

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

**ESTUDO DO ACABAMENTO NO TORNEAMENTO DO AÇO  
ABNT 52100 ENDURECIDO, UTILIZANDO O ARRANJO  
FATORIAL COMPLETO**

**JOSÉ EDMILSON MARTINS GOMES**

**Itajubá, dezembro de 2016**

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

**JOSÉ EDMILSON MARTINS GOMES**

**ESTUDO DO ACABAMENTO NO TORNEAMENTO DO AÇO  
ABNT 52100 ENDURECIDO, UTILIZANDO O ARRANJO  
FATORIAL COMPLETO**

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

**Área de Concentração:** Projeto, Materiais e Processos

**Orientador:** Prof. Dr. Gilbert Silva

**Coorientador:** Prof. Dr. João Roberto Ferreira

**Dezembro de 2016**

**Itajubá**

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

**JOSÉ EDMILSON MARTINS GOMES**

**ESTUDO DO ACABAMENTO NO TORNEAMENTO DO AÇO  
ABNT 52100 ENDURECIDO, UTILIZANDO O ARRANJO  
FATORIAL COMPLETO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 13 de dezembro de 2016, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica*.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Gilbert Silva (Orientador)

Prof. Dr. João Roberto Ferreira (Coorientador)

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Prof. Dr. Marcos Moura Galvão

**Itajubá**

**2016**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Edson e Márcia. À minha irmã Elaine e irmãos Márcio e Flávio. Aos meus afilhados. Em especial a minha esposa Clevane e filhas Isabelly e Anna Heloísa.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, saúde e por tudo que sempre me proporcionou, possibilitando alcançar este objetivo.

Ao Prof. Dr. Gilbert Silva, primeiramente por me aceitar como seu orientado e acreditar que pudéssemos desenvolver um bom trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gilbert Silva e coorientador Prof. João Roberto Ferreira, pelo apoio, incentivo e horas dedicadas para realização deste projeto.

À minha família, mas principalmente meus pais que em toda sua simplicidade ensinaram a mim e meus irmãos a nunca desistir e sempre buscar nossos objetivos, sempre nos apoiando e nos passando valores como honestidade, amizade, companheirismo, humildade, perseverança, entre outros, e também principalmente a minha esposa e filhas pelo apoio, paciência e por entenderem as diversas vezes que estive ausente e também às diversas vezes que mesmo presente eu estava ausente. Saibam que eu amo vocês.

Aos professores e técnicos da UNIFEI que contribuem com seus conhecimentos e experiências para o desenvolvimento de nós alunos.

À empresa MAHLE Metal Leve S.A. pelo apoio e incentivo no desenvolvimento e capacitação de seus funcionários.

De um modo geral agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta durante toda a minha trajetória e desenvolvimento. Afirmo-lhes que todos foram muito importantes.

A todos o meu muito obrigado.

“É graça divina começar bem. Graça maior  
persistir na caminhada certa. Mas graça  
das graças é não desistir nunca.”

**Dom Hélder Câmara.**

“Quando os soldados olharam para o gigante Golias  
disseram: Ele é muito grande é impossível vencer.  
Então o pequeno Davi olhou e disse: Ele é muito  
grande é impossível errar.”

**Autor desconhecido.**

“Eu pedi a Deus...  
Eu pedi força...  
Deus me deu dificuldades para me fazer forte.  
Eu pedi sabedoria...  
Deus me deu problemas para resolver.  
Eu pedi prosperidade...  
Deus me deu cérebro e músculos para trabalhar.  
Eu pedi coragem...  
Deus me deu perigos para superar.  
Eu pedi amor...  
Deus me deu pessoas com problemas para ajudar.  
Eu pedi favores...  
Deus me deu oportunidades.  
Eu não recebi nada do que pedi...  
Mas eu recebi tudo de que precisava.”

**Autor desconhecido.**

“Se eu vi mais longe, foi por estar  
de pé sobre ombros de gigantes.”

**Isaac Newton.**

## RESUMO

O aço ABNT 52100 é um aço que devido à elevada dureza após o tratamento térmico, precisão dimensional e acabamento superficial é amplamente utilizado na indústria para a produção de componentes mecânicos, ferramentas para trabalho à frio e componentes de rolamentos. O torneamento de materiais endurecidos por tratamento térmico é estudado como uma alternativa na substituição e/ou eliminação do processo de retificação no requisito de acabamento superficial do componente usinado. Neste trabalho foi utilizado como matéria prima o aço ABNT 52100 na forma de um tarugo laminado à quente e com microestrutura de carbonetos esferoidizados em uma matriz de ferrita. O material foi temperado e revenido com  $60 \pm 2\text{HRC}$  e analisou-se sua microdureza e microestrutura. Posteriormente, o corpo de prova foi usinado em um torno CNC sem a utilização de fluidos de refrigeração, no qual os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) foram alterados dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante de ferramentas para usinagem de materiais com dureza média de 60HRC (697HV). Na usinagem foi utilizado uma aresta de corte para cada corpo de prova com o objetivo de eliminar a influência do desgaste da ferramenta no acabamento superficial. Durante a usinagem os esforços de corte  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  foram medidos e após o torneamento a rugosidade do corpo de prova foi medida. Os resultados coletados foram analisados estatisticamente através da técnica de projeto de experimentos (DOE). Posteriormente, a aresta de corte e superfície de saída do inserto foram verificados por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Utilizou-se também o MEV para análise da superfície dos corpos de prova e arestas dos insertos selecionados conforme parâmetro de usinagem que estatisticamente influenciou nos resultados. Após a usinagem observou-se que o acabamento superficial das peças obteve rugosidade  $R_a$  máxima inferior a  $0,80\mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** Torneamento endurecido, Acabamento superficial, DOE, MEV, Desgaste, Esforços de corte, Microestrutura, Ferramenta cerâmica.

## ABSTRACT

ABNT 52100 steel is a steel that due to its high hardness after heat treatment, good surface finish and dimensional accuracy is widely used in industry for manufacturing mechanical components, tools for cold working and bearing components. The hard turning are studied as an alternative to replace and / or eliminate of the grinding process on the surface finish requirement of the machined component. The raw material used in this work was the ABNT 52100 steel in the form of a round bar with microstructure of spheroidized carbides in a ferrite matrix. The material was hardened and tempered to  $60 \pm 2\text{HRC}$  and analyzed its microhardness and microstructure. After, the material was machined on a CNC lathe without the use of lubricants and the machining parameters (Cutting speed, feed rate, and depth of cut) were set within the limits established by the toolmaker for machining materials with hardness of 60HRC (697HV). A different cutting edge was used for machining each workpiece in order to eliminate the tool wear influence on surface finish. During the turning the forces  $F_x$ ,  $F_y$  and  $F_z$  components were measured and afterwards the workpiece surface roughness. The collected results were statistically analyzed by design of experiments (DOE). Subsequently the cutting edge and back rake surface were observed by scanning electron microscopy (SEM). The SEM was also used to analyze the part surface and cutting edge according to machining parameter that most affected the results. The surface roughness ( $R_a$ ) obtained in the experiments were lower than  $0.80\mu\text{m}$ .

**Keywords:** *Turning hardened, Surface finish, DOE, SEM, Wear, Force components, Microstructure, Ceramic tool.*

## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xv
Lista de Quadros .....	xvi
Índice de Símbolos, Abreviações e Unidades de Medida .....	xvii
Índice de Elementos e Ligações Químicas .....	xix
Capítulo 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Importância do Tema .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo Principal .....	2
1.2.2 Objetivo Específico .....	2
1.3 Estrutura do Trabalho .....	2
Capítulo 2 .....	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Aço ABNT 52100 .....	4
2.2 Tratamento Térmico .....	6
2.3 Usinagem por Torneamento .....	9
2.4 Torneamento X Retificação .....	14
2.5 Integridade Superficial .....	16
2.5.1 Rugosidade .....	17
2.5.2 Acabamento Superficial .....	20
2.6 Planejamento de Experimentos .....	22
Capítulo 3 .....	28
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	28
3.1 Material .....	28
3.2 Métodos .....	29

3.2.1	Análise Metalográfica.....	29
3.2.2	Beneficiamento do Material por Tratamentos Térmicos.....	31
3.2.3	Processo de Usinagem.....	33
Capítulo 4	.....	37
RESULTADOS E DISCUSSÃO	.....	37
4.1	Microestrutura do Aço ABNT 52100.....	37
4.2	Torneamento dos Corpos de Prova.....	39
4.3	Projeto de Experimentos – DOE.....	43
4.3.1	DOE – Rugosidade Ra.....	44
4.3.2	DOE – Rugosidade Rt.....	46
4.3.3	DOE – Força de avanço $F_x$ .....	49
4.3.4	DOE – Força de penetração $F_y$ .....	52
4.3.5	DOE – Força de corte $F_z$ .....	55
4.4	Análise da Superfície do Corpo de Prova no MEV.....	59
4.4.1	MEV – Superfície do corpo de prova – $f=0,05\text{mm/rev}$ .....	60
4.4.2	MEV – Superfície do corpo de prova – $f=0,09\text{mm/rev}$ .....	63
4.4.3	MEV – Superfície do corpo de prova – $f=0,13\text{mm/rev}$ .....	65
4.5	Análise da Superfície de Saída do Inserto / Aresta de Corte no MEV.....	68
4.5.1	MEV – Análise dos insertos – $f=0,05\text{mm/rev}$ .....	68
4.5.2	MEV – Análise dos insertos – $f=0,13\text{mm/rev}$ .....	72
4.5.3	MEV do inserto novo.....	75
4.5.4	MEV dos insertos – Maiores esforços de corte – $f=0,13\text{mm/rev}$ .....	78
4.5.5	MEV dos insertos – <i>Center point</i> – $f=0,09\text{mm/rev}$ .....	82
4.5.6	MEV dos insertos – Menores esforços de corte – $f= 0,05\text{mm/rev}$ .....	86
Capítulo 5	.....	91
CONCLUSÕES	.....	91
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	91

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....93

## Lista de Figuras

Figura 1: Microestrutura do aço ABNT 52100. Estado laminado à quente conforme recebido do fabricante. ....	5
Figura 2: Curva TTT do aço ABNT 52100. ....	8
Figura 3: Microestrutura do aço ABNT 52100 conforme recebido (amplificação 1250x). ....	9
Figura 4: Torneamento na direção longitudinal. ....	12
Figura 5: Visão qualitativa das características das operações de torneamento duro e retificação. ....	15
Figura 6: Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade). ....	18
Figura 7: Altura máxima das irregularidades ( $R_{m\acute{a}x}$ ). ....	19
Figura 8: Largura dos elementos do perfil. ....	19
Figura 9: Fluxo lateral de material no torneamento duro. ....	21
Figura 10: Modelo de processo. ....	23
Figura 11: Microestrutura do aço ABNT 52100, após tratamento térmico de esferoidização. ....	29
Figura 12: Microscópio óptico – OLYMPUS – BX41M-LED com recurso para captura de imagens. ....	30
Figura 13: Aparelho digital de medir microdureza Vickers. ....	31
Figura 14: Desenho do Corpo de Prova. ....	32
Figura 15: Torno CNC Nardini Logic 175. ....	34
Figura 16: Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV. ....	36
Figura 17: Microestrutura do aço ABNT 52100 conforme recebido (amplificação 1000x). ....	37
Figura 18: Microestrutura do aço ABNT 52100, temperado, amplificação 1000x. ....	38
Figura 19: Microestrutura do aço ABNT 52100, temperado e revenido, amplificação 1000x. ....	39
Figura 20: Forças $F_x$ e $F_y$ no torneamento. ....	40
Figura 21: Forças $F_x$ , $F_y$ e $F_z$ atuantes no corpo de prova no torneamento. ....	40
Figura 22: Gráfico dos esforços de corte da usinagem. ....	42
Figura 23: Gráfico dos esforços de corte da usinagem do <i>center point</i> . ....	43
Figura 24: Gráfico da significância dos fatores para rugosidade $R_a$ . ....	44
Figura 25: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na rugosidade $R_a$ . ....	45
Figura 26: Gráfico da interação dos fatores na rugosidade $R_a$ . ....	46
Figura 27: Gráfico da significância dos fatores para rugosidade $R_t$ . ....	47
Figura 28: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na rugosidade $R_t$ . ....	48
Figura 29: Gráfico da interação dos fatores na rugosidade $R_t$ . ....	49

Figura 30: Gráfico da significância dos fatores para força de avanço $F_x$ .	50
Figura 31: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na força de avanço $F_x$ (N).	51
Figura 32: Gráfico da interação dos fatores na força de avanço $F_x$ (N).	52
Figura 33: Gráfico da significância dos fatores para força de penetração $F_y$ .	53
Figura 34: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na força de penetração $F_y$ (N).	54
Figura 35: Gráfico da interação dos fatores na força de penetração $F_y$ (N).	55
Figura 36: Gráfico da significância dos fatores para força de corte $F_z$ .	56
Figura 37: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na força de corte $F_z$ (N).	57
Figura 38: Gráfico da interação dos fatores na força de corte $F_z$ (N).	58
Figura 39: Distância entre picos para corpo de prova – Avanço 0,05mm/rev.	60
Figura 40: Largura da deformação do material em um ponto específico – Avanço 0,05mm/rev.	61
Figura 41: Profundidade do pico específico de deformação do material – Avanço 0,05mm/rev.	61
Figura 42: Largura do pico para deformação do material – Avanço 0,05mm/rev.	62
Figura 43: Profundidade do pico para deformação do material – Avanço 0,05mm/rev.	62
Figura 44: Distância entre picos para corpo de prova – Avanço 0,09mm/rev.	63
Figura 45: Largura do pico para deformação do material – Avanço 0,09mm/rev.	64
Figura 46: Profundidade do pico para deformação do material – Avanço 0,09mm/rev.	64
Figura 47: Distância entre picos para corpo de prova – Avanço 0,13mm/rev.	65
Figura 48: Largura do pico para deformação do material – Avanço 0,13mm/rev.	66
Figura 49: Profundidade do pico para deformação do material – Avanço 0,13mm/rev.	66
Figura 50: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=105$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.	69
Figura 51: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=170$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.	70
Figura 52: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=170$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.	71
Figura 53: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=105$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.	71
Figura 54: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=105$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.	73
Figura 55: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=170$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.	74

Figura 56: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=105$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.....	74
Figura 57: MEV da aresta de corte / superfície de saída - $V_c=170$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.....	75
Figura 58: Análise do MEV do inserto antes da usinagem (Novo).....	76
Figura 59: Análise do MEV do inserto antes da usinagem (Novo) – Elementos isolados.....	77
Figura 60: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos de análise – $V_c=170$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.....	78
Figura 61: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos – $V_c=170$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.....	79
Figura 62: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos do aço ABNT 52100 – $V_c=170$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.....	80
Figura 63: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos (Isolados) do aço ABNT 52100 – $V_c=170$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.....	81
Figura 64: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Superfície do inserto – $V_c=170$ m/min; $f=0,13$ mm/rev; $a_p=0,4$ mm.....	81
Figura 65: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos de análise – $V_c=137$ m/min; $f=0,09$ mm/rev; $a_p=0,3$ mm.....	82
Figura 66: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos – $V_c=137$ m/min; $f=0,09$ mm/rev; $a_p=0,3$ mm.....	83
Figura 67: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos do aço ABNT 52100 – $V_c=137$ m/min; $f=0,09$ mm/rev; $a_p=0,3$ mm.....	84
Figura 68: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos (Isolados) do aço ABNT 52100 – $V_c=137$ m/min; $f=0,09$ mm/rev; $a_p=0,3$ mm.....	85
Figura 69: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Superfície do inserto – $V_c=137$ m/min; $f=0,09$ mm/rev; $a_p=0,3$ mm.....	85
Figura 70: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos de análise – $V_c=105$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.....	86
Figura 71: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos – $V_c=105$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.....	87
Figura 72: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos do aço ABNT 52100 – $V_c=105$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.....	88
Figura 73: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos (Isolados) do aço ABNT 52100 – $V_c=105$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=0,2$ mm.....	89

Figura 74: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Superfície do inserto –  $V_c=105$  m/min;  $f=0,05$  mm/rev;  $a_p=0,2$ mm. .... 89

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros de usinagem, resultados em rugosidade e forças de usinagem.....	41
Tabela 2: Grau de ajuste dos modelos para as respostas analisadas.....	58
Tabela 3: Relação entre avanço e largura média de um elemento do perfil (Rsm).....	67

## Lista de Quadros

Quadro 1: Composição química do aço AISI 52100.....	4
Quadro 2: Passos para a condução de um experimento.....	25
Quadro 3: Características às principais técnicas do projeto e análise de experimentos.....	26
Quadro 4: Limites inferior e superior dos parâmetros de usinagem dos corpos de prova (SANDVIK, 2010; SANDVIK, 2015). .....	34
Quadro 5: Número do experimento e nível do parâmetro de usinagem no torneamento.....	35

## Índice de Símbolos, Abreviações e Unidades de Medida

ABNT	=	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ap	=	Profundidade de corte;
CBN	=	Nitreto de boro cúbico;
CDP	=	Corpo de prova;
CtPt	=	<i>Center point</i> ;
cv	=	Unidade de medida de potência;
C-K	=	Elétron de carbono da camada K;
Ø	=	Diâmetro;
Ø2"	=	Diâmetro de duas polegadas;
DIN	=	Instituto Alemão para Normatização – <i>Deutsches Institut für Normung</i> ;
DOE	=	Projeto de Experimentos – <i>Design of Experiment</i> ;
ε	=	Erro experimental no DOE;
EHT	=	Tensão de filamento;
ES	=	Elétron secundário;
ERE	=	Elétrons retroespalhados (BSD);
f	=	Avanço;
F <sub>x</sub>	=	Força de avanço;
F <sub>y</sub>	=	Força de penetração;
F <sub>z</sub>	=	Força de corte;
°C	=	Temperatura em graus Celsius;
HB	=	Dureza Brinell;
HRC	=	Dureza Rockwell C;
HV	=	Dureza Vickers;
ISO	=	Organização Internacional para Padronização – <i>International Organization for Standardization</i> ;
kg	=	Peso em quilograma;
kN	=	Quilo newton – 10 <sup>3</sup> newton;
m	=	Metro;
Mag	=	Amplificação;
MEV	=	Microscópio eletrônico de varredura;
µm	=	Micrometro – 10 <sup>-6</sup> metros;

min	=	Minuto;
mm	=	Milímetro;
m/min	=	Metro por minuto;
mm/r	=	Milímetro por revolução ou Milímetro por volta;
N	=	Newton;
Nm	=	Newton metro;
PCBN	=	Nitreto de boro cúbico policristalino;
Ra	=	Rugosidade média;
Rt	=	Rugosidade total;
rpm	=	Rotações por minuto;
Rsm	=	Largura média de um elemento do perfil;
s	=	Segundos;
Ta-La	=	Elétron de tântalo da camada L;
UNIFEI	=	Universidade Federal de Itajubá;
Vc	=	Velocidade de corte;
WD	=	Distância de trabalho;
X	=	Fatores controlados no DOE;
Xr	=	Kapa “r” – Ângulo de posição;
Y	=	Fatores de saída no DOE;
Z	=	Fatores não controlados no DOE;
(-) no DOE	=	Parâmetros do torneamento no limite inferior;
(+) no DOE	=	Parâmetros do torneamento no limite superior;
(0) no DOE	=	Parâmetros do torneamento no <i>Center point</i> .

## Índice de Elementos e Ligações Químicas

Al	=	Alumínio;
$Al_2O_3$	=	Óxido de alumínio – Alumina;
$Al_2O_3 + TiC$	=	Alumina com carboneto de titânio;
C	=	Carbono;
Ca	=	Cálcio;
Cr	=	Cromo;
F	=	Flúor;
Fe	=	Ferro;
Mg	=	Magnésio;
Mn	=	Manganês;
N	=	Nitrogênio;
Na	=	Sódio;
O	=	Oxigênio;
Si	=	Silício;
$Si_3N_4$	=	Nitreto de silício;
Ta	=	Tântalo;
Ti	=	Titânio;
TiC	=	Carboneto de titânio;
TiN	=	Nitreto de titânio;

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Importância do Tema

O material ABNT 52100 é um aço amplamente utilizado na produção de ferramentas de trabalho a frio, roletes de guia de laminação, rolos desempenadores de barras e componentes de rolamentos como anéis internos e externos, esferas, roletes e agulhas, etc.

Nos processos de fabricação de materiais que são utilizados para o desenvolvimento de peças e equipamentos, assim como, no processo de fabricação e beneficiamento destes, são aplicadas forças externas (tensões externas) e / ou gradientes de temperatura com objetivo de atribuir a estes componentes geometrias e características específicas, sendo que no atual cenário fabril, diversos equipamentos como furadeiras, tornos, fresas, retíficas, entre outros são utilizados para confeccionar produtos com estas características e geometrias pré-determinadas.

O processo de manufatura de um produto por retificação geralmente é utilizado quando deseja-se obter uma superfície da peça com rugosidade inferior a  $0,80\mu\text{m}$ , sendo um processo de manufatura demorado e com o custo elevado para a empresa, por se tratar de um processo de usinagem de precisão e baixa remoção de material, requerendo uma quantidade elevada de horas de trabalho.

O torneamento de materiais endurecidos é um processo de fabricação que esta sendo comparado ao processo de retificação cilíndrica no requisito de acabamento superficial, desta forma atribuindo ao produto à geometria final, com o objetivo de substituir ou até mesmo eliminar a retificação durante a manufatura de um determinado produto quando o requisito é rugosidade  $Ra < 0,80\mu\text{m}$ .

Clientes de todos os setores buscam sempre obter produtos de qualidade e a baixo custo. Já os fornecedores procuram alternativas para produzir produtos com qualidade e baixo custo de produção tornando-se competitivos no mercado.

Na constante busca por produtos de qualidade e a baixo custo, diversas alternativas são utilizadas, desde o desenvolvimento de novas tecnologias e automatização de linhas de produção, como a substituição / eliminação de processos durante a manufatura da peça.

Neste cenário, o estudo da influência dos parâmetros de usinagem, tais como, velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), utilizados no processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido é de extrema importância, visto que, o conhecimento da ação destas variáveis sobre a peça pode definir como a mesma será usinada e também verificar a real necessidade da retificação.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Principal**

Avaliar por microscopia eletrônica de varredura e através da medição de rugosidade, a superfície do aço ABNT 52100 temperado e revenido com 58 – 62HRC (653 – 746HV) após usinagem por torneamento sem utilização de fluidos de refrigeração e com medição dos esforços de corte  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ .

### **1.2.2 Objetivo Específico**

Obter rugosidade  $R_a$  inferior a  $0,80\mu\text{m}$  e definir a influência dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) no acabamento superficial da peça, utilizando a técnica de arranjo fatorial completo do projeto de experimentos (DOE).

## **1.3 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho será realizado conforme a estrutura abaixo:

1 – Revisão Bibliográfica:

- a) Aço ABNT 52100;
- b) Tratamento térmico;
- c) Usinagem por torneamento;
- d) Torneamento X Retificação;
- e) Integridade superficial;
- f) Projeto de experimentos – DOE.

## 2 – Procedimento Experimental:

a) Análise da microestrutura do material conforme recebido por processo de metalografia. O objetivo principal desta análise é verificar se o material já apresenta algum tipo de beneficiamento por tratamentos térmicos;

b) Beneficiamento do material por tratamento térmico de têmpera e revenimento com o objetivo de obter dureza de 58 – 62HRC (653 – 746HV);

c) Análise da microestrutura do material por processo de metalografia após o tratamento térmico. O objetivo principal desta análise é verificar a nova microestrutura do material após o beneficiamento por tratamento térmico;

d) Processo de fabricação dos corpos de prova por torneamento. Os parâmetros de usinagem ( $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$ ) serão alterados com o objetivo de evidenciar a sua influência na rugosidade final do material e nos esforços de corte durante a usinagem;

e) Análise da superfície do corpo de prova que apresentou o menor esforço de corte, o maior esforço de corte e um corpo de prova de *center point*, por microscopia eletrônica de varredura. Espera-se durante esta análise observar alguma relação entre os parâmetros de usinagem utilizados e a superfície do corpo de prova.

f) Análise das ferramentas de usinagem por microscopia eletrônica de varredura. O objetivo desta análise é avaliar a superfície da aresta de corte e superfície de saída do inserto após a usinagem.

## 3 – Resultados e Discussão.

## 4 – Conclusões.

## Capítulo 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aço ABNT 52100

Nos últimos anos tem ocorrido uma melhoria significativa nos aços utilizados para fabricação de rolamentos. A rota comumente utilizada para obter aços para rolamentos é a fusão em alto forno elétrico (ASM HANDBOOK, 2002).

De acordo com Bhadeshia (2012), são designados como aços ferramenta os materiais que contêm em sua estrutura concentrações de carbono entre 0,8 a 1,1% e o total de solução substitucional menor que 3%.

O material ABNT 52100 é um aço com alto teor de carbono e com baixo teor de inclusões que após o processo de têmpera apresenta elevada dureza e resistência ao desgaste. Devido à elevada dureza, resistência ao desgaste, acabamento superficial e precisão dimensional é um material amplamente utilizado na indústria na produção de componentes mecânicos, ferramentas de trabalho à frio, roletes de guia de laminação, rolos desempenadores de barras, componentes automotivos, máquinas-ferramenta, bombas, instrumentos de medição, válvulas e componentes de rolamentos como anéis internos e externos, esferas, roletes e agulhas (R.G.P. INTERNATIONAL, Revisão nº4; VILLARES METALS, 2005). A composição química típica de um aço ABNT 52100 é indicada no Quadro 1.

**Quadro 1: Composição química do aço AISI 52100.**

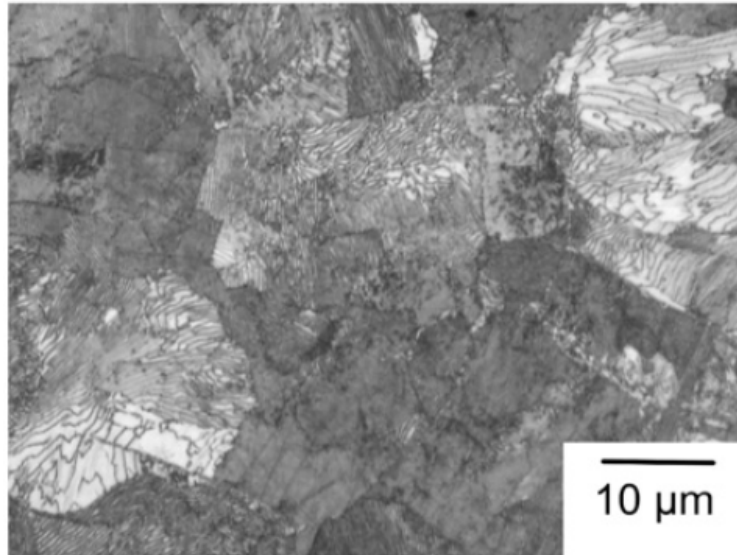
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr
0,98 – 1,10	0,25 – 0,45	0,025	0,025	0,15 – 0,35	1,30 – 1,60

**Fonte: Asm Handbook (1990).**

O aço ABNT 52100 está entre os aços liga provenientes do processo de laminação à quente. As barras laminadas deste material são do mesmo tamanho que as barras fornecidas de aço de qualidade especial. É usual que nesta condição de fabricação o aço ABNT 52100 apresente uma microestrutura perlítica e com alguma cementita proeutetóide nos contornos de

grãos austeníticos (BHADESHIA, 2012; ASM HANDBOOK, 1990). É ilustrado na Figura 1 a microestrutura do aço ABNT 52100, proveniente do processamento por laminação à quente.

**Figura 1: Microestrutura do aço ABNT 52100. Estado laminado à quente conforme recebido do fabricante.**



**Fonte: Bhadeshia (2012).**

Os rolamentos são fabricados tradicionalmente a partir de aços de baixo teor de carbono (0,20%), assim como de aços de alto teor de carbono (1,00%). A utilização de aços de baixo teor de carbono requer cementação para fornecer a dureza necessária na superfície, enquanto aços com alto teor de carbono necessitam de tratamentos térmicos para obter esta dureza. A utilização de aços de alto teor de carbono para fabricação de rolamentos apresenta as seguintes vantagens (ASM HANDBOOK, 1990):

- Suportam tensões de contato um pouco mais elevadas, tais como as tensões encontradas no carregamento de contato nas esferas de rolamentos;
- Podem ser temperados e revenidos, sendo que este tipo de tratamento térmico é mais simples que um processo de cementação, no qual o material deve primeiramente ser aquecido a altas temperaturas, em atmosfera rica em carbono (meio sólido, líquido ou gasoso) e permanecer nesta temperatura para ocorrer difusão do carbono da superfície para o centro da peça, para posteriormente ser temperado e revenido;
- Em temperaturas extremas, devido a sua característica de menor teor de austenita retida, pode oferecer uma maior estabilidade dimensional, uma vez que alterações de temperatura podem gerar mudanças de fase devido à austenita ser uma fase metaestável no material.

Deve-se ressaltar que é necessário a utilização de aços especiais para aplicações em que a temperatura de serviço do rolamento exceda 150°C, uma vez que a partir desta temperatura alguns aços de baixa liga não proporcionam a resistência à fadiga necessária devido à perda de dureza na superfície (ASM HANDBOOK, 1990).

## 2.2 Tratamento Térmico

A dureza do material para rolamentos entre 59 a 66 HRC (674 a 865HV) é correlacionada positivamente com a vida em fadiga de contato do mesmo, sendo que há uma associação entre a dureza do material e o desgaste nas pistas de rolamento, na qual quanto maior a dureza menor o desgaste (BHADESHIA, 2012).

