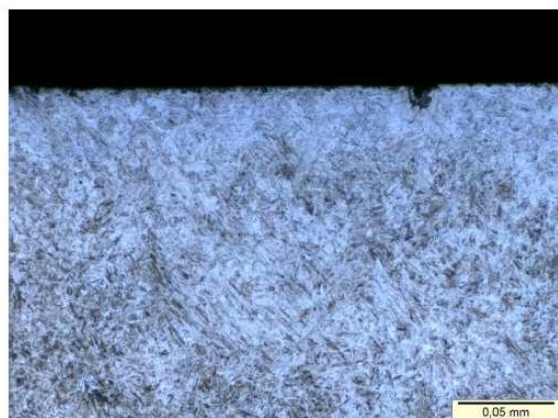
Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



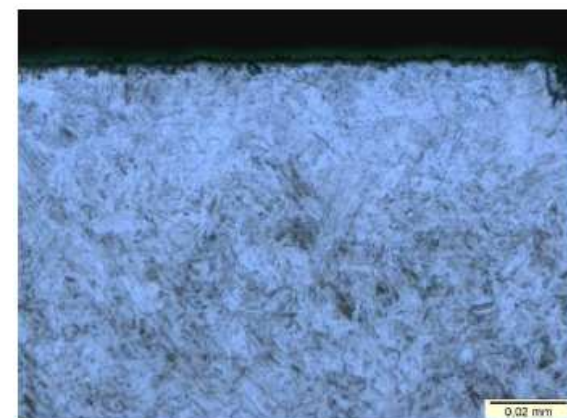
Corpo de prova 02 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x



Não houve formação de camada branca

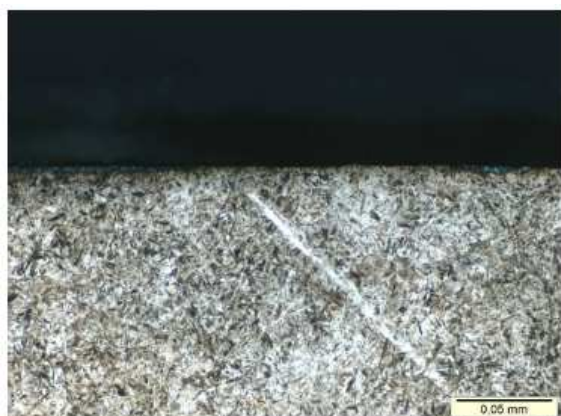
Aumento: 1000x



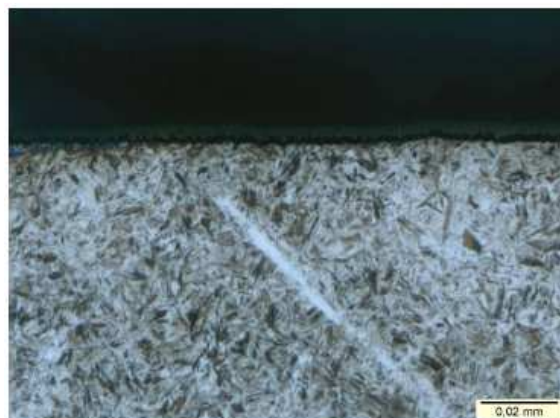
Corpo de prova 03 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x

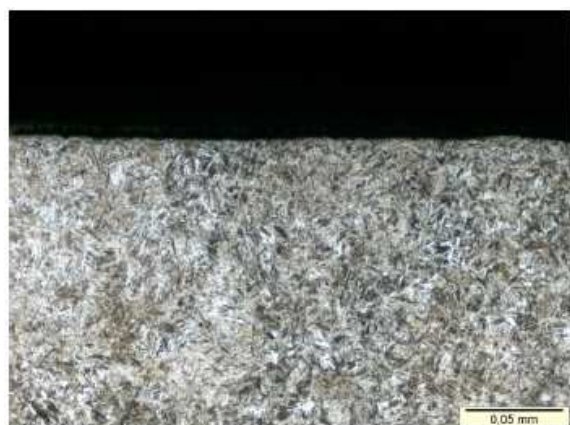
Aumento: 1000x



Não houve formação de camada branca  
Corpo de prova 04 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x