A têmpera é um processo de beneficiamento por tratamento térmico no qual o aço é aquecido a uma temperatura acima do ponto crítico (passagem da microestrutura alfa para gama), e permanece nesta temperatura durante o tempo necessário para uniformizar e completar as transformações de fases ao longo da maior seção transversal da peça ou carga. Finalizado a uniformização o material é resfriado rapidamente em óleo, água, sais fundidos ou polímeros (FARIAS, 2009).

O revenimento é um beneficiamento por tratamento térmico no qual o aço temperado é aquecimento a uma temperatura abaixo do ponto A1 do diagrama Ferro Carbono (Fe-C) e permanece nesta temperatura durante um tempo adequado, com o objetivo de aumentar a ductilidade e a tenacidade do aço previamente temperado, visando eliminar na medida do possível, os inconvenientes gerados pelo processo de têmpera (FARIAS, 2009).

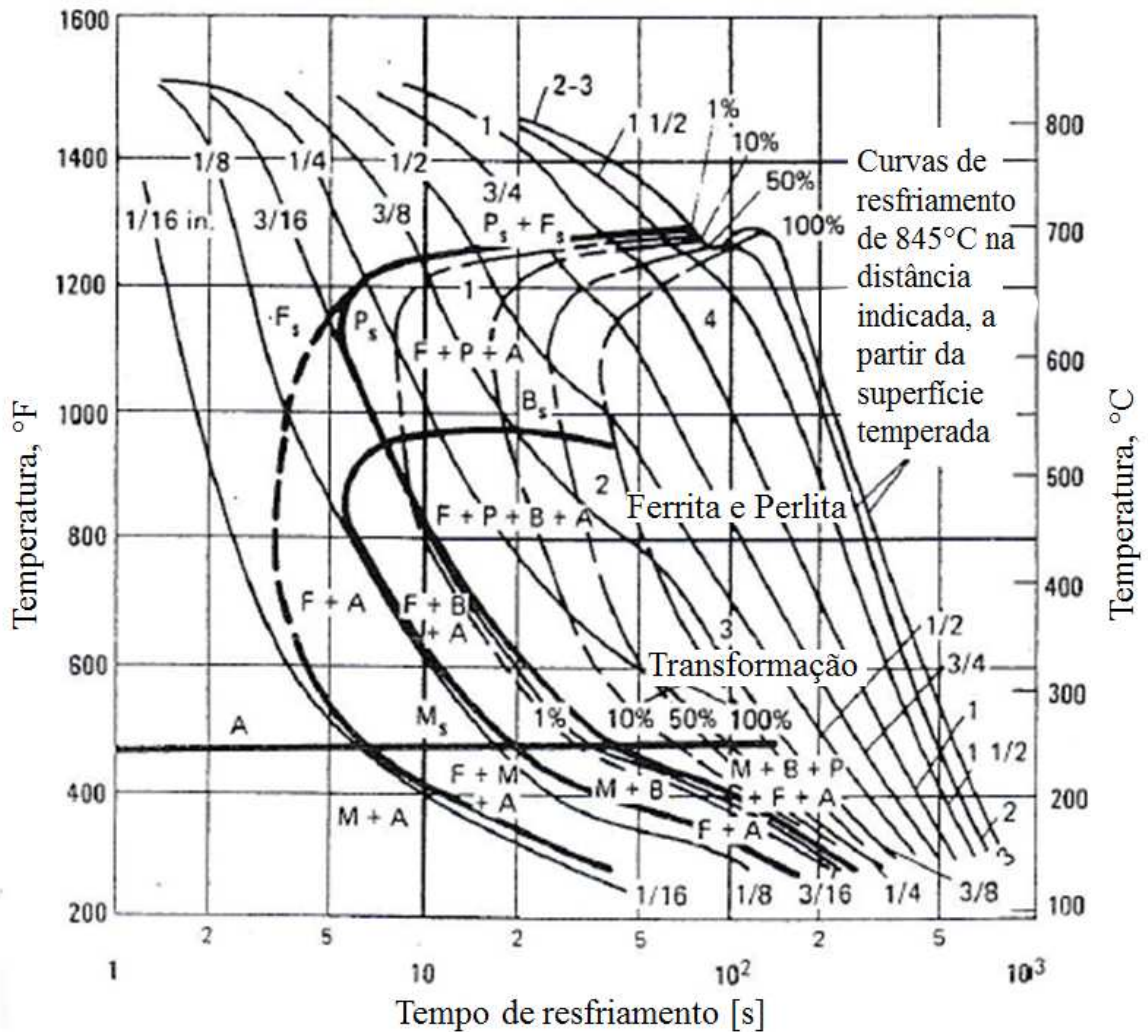
De acordo com Unterweiser, Boyer e Kubbs (1982), o aço ABNT 52100 quando beneficiado por tratamentos térmicos pode atingir durezas de 62 – 66HRC (746 – 865HV). Segundo os autores, para beneficiamento deste material, podem-se utilizar os seguintes processos e parâmetros:

- Na normalização o material deve ser aquecido à 885°C e resfriado ao ar livre.
- No recozimento para uma estrutura predominantemente esferoidizada, a qual é desejada para usinagem, o material deve ser aquecido à 795°C e resfriado rapidamente para 750°C, então, deve-se continuar resfriando até 675°C e a taxa de resfriamento não deve exceder 6°C por hora. Outra técnica alternativa é aquecer o material à 795°C, resfriar rapidamente até 690°C e manter nesta temperatura por 16 horas.

- O endurecimento do material é realizado aquecendo o material à 845°C em banho de sal neutro ou em atmosfera gasosa com potencial de carbono próximo a 1,0% e temperar a óleo.
- Após o tratamento térmico de têmpera, as peças devem ser revenidas assim que tenham atingido uniformemente a temperatura ambiente. Por causa do alto teor de carbono, as peças devem ser revenidas no mínimo à 120°C para converter a estrutura tetragonal martensítica em cúbica martensítica. Na maioria das práticas comerciais o revenimento acontece à 150°C, o que não reduz a dureza da têmpera de forma significativa. Quando é tolerada (aceitável) uma redução na dureza de aproximadamente dois pontos HRC, a temperatura de revenimento recomendada é 175°C.

A curva TTT (diagrama tempo-temperatura-transformação) do aço ABNT 52100 é representado na Figura 2, na qual são demonstradas as microestruturas obtidas para o material em função do tempo de resfriamento e da profundidade a partir da superfície temperada a 845°C. Nesta figura temos os seguintes termos: A = Austenita; F = Ferrita; P = Perlita; B = Bainita; M = Martensita (UNTERWEISER, BOYER e KUBBS, 1982).

Figura 2: Curva TTT do aço ABNT 52100.



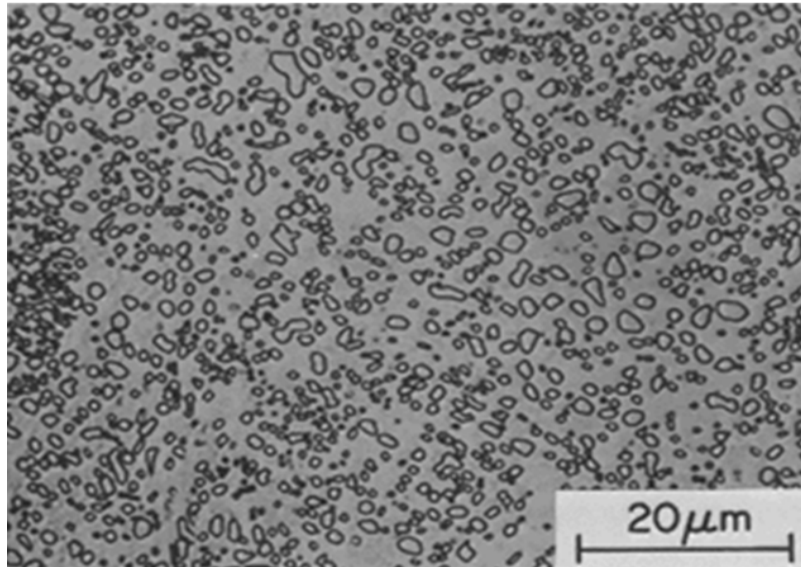
Fonte: Adaptado de Unterweiser, Boyer e Kubbs (1982).

Na maioria dos componentes de rolamentos a dureza mínima aceitável da superfície é de 58HRC (653HV). Nos componentes com dureza superficial inferiores à 58HRC (653HV) a resistência à fadiga é reduzida. Uma vez que temperaturas de trabalho elevadas podem reduzir a dureza dos componentes, materiais convencionais só podem ser utilizados em aplicações que a temperatura de trabalho esteja abaixo de 150°C (ASM HANDBOOK, 2002).

Aços fornecidos para fabricantes de rolamentos podem ter a forma de tubos ou em peças forjadas à frio partindo de uma microestrutura obtida por recozimento de esferoidização. O objetivo do recozimento de esferoidização é facilitar a usinagem e operações de conformação à quente e à frio, através da indução de uma microestrutura que é uma mistura de partículas relativamente grosseiras de cementita e ferrita. A rugosidade da superfície usinada também é reduzida no processo. A esferoidização do aço para rolamento reduz a dureza do mesmo para aproximadamente 230HV (BHADESHIA, 2012). A

microestrutura de carbonetos esferoidizados em uma matriz de ferrita do aço ABNT 52100 conforme recebido é ilustrada na Figura 3.

**Figura 3: Microestrutura do aço ABNT 52100 conforme recebido (amplificação 1250x).**



Fonte: Stickels (1974).

## 2.3 Usinagem por Torneamento

O crescente aumento da demanda de produção atrelado à necessidade de redução de custos de fabricação, devido às exigências cada vez maiores das novas tecnologias industriais, fez com que ao longo dos últimos anos o torneamento de materiais endurecidos venha sendo cada vez mais utilizado. Convencionou-se chamar de torneamento duro a usinagem de materiais com dureza na faixa de 45 à 65 HRC (446 à 832HV). A usinagem de materiais na forma endurecida, até poucos anos era executada somente pelo processo de retificação (CAMPOS, 2015; DAVIM, 2011).

O grau de dificuldade na usinagem de um determinado material é definido como usinabilidade. Esta usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro utilizado como padrão (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

A dureza do material é o fator metalúrgico dos aços predominante com respeito à usinabilidade. O aço com uma maior porcentagem de carbono tem sua usinabilidade melhorada devido ao aumento da dureza e diminuição da ductilidade. A dureza de 200HB

(207 à 218HV) pode ser considerada como um valor médio em termos de influência da dureza do aço. Acima desta dureza a usinabilidade do material é afetada negativamente, devido ao desgaste da ferramenta por abrasão e difusão. Abaixo desta dureza, aumenta há tendência à formação da aresta postiça de corte, o que reduz a vida da ferramenta e não gera um bom acabamento superficial. (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

A usinagem, na qual não existe controle de ferramentas e do lubrificante e a taxa de produção é maximizada, é definida como usinagem severa. Este tipo de usinagem é associado ao uso de altas velocidades de corte, avanço e profundidade de corte; uso de ferramentas que estão no fim de suas vidas, desgastadas e sem corte; lubrificação inadequada e/ou inapropriadas, ou sem lubrificação; uso de máquinas ferramenta velhas, desgastadas e sem rigidez, logo, este tipo de usinagem gera calor, altas tensões e alta taxa de carregamento na superfície (FARIAS, 2009).

A usinagem, na qual um extremo cuidado com as condições de processo são tomados, produzindo pouca geração de calor e alterações mínimas na superfície, é definida como usinagem leve. Este tipo de usinagem é associado ao uso de velocidades de corte, avanço e profundidades de corte que promovam maior vida da ferramenta; uso de ferramentas afiadas; lubrificação abundante e apropriada; máquinas ferramentas precisas e rígidas operando sem vibrações, logo este tipo de usinagem gera pouco calor e produz uma superfície com menores valores de tensão de tração, ou totalmente isentas desta condição (FARIAS, 2009).

O balanceamento entre uma boa condição de produção e um bom desempenho do componente deve ser o objetivo a ser alcançado, visto que determinadas condições de usinagem são inviáveis para produção em larga escala (FARIAS, 2009).

A geometria, material e desgaste da ferramenta, assim como os parâmetros de usinagem são alguns dos fatores estudados no torneamento. O torneamento também é comparado ao processo de retificação em termos de tensão residual, acabamento e vida em fadiga do material usinado.

A grande frequência na qual se concentra os materiais endurecidos está entre 58 a 68 HRC (653 a 940HV), entretanto quando a dureza do material é superior à 45HRC (446HV) já é considerado como usinagem de material duro (DAVIM, 2011).

No torneamento duro a idade da máquina que será utilizada não é considerada como um fator muito importante, uma vez que um torno manual bem conservado pode realizar esta operação, porém máquinas especiais e centros de torneamento são considerados a melhor opção para realizar este tipo de operação, que indiferente do equipamento que é utilizado, o

sucesso na usinagem não esta somente na rigidez do mesmo, mais sim na rigidez de todo o sistema (DAVIM, 2011).

Os insertos, também denominados como ferramentas, que são utilizados no torneamento são confeccionados com diversos tipos de materiais, formas e perfis. A definição do tipo de inserto que será utilizado depende do material que será usinado e da dureza, entre outros parâmetros, conforme pode ser analisado em catálogos de fabricantes de ferramentas. Neste trabalho são descritos algumas características dos insertos de materiais cerâmicos, devido ao fato de ser o material do inserto que será utilizado neste estudo.

Algumas características/propriedades do material cerâmico como a dureza à quente e à frio, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química (que evita a difusão, o que é muito importante quando se usina em altas velocidades e temperaturas) são muito interessantes para aplicação em ferramentas de usinagem. Entretanto, algumas características como a baixa condutividade térmica, o que, dificulta a transferência de calor e faz com que a região próxima do contato cavaco-ferramenta e peça-ferramenta atinjam temperaturas muito altas e, principalmente, a baixa tenacidade, o que facilita o aparecimento de trincas e a quebra da ferramenta, fazem com que a sua utilização na usinagem não seja tão fácil. A principal razão do material cerâmico não fazer parte do mercado das ferramentas de corte há mais tempo é a baixa tenacidade, contudo, um grande esforço tem sido feito nos últimos anos para aumentar a tenacidade deste material e bons resultados estão sendo obtidos (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

Ferramentas de material CBN e cerâmicas possuem grande resistência ao calor, o que permite a usinagem a seco de materiais endurecidos, desta forma há uma redução considerável dos custos com compra, armazenamento e descarte do fluido de refrigeração (FARIAS, 2009).

Ferramentas de cerâmica são baseadas principalmente em alumina ( $Al_2O_3$ ), nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ) e SIALON que é uma combinação de Silício (Si), Alumínio (Al), Oxigênio (O) e Nitrogênio (N). É um material muito duro e refratário que resiste a temperaturas acima de  $1500^{\circ}C$  sem que ocorra decomposição química. Devido a estas características seu uso é recomendado em usinagens de metais a seco e com altas velocidades de corte (DAVIM, 2011).

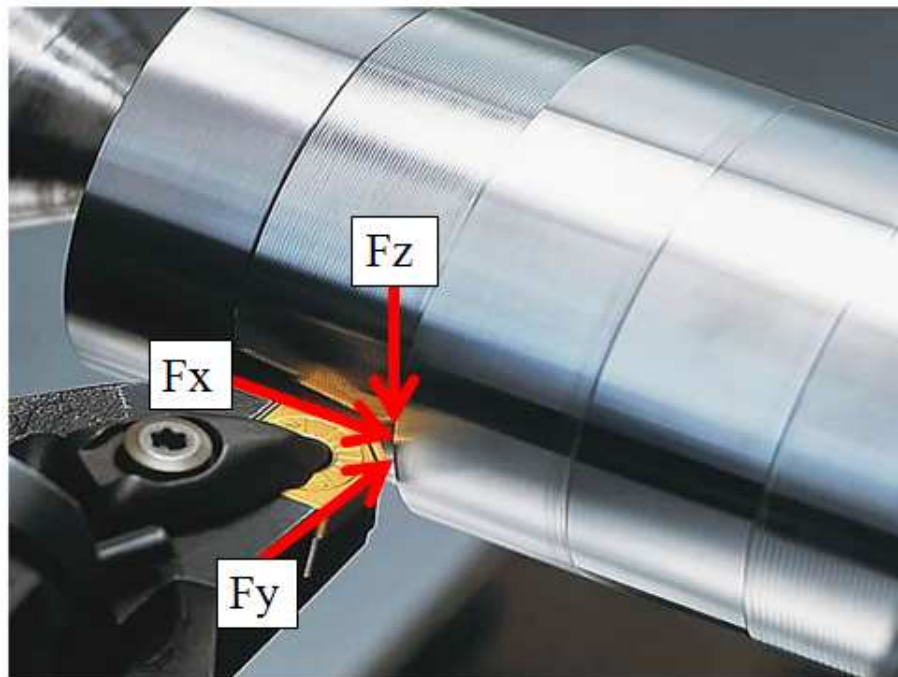
No torneamento de materiais endurecidos os parâmetros de usinagem utilizados são típicos de operações de acabamento, nos quais os valores de avanço (f) são compatíveis com os padrões de acabamento superficial desejado, na velocidade de corte ( $V_c$ ) e profundidade de

corte ( $a_p$ ) são utilizados valores inferiores aos praticados no torneamento de materiais não endurecidos (CAMPOS, 2015).

No torneamento de materiais endurecidos, os valores utilizados com maior frequência na velocidade de corte estão no intervalo de  $(V_c) = 100$  a  $200$  m/min, o intervalo praticado com maior frequência na profundidade de corte está na faixa de  $(a_p) = 0,15$  a  $0,20$ mm e o último parâmetro de usinagem de grande importância no torneamento é o avanço, que neste caso depende diretamente do padrão de rugosidade desejado no componente usinado e do raio da ponta da ferramenta. O avanço é descrito como o parâmetro de usinagem que tem maior influência no acabamento do componente usinado. Na definição do parâmetro de usinagem profundidade de corte em operações de acabamento, deve-se atentar que este parâmetro é diretamente relacionado ao material excedente (sobremetal), deixado nas operações de desbaste e também nas possíveis alterações que o componente pode sofrer durante o beneficiamento por processos de endurecimento, de tal forma que as especificações finais do produto não sejam inviabilizadas (CAMPOS, 2015).

No torneamento na direção longitudinal, conforme Figura 4, a força de avanço ( $F_x$ ) é a componente da força de usinagem na direção do avanço ( $f$ ), a força de penetração ou também chamada de força passiva ( $F_y$ ) é a componente na direção da profundidade de corte ( $a_p$ ) e a força de corte ( $F_z$ ) é a componente na direção da velocidade de corte ( $V_c$ ).

**Figura 4: Torneamento na direção longitudinal.**



**Fonte: Adaptado de Usinagem Carillo.**

O torneamento de materiais endurecidos pode ser utilizado em diversos ferros fundidos e aços, sendo que este tipo de operação a superfície da peça usinada pode ser completamente homogênea, sendo denominado como processo com corte contínuo ou possuir detalhes como, por exemplo, rasgos para chavetas, sendo neste caso denominadas como processo com corte interrompido. A característica mais comum é o torneamento por corte contínuo. No torneamento por corte interrompido, os impactos que a ferramenta sofre devido às interrupções, torna-se uma característica difícil, principalmente quando as ferramentas são construídas de material frágil, como cerâmica e nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN), nos quais os impactos devido ao corte interrompido podem gerar falhas catastróficas nas arestas de corte (OLIVEIRA, DINIZ e URSOLINO, 2009).

Nas investigações de Meddour *et al* (2015) no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, utilizando ferramenta de cerâmica, as forças de avanço, penetração e corte são influenciadas pelos seguintes parâmetros de usinagem: profundidade de corte e avanço. Segundo os autores, a melhor rugosidade foi obtida usando pequenos avanços e grandes raios da ponta ( $r_e$ ) da ferramenta. Este resultado de rugosidade pode ser demonstrado pela Equação 1 (equação teórica) para cálculo de rugosidade  $R_a$ , na qual quanto maior o raio da ponta da ferramenta e menor o avanço, menor a rugosidade  $R_a$ .

$$R_a = \frac{f^2 \times 1000}{32 \times r_e} \quad (1)$$

Onde:

$f$  = Avanço (mm/rev);

$r_e$  = Raio da ponta da ferramenta (mm);

Azizi *et al* (2012) em seus estudos da rugosidade e esforços de corte no torneamento de acabamento do material ABNT 52100 endurecido, relatam que a faixa de valores obtidas para força de avanço  $F_x = 10,0$  à  $118,6$ N; força de penetração  $F_y = 40,3$  à  $298,2$ N e força de corte  $F_z = 28,0$  à  $172,3$ N. Em suas análises, as componentes de força  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  são influenciadas principalmente pela profundidade de corte, avanço e a dureza da peça, sendo que a velocidade de corte tem menos influência sobre os resultados.

O processo de torneamento duro é interessante devido a sua capacidade de produzir uma baixa rugosidade ( $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ ) durante um longo tempo de usinagem e também por induzir tensões residuais de compressão quando utilizado baixas velocidades de corte e avanço. O avanço é o principal parâmetro que influencia na rugosidade e a velocidade de

corte é o principal parâmetro que influencia no nível de tensão residual (RECH e MOISAN, 2003).

Segundo Aouici *et al* (2012), o avanço e a dureza do material são os parâmetros que estatisticamente tem influência significativa na rugosidade, sendo que para uma melhor rugosidade foi utilizado baixo avanço e alta velocidade de corte. Ainda conforme o autor, as forças de avanço e de corte são fortemente influenciadas pela profundidade de corte.

Nas investigações de Kurt, Yalçin e Yilmaz (2015), as forças de corte e avanço diminuem com o aumento da velocidade de corte. Segundo os autores, este fato ocorre, pois o aumento da velocidade de corte facilita o fluxo de cavaco na região de contato cavaco-ferramenta. Em seus estudos o aumento da profundidade de corte tende a aumentar a força de penetração.

Segundo Rao, Rao e Srihari (2013) o avanço tem influencia significativa na força de corte e na rugosidade, a velocidade de corte não tem efeito significativo nestas respostas e a profundidade de corte tem influência significativa na força de corte, porém não tem influência na rugosidade.

Nas investigações de Grzesik, Rech e Wanat(2007), no torneamento do aço para rolamento ABNT 52100 endurecido, utilizando insertos de cerâmica mista, foram obtidos valores de rugosidade Ra de 0,1 a 1 $\mu$ m.

De acordo com Thiele e Melkote (1999), em suas investigações no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, a interação entre a geometria da aresta de corte e a dureza do material tem influência significativa na rugosidade.

## **2.4 Torneamento X Retificação**

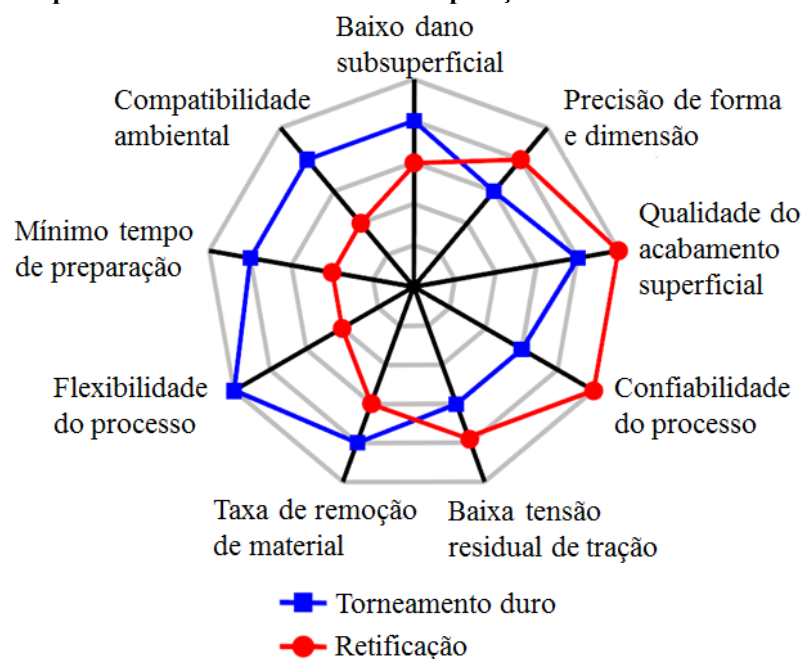
O torneamento duro é um processo de fabricação que está sendo comparado ao processo de retificação cilíndrica no requisito de acabamento superficial, desta forma atribuindo ao produto à geometria final, com o objetivo de substituir ou até mesmo eliminar a retificação durante a manufatura de um produto.

Segundo Bouacha *et al* (2010) e Revel *et al* (2016), o torneamento duro é definido como processo de usinagem de materiais com dureza superior a 45HRC (446HV) utilizando baixos valores de avanço e profundidade de corte. Ainda segundo os autores, este processo de usinagem tem se tornado uma alternativa viável em varias indústrias, em substituição ao processo de retificação convencional.

Farias (2009) relata que alguns autores definem o processo de torneamento de materiais endurecidos como o processo de usinagem com uso de ferramentas monocortantes de materiais com dureza superior a 600 HV (55HRC) no qual uma das principais vantagens é obter as dimensões finais da peça sem a necessidade do processo da retificação, contribuindo para um baixo custo de produção e maiores produtividades. Outra vantagem é de se eliminar o risco de distorções da peça durante a etapa de tratamento térmico e o subsequente retrabalho.

Uma comparação entre as características dos processos de torneamento de materiais endurecidos e retificação é verificada na Figura 5, sendo que os pontos destacados próximos à periferia correspondem aos melhores resultados. O processo de torneamento demonstra vantagens como possibilitar a usinagem de geometrias complexas, é um processo mais flexível, possui alta taxa de remoção de material e também maior compatibilidade ambiental, pois possibilita a isenção de fluidos de corte durante a usinagem. O processo de retificação possui diversas vantagens como a precisão de forma e dimensão, baixos valores de rugosidade e maior confiabilidade do processo em relação ao torneamento, que é atribuído principalmente às repentinas avarias nas ferramentas utilizadas no torneamento. Conforme Figura 5 o processo de retificação gera menores valores de tensão residual na peça usinada quando comparado ao torneamento, entretanto as tensões residuais geradas pela retificação são geralmente de tração, o que é relacionado principalmente ao efeito térmico durante o corte (CAMPOS, 2015).

**Figura 5: Visão qualitativa das características das operações de torneamento duro e retificação.**



Fonte: Adaptado de Klocke, Brinksmeier e Weinert (2005).

Oliveira, Diniz e Ursolino (2009), observaram em suas investigações, que no torneamento de materiais endurecidos de superfícies com características de corte interrompido, os valores obtidos em rugosidade quando utilizados insertos de materiais cerâmicos, impossibilitam a sua utilização em substituição ao processo de retificação.

Nas investigações de Abrão e Aspinwall (1996); Agha e Liu (2000); Dahlman, Gunnberg e Jacobson (2004); Matsumoto, Hashimoto e Lahoti (1999), a avaliação da vida em fadiga no aço endurecido para rolamento indicou que as amostras torneadas apresentam resistência à fadiga superior em comparação com as amostras retificadas. No torneamento, a geometria da aresta de corte da ferramenta é relacionada com um dos fatores dominantes para determinar o perfil da tensão residual. Há autores que demonstram que é mais fácil controlar a integridade da superfície do produto utilizando torneamento duro do que a retificação.

A resistência à fadiga do aço ABNT 52100 temperado com dureza de 62HRC (746HV) foi analisada por Hashimoto, Guo e Warren (2006), comparando o material usinado por processo de retificação e torneamento. A análise demonstrou que é possível utilizando o torneamento de material endurecido, melhorar o desempenho do componente, uma vez que a condição de torneamento apresentou mais que o dobro de ciclos até a fadiga do material.

## **2.5 Integridade Superficial**

A parte de uma peça que representa a fronteira entre o corpo sólido e o ambiente é a superfície deste sólido. Entre os diversos atributos de uma superfície, a geometria é um destes. A natureza de uma geometria é tridimensional e as características superficiais são denominadas como topografia, sendo que a modificação desta topografia pode ser realizada por procedimentos como remoção de material, tratamentos térmicos ou adição de coberturas, que tem por objetivo atribuir à superfície características desejadas para uma determinada aplicação (FARIAS, 2009).

À medida que cresce a precisão de ajuste entre peças que serão acopladas, aumenta também a importância do estudo do acabamento superficial destes itens com objetivo de garantir a sua funcionalidade. A especificação do acabamento superficial de peças nas quais houver atrito, desgaste, corrosão, resistência à fadiga, aparência, transferência de calor, superfícies de medição (blocos-padrões, micrômetros), escoamento de fluidos (paredes de dutos e tubos) através da rugosidade é fundamental (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1986).