Aumento: 1000x



Não houve formação de camada branca

Corpo de prova 05 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x



Aumento: 1000x



Não houve formação de camada branca

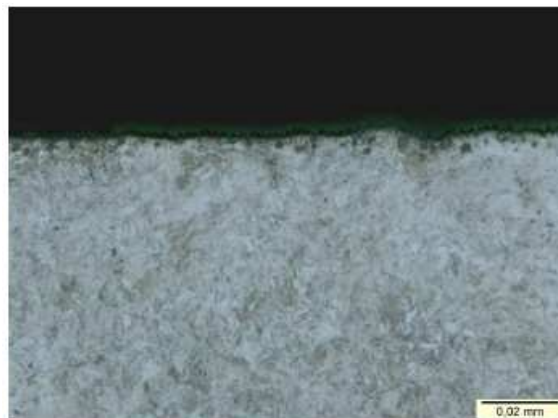
Corpo de prova 06 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x



Aumento: 1000x



Não houve formação de camada branca



Corpo de prova 07 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x



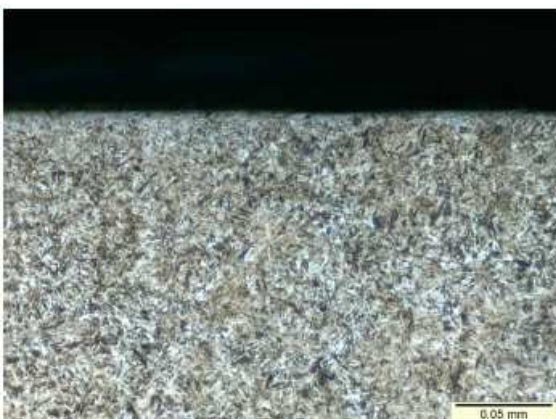
Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



Corpo de prova 08 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x



Não houve formação de camada branca

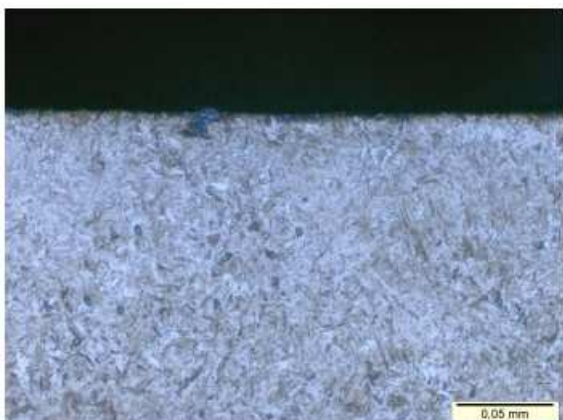
Aumento: 1000x



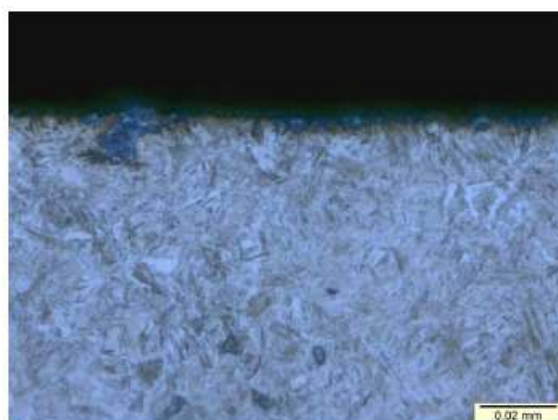
Corpo de prova 09 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x