### 2.5.1 Rugosidade

Caracteriza-se a rugosidade da peça pela forma como é executada sua medição. Foi adotado no Brasil pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas o sistema da “Linha Média” (M), sendo que este é o sistema mais utilizado em todo o mundo. Neste tipo de sistema, no comprimento de amostragem, todas as grandezas de medição são definidas a partir de uma linha paralela à direção geral do perfil, sendo esta linha a média entre os picos e reentrâncias de irregularidades. Os sistemas de medição de rugosidade, baseados na linha média, são divididos em três classes (CAMPOS, 2015):

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

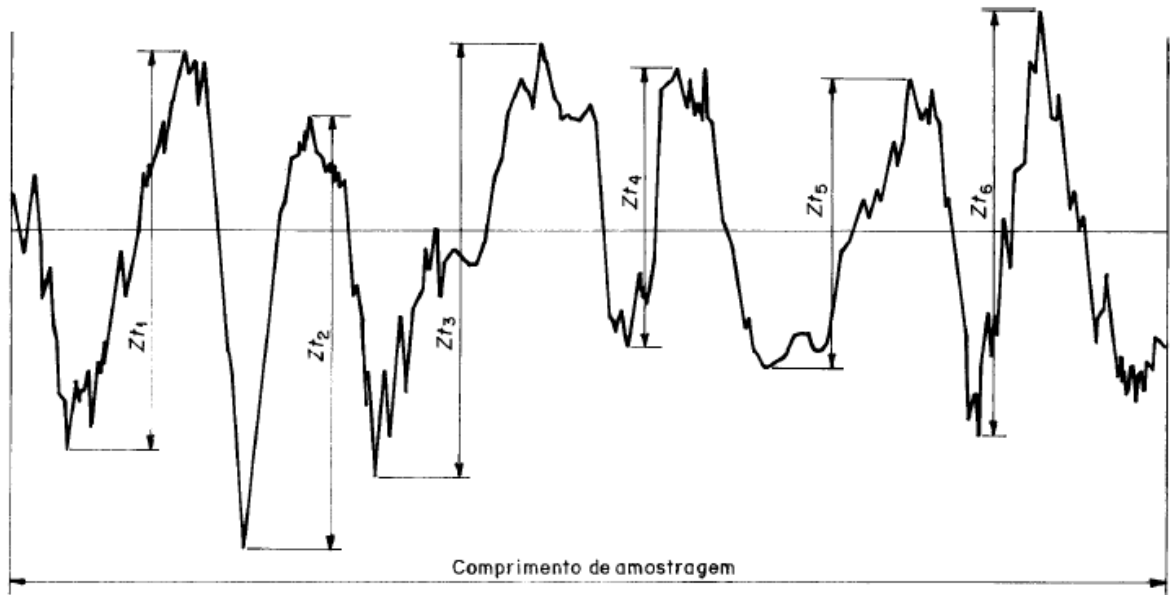
O critério para medição de rugosidade dos corpos de prova utilizados neste trabalho segue o sistema de medição fundamentado na medida da profundidade da rugosidade. Pertencem a este grupo os seguintes parâmetros (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1986):

- Desvio médio aritmético –  $R_a$ ;
- Desvio médio quadrático –  $R_q$ ;
- Altura das irregularidades dos 10 pontos –  $R_z$ ;
- Altura máxima das irregularidades –  $R_{m\acute{a}x}$  (Definido neste trabalho como  $R_t$ );
- Profundidade média –  $R_p$ .

Será descrito a seguir somente a rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  ( $R_{m\acute{a}x}$ ), pois estes foram os tipos de rugosidades analisadas neste trabalho.

O desvio médio aritmético ( $R_a$ ) é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média em um comprimento de amostragem. A medição de rugosidade é feita utilizando os valores em  $R_a$ , por este ser o parâmetro adotado pela norma brasileira (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1986). É representado na Figura 6 o modo de análise da rugosidade  $R_a$ .

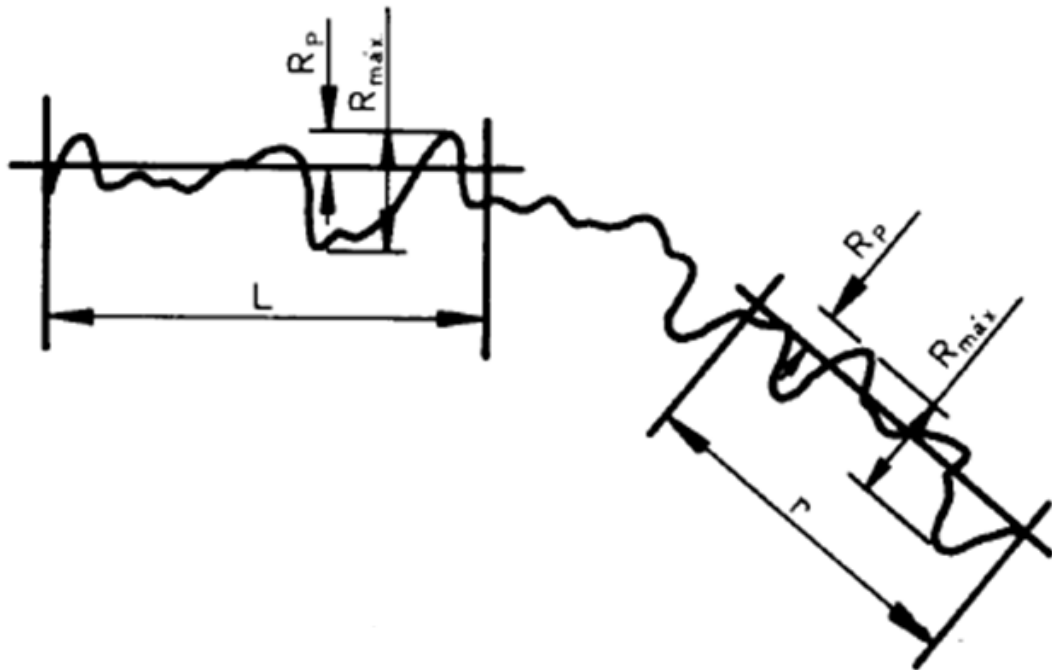
**Figura 6: Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade).**



Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

A altura máxima das irregularidades ( $R_{m\acute{a}x}$ ) ou conforme descrito neste trabalho como  $R_t$  é definida como a distância entre o maior pico de irregularidade e o maior vale (reentrância) de irregularidade medida no comprimento de amostragem, considerando duas linhas paralelas a linha média e que tangenciam o maior pico e vale. É o critério preferido pelas normas alemãs (DIN – Instituto Alemão para Normatização) na qual é designado o termo  $R_t$  que também é a simbologia adotada pela norma ISO – Organização Internacional para Padronização (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1986; CAMPOS, 2015). O sistema de medição do parâmetro  $R_{m\acute{a}x}$  ( $R_t$ ) é representado na Figura 7, na qual os parâmetros “L” e “r” ilustram os comprimentos de amostragem. Nesta figura, é também representada a profundidade média ( $R_p$ ), que é definida como a ordenada do maior pico de irregularidade com origem na linha média, no comprimento de amostragem (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1986).

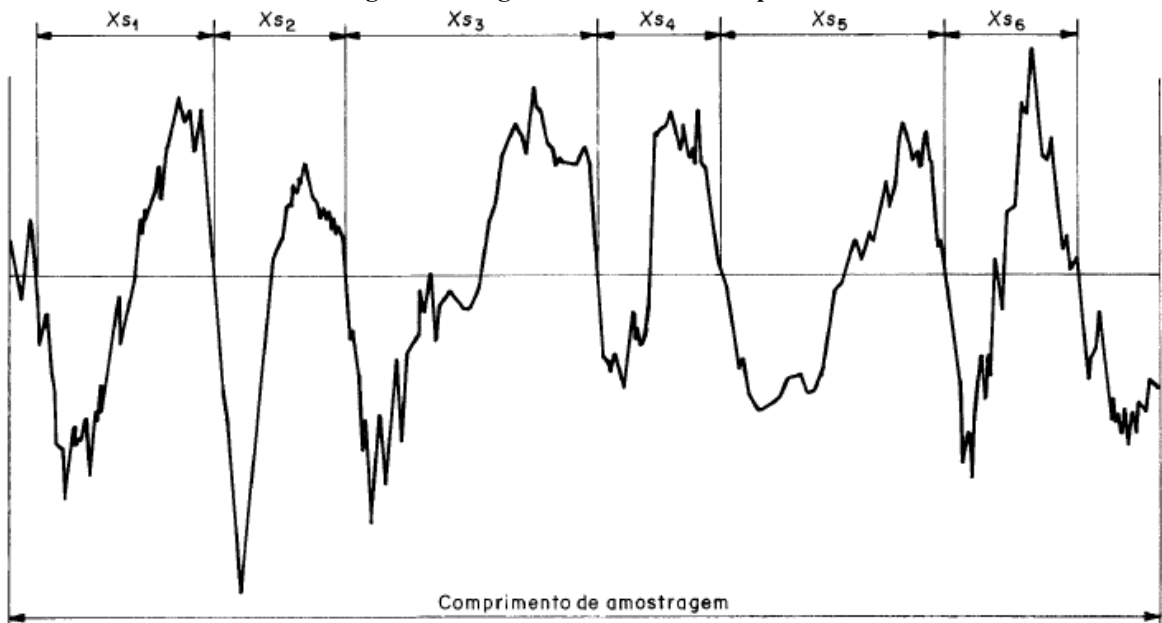
Figura 7: Altura máxima das irregularidades ( $R_{m\acute{a}x}$ ).



Fonte: Agostinho, Rodrigues e Lirani (1986).

A superfície do componente usinado pode ser avaliada por parâmetros de espaçamento entre os elementos do perfil, conforme Figura 8. Neste tipo de análise, é realizada a medição do valor médio da largura dos elementos do perfil ( $R_{sm}$ ) na superfície (NBR ISO 4287, 2002).

Figura 8: Largura dos elementos do perfil.



Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

### 2.5.2 Acabamento Superficial

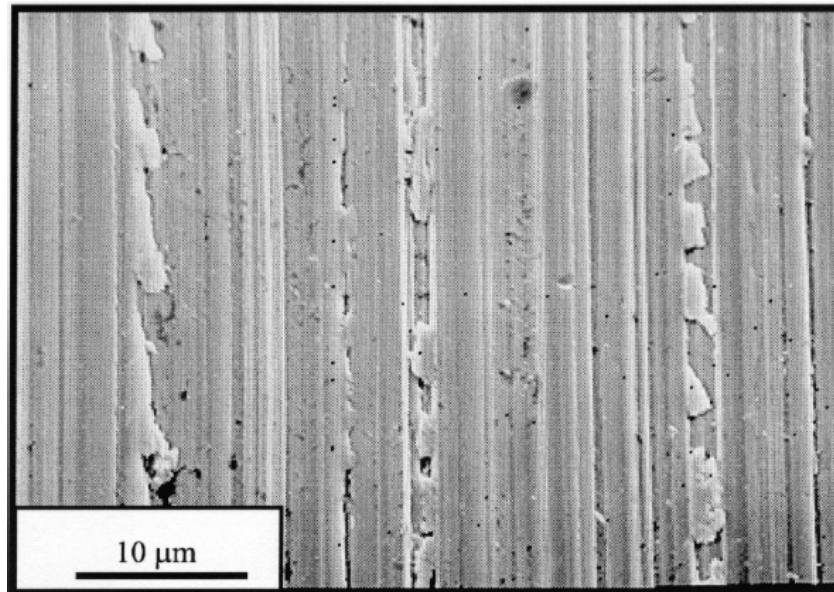
O acabamento superficial do item usinado depende muito da relação entre o raio da ponta da ferramenta e do avanço utilizado. O aumento do raio da ponta torna a ponta da ferramenta mais resistente, entretanto, devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato entre ferramenta e peça, aumenta também a vibração da ferramenta. Quando o objetivo é obter rugosidades menores, deve-se utilizar raios da ponta da ferramenta maiores, porém a vibração será maior devido ao atrito (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

No requisito de acabamento superficial da peça, o avanço e o raio de corte da ferramenta são amplamente reconhecidos como os principais parâmetros que afetam o acabamento superficial de componentes torneados (DAVIM, 2011).

O desvio entre o teórico e o real no acabamento superficial em processos de corte é muito dependente da velocidade de corte, devido a influência dos efeitos térmicos no evento primário de cisalhamento do material. O fluxo lateral de material durante a usinagem está associado a altas velocidades de corte, no entanto, descontinuidades como aresta postiça, fraturas e risco estão associadas a baixas velocidades de corte, sendo que ambos os casos são de interesse por se aplicarem na usinagem do material (FARIAS, 2009).

O fluxo lateral de material na superfície do componente usinado por torneamento duro é representado na Figura 9. Segundo Kishawy e Elbestawi (1999), nas suas investigações, esta superfície foi obtida utilizando uma ferramenta com desgaste, logo, as deformações plásticas não ocorreram somente ao longo do avanço, mais também entre os mesmos.

**Figura 9: Fluxo lateral de material no torneamento duro.**



**Fonte: Kishawy e Elbestawi (1999).**

As topografias geradas na superfície do componente usinado pelas operações de torneamento e retificação são diferentes, apesar de ambos os processos serem capazes de atingir os mesmos níveis de rugosidade (geralmente  $R_a=0,4\mu\text{m}$  e  $R_a=0,8\mu\text{m}$ ), desta forma promovendo diferentes comportamentos físicos da superfície usinada. Comparando a superfície usinada por torneamento e a superfície usinada por retificação, pode-se destacar que as principais vantagens do torneamento em relação à retificação são: topografia da superfície usinada menos propensa a nucleação e a propagação de trincas e melhores propriedades para retenção de lubrificantes (CAMPOS, 2015).

De acordo com Farias (2009), em todos os casos de rugosidade estudados em seu trabalho, o torneamento de material endurecido apresentou valores menores de rugosidade quando comparado ao processo de retificação.

## 2.6 Planejamento de Experimentos

O teste ou série de testes que induzem mudanças ou estímulos nas variáveis de entrada de um processo, de modo que seja possível observar e/ou identificar seus efeitos nas variáveis de saída ou respostas, é definido como experimento planejado. O objetivo básico da utilização de técnicas de planejamento e análise de experimentos é (CAMPOS, 2015; VIANA, 2014):

- Melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação;
- Reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa, tais como, material, tempo de mão de obra, de máquinas entre outros.

Em diversas áreas de conhecimento as técnicas do Projeto e Análise de Experimentos têm encontrado uma ampla aplicação, se mostrando como um conjunto de ferramentas importantes para o desenvolvimento de processos e produtos. Os benefícios principais que podem ser alcançados com a utilização das técnicas do DOE podem ser resumidos em (CAMPOS, 2015; VIANA, 2014):

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

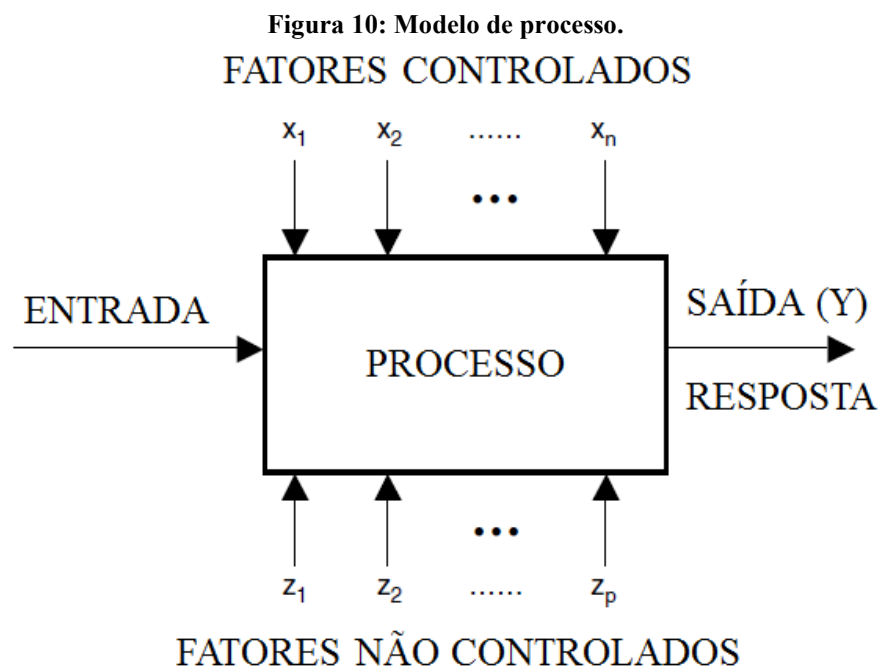
Na análise estatística o termo robustez é definido como à aplicação de um procedimento que resulta em dados satisfatórios, mesmo que algumas hipóteses pré-estabelecidas apresentem transgressão. Este fato pode ocorrer dentro do planejamento experimental, por meio das suposições definidas, pois mesmo que as escolhas não estejam exatamente corretas, ainda assim podem fornecer respostas robustas. Desta forma com o objetivo de estabelecer um bom planejamento é necessário deter um pré-conhecimento do assunto que será investigado e de como os dados devem ser coletados e analisados. O levantamento do maior número de informações sobre as variáveis de entrada também é essencial para obter uma ampla abordagem sobre o tema (MIRIM, 2011).

Segundo Montgomery (2013), a observação de um sistema ou processo durante o seu funcionamento, é uma parte importante da aprendizagem do processo, e é parte integrante da compressão do sistema, porém para compreender o que acontece ao processo quando é alterado determinados fatores de entrada, é necessário realmente fazê-lo e não somente observar, portanto para entender realmente a relação de causa e efeito em um sistema, é necessário alterar fatores de entrada e observar as mudanças que ocorrem na saída devido a

estas alterações, ou seja, é necessário realizar experiências no sistema. A observação de um processo pode levar às hipóteses e teorias de o que faz o sistema funcionar, entretanto, os experimentos são necessários para demonstrar se estas teorias estão corretas. A experimentação é caracterizada como uma parte vital do método científico e/ou das diversas aplicações de engenharia.

Ainda de acordo com Montgomery (2013), o projeto e análise de experimentos (DOE), refere-se ao processo de planejamento dos experimentos para que dados apropriados sejam coletados e analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. A análise estatística é necessária para tirar conclusões significativas a partir dos dados coletados, sendo que quando os dados coletados do problema estão sujeitos a erros experimentais, a única abordagem objetiva da análise são os métodos estatísticos. Deste modo, há dois aspectos para serem considerados para qualquer problema experimental: A análise estatística dos dados e o projeto dos experimentos.

O planejamento de experimentos (DOE) expressa uma equação algébrica da relação entre a resposta de interesse de um processo ou sistema com os fatores controlados do experimento e suas variações empíricas. O objetivo é obter para um determinado processo a relação de causa e efeito entre a resposta (Y) e os fatores controlados (X) (YANG e EL-HAIK, 2003). É ilustrado na Figura 10 um modelo de processo.



Fonte: Adaptado de Yang e El-Haik (2003).

Na utilização do DOE para análise dos experimentos, intencionalmente alteram-se os valores dos fatores controlados e analisam-se os seus efeitos na variável resposta (valores de saída). Os resultados obtidos serão utilizados para ajustar um modelo empírico que relaciona a saída (Y) com os fatores controlados (X) do experimento. Matematicamente o objetivo é a função de relacionamento conforme Equação 2 (PERINI, 2008).

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon \quad (2)$$

Onde o  $\varepsilon$  é designado como erro experimental ou variação experimental. Este  $\varepsilon$  é considerado, pois talvez não exista uma função de relacionamento exata entre os fatores de resposta Y e os fatores controlados ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ). Este fato ocorre devido aos fatores não controlados ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ ) que podem influenciar na resposta, porém não são considerados na equação (2). É necessário considerar também a existência de erros experimentais e de medição nos fatores controlados (X) e na saída (Y) (YANG e EL-HAIK, 2003).

Na análise de experimentos que envolvem dois ou mais fatores, o método de variar um fator e manter os demais fixos pode não ser adequado quando há a possibilidade de influência de uns fatores sobre outros. Desta forma, o mais adequado é a utilização de projetos fatoriais, nos quais todas as combinações possíveis entre fatores são analisados (MIRIM, 2011).

A mudança na resposta produzida devido à mudança no nível de um fator/variável controlado é definida como efeito de um fator e é comumente chamado de efeito principal por se tratar de fatores primários, entretanto em muitos casos, a mudança da resposta não é a mesma para todos os níveis dos outros fatores, neste caso existe uma interação entre fatores (MIRIM, 2011).

Segundo Montgomery (2013), para utilizar uma abordagem estatística no processo e análise de experimentos, todos os envolvidos necessariamente devem ter uma ideia clara do fenômeno que será estudado, do modo como os dados devem ser coletados e da forma como estes dados serão analisados. Desta forma, o autor propõe que para aumentar as chances de sucesso em um experimento, sejam observadas algumas etapas importantes (principais passos), conforme Quadro 2.

**Quadro 2: Passos para a condução de um experimento.**

Nº	Passos	Descrição
1	Conhecimento e definição do problema.	O experimentador deve ter o máximo de informações sobre o problema a ser analisado.
2	Escolha dos fatores e definição dos níveis de trabalho.	Devem ser determinados os fatores (entrada), bem como os níveis de estudo.  Neste passo, soma-se conhecimento prático e teórico por parte do observador.
3	Seleção das variáveis de resposta.	As respostas a serem analisadas devem prover informação suficiente para resolver o problema em questão.
4	Escolha do projeto experimental.	Caso os passos anteriores estejam corretos, este passo é relativamente simples.  Deve-se escolher o tipo de análise levando-se em consideração tempo, custo, dificuldades dos experimentos e objetivos pretendidos.
5	Execução dos experimentos.	Processo de coleta de dados. Deve-se tomar cuidados para se evitar erros experimentais.
6	Análise estatística dos dados.	Utilização de métodos estatísticos para análise dos resultados e conclusões.  Aconselha-se a utilização de <i>softwares</i> de apoio. Dois deles, bastante utilizados: <i>STATGRAPHICS</i> e <i>MINITAB</i> .
7	Conclusões e recomendações.	Conclusões através dos resultados obtidos e inferências estatísticas. Acompanhamentos e confirmações devem ser executados para validação dos resultados e conclusões.

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003).

Nos projetos de experimentos, as técnicas mais utilizadas, compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta (CAMPOS, 2015; VIANA, 2014). No Quadro 3

são descritas algumas das vantagens, desvantagens e aplicações com relação a cada uma das técnicas de projetos de experimentos mais utilizadas, desta forma contribuindo para escolha correta do tipo de técnica que será utilizado conforme necessidade do observador.

**Quadro 3: Características às principais técnicas do projeto e análise de experimentos.**

<b>Projeto experimental</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Fatorial Completo <math>2^k</math></b>	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.	Processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda maior tempo ou custo.
<b>Fatorial Fracionado <math>2^{(k-1)}</math></b>	Permite uma pré análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos onde se deseja um pré conhecimento e onde a literatura é limitada. Corridas que demandam maior tempo ou custo.
<b>Taguchi</b>	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornece uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo
<b>Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)</b>	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003).

Em experimentos industriais, no DOE são frequentemente utilizados dois ou mais fatores controlados ( $X$ ), e para cada um dos fatores são utilizados dois níveis. Este fato é denominado como experimento fatorial  $2^k$ , onde o expoente ( $k$ ) representa o número de fatores utilizados no experimento e o número “2” os dois níveis de intensidade que cada fator de ( $k$ ) pode assumir durante o experimento. A quantidade de experimentos necessários é determinada por estes dados (PERINI, 2008).

Neste trabalho foi utilizado para atingir os objetivos a técnica de projeto de experimentos do projeto fatorial completo (com 03 fatores e 02 níveis) com uma réplica, visando avaliar a influência dos parâmetros de usinagem  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  na rugosidade do corpo de prova de aço ABNT 52100 temperado e revenido com 58 – 62HRC (653 – 746HV) torneado sem fluido de refrigeração e utilizando inserto de material cerâmico.

## Capítulo 3

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Avaliar a influência dos parâmetros de usinagem ( $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$ ) do processo de torneamento na rugosidade do aço ABNT 52100 temperado e revenido com 58 – 62 HRC (653 – 746HV) é o objetivo principal deste trabalho. Utilizando a técnica de arranjo fatorial completo da ferramenta DOE, foi definido que seriam necessários 08 corpos de prova, com uma réplica, 16 amostras. Com o intuito de verificar se a rugosidade da peça segue “determinada” linearidade ou não, também foi definido a usinagem de quatro corpos de prova para análise do *center point*, totalizando 20 corpos de prova.

Neste trabalho foi utilizado um único passe durante o processo de torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, portanto todos os resultados analisados correspondem a um único ciclo de usinagem do corpo de prova.

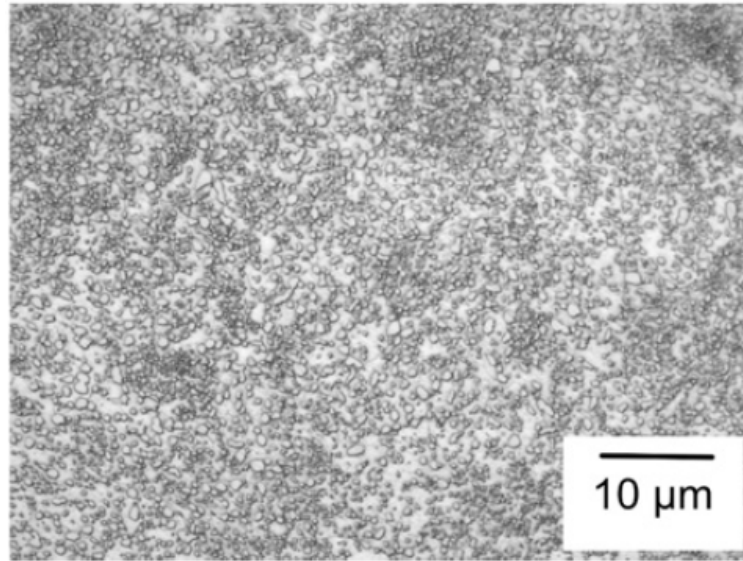
Todas as etapas e processos deste trabalho, com exceção do tratamento térmico de têmpera e revenimento dos 20 corpos de prova, foram realizados com equipamentos e materiais disponíveis nos laboratórios da UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

#### 3.1 Material

O aço ABNT 52100 utilizado neste trabalho foi recebido em barras redondas Ø2” (Ø50,8mm) e comprimento padrão de 6 metros.

Este material proveniente do processo de laminação à quente foi recebido com microestrutura esferoidizada, desta forma possibilitando sua utilização em usinagens, conformações e beneficiamentos diretamente, conforme recebido. É apresentada na Figura 11 uma microestrutura esferoidizada do aço ABNT 52100 após tratamento térmico de esferoidização.

**Figura 11: Microestrutura do aço ABNT 52100, após tratamento térmico de esferoidização.**



**Fonte: Bhadeshia (2012).**

## **3.2 Métodos**

Primeiramente, antes de qualquer intervenção no material, seja por processos de usinagem ou por beneficiamentos por tratamentos térmicos, foi realizado a análise da sua microestrutura. Após a primeira análise do material conforme recebido, iniciou-se os processos de beneficiamento, sendo que a microestrutura foi analisada a cada etapa do beneficiamento.

### **3.2.1 Análise Metalográfica**

Inicialmente, retirou-se uma pequena amostra da barra do aço ABNT 52100 com dimensões de aproximadamente Ø50,8mm por 10mm de espessura. Posteriormente foi utilizada a máquina de corte DISCOTOM para seccionar esta amostragem em pequenos cubos com dimensões de aproximadamente 10x10mm. Estes cubos (~10x10) foram embutidos em baquelite preta tipo MP 39 para embutimento à quente na máquina de embutimento AROTEC.

Finalizado o processo de embutimento das amostras, as mesmas foram lixadas utilizando lixas com granulometria iniciando em 220, 320, 400, 600 e 800 respectivamente, na

máquina de lixamento AROTEC, e posteriormente utilizou-se o abrasivo Alumina líquida ( $AL_2O_3$ ) na máquina poltriz STRUERS para polimento das amostras.

Nas amostras já polidas, utilizou-se o reagente NITAL 4% (4% de ácido nítrico e 96% de álcool etílico) para ataque.

A análise metalográfica das amostras, após todo o processo de preparação descrito anteriormente, foi realizada em microscópio óptico OLYMPUS modelo BX41M-LED com recurso para captura de imagens, conforme Figura 12.

**Figura 12: Microscópio óptico – OLYMPUS – BX41M-LED com recurso para captura de imagens.**



Após análise metalográfica, foi medida a microdureza do aço ABNT 52100 utilizando um aparelho digital de medir microdureza na escala Vickers, conforme Figura 13. A carga utilizada na medição da microdureza foi de 0,5kg (4,9N) por 15 segundos.

A cada etapa do processo de beneficiamento do material a microdureza foi verificada.

**Figura 13: Aparelho digital de medir microdureza Vickers.**



Antes de atuar diretamente no beneficiamento por tratamento térmico dos corpos de prova, foi utilizado um forno da marca JUNG com capacidade de até 1200°C para beneficiar pequenas amostras. Este beneficiamento foi necessário para verificar a microestrutura do material por análise metalográfica e medição da microdureza Vickers. Com os resultados encontrados, foi possível definir a roteiro de tratamentos térmicos que seria utilizado.

Todos os equipamentos utilizados para preparar e analisar o material por metalografia e também o forno da marca JUNG, estão localizados no Laboratório de Metalurgia e Materiais (LMM) do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM) da UNIFEI.

### **3.2.2 Beneficiamento do Material por Tratamentos Térmicos**

A análise metalográfica do aço ABNT 52100 demonstrou que o material foi recebido com uma microestrutura esferoidizada. Com base neste resultado iniciou-se a usinagem do CDP (corpo de prova) para processo de têmpera e revenimento.

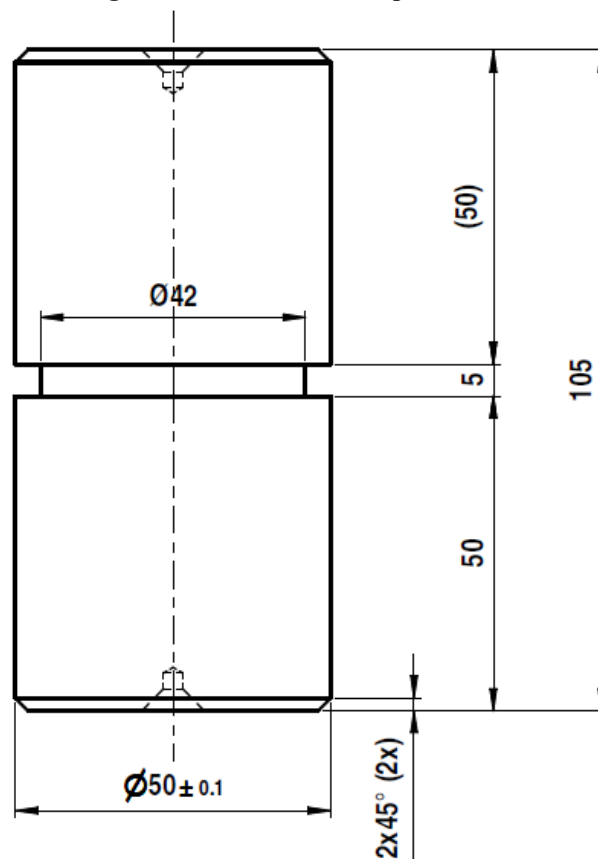
Na compra de qualquer tipo de material com exceção de casos específicos, são solicitadas dimensões brutas, que neste caso foi o diâmetro da barra de Ø50,8mm. Os

materiais que são solicitados em relação a dimensões brutas possuem variações dimensionais e desvios aceitáveis que são definidos pelos fabricantes do material.

A barra de aço ABNT 52100 com  $\varnothing 50,8\text{mm}$  foi cortada em peças com comprimento de 110mm para execução dos corpos de prova. Estas peças foram usinadas por torneamento utilizando os parâmetros  $V_c=800\text{m/min}$ ,  $f=0,35\text{mm/v}$  e  $a_p=0,4\text{mm}$ . Embora esta usinagem não faça parte do foco do objetivo principal deste trabalho, a mesma é necessária para garantir um dimensional específico para todos os corpos de prova antes dos processos de beneficiamento por tratamento térmico e usinagens seguintes. Portanto, por precaução, foi evitado a utilização de arestas de corte desgastadas, visando garantir a mesma condição de usinagem de todos os corpos de prova (CDP).

O desenho utilizado para usinagem do corpo de prova é representado na Figura 14. O canal de  $\varnothing 42 \times 5\text{mm}$  usinado no centro do CDP foi realizado somente para saída da ferramenta durante a usinagem do material já temperado e revenido.

Figura 14: Desenho do Corpo de Prova.



Finalizado a usinagem preliminar do material, o mesmo já considerado como corpo de prova, foi beneficiado por tratamento térmico de têmpera e revenimento com o objetivo de atingir a dureza na faixa de 58 – 62 HRC (653 – 746HV).

### 3.2.3 Processo de Usinagem

Inicialmente, foi definido um processo de usinagem para trabalhar com aço ABNT 52100 na faixa de dureza de 62 – 66 HRC (746 – 865HV). Nesta etapa foram definidos os insertos que seriam utilizados e também o suporte necessário para fixação destes insertos no torno. Posteriormente verificou-se na UNIFEI há existência de insertos novos código CNGA 120408 S01525 – CC6050 que poderiam ser utilizados nesta usinagem, porém conforme catálogo do fabricante de ferramentas Sandvik (2010) estes tipos de insertos são utilizados para tornear materiais com dureza de aproximadamente 60HRC (697HV). Partindo deste princípio, ficou definido que seriam utilizados os insertos já disponíveis e que a dureza do material para análise seria de 58 – 62 HRC (653 – 746HV).

O código do suporte dos insertos (porta ferramentas), foi definido considerando o tipo de inserto que seria utilizado, o tipo de material usinado e a possibilidade de medição dos esforços de corte na usinagem.

No torneamento do corpo de prova já endurecido, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Torno CNC Nardini Logic 175, com potência máxima de eixo de 7,5 CV, rotação máxima de 4000 rpm, torre com oito posições e torque máximo de 200 Nm;
- Porta ferramenta haste quadrada código: DCLNR 2525M 12, fixação rígida, geometria negativa e ângulo de posição  $X_r = 95^\circ$ ;
- Inseto de cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ), recoberta com TiN, rômbo 80° código: CNGA 120408 S01525, classe Sandvik CC6050.

O Torno CNC Nardini utilizado para usinagem dos corpos de prova do aço ABNT 52100 endurecido é ilustrado na Figura 15.

**Figura 15: Torno CNC Nardini Logic 175.**



Com base na dureza do material e no inserto, os catálogos do fornecedor Sandvik foram consultados para definição dos parâmetros de usinagem.

O catálogo do fornecedor contém limites mínimos e máximos indicados para cada parâmetro de usinagem. Neste trabalho foram utilizados parâmetros de usinagem dentro dos limites mínimos e máximos indicados pelo fabricante de ferramentas com o objetivo de possibilitar posteriormente a análise da influência destes parâmetros na rugosidade final do corpo de prova.

Os parâmetros utilizados para usinagem dos CDP do aço ABNT 52100 endurecido são descritos no Quadro 4.

**Quadro 4: Limites inferior e superior dos parâmetros de usinagem dos corpos de prova (SANDVIK, 2010; SANDVIK, 2015).**

Parâmetros de Usinagem		
Parâmetros	Limite Inferior	Limite Superior
V <sub>c</sub> (m/min)	105	170
f (mm/volta)	0,05	0,13
a <sub>p</sub> (mm)	0,2	0,4

Na definição da quantidade de corpos de prova necessários para este estudo foram observados 03 fatores (parâmetros de usinagem) e para cada um destes fatores foram

observados dois níveis (limite inferior e superior) que estão dentro da faixa de valores dos limites mínimo e máximo determinados nos catálogos Sandvik (2010) e Sandvik (2015).

Neste experimento, para usinagem de cada um dos corpos de prova foi utilizado uma aresta do inserto, visando eliminar a influência do desgaste da ferramenta nesta análise. Após a usinagem, cada corpo de prova, assim como, a aresta do inserto que foi utilizada para sua usinagem foram devidamente identificados. Esta identificação permitiu a análise da superfície de saída e da aresta de corte da ferramenta em relação à superfície dos corpos de prova no microscópio eletrônico de varredura – MEV.

Neste estudo foram utilizados os limites inferiores (-), limites superiores (+) e *center point* (0) que é a média entre o limite inferior e superior para os fatores  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$ .

Utilizando o *software MINITAB* foi desenvolvido o Quadro 5, no qual é mostrado os parâmetros de usinagem em termos de limites inferiores, superiores e *center points*. Neste quadro também é representado a quantidade total de amostras disponibilizadas de forma aleatória pelo próprio *MINITAB*. Esta aleatoriedade foi seguida durante o torneamento.

**Quadro 5: Número do experimento e nível do parâmetro de usinagem no torneamento.**

Experimentos	Parâmetros de Usinagem		
	Nº	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/volta)
1	-	-	-
2	-	+	+
3	+	+	-
4	-	+	-
5	0	0	0
6	-	+	+
7	+	+	+
8	-	-	-
9	0	0	0
10	+	-	+
11	+	-	+
12	+	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	+	+	-
16	+	-	-
17	-	+	-
18	-	-	+
19	+	-	-
20	-	-	+

A medição e análise dos esforços de corte durante a usinagem dos corpos de prova foi realizada utilizando um dinamômetro piezoelétrico estacionário *Kystler 9257BA* com três canais, um amplificador de sinais *Kystler 5233A* e com o *software Dynoware*, também fornecido pela *Kystler*.

Após o torneamento de todos os corpos de prova, foi realizada a medição e análise da rugosidade utilizando um rugosímetro Mitutoyo *Surftest SJ-210P* e com o *software Surftest SJ-210 Serial Communication 2.00*, fornecido pela Mitutoyo. Com este equipamento e *software* pode ser realizada a medição da rugosidade nos parâmetros  $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  e  $R_{sm}$ , sendo que neste trabalho analisou-se somente os parâmetros  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_{sm}$ .

Todos os equipamentos utilizados no torneamento, análise e medição dos esforços de corte e da rugosidade, estão localizados no Laboratório de Automação da Manufatura (LAM) do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG) da UNIFEI.

Finalizado a medição e análise da rugosidade, todas as arestas de corte e superfície de saída dos insertos foram analisadas no modo ES e ERE no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) marca Zeiss modelo EVOMA15 localizado no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM) da UNIFEI. O MEV utilizado nas análises deste trabalho é ilustrado na Figura 16.

**Figura 16: Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV.**



O MEV também foi utilizado para análise de 03 corpos de prova considerando o parâmetro de usinagem avanço ( $f$ ) nos limites mínimo, máximo e um *center point*.

## Capítulo 4

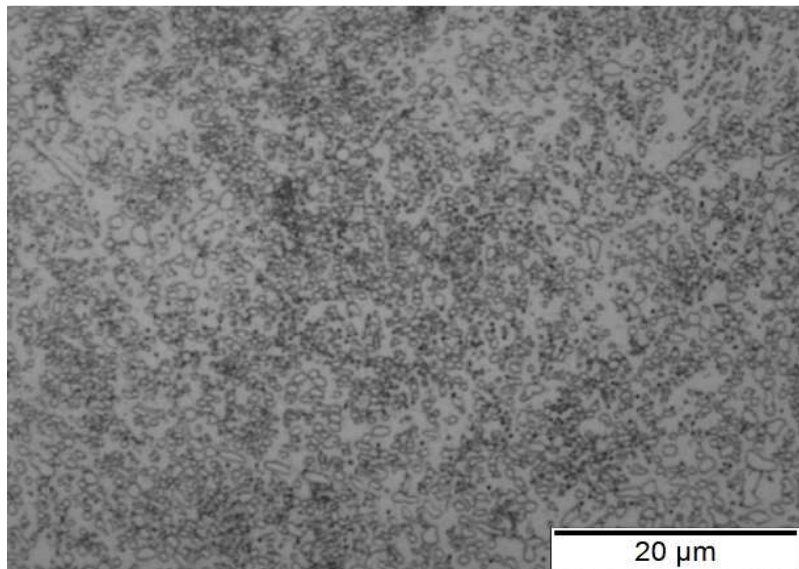
# RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Microestrutura do Aço ABNT 52100

Na análise da microestrutura do aço ABNT 52100 conforme recebido utilizou-se amplificação de 1000x. Em Asm Handbook (2004), é relatado que para evidenciar a solução completa de carbonetos antes do endurecimento deste aço, muitas vezes é necessário utilizar esta amplificação.

É exibido na Figura 17 a microestrutura de carbonetos esferoidizados em uma matriz de ferrita do aço ABNT 52100 conforme recebido. Microestrutura semelhante foi verificada por Bhadeshia (2012) e Stickels (1974) em suas análises.

**Figura 17: Microestrutura do aço ABNT 52100 conforme recebido (amplificação 1000x).**



A diferença entre a microestrutura que o material foi entregue e a microestrutura esperada devido ao processo de laminação à quente demonstra a importância da análise metalográfica do material conforme recebido, antes do início de qualquer estudo e/ou etapa de beneficiamento seja por tratamento térmico ou por processos de fabricação.

A análise da microdureza do material conforme recebido foi realizada com medição de 05 indentações e obtiveram-se valores entre 199,5HV e 207HV, sendo que o valor médio foi aproximadamente 204HV (Dureza Vickers). Esta dureza esta dentro dos padrões esperados para este material quando fornecido com microestrutura esferoidizada (BHADESHIA, 2012; VILLARES METALS, 2005).

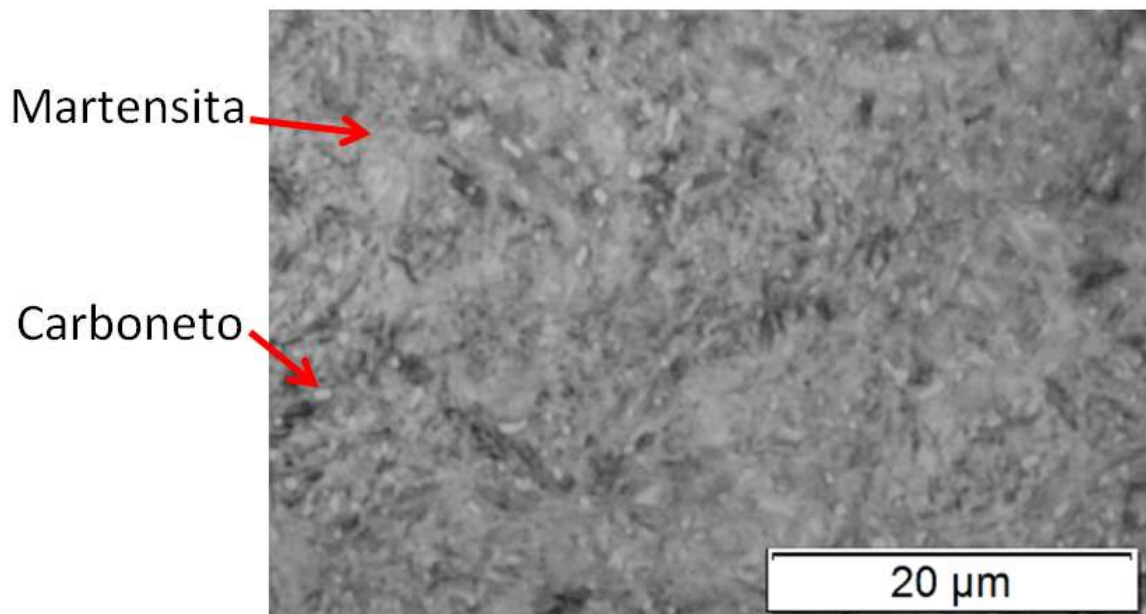
Uma vez que o aço ABNT 52100 recebido apresentou uma microestrutura proveniente de um processo de esferoidização, foi possível realizar o tratamento térmico de têmpera e revenimento diretamente, dispensando a necessidade de normalização ou recozimento conforme esperado inicialmente.

Finalizado o tratamento térmico de têmpera e revenimento todos os corpos de prova foram entregues com uma dureza dentro dos requisitos necessários para realização deste trabalho, ou seja, todos estavam com dureza de 58 à 62HRC (653 – 746HV).

A microestrutura do aço ABNT 52100 após o processo de beneficiamento por tratamento térmico de têmpera é ilustrada na Figura 18. Nesta condição o material apresentou dureza entre 62 e 63 HRC (746 a 772HV).

Na microestrutura do material após processo de têmpera, foi possível identificar martensita e também há homogeneidade na distribuição dos carbonetos.

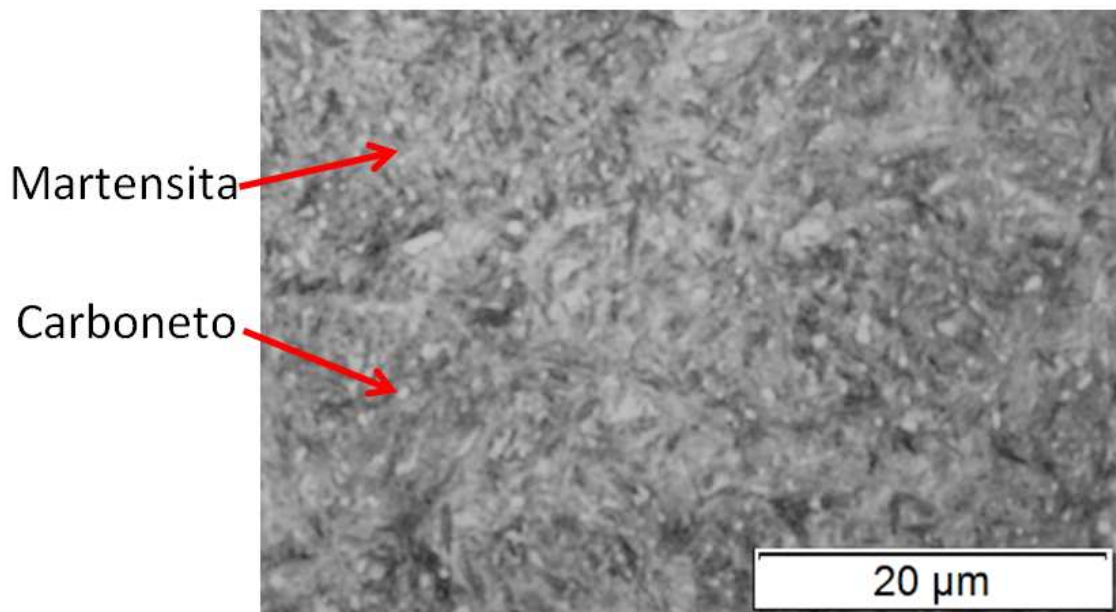
**Figura 18: Microestrutura do aço ABNT 52100, temperado, amplificação 1000x.**



É exibido na Figura 19 a microestrutura do aço ABNT 52100 após o processo de beneficiamento por tratamento térmico de têmpera e revenimento. Nesta condição o material apresentou dureza dentro da faixa desejada entre 58 – 62 HRC (653 – 746HV).

Na microestrutura do material revenido, também foi possível identificar martensita, entretanto observou-se martensita mais grosseira que na microestrutura do material somente temperado, este fato ocorre devido ao processo de revenimento do material. No material temperado e revenido, também foi possível observar há homogeneidade na distribuição dos carbonetos na microestrutura.

**Figura 19: Microestrutura do aço ABNT 52100, temperado e revenido, amplificação 1000x.**



## 4.2 Torneamento dos Corpos de Prova

No torneamento dos corpos de prova com dureza de 58 – 62 HRC (653 – 746HV) sem a utilização de fluidos de refrigeração não houve quebras de ferramentas, danos aos corpos de prova e nenhum tipo específico de ocorrência danosa.

O torneamento de um dos corpos de prova e a direção dos esforços de corte  $F_x$  e  $F_y$  atuantes no mesmo é ilustrado na Figura 20. A vista isométrica do corpo de prova que identifica a direção das forças  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  que foram analisadas durante o torneamento, é visualizada na Figura 21. Com os resultados encontrados na análise dos esforços de corte, foi possível verificar a influência da variação dos parâmetros de usinagem nas forças atuantes sobre o corpo de prova.

Figura 20: Forças  $F_x$  e  $F_y$  no torneamento.

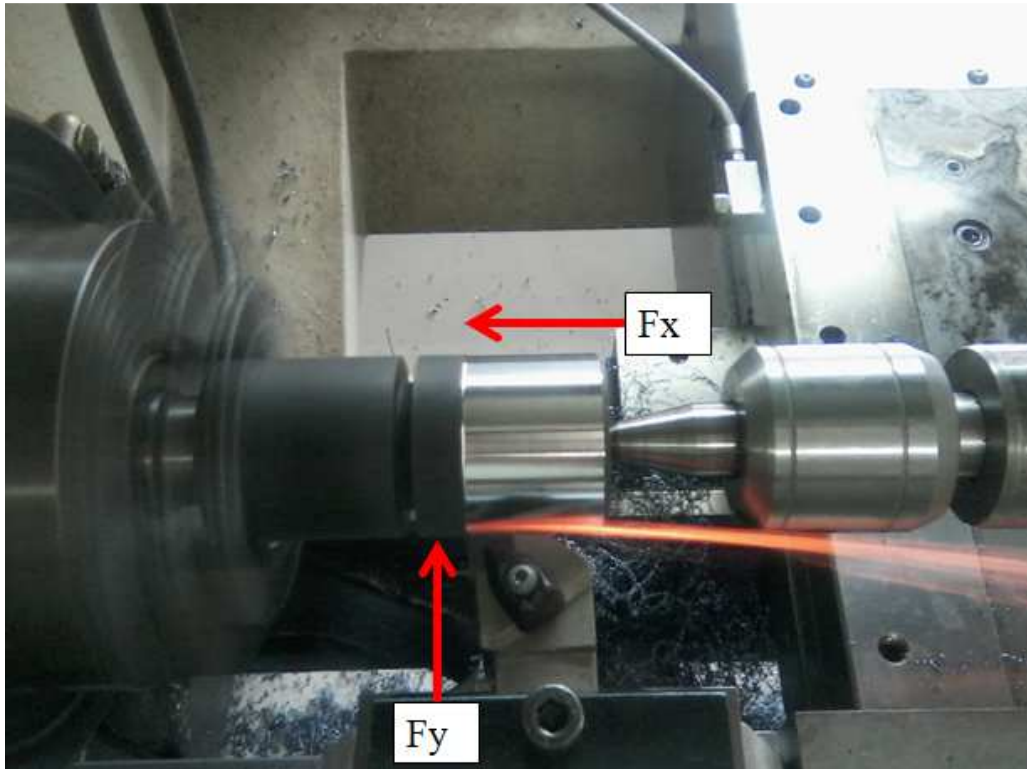
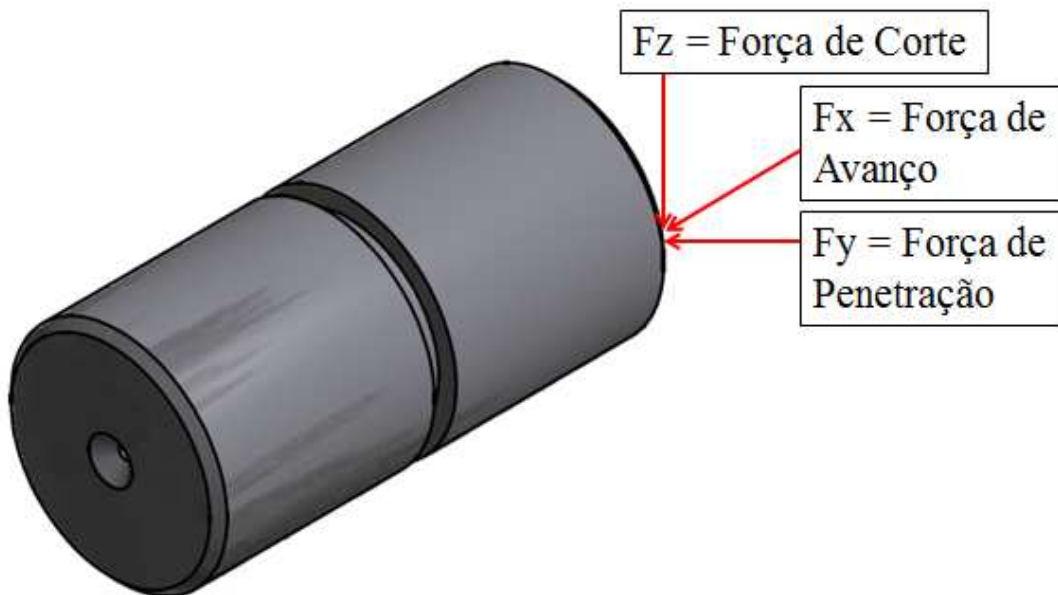


Figura 21: Forças  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  atuantes no corpo de prova no torneamento.



Com o objetivo de avaliar o acabamento superficial do material ABNT 52100 endurecido com 58 – 62 HRC (653 – 746HV) após a usinagem por torneamento sem a utilização de refrigeração, a rugosidade de cada corpo de prova foi medida em quatro pontos defasados em aproximadamente  $90^\circ$ . Durante a medição da rugosidade, não foram

encontrados valores de rugosidade Ra superiores a  $0,80\mu\text{m}$ , portanto com as condições utilizadas neste trabalho foi possível através do torneamento obter peças com acabamento superficial Ra semelhantes aos padrões encontrados no processo de retificação, eliminando a necessidade de retificar a peça posteriormente.

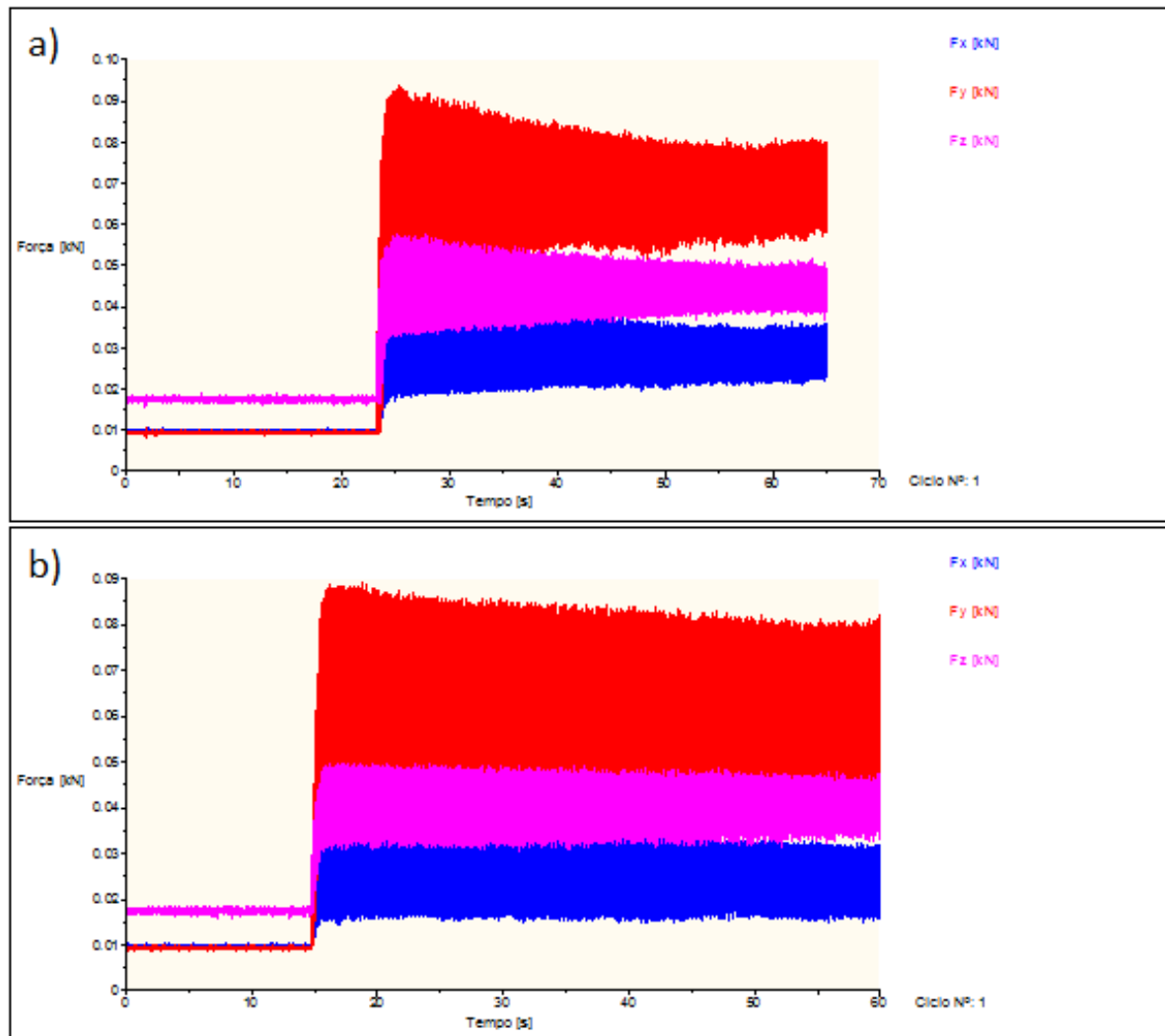
Os valores dos parâmetros de usinagem utilizados no torneamento de cada corpo de prova e os respectivos valores médios obtidos em rugosidade (Ra e Rt) e forças (Fx, Fy e Fz) são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1: Parâmetros de usinagem, resultados em rugosidade e forças de usinagem.**

Experimentos	Parâmetros de Usinagem			Resultados em Rugosidade		Resultados em Forças de Usinagem		
	Nº	Vc (m/min)	f (mm/volta)	ap (mm)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	Fx (N)	Fy (N)
1	105	0,05	0,2	0,30	3,21	30	70	40
2	105	0,13	0,4	0,47	3,96	90	170	140
3	170	0,13	0,2	0,79	3,45	40	110	80
4	105	0,13	0,2	0,75	3,61	60	130	100
5	137,5	0,09	0,3	0,30	2,81	70	130	100
6	105	0,13	0,4	0,66	5,03	90	160	140
7	170	0,13	0,4	0,78	3,41	100	160	140
8	105	0,05	0,2	0,34	2,19	20	60	40
9	137,5	0,09	0,3	0,31	2,88	70	130	100
10	170	0,05	0,4	0,25	2,33	60	110	70
11	170	0,05	0,4	0,22	1,87	70	120	80
12	170	0,13	0,4	0,74	3,90	110	170	150
13	137,5	0,09	0,3	0,43	2,59	70	130	100
14	137,5	0,09	0,3	0,44	2,79	70	130	90
15	170	0,13	0,2	0,67	3,55	40	110	80
16	170	0,05	0,2	0,25	1,96	40	90	60
17	105	0,13	0,2	0,67	5,85	60	130	90
18	105	0,05	0,4	0,26	2,29	80	120	90
19	170	0,05	0,2	0,17	1,31	30	70	40
20	105	0,05	0,4	0,30	2,62	80	120	90

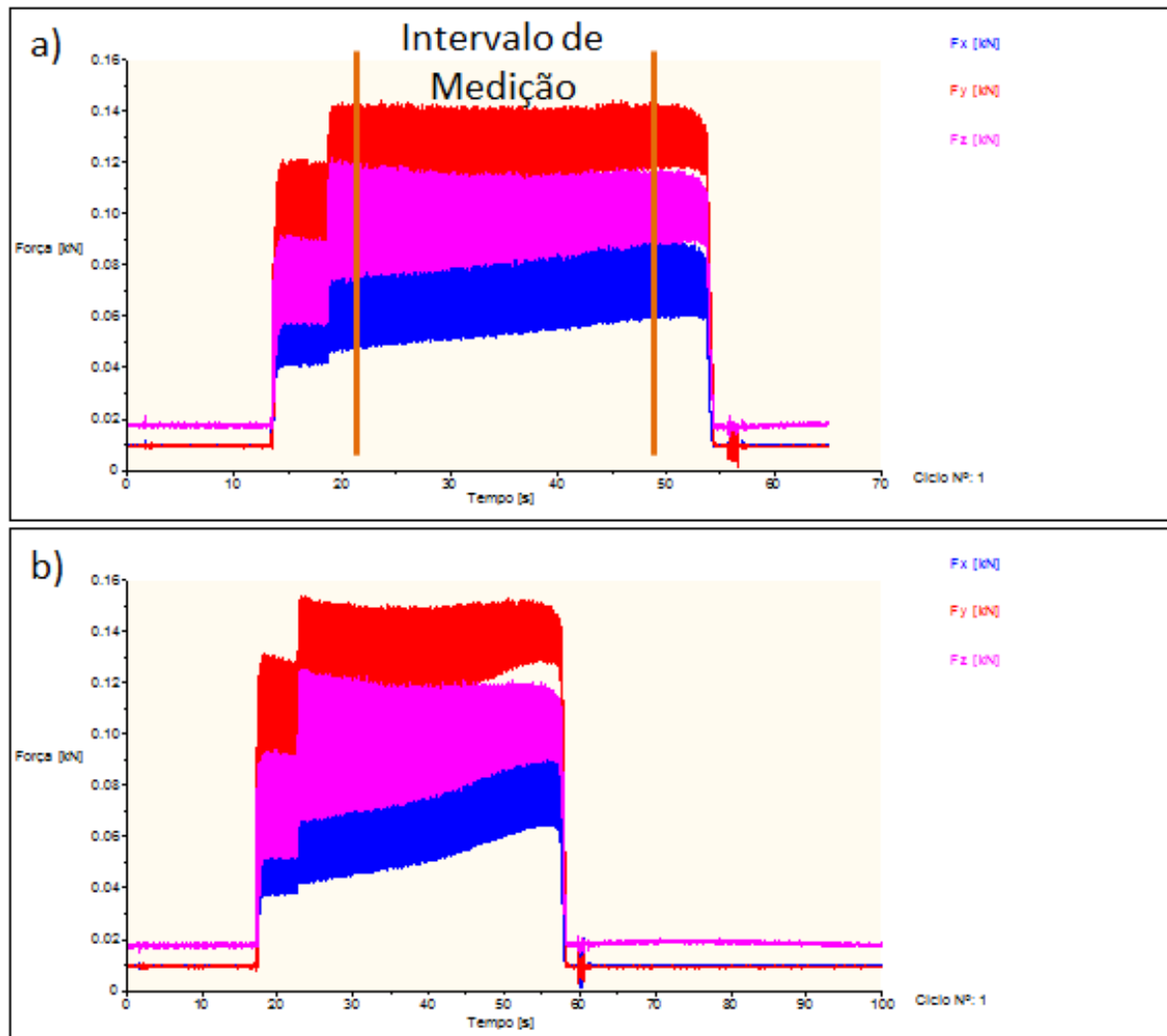
Na Figura 22 e Figura 23 são mostrados os esforços de corte atuantes nos corpos de prova durante o torneamento. Na Figura 22a e Figura 23a são visualizadas as forças durante a usinagem da primeira peça e na Figura 22b e Figura 23b os esforços de corte atuantes na usinagem das réplicas. Nestas figuras foi possível verificar que as forças atuantes na peça e na réplica seguem valores próximos. A unidade de medida dos esforços de corte destes gráficos estão na escala de quilo newton ( $\text{kN}=10^3 \text{ N}$ ) e o tempo analisado em segundos (s). Os valores obtidos dos esforços de corte Fx, Fy e Fz estão dentro da faixa de valores encontrados por outros autores durante a usinagem de aços endurecidos.