Aumento: 1000x



Não houve formação de camada branca



Corpo de prova 10 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x

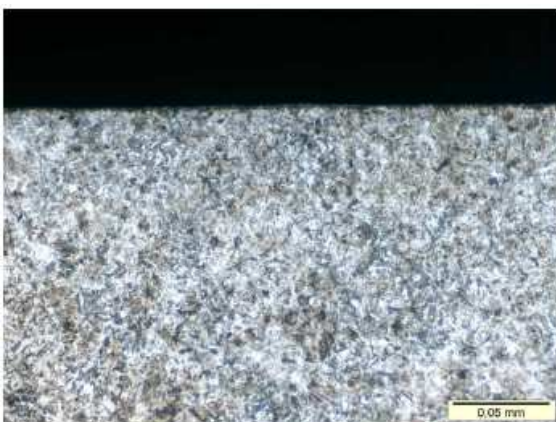


Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



Corpo de prova 11 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x



Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



Corpo de prova 12 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x

Aumento: 1000x



Não houve formação de camada branca



Corpo de prova 13 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x

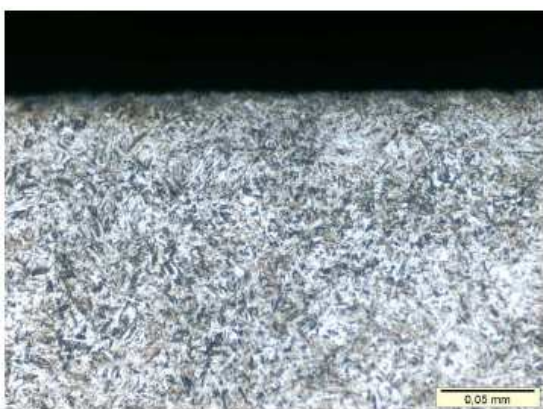


Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



Corpo de prova 14 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x



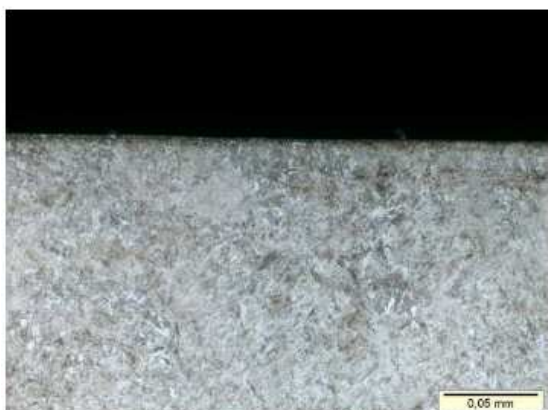
Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x