Figura 22: Gráfico dos esforços de corte da usinagem.



Na Figura 23a e Figura 23b pode-se observar o deslocamento da ferramenta até o corpo de prova (aproximadamente no intervalo de tempo de 0 à 15s); o início da usinagem com todos os parâmetros nos limites inferiores para evitar a entrada brusca da ferramenta no corpo de prova (aproximadamente no intervalo de tempo de 15 a 20s), no qual foi possível verificar o aumento brusco dos esforços de corte; a usinagem do corpo de prova conforme parâmetros desejados (aproximadamente no intervalo de tempo de 20 a 55s), no qual foi realizada a medição dos esforços de corte e, finalmente, a saída da ferramenta do corpo de prova. Nesta figura é demarcado o intervalo de medição que foi considerado para obter as médias dos esforços de corte atuantes durante o torneamento.

Figura 23: Gráfico dos esforços de corte da usinagem do *center point*.



Na análise dos esforços de corte, a força de penetração foi maior que a força de corte, que foi maior que a força de avanço ( $F_y > F_z > F_x$ ), em todos os corpos de prova. Outros autores apresentam em suas investigações na usinagem de aços endurecidos, esta mesma ordem de grandeza.

### 4.3 Projeto de Experimentos – DOE

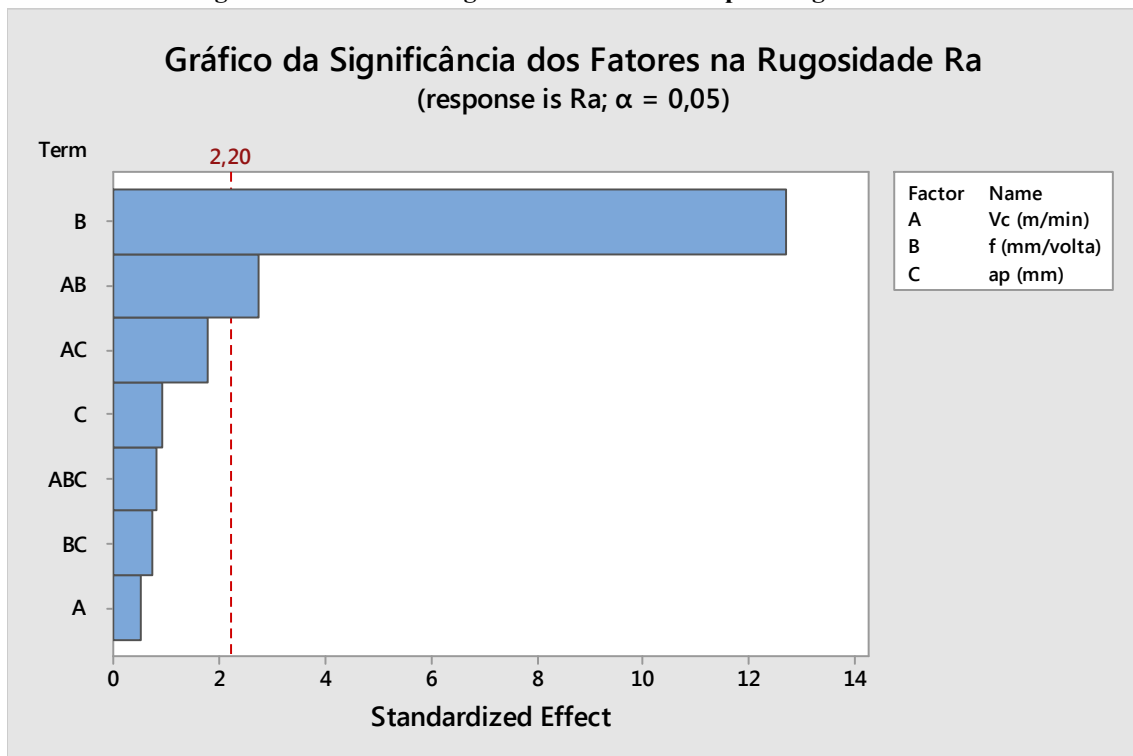
Uma vez que foram obtidas respostas para a variação dos fatores de entrada  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$ , foi utilizado o *software MINITAB* para análise da influência deste fatores nas respostas encontradas, através do DOE utilizando a técnica do arranjo fatorial completo.

### 4.3.1 DOE – Rugosidade Ra

Na Figura 24, Figura 25 e Figura 26 são mostrados a importância dos fatores controlados de entrada  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  e da interação dos mesmos na rugosidade  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) obtida como resposta. A significância dos fatores analisados na resposta encontrada é ilustrada na Figura 24. A escala deste gráfico é gerada automaticamente pelo *software MINITAB* e representa o efeito do fator ou da interação dos fatores sobre a resposta. Fatores que ultrapassam a linha de corte gerada automaticamente pelo *MINITAB* representam nesta análise um intervalo de confiança acima de 95%, ou seja, o fator ou a interação dos fatores que ultrapassam a linha de corte de valor 2,2 calculado automaticamente pelo *MINITAB* tem significância inferior a 5% na resposta.

Conforme Figura 24, o avanço ( $f$ ) foi o fator de entrada com maior influência na rugosidade  $R_a$  e também a interação entre o avanço e a velocidade de corte. Os demais fatores e interações entre fatores também influenciaram na rugosidade  $R_a$ , entretanto, sua significância foi superior a 5%.

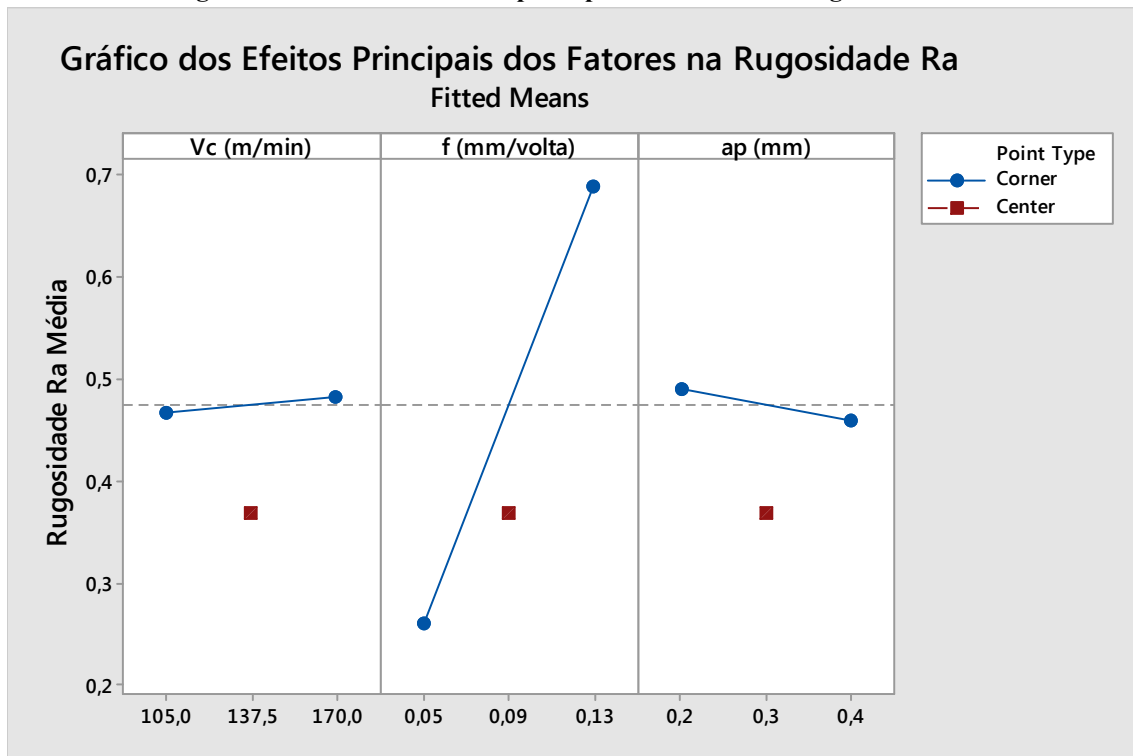
Figura 24: Gráfico da significância dos fatores para rugosidade  $R_a$ .



Na Figura 25 a rugosidade  $R_a$  foi analisada com relação a cada fator isolado. Nesta figura observou-se que o aumento do avanço tende a aumentar significativamente a

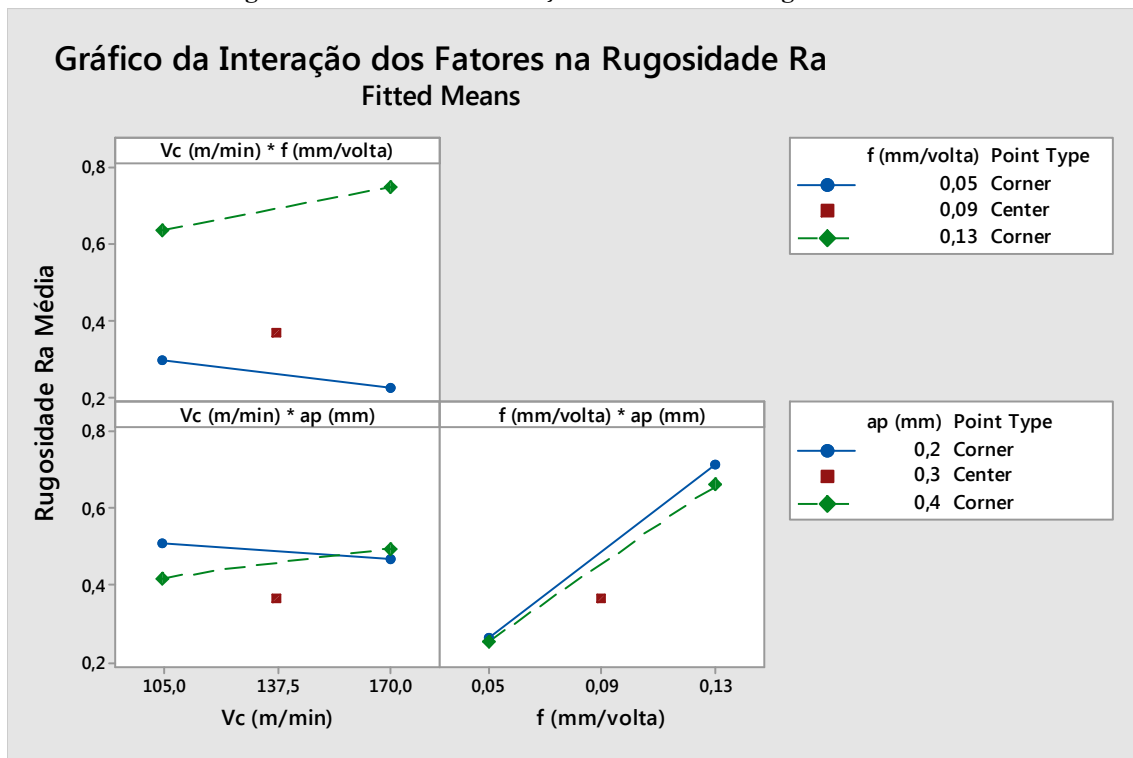
rugosidade do material. A velocidade de corte e a profundidade de corte também influenciaram na rugosidade, porém não significativamente. Um fator que deve ser considerado durante esta análise foi que os *center points* não acompanham a taxa de variação dos fatores de entrada, portanto não foi possível afirmar que há uma “determinada” linearidade entre variação dos fatores de entrada e a rugosidade Ra.

Figura 25: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na rugosidade Ra.



O efeito da interação entre fatores de entrada foi visualizado na Figura 26, na qual ao analisar a interação entre a velocidade de corte e avanço verifica-se que o aumento da velocidade de corte utilizando o avanço no limite superior tende a aumentar a rugosidade Ra na superfície da peça, ao passo que, ao aumentar a velocidade de corte utilizando o avanço no limite inferior, a tendência é diminuir a rugosidade Ra da peça. A interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte demonstra que o aumento da velocidade de corte para a profundidade de corte no limite superior tende a aumentar a rugosidade Ra da peça e o aumento da velocidade de corte com a profundidade de corte no limite inferior, tende a diminuir a rugosidade da peça. A terceira interação referente ao avanço e a profundidade de corte, demonstra que o aumento do avanço utilizando à profundidade de corte no limite superior ou inferior, tende a aumentar a rugosidade da peça.

Figura 26: Gráfico da interação dos fatores na rugosidade Ra.

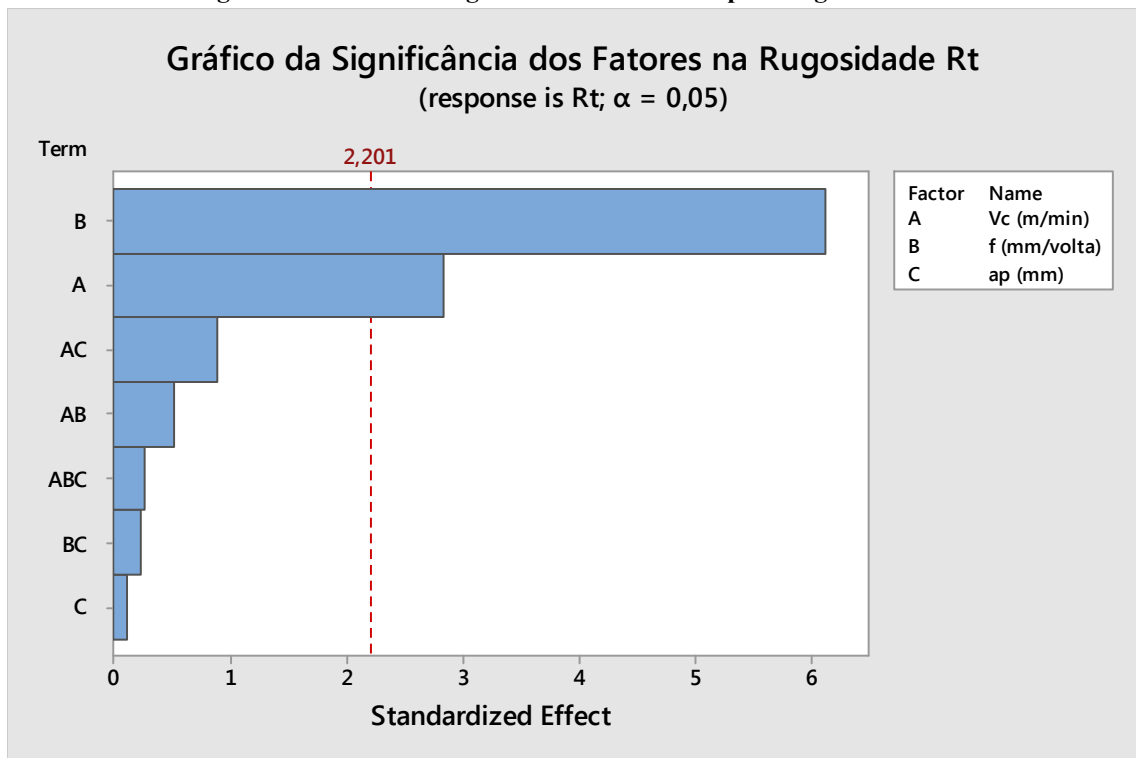


### 4.3.2 DOE – Rugosidade Rt

Na Figura 27, Figura 28 e Figura 29 são mostrados a importância dos fatores controlados  $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  e da interação dos mesmos na rugosidade  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ ) obtida como resposta. Assim como na Figura 24, a escala da Figura 27 é gerada automaticamente pelo *software MINITAB* e representa o efeito do fator ou da interação dos fatores sobre a resposta. O fator ou a interação dos fatores que ultrapassam a linha de corte de valor 2,201 calculado automaticamente pelo *MINITAB* tem significância inferior a 5% na resposta.

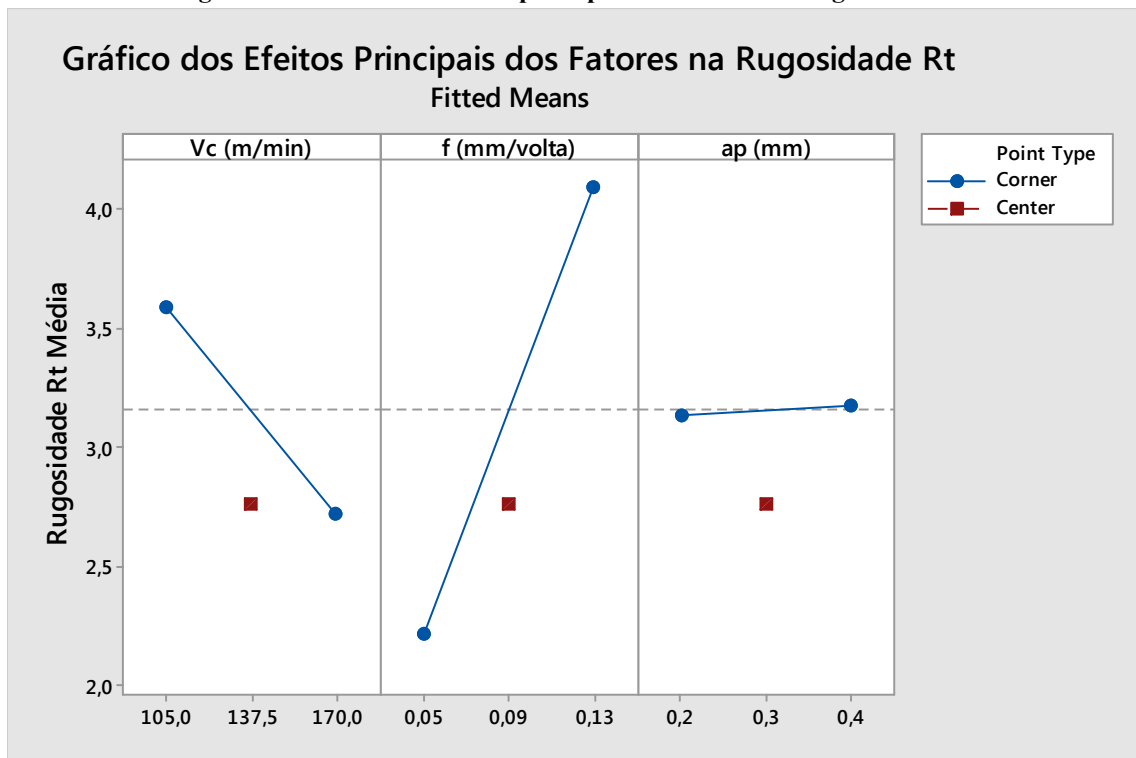
Conforme Figura 27, o avanço ( $f$ ) foi o fator de entrada com maior influência na rugosidade  $R_t$  e também a velocidade de corte ( $V_c$ ). Os demais fatores e interações entre fatores também influenciaram na rugosidade  $R_t$ , entretanto, sua significância na resposta foi superior a 5%.

Figura 27: Gráfico da significância dos fatores para rugosidade Rt.



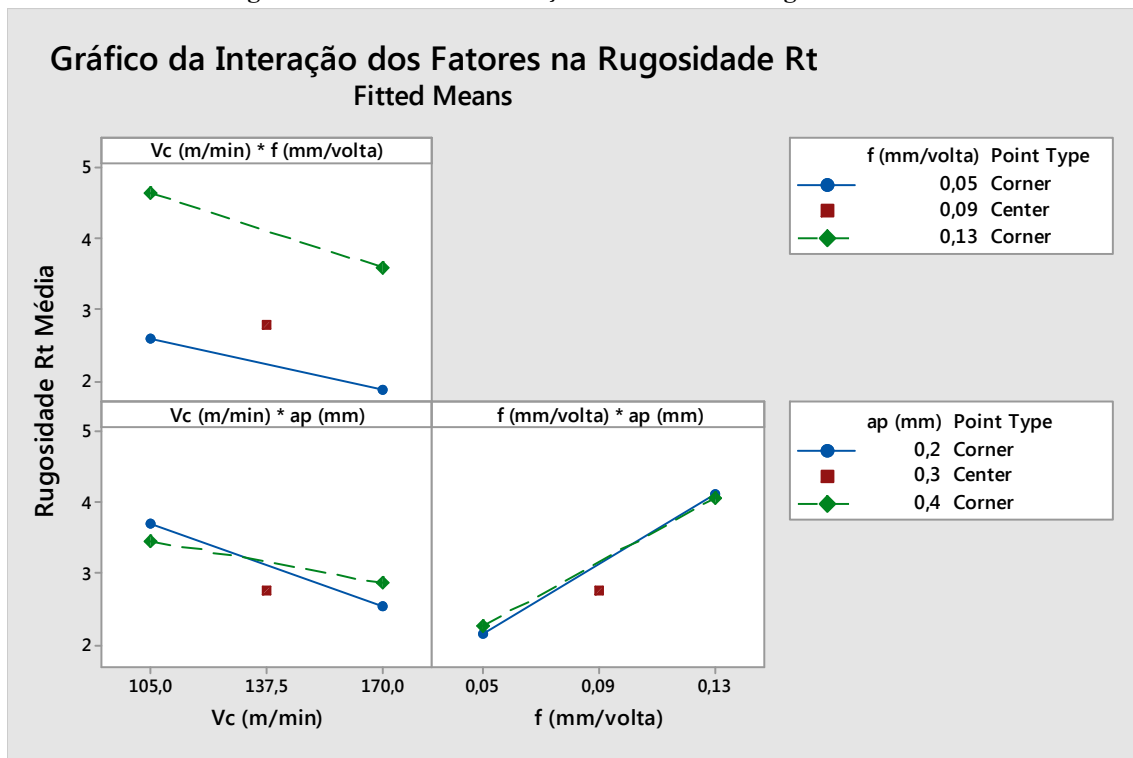
Na Figura 28 a rugosidade Rt foi analisada com relação a cada fator isolado. Nesta figura observou-se que o aumento do avanço tende a aumentar significativamente a rugosidade Rt do material. A velocidade de corte foi um fator que também tem grande influência na rugosidade obtida, sendo que o aumento da velocidade de corte tende a diminuir significativamente a rugosidade Rt. A profundidade de corte também influenciou na rugosidade, porém não significativamente. Um fator que deve ser considerado durante esta análise foi que os *center points* novamente não acompanham a taxa de variação dos fatores de entrada, portanto não foi possível afirmar que há uma “determinada” linearidade entre variação dos fatores de entrada e a rugosidade Rt.

Figura 28: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na rugosidade Rt.



O efeito da interação entre fatores de entrada foi visualizado na Figura 29, na qual ao analisar a interação entre a velocidade de corte e o avanço verifica-se que com o aumento da velocidade de corte utilizando o avanço no limite superior ou inferior, a tendência foi diminuir o valor da rugosidade Rt na superfície da peça. A interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte demonstra que o aumento da velocidade de corte utilizando a profundidade de corte no limite superior ou inferior, a tendência também foi diminuir a rugosidade. Na terceira interação referente ao avanço e a profundidade de corte o aumento do avanço utilizando a profundidade de corte no limite superior ou inferior, a tendência foi aumentar a rugosidade. Nesta análise, somente na interação entre o avanço e a profundidade de corte foi mostrada uma tendência de aumento da rugosidade Rt.

Figura 29: Gráfico da interação dos fatores na rugosidade Rt.

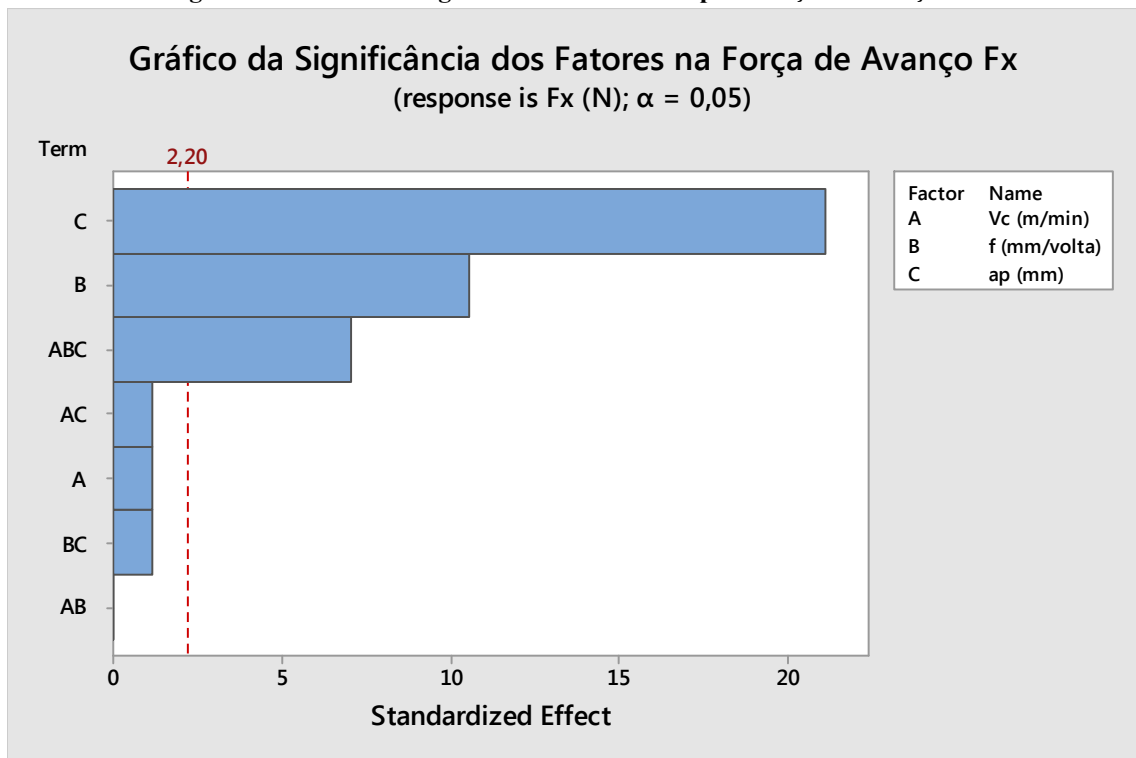


### 4.3.3 DOE – Força de avanço Fx

Na Figura 30, Figura 31 e Figura 32, são mostrados a importância dos fatores controlados Vc, f, ap e da interação dos mesmos na força de avanço Fx (N) obtida como resposta. A escala da Figura 30 foi gerada automaticamente pelo *software MINITAB* e representa o efeito do fator ou da interação dos fatores sobre a resposta. O fator ou a interação dos fatores que ultrapassam a linha de corte de valor 2,20 calculado automaticamente pelo *MINITAB* tem significância inferior a 5% na resposta.

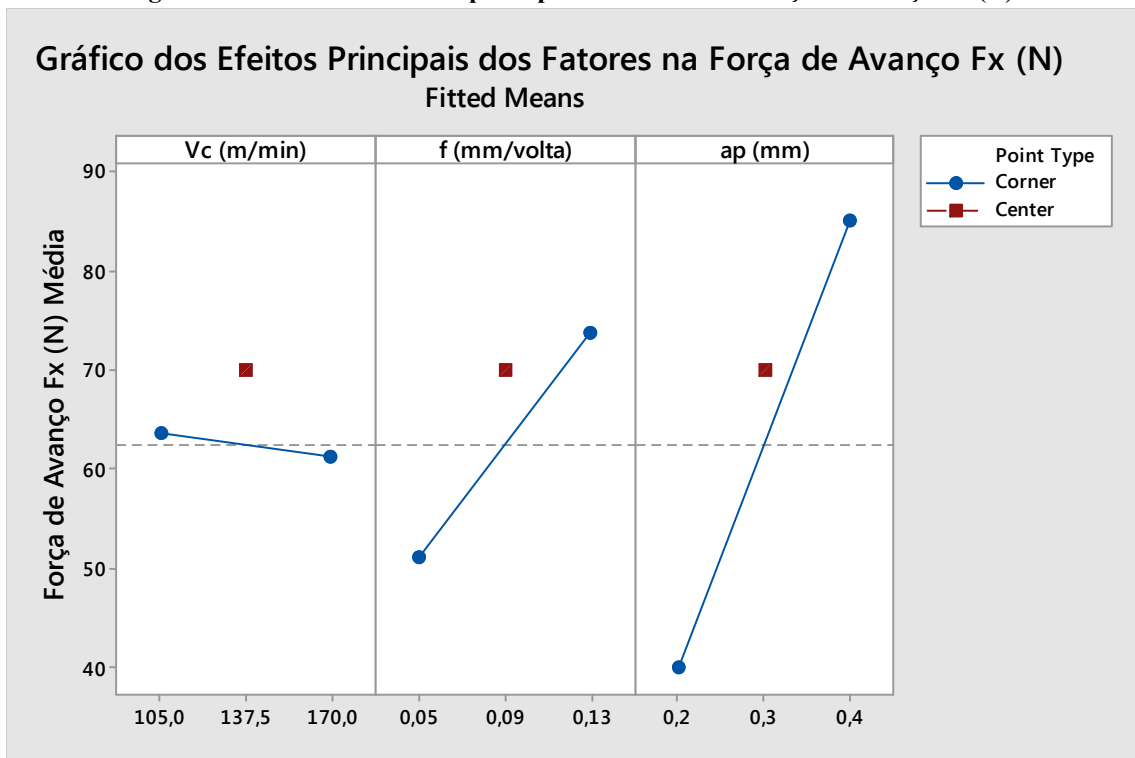
Conforme Figura 30, a profundidade de corte foi o fator de entrada com maior influência na força de avanço Fx. O avanço e a interação entre os três fatores também são significativos. Os demais fatores e interações entre fatores também influenciaram na força de avanço Fx, entretanto, sua significância na resposta foi superior a 5%.

Figura 30: Gráfico da significância dos fatores para força de avanço Fx.



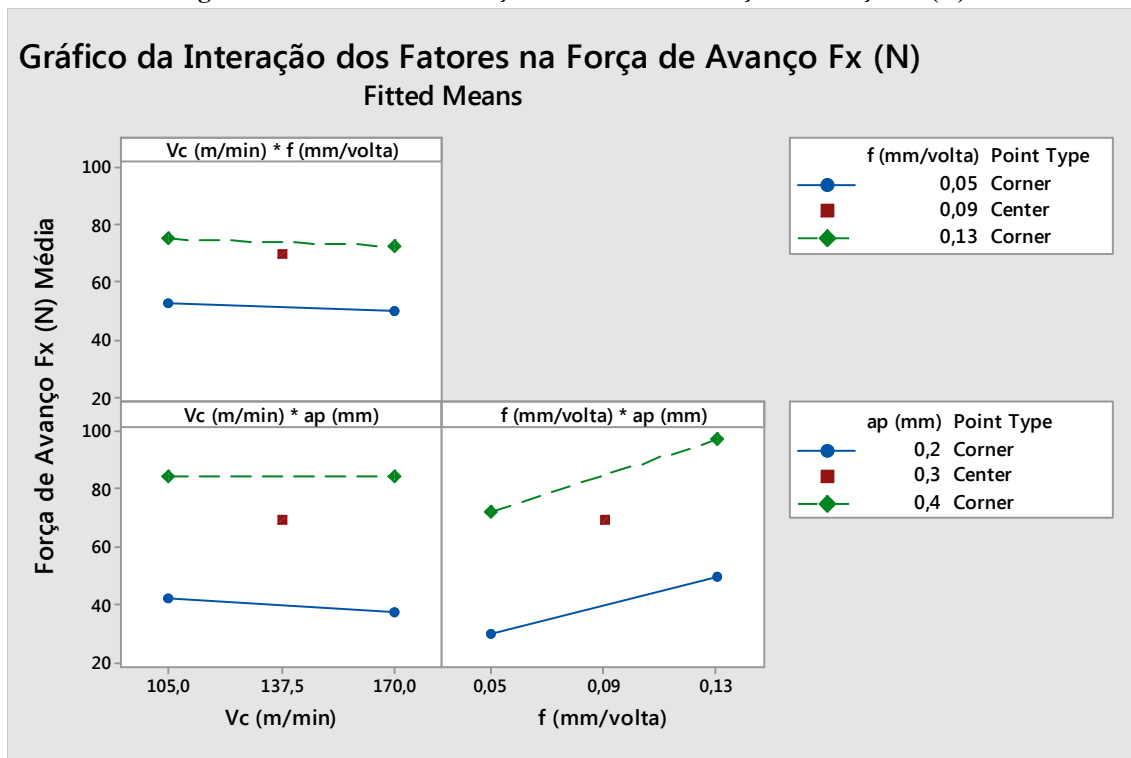
Na Figura 31 a força de avanço Fx foi analisada com relação a cada fator isolado. Nesta figura observou-se que o aumento da profundidade de corte tende a aumentar significativamente a força de avanço Fx durante a usinagem do material. O avanço foi um fator que também tem grande influência na força de avanço, sendo que o aumento do avanço também tende a aumentar significativamente a força de avanço. A velocidade de corte também influenciou na força de avanço, porém não significativamente. Um fator que deve ser considerado durante esta análise foi que os *center points* novamente não acompanham a taxa de variação dos fatores de entrada, portanto neste caso também não foi possível afirmar que há uma “determinada” linearidade entre variação dos fatores de entrada e a força de avanço Fx.

Figura 31: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na força de avanço  $F_x$  (N).



O efeito da interação entre fatores de entrada foi visualizado na Figura 32, na qual ao analisar a interação entre a velocidade de corte e o avanço verifica-se que com o aumento da velocidade de corte utilizando o avanço no limite superior ou inferior, a tendência foi diminuir o valor da força de avanço durante a usinagem da peça. A interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte demonstra que o aumento da velocidade de corte utilizando a profundidade de corte no limite superior obteve uma força de avanço praticamente constante, no entanto, o aumento da velocidade de corte e utilizando a profundidade de corte no limite inferior, ocorreu uma pequena tendência em diminuir a força de avanço. Na terceira interação referente ao avanço e a profundidade de corte o aumento do avanço utilizando a profundidade de corte no limite superior ou inferior, a tendência foi aumentar a força de avanço  $F_x$ . Somente na interação entre o avanço e profundidade de corte que a tendência foi aumentar a força de avanço.

Figura 32: Gráfico da interação dos fatores na força de avanço  $F_x$  (N).

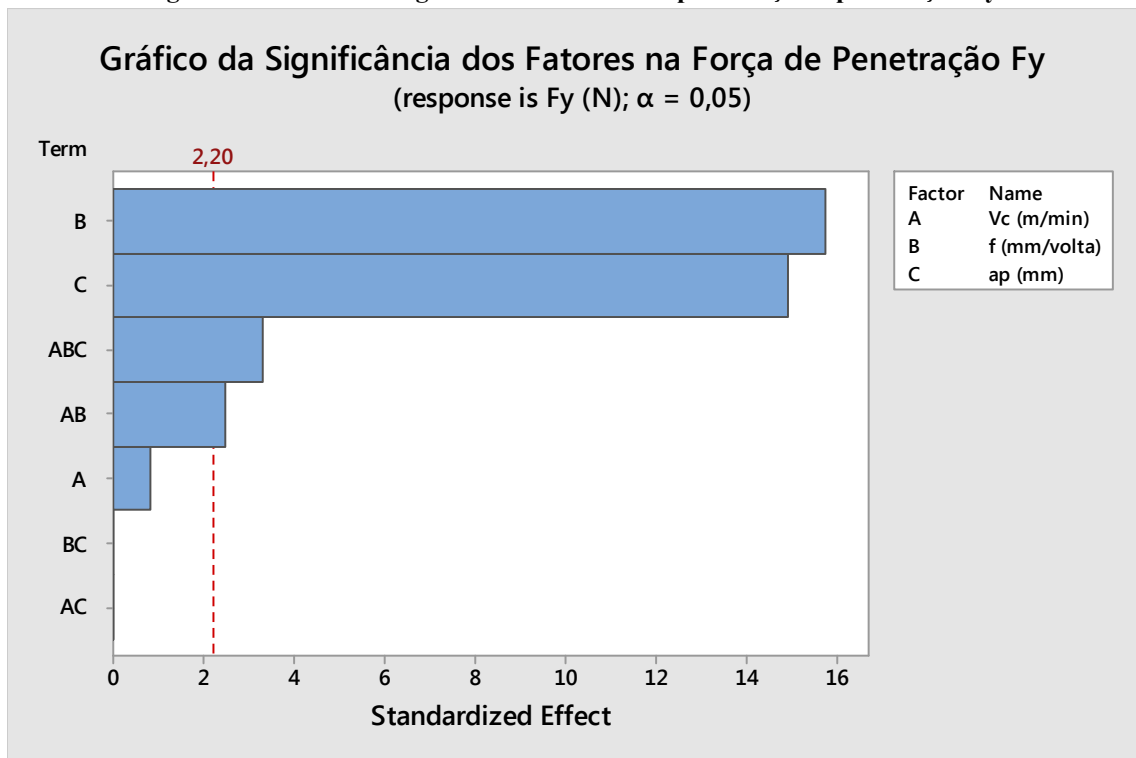


#### 4.3.4 DOE – Força de penetração $F_y$

Na Figura 33, Figura 34 e Figura 35, são mostrados a importância dos fatores controlados  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  ou da interação dos mesmos na força de penetração  $F_y$  (N) obtida como resposta. O fator ou a interação dos fatores que ultrapassam a linha de corte de valor 2,20 calculado automaticamente pelo *MINITAB* tem significância inferior a 5% na resposta.

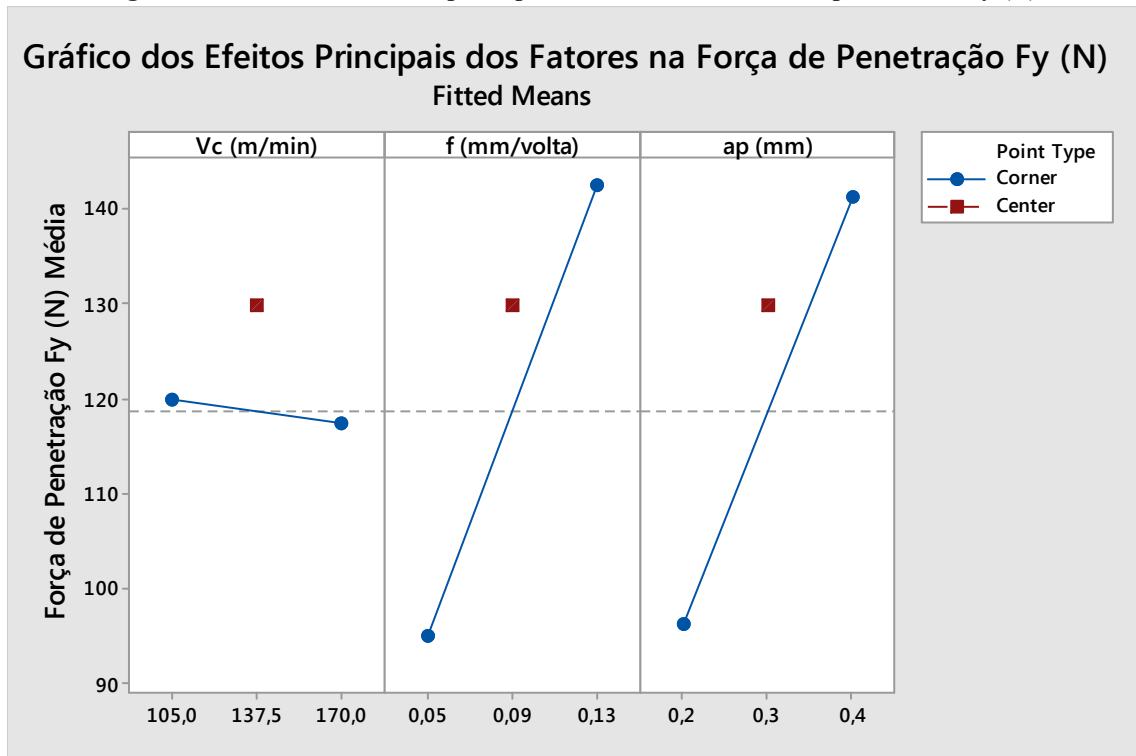
Conforme Figura 33, o avanço foi o fator de entrada com maior influência na força de penetração. A profundidade de corte, a interação entre os três fatores e a interação entre velocidade de corte e avanço também são significativas. Os demais fatores e interações entre fatores também influenciaram na força de penetração, entretanto, sua significância na resposta foi superior a 5%.

Figura 33: Gráfico da significância dos fatores para força de penetração  $F_y$ .



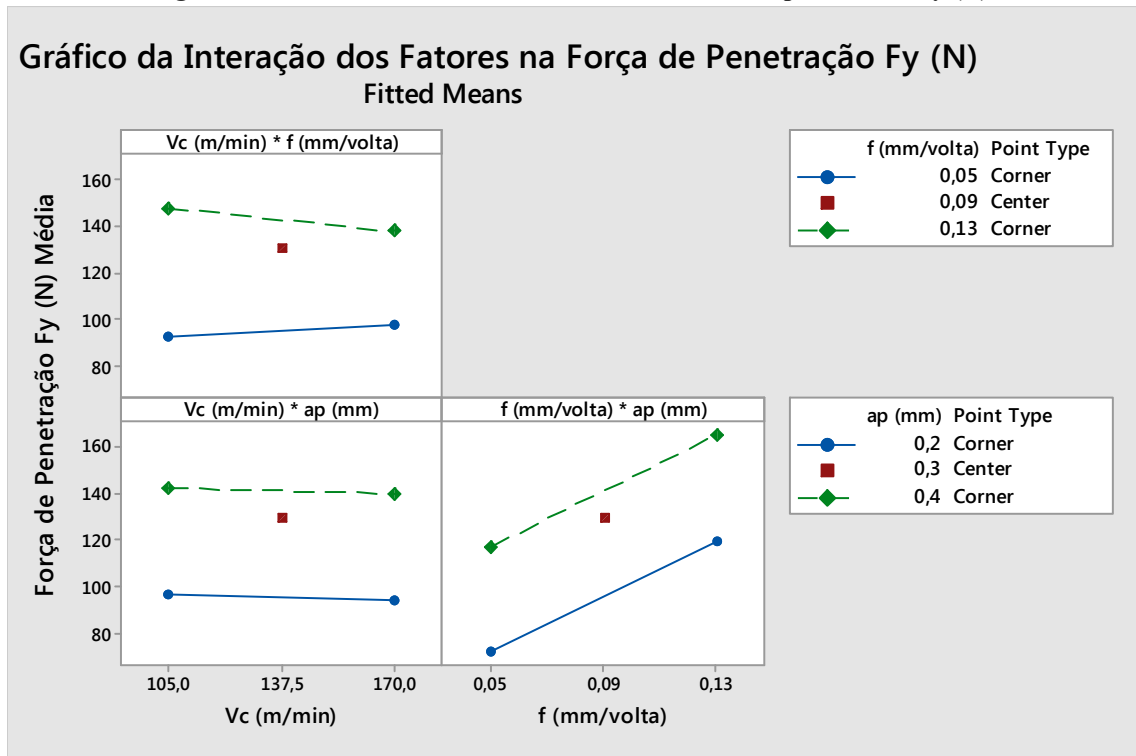
Na Figura 34 a força de penetração foi analisada com relação a cada fator isolado. Nesta figura observou-se que o aumento do avanço tende a aumentar significativamente a força de penetração durante a usinagem do material. A profundidade de corte foi um fator que também tem grande influência na força de penetração, sendo que o aumento da profundidade de corte também tende a aumentar significativamente a força de penetração. A velocidade de corte também influenciou na força de penetração, porém não significativamente. Um fator que deve ser considerado durante esta análise foi que os *center points* novamente não acompanham a taxa de variação dos fatores de entrada, portanto neste caso também não foi possível afirmar que há uma “determinada” linearidade entre a variação dos fatores de entrada e a força de penetração.

Figura 34: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na força de penetração  $F_y$  (N).



O efeito da interação entre fatores de entrada foi visualizado na Figura 35, na qual ao analisar a interação entre a velocidade de corte e o avanço verifica-se que com o aumento da velocidade de corte utilizando o avanço no limite superior a tendência foi diminuir o valor da força de penetração durante a usinagem da peça, porém utilizando o limite inferior a tendência da força de penetração é aumentar. A interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte mostra que o aumento da velocidade de corte utilizando à profundidade de corte no limite superior ou inferior a tendência foi diminuir a força de penetração. Na terceira interação referente ao avanço e a profundidade de corte o aumento do avanço utilizando à profundidade de corte no limite superior ou inferior a tendência foi aumentar a força de penetração.

Figura 35: Gráfico da interação dos fatores na força de penetração  $F_y$  (N).

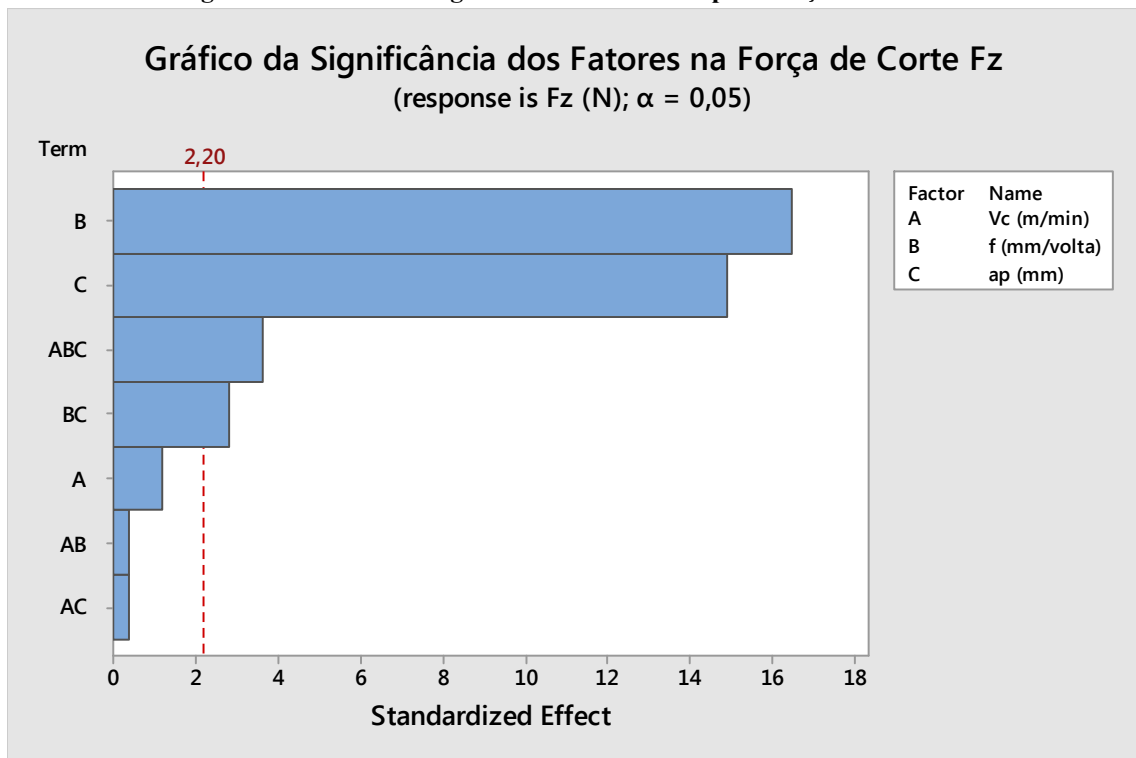


#### 4.3.5 DOE – Força de corte $F_z$

Na Figura 36, Figura 37 e Figura 38, são mostrados a importância dos fatores controlados  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  ou da interação dos mesmos na força de corte obtida como resposta. O fator ou a interação dos fatores que ultrapassam a linha de corte de valor 2,20 calculado automaticamente pelo *MINITAB* tem significância inferior a 5% na resposta.

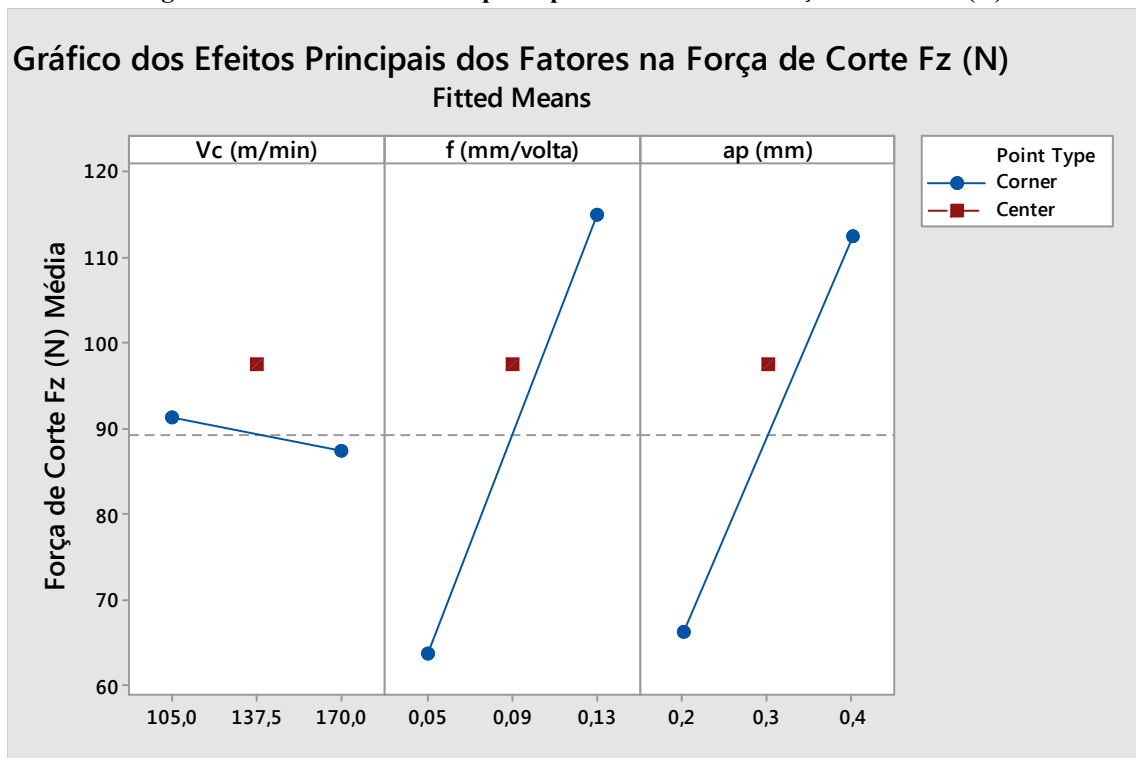
Conforme Figura 36, o avanço foi o fator de entrada com maior influência na força de corte. A profundidade de corte, interação entre os três fatores e a interação entre o avanço e a profundidade de corte também são significativos. Os demais fatores e interações entre fatores também influenciaram na força de corte, entretanto, sua significância na resposta foi superior a 5%.

Figura 36: Gráfico da significância dos fatores para força de corte Fz.



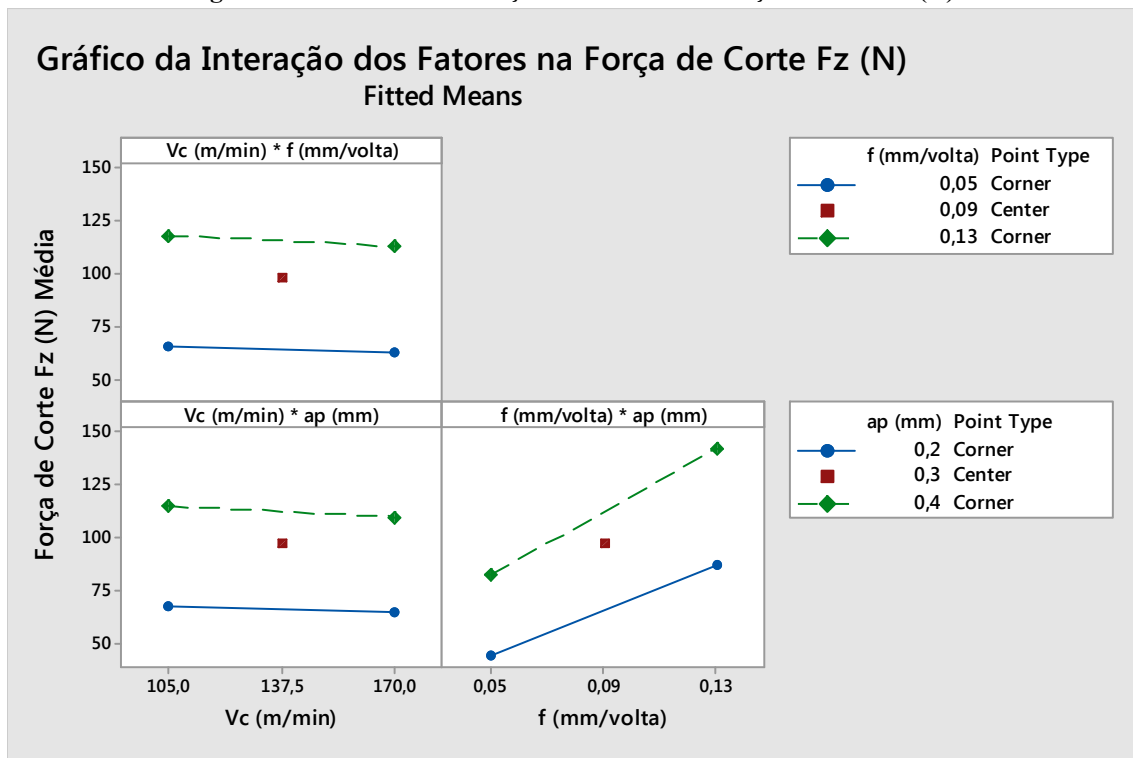
Na Figura 37 a força de corte foi analisada com relação a cada fator isolado. Nesta figura observou-se que o aumento do avanço tende a aumentar significativamente a força de corte durante a usinagem do material. A profundidade de corte foi um fator que também tem grande influência na força de corte, sendo que o aumento da profundidade de corte também tende a aumentar significativamente a força de corte. A velocidade de corte também influenciou na força de corte, porém não significativamente. Um fator que deve ser considerado durante esta análise foi que os *center points* novamente não acompanham a taxa de variação dos fatores de entrada, portanto, neste caso assim como em todos os casos anteriores, também não foi possível afirmar que há uma “determinada” linearidade entre a variação dos fatores de entrada e a força de corte.

Figura 37: Gráfico dos efeitos principais dos fatores na força de corte  $F_z$  (N).



O efeito da interação entre fatores de entrada foi visualizado na Figura 38, na qual ao analisar a interação entre a velocidade de corte e o avanço verifica-se que com o aumento da velocidade de corte utilizando o avanço no limite superior ou inferior a tendência foi diminuir o valor da força de corte durante a usinagem da peça. A interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte mostra que o aumento da velocidade de corte utilizando à profundidade de corte no limite superior ou inferior a tendência foi diminuir a força de corte  $F_z$ . Na terceira interação referente ao avanço e profundidade de corte o aumento do avanço utilizando à profundidade de corte no limite superior ou inferior a tendência foi aumentar a força de corte. Somente na interação entre o avanço e a profundidade de corte foi que a tendência foi aumentar a força de corte.

Figura 38: Gráfico da interação dos fatores na força de corte Fz (N).



Os dados analisados para estes experimentos apresentaram um alto percentual de confiabilidade. A única variável de resposta que obteve um menor percentual de confiabilidade foi a rugosidade Rt.

É apresentado na Tabela 2 o grau de ajuste dos modelos para os resultados obtidos com a variação dos parâmetros de usinagem. Com exceção da rugosidade Rt os demais fatores estão acima de 90%. O menor grau de ajuste para a rugosidade Rt pode ocorrer devido a este tipo de rugosidade ser determinado pela diferença entre o menor vale e o maior pico no comprimento de medição analisado.

Tabela 2: Grau de ajuste dos modelos para as respostas analisadas.