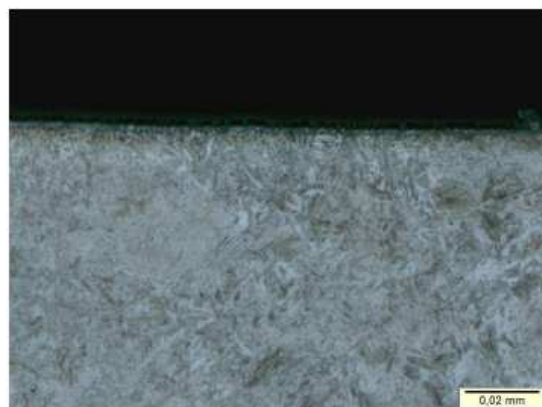


Corpo de prova 15 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x

Aumento: 1000x



Não houve formação de camada branca

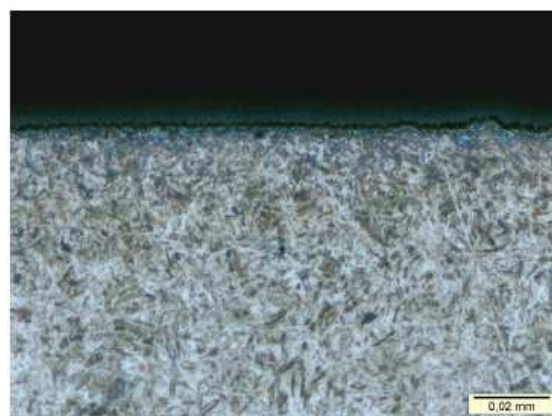


Corpo de prova 16 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x

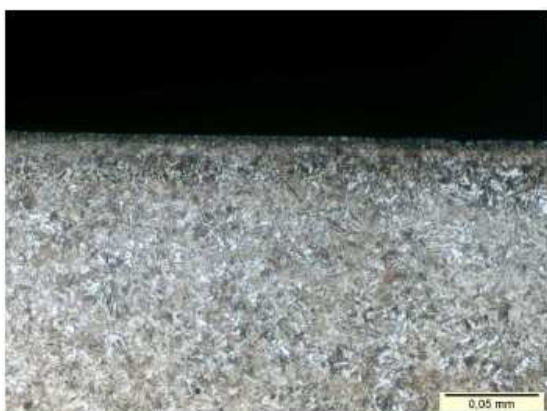


Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



Corpo de prova 17 (ataque de Nital 2%)  
Aumento: 500x



Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



Corpo de prova 18 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x



Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



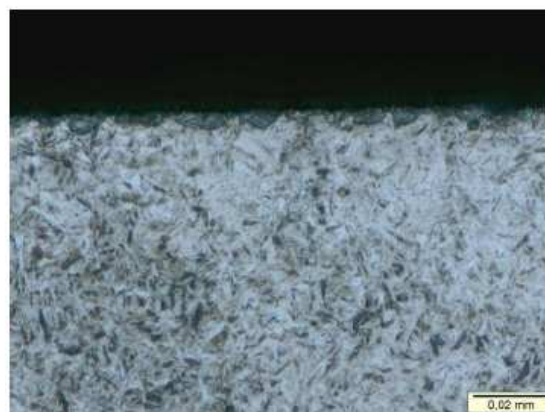
Corpo de prova 19 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x



Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



Corpo de prova 20 (ataque de Nital 2%)

Aumento: 500x



Não houve formação de camada branca

Aumento: 1000x



## Anexo 4 – Análise do Programa de regressão não linear NLREG para a rugosidade

Programação e resultados da regressão não linear da rugosidade Ra em função dos parâmetros de corte ( $v_c$ ,  $f_z$  e  $a_p$ ), no software NLREG.

```

1: Title "Rugosidade" ;
2: Variable v;      // v velocidade de corte em m/min
3: Variable f;      // f avanço por dente mm/rev
4: Variable ap;     // ap profundidade de corte mm
5: Variable Ra;     // Ra rugosidade em microns
6: Parameter k;     // cte
7: Parameter a;     // cte para v
8: Parameter b;     // cte para f
9: Parameter c;     // cte para ap
10: Function Ra = k*(v^a)*(f^b)*(ap^c);
11: plot xvar=v , yvar=f , svar=ap;
12: Data;

Beginning computation...
Stopped due to: Relative function convergence.

----- Final Results -----

NLREG version 6.5
Copyright (c) 1992-2008 Phillip H. Sherrod.

Rugosidade
Number of observations = 20
Maximum allowed number of iterations = 500
Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
Stopped due to: Relative function convergence.
Number of iterations performed = 32
Final sum of squared deviations = 1.8310178E-002
Final sum of deviations = 1.1414337E-002
Standard error of estimate = 0.0338288
Average deviation = 0.0241044
Maximum deviation for any observation = 0.0727689
Proportion of variance explained (R^2) = 0.6944 (69.44%)
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 0.6371 (63.71%)
Durbin-Watson test for autocorrelation = 1.485
Analysis completed 4-Oct-2012 20:49. Runtime = 0.03 seconds.

----- Descriptive Statistics for Variables -----

```

| Variable | Minimum value | Maximum value | Mean value | Standard dev. |
|----------|---------------|---------------|------------|---------------|
| v        | 98.9          | 351.1         | 225        | 63.57855      |
| f        | 0.016         | 0.184         | 0.1        | 0.04237179    |
| ap       | 0.07          | 0.23          | 0.15       | 0.04154896    |
| Ra       | 0.16          | 0.41          | 0.238      | 0.05615767    |

```

----- Calculated Parameter Values -----

```

| Parameter | Initial guess | Final estimate | Standard error | t     | Prob(t) |
|-----------|---------------|----------------|----------------|-------|---------|
| k         | 1             | 3.48076747     | 2.059192       | 1.69  | 0.11034 |
| a         | 1             | -0.222838231   | 0.09802253     | -2.27 | 0.03714 |
| b         | 1             | 0.325028885    | 0.07264455     | 4.47  | 0.00038 |
| c         | 1             | 0.37345944     | 0.1148346      | 3.25  | 0.00500 |

```

----- Analysis of Variance -----