Respostas Analisadas	R-sq (adj)
Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )	90,17%
Rugosidade Rt ( $\mu\text{m}$ )	67,77%
Força de Avanço Fx (N)	96,99%
Força de Penetração Fy (N)	96,28%
Força de Corte Fz (N)	96,43%

A análise da influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade (Ra e Rt) e nos esforços de corte (Fx, Fy e Fz) resultou nos seguintes modelos matemáticos:

– Modelo Matemático para rugosidade Ra – Equação 3:

$$Ra = 0,349 - 0,00286*Vc + 5,73*f + 0,15*ap + 0,0041*Vc*f - 0,0002*Vc*ap - 17,5*f*ap + 0,105*Vc*f*ap - 0,1070*CtPt \quad (3)$$

– Modelo Matemático para rugosidade Rt – Equação 4:

$$Rt = 4,72 - 0,0289*Vc + 21,9*f - 8,7*ap + 0,031*Vc*f + 0,070*Vc*ap + 33*f*ap - 0,31*Vc*f*ap - 0,391*CtPt \quad (4)$$

– Modelo Matemático para força de avanço Fx – Equação 5:

$$Fx = - 214,9 + 1,404*Vc + 2567*f + 858*ap - 17,31*Vc*f - 4,808*Vc*ap - 7620*f*ap + 57,69*Vc*f*ap + 7,50*CtPt \quad (5)$$

– Modelo Matemático para força de penetração Fy – Equação 6:

$$Fy = - 175,4 + 1,260*Vc + 2577*f + 701*ap - 14,42*Vc*f - 3,46*Vc*ap - 5288*f*ap + 38,5*Vc*f*ap + 11,25*CtPt \quad (6)$$

– Modelo Matemático para força de corte Fz – Equação 7:

$$Fz = - 174,7 + 1,212*Vc + 2163*f + 695*ap - 13,46*Vc*f - 4,09*Vc*ap - 4856*f*ap + 43,3*Vc*f*ap + 8,13*CtPt \quad (7)$$

O termo CtPt nos modelos matemáticos refere-se ao *center point* presente na análise.

O parâmetro avanço (f) influenciou em todos os resultados com percentual de confiança superior a 95%, logo neste trabalho adotou-se este parâmetro como referência para as análises no MEV.

#### 4.4 Análise da Superfície do Corpo de Prova no MEV

A superfície do corpo de prova foi analisada no MEV com o objetivo de verificar a deformação (fluxo lateral) dos picos de usinagem presentes na superfície do material.

Na análise de rugosidade do corpo de prova, verificou-se a medição da largura média de um elemento do perfil (Rsm), que avalia a distância longitudinal entre os picos de usinagem, ao contrário das rugosidades Ra e Rt que avaliam os picos na superfície da peça na direção radial (profundidade dos picos).

#### 4.4.1 MEV – Superfície do corpo de prova – $f=0,05\text{mm/rev}$

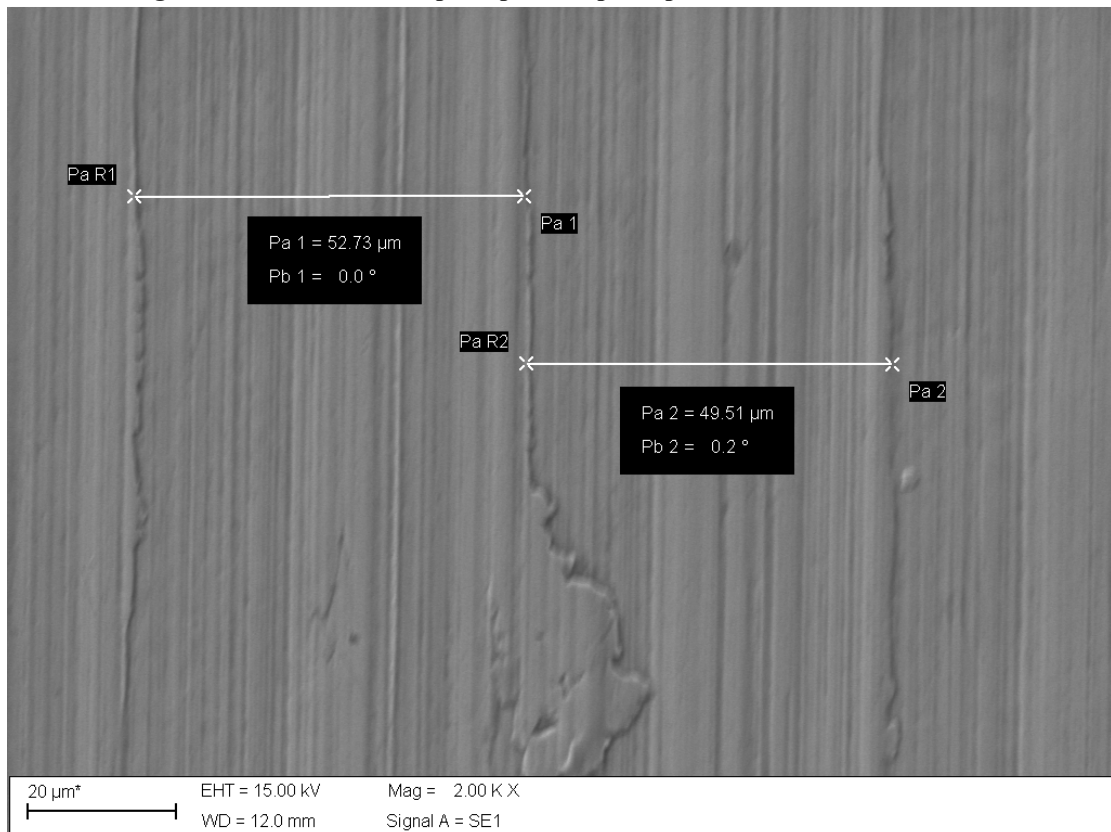
Da Figura 39 à Figura 43 são apresentados à análise dos picos de usinagem do material utilizando o MEV, para avanço de  $0,05\text{mm/v}$ .

É exibido na Figura 39 a distância entre dois picos que obteve valores próximos a  $50\mu\text{m}$  que foi o avanço utilizado.

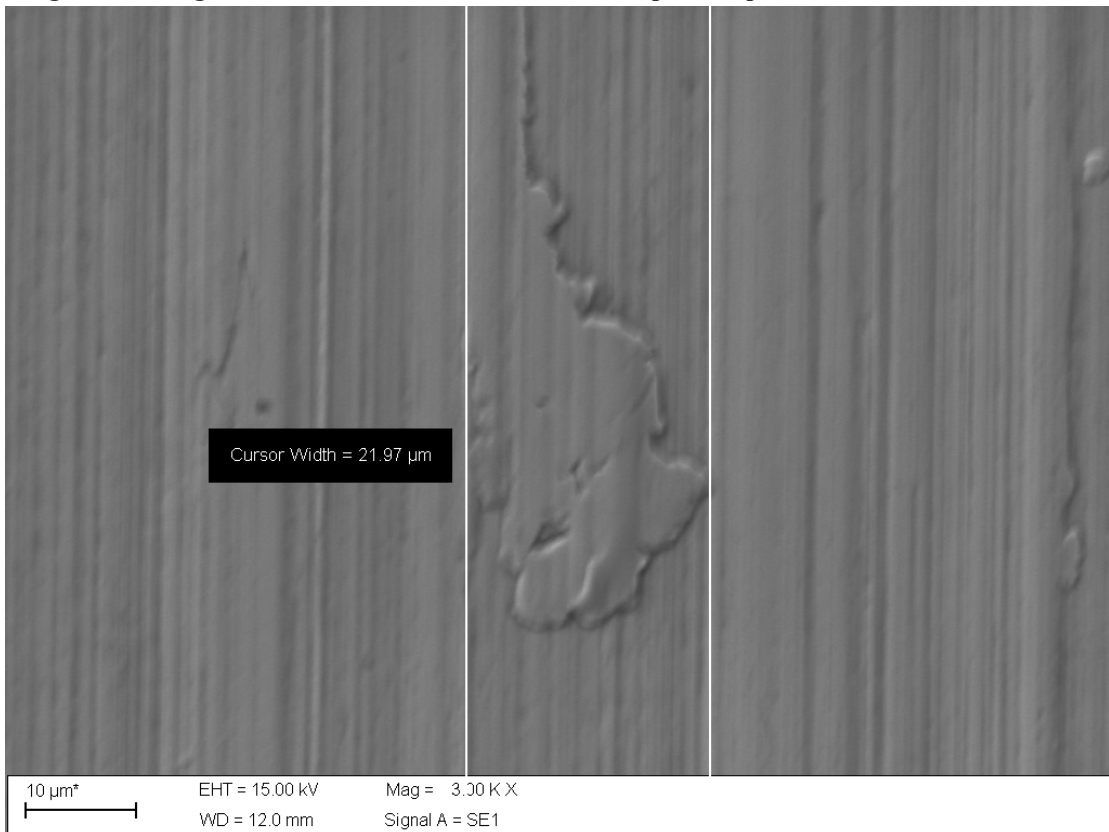
Na Figura 40 e Figura 41 foi analisado um ponto específico do material no qual apresentou uma largura de deformação muito maior do que as existentes. Na análise desta deformação observou-se que não apresentou variações na profundidade no perímetro compreendido aproximadamente entre o centro de 01 pico e o centro do próximo, desta forma concluiu-se que este ponto específico possivelmente foi à adesão de um cavaco muito fino e não a deformação do material.

Na Figura 42 e Figura 43, são ilustrados a deformação do material na usinagem utilizando o avanço de  $0,05\text{mm/v}$  ( $50\mu\text{m}$ ), para este pico analisado, encontrou-se uma largura de aproximadamente  $3,9\mu\text{m}$  e profundidade / altura de pico de aproximadamente  $2,2\mu\text{m}$ .

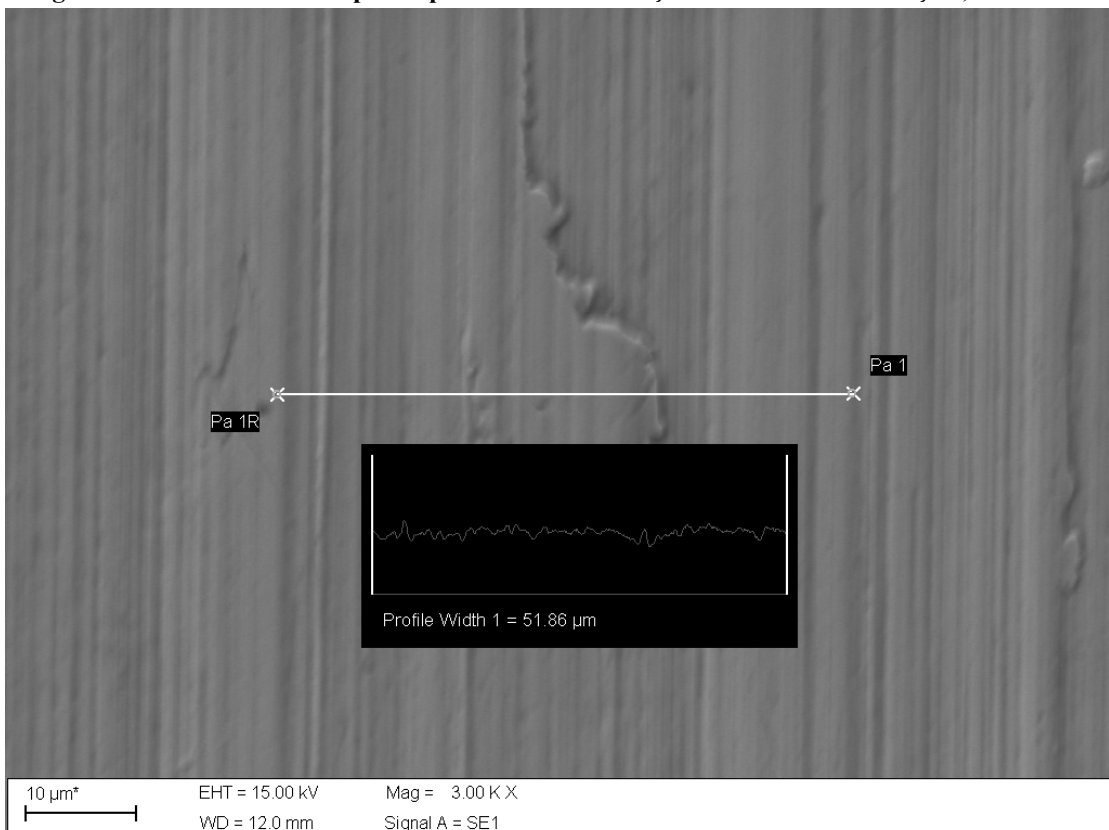
**Figura 39: Distância entre picos para corpo de prova – Avanço  $0,05\text{mm/rev}$ .**

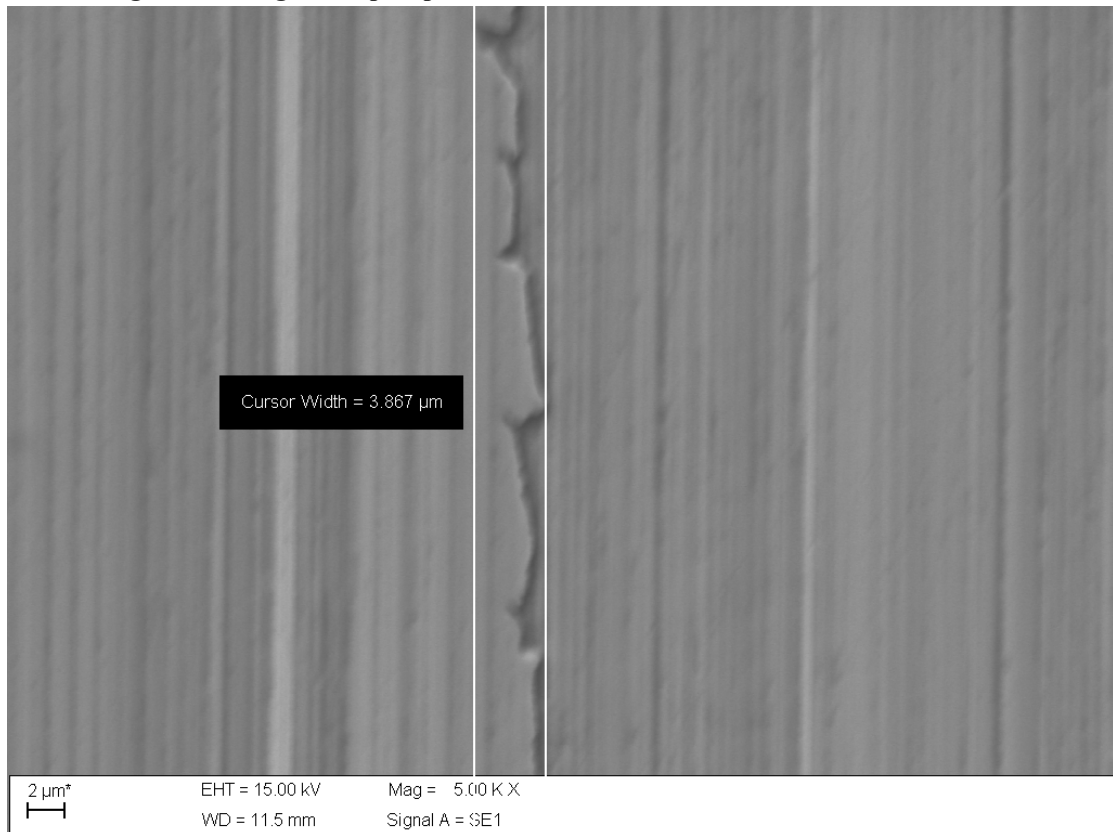
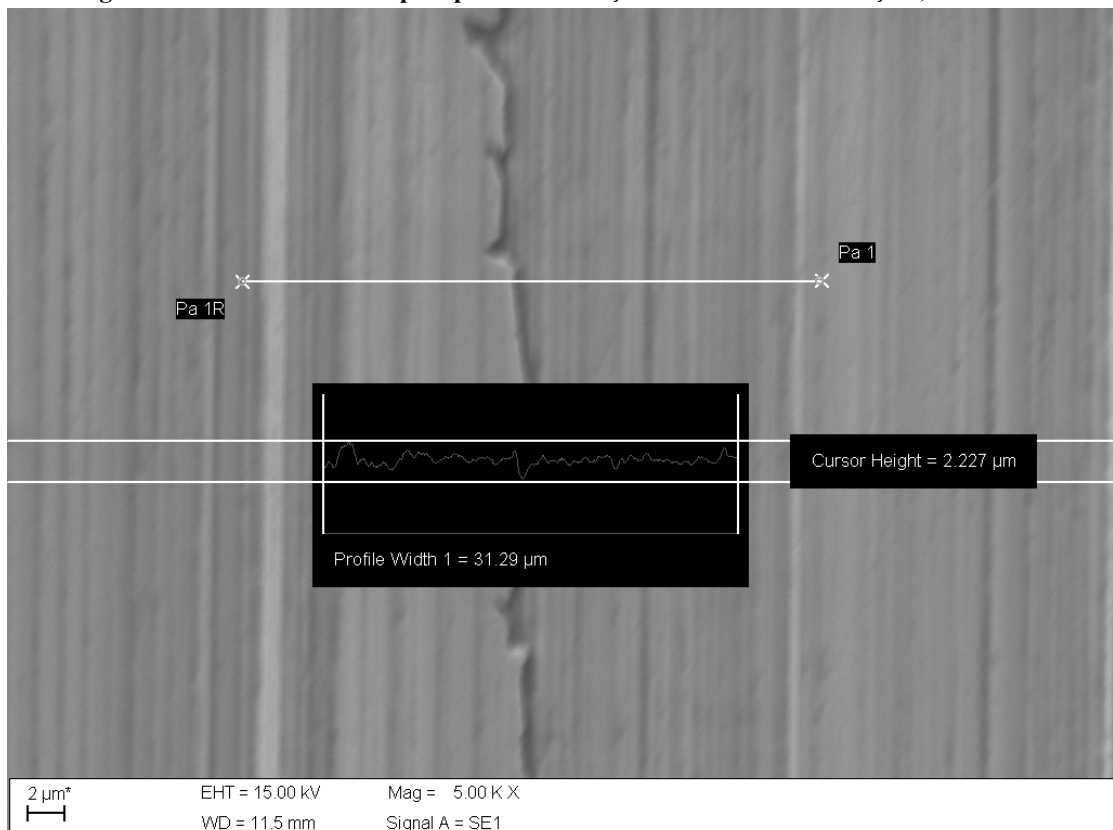


**Figura 40: Largura da deformação do material em um ponto específico – Avanço 0,05mm/rev.**



**Figura 41: Profundidade do pico específico de deformação do material – Avanço 0,05mm/rev.**



**Figura 42: Largura do pico para deformação do material – Avanço 0,05mm/rev.****Figura 43: Profundidade do pico para deformação do material – Avanço 0,05mm/rev.**

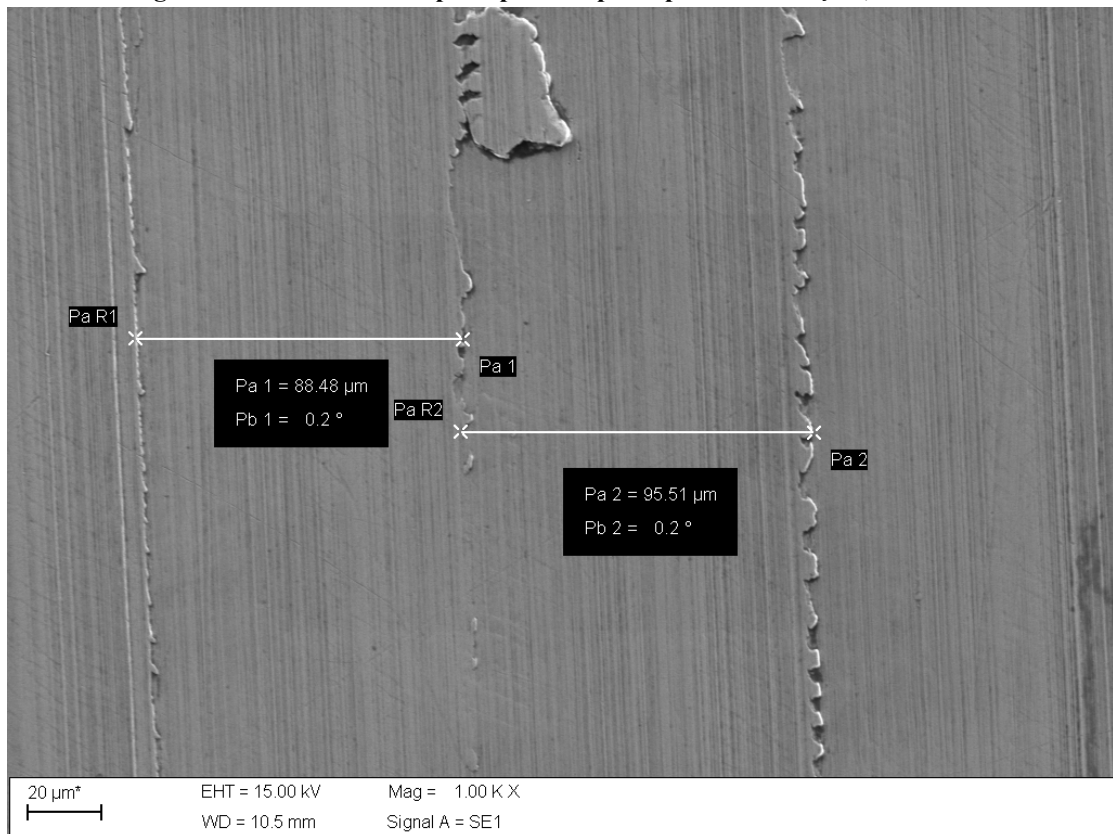
#### 4.4.2 MEV – Superfície do corpo de prova – $f=0,09\text{mm/rev}$

Na Figura 44, Figura 45 e Figura 46 são mostradas a análise dos picos de usinagem do material utilizando o MEV, para avanço de  $0,09\text{mm/v}$ .

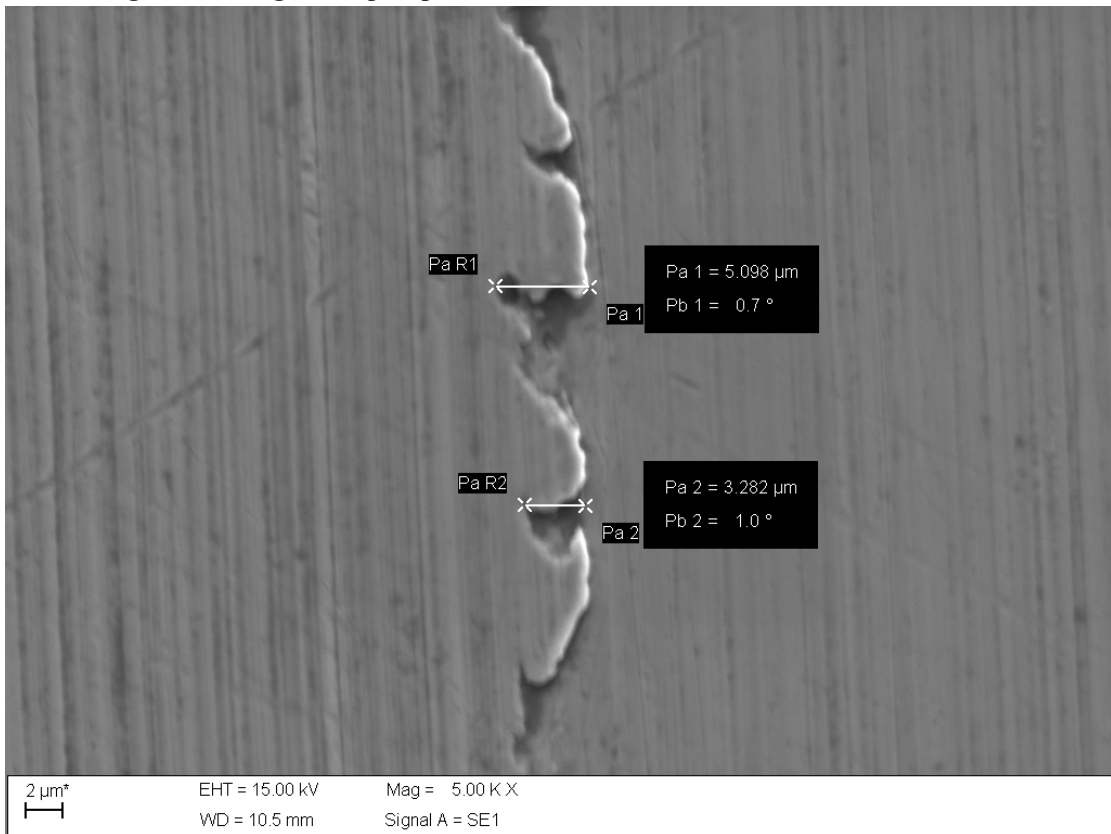
É exibido na Figura 44 a distância entre dois picos e obteve valores próximos a  $90\mu\text{m}$  que foi o avanço utilizado.

Na Figura 45 e Figura 46 são ilustradas a largura e profundidade do pico de deformação, nos quais os valores encontrados são aproximadamente  $5,1\mu\text{m}$  e  $4,3\mu\text{m}$  respectivamente. Observou-se na Figura 46 que com relação à profundidade / altura do pico de deformação, o material segue uma homogeneidade na superfície e somente apresenta o pico no ponto de deformação.

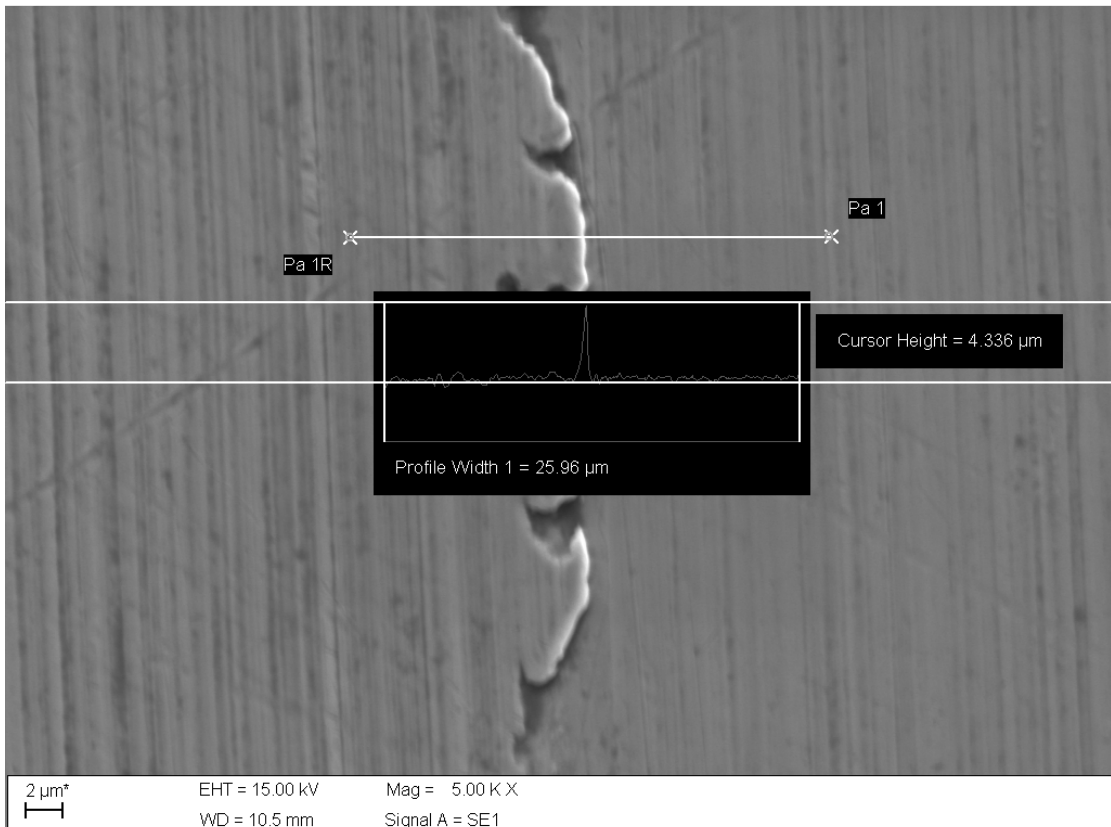
**Figura 44: Distância entre picos para corpo de prova – Avanço  $0,09\text{mm/rev}$ .**



**Figura 45: Largura do pico para deformação do material – Avanço 0,09mm/rev.**



**Figura 46: Profundidade do pico para deformação do material – Avanço 0,09mm/rev.**



Os valores de largura e profundidade de pico para o corpo de prova usinado com avanço de 0,09mm/v foram superiores aos do corpo de prova usinado com avanço de 0,05mm/v.