```

| Source     | DF | Sum of Squares | Mean Square | F value | Prob(F) |
|------------|----|----------------|-------------|---------|---------|
| Regression | 3  | 0.04160982     | 0.01386994  | 12.12   | 0.00022 |
| Error      | 16 | 0.01831018     | 0.001144386 |         |         |
| Total      | 19 | 0.05992        |             |         |         |

## Anexo 5 – Função “Desirability” do software STATISTICA versão 10.0

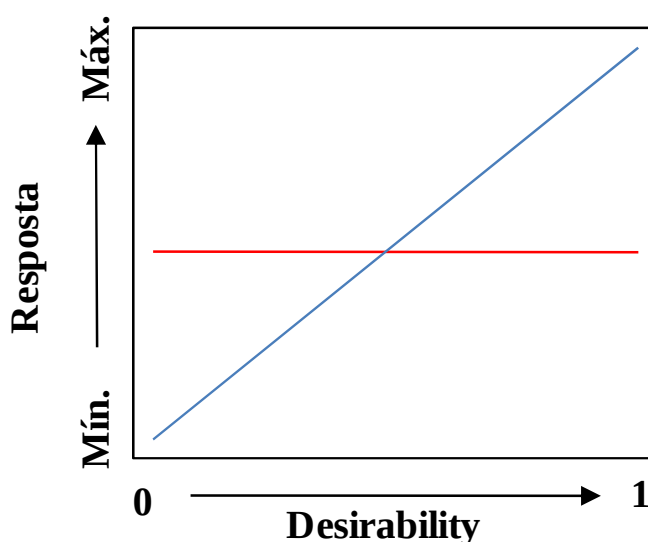
O desafio encontrado em processos de otimização de múltiplas respostas é definir um ajuste ótimo para o conjunto de valores operacionais das variáveis independentes que satisfaçam simultaneamente todos os requisitos necessários das variáveis dependentes.

Para tratar este assunto, HARRINGTON (1965), primeiramente desenvolveu um critério de otimização de resposta, “Desirability”, que foi mais tarde popularizado por DERRINGER e SUICH (1980).

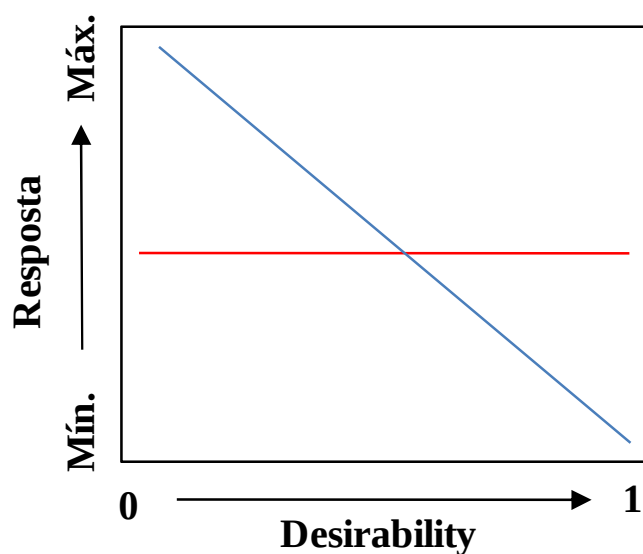
O processo consiste em definir para cada resposta  $y_i$  uma função  $d_i$ , que assuma um valor entre 0 e 1, no qual:

- ZERO, indique um valor de resposta que seja menos desejável;
- UM, represente o valor mais desejável;
- valores intermediários entre ZERO e UM indiquem a “Desirability” da resposta associada.

Graficamente, se o objetivo for maximizar a resposta, a função “Desirability” deve se comportar conforme a figura abaixo.



Se o objetivo for minimizar a resposta, a função “Desirability” deve se comportar de modo oposto, conforme a figura abaixo.



Por fim, se o objetivo for definir um valor Target situado entre um limite superior e um inferior previamente determinados, a função “Desirability” deve se comportar conforme a figura abaixo.