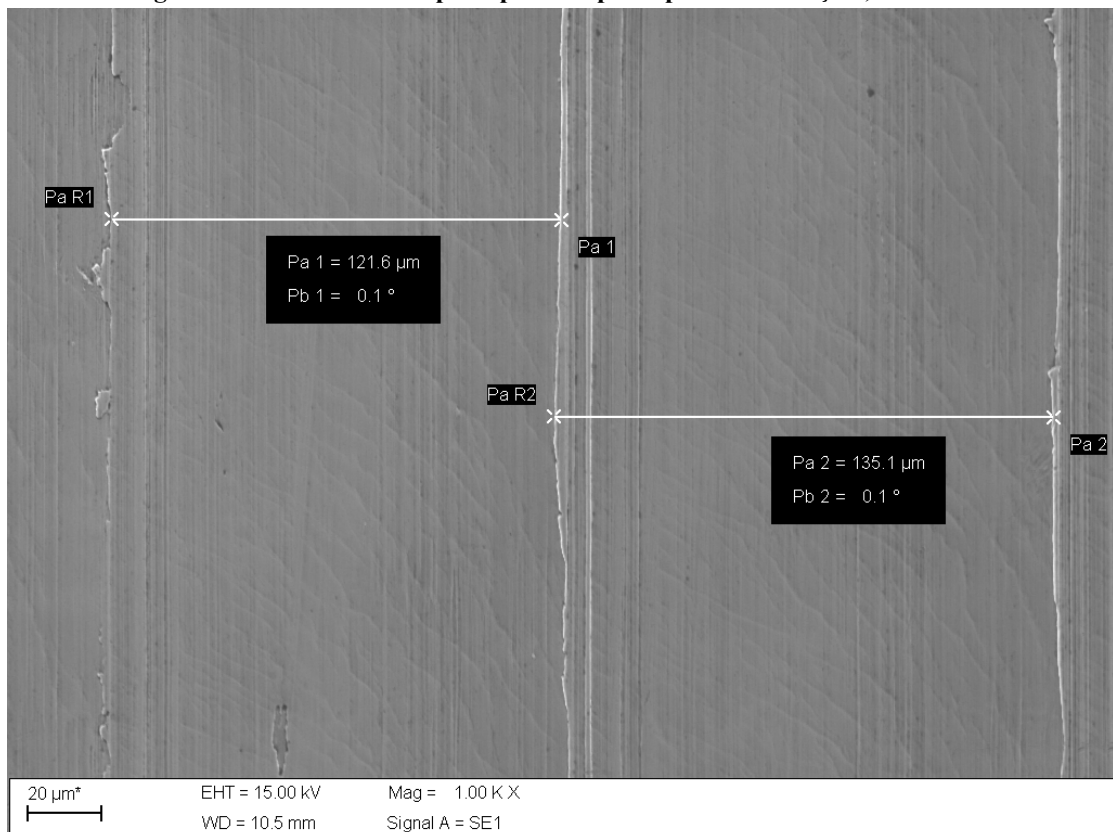
#### 4.4.3 MEV – Superfície do corpo de prova – $f=0,13\text{mm/rev}$

Na Figura 47, Figura 48 e Figura 49 são mostradas a análise dos picos de usinagem do material utilizando o MEV, para avanço de 0,13mm/v.

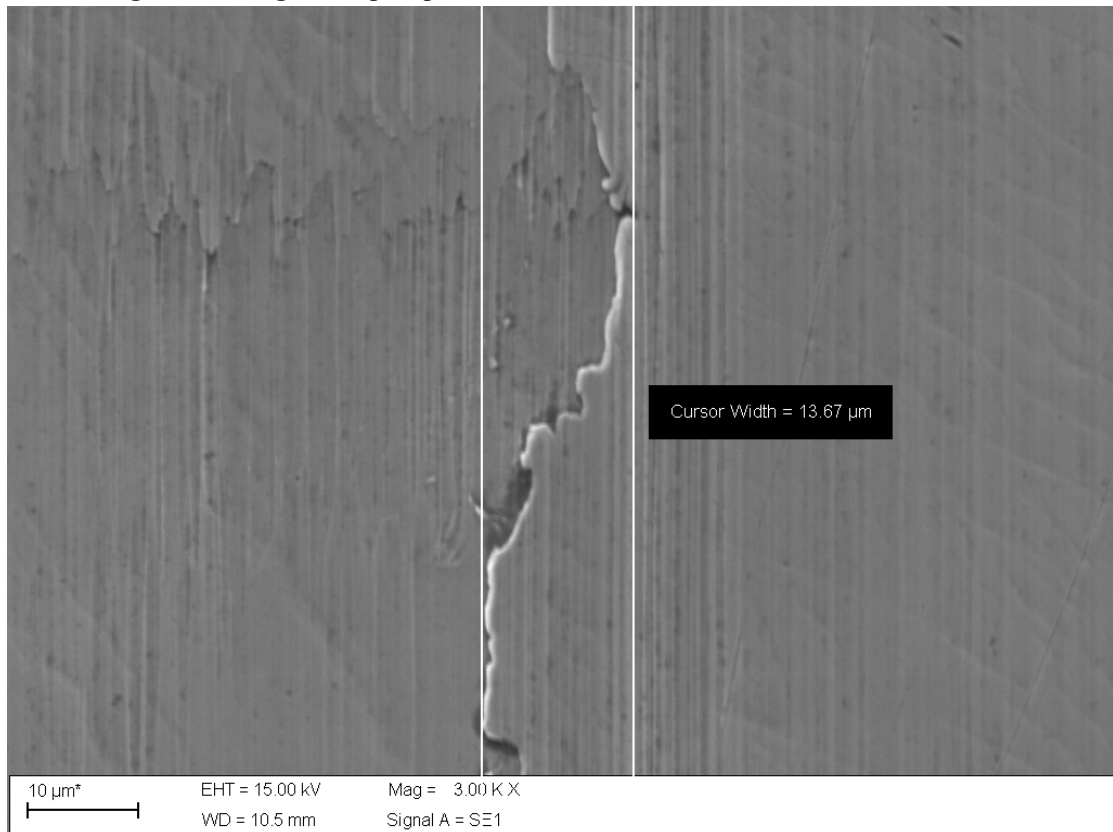
É indicado na Figura 47 a distância entre dois picos e obteve valores próximos a  $130\mu\text{m}$  que foi o avanço utilizado.

Na Figura 48 e Figura 49 são representadas a largura e profundidade do pico de deformação, nos quais os valores encontrados são aproximadamente  $13,7\mu\text{m}$  e  $6,1\mu\text{m}$  respectivamente. Observou-se na Figura 49 que com relação à profundidade / altura do pico de deformação, o material segue uma homogeneidade na superfície e somente apresenta o pico no ponto de deformação.

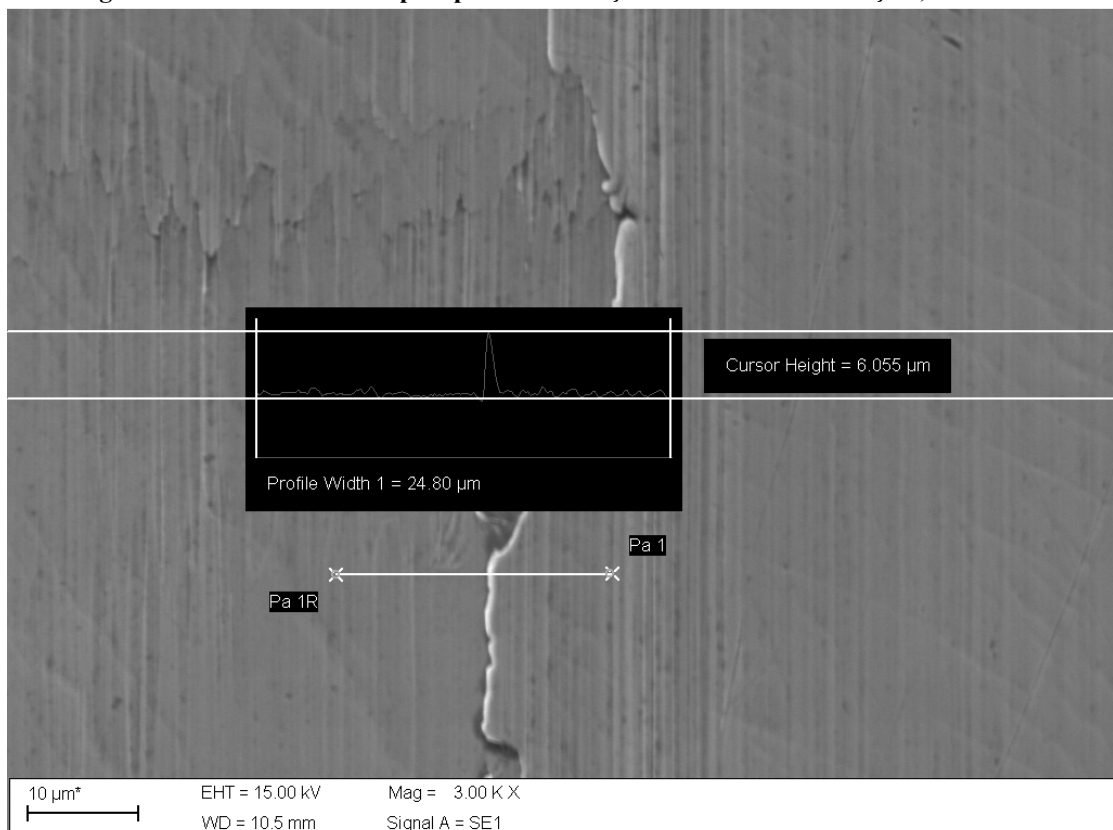
**Figura 47: Distância entre picos para corpo de prova – Avanço 0,13mm/rev.**



**Figura 48: Largura do pico para deformação do material – Avanço 0,13mm/rev.**



**Figura 49: Profundidade do pico para deformação do material – Avanço 0,13mm/rev.**



Os valores de largura e profundidade de pico para o corpo de prova usinado com avanço de 0,13mm/v foram maiores que os corpos de prova usinados com avanço de 0,05mm/v e 0,09mm/v. Avanços maiores são mais agressivos para o material e exigem maiores esforços de corte, o que resulta também em maiores deformações do material. Outro fator importante que foi verificado foi uma determinada homogeneidade na superfície, sendo que somente no ponto de deformação que apresentou pico de profundidade / altura. Como a rugosidade  $R_t$  considera a distância entre o maior pico e o menor vale na superfície analisada, este fato influencia diretamente neste tipo de rugosidade.

Como o processo de usinagem utilizado foi o torneamento, a medição da largura média de um elemento do perfil ( $R_{sm}$ ) com o rugosímetro apresentou medidas próximas ao valor do avanço e as imagens dos picos de deformação utilizando a microscopia eletrônica de varredura confirmaram estes valores.

É apresentado na Tabela 3 a relação entre o avanço utilizado na usinagem e a medição da largura média de um elemento do perfil obtido com resposta. O valor  $R_{sm}$  medido pelo rugosímetro no corpo de prova usinado com avanço de 0,05mm/v foi de 55,5 $\mu$ m. O valor  $R_{sm}$  do corpo de prova usinado com avanço de 0,09mm/v foi 86,33 $\mu$ m e o valor  $R_{sm}$  do corpo de prova usinado com avanço de 0,13mm/v foi 127 $\mu$ m. Os valores da tabela para análise no rugosímetro (média) foram obtidos calculando a média entre todos os corpos de prova usinados que utilizaram o mesmo valor de avanço.

**Tabela 3: Relação entre avanço e largura média de um elemento do perfil ( $R_{sm}$ ).**

Taxa de Avanço	Largura Média de um Elemento do Perfil ( $R_{sm}$ ) - Análise no Rugosímetro (Média)	Largura Média de um Elemento do Perfil ( $R_{sm}$ ) - Análise no MEV
$f = 0,05\text{mm/volta}$	70,32 $\mu$ m	51,12 $\mu$ m
$f = 0,09\text{mm/volta}$	88,21 $\mu$ m	92 $\mu$ m
$f = 0,13\text{mm/volta}$	134,59 $\mu$ m	128,35 $\mu$ m

## **4.5 Análise da Superfície de Saída do Inseto / Aresta de Corte no MEV**

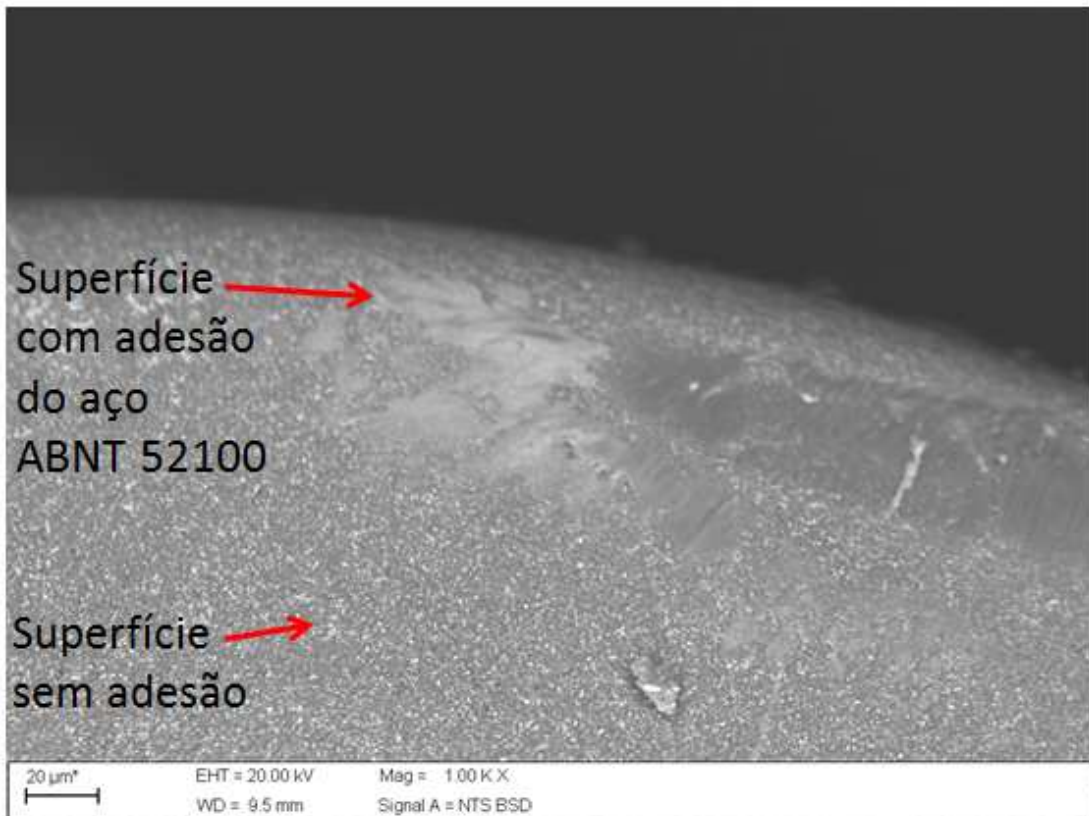
As arestas de corte utilizadas durante a usinagem foram analisadas utilizando o MEV no modo elétrons retroespalhados (ERE). Como o avanço foi o fator que isoladamente influenciou em todos os resultados, as análises foram separadas em grupos conforme avanço utilizado na usinagem.

### **4.5.1 MEV – Análise dos insertos – $f=0,05\text{mm/rev}$**

Na Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53 são mostradas a superfície de saída da ferramenta e a aresta de corte utilizando avanço de  $0,05\text{mm/v}$ . Observou-se que ocorreu adesão do aço ABNT 52100 na superfície da ferramenta, principalmente no local do inserto que precede ao início do corte. Entretanto, não foi evidenciada aresta postiça de corte, portanto esta variável não influenciou nos resultados encontrados.

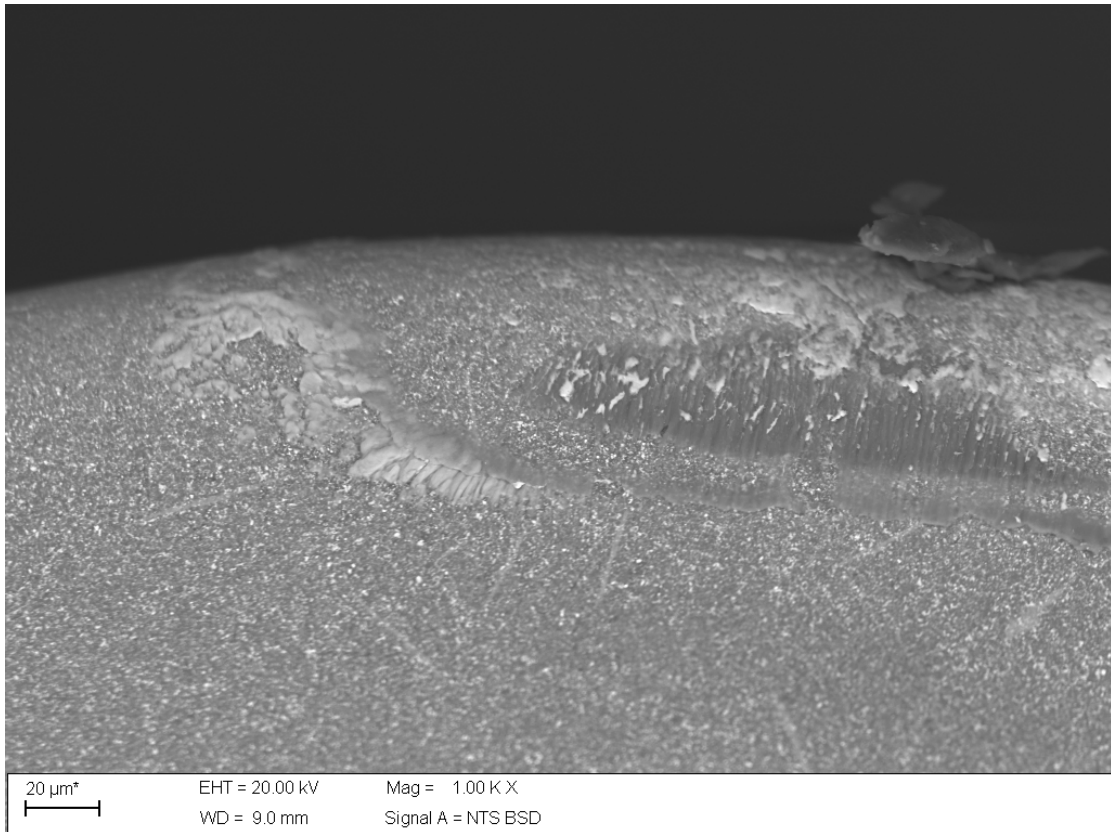
Na Figura 50 é indicado a superfície do inserto com e sem adesão do material. Esta indicação das superfícies é também uma referência para as próximas análises. Nesta figura, foi utilizado  $V_c=105\text{m/min}$  e  $a_p=0,2\text{mm}$  (limites inferiores) e observou-se que ocorreu menor adesão de material em relação a Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

Figura 50: MEV da aresta de corte / superfície de saída -  $V_c=105$  m/min;  $f=0,05$  mm/rev;  $a_p=0,2$ mm.



Na Figura 51 foi utilizada a profundidade de corte de 0,2mm. Notou-se nesta figura que a quantidade de material na superfície do inserto foi menor que na Figura 52 e Figura 53, nas quais a profundidade de corte utilizada foi de 0,4mm.

**Figura 51: MEV da aresta de corte / superfície de saída -  $V_c=170$  m/min;  $f=0,05$  mm/rev;  $a_p=0,2$ mm.**



Analisando a Figura 52 em relação à Figura 53, observou-se que a quantidade de material aderido no inserto da Figura 53 que utilizou velocidade de corte de 105m/min foi maior do que o da Figura 52 que utilizou velocidade de corte 170m/min.



Os resultados demonstram que considerando  $V_c$  no limite inferior ou superior, quanto maior  $ap$ , maior a adesão de material na superfície da ferramenta, considerando  $ap$  no limite superior, quanto menor a  $V_c$ , maior a adesão e  $ap$  no limite inferior, quando menor  $V_c$ , menor a adesão. A maior adesão de material na superfície de saída do inserto ocorreu utilizando maior  $ap$  com menor  $V_c$  e a menor adesão ocorreu utilizando menor  $ap$  e menor  $V_c$ .

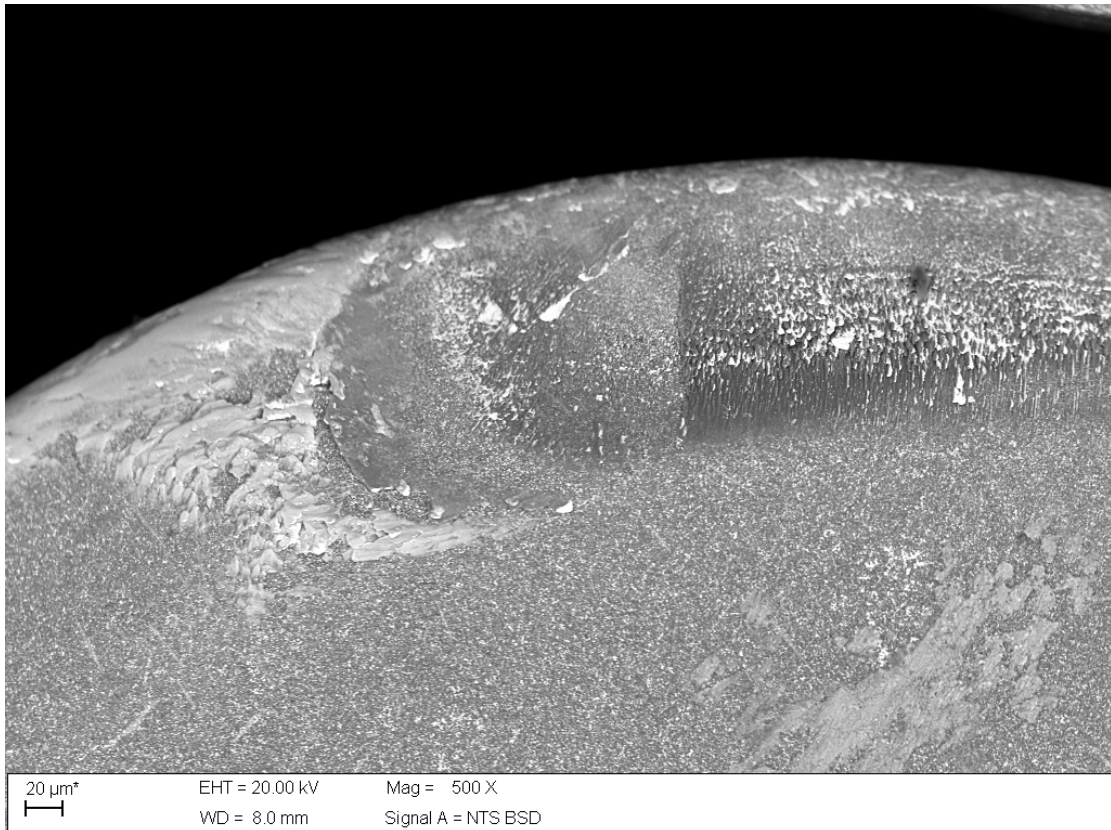
#### **4.5.2 MEV – Análise dos insertos – $f=0,13\text{mm/rev}$**

Na Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57 são representadas a superfície de saída da ferramenta e a aresta de corte utilizando avanço de  $0,13\text{mm/v}$ .

Assim como nas arestas de corte que utilizaram avanço de  $0,05\text{mm/v}$ , observou-se que nestas arestas utilizando avanço de  $0,13\text{mm/v}$  também ocorreu adesão de material na superfície da ferramenta e novamente a adesão de material ocorreu principalmente no local do inserto que precede ao início do corte. Nesta análise também não foi evidenciado aresta postiça de corte, portanto esta variável não influenciou nos resultados encontrados.

Na Figura 54 foi utilizada a profundidade de corte de  $0,4\text{mm}$ . Notou-se nesta figura que a quantidade de material na superfície do inserto foi maior do que na Figura 56 na qual a profundidade de corte utilizada foi de  $0,2\text{mm}$ . Possivelmente esta maior adesão de material ocorreu devido a maior largura do cavaco utilizando a profundidade de corte no limite superior, que também resulta em maiores esforços de corte durante a usinagem.

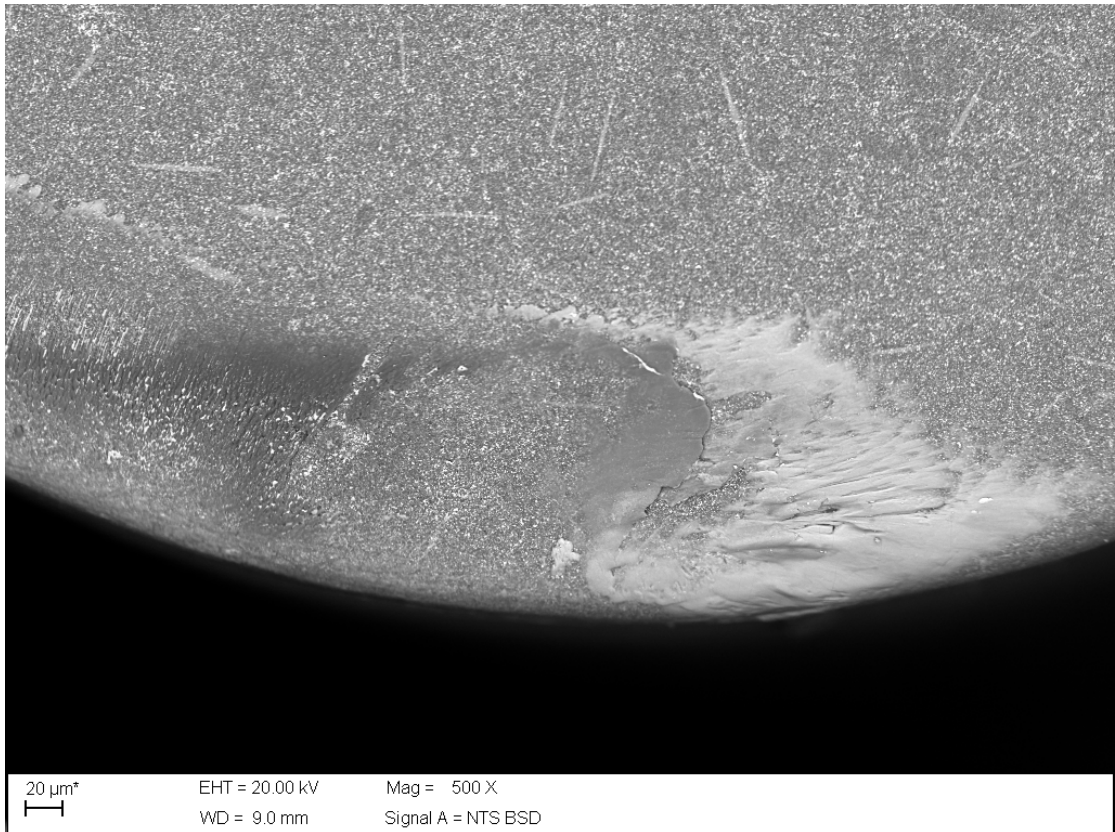
**Figura 54: MEV da aresta de corte / superfície de saída -  $V_c=105$  m/min;  $f=0,13$  mm/rev;  $a_p=0,4$ mm.**



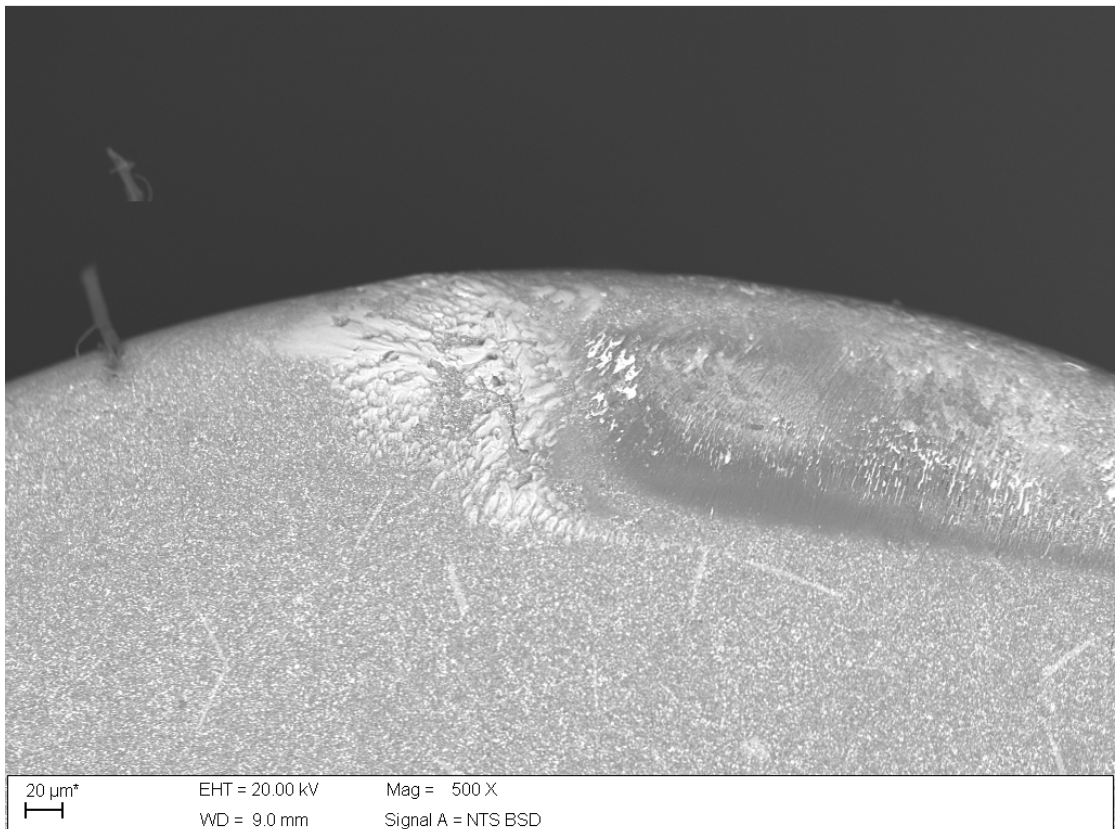
Analisando a Figura 55 em relação à Figura 56, observou-se que a quantidade de material aderido no inserto da Figura 55 que utiliza velocidade de corte de 170m/min foi maior do que a Figura 56 que utiliza velocidade de corte 105m/min.

Observou-se na Figura 55 que utilizou  $a_p=0,2$ mm maior quantidade de material aderido que na Figura 57 que utilizou  $a_p=0,4$ mm.

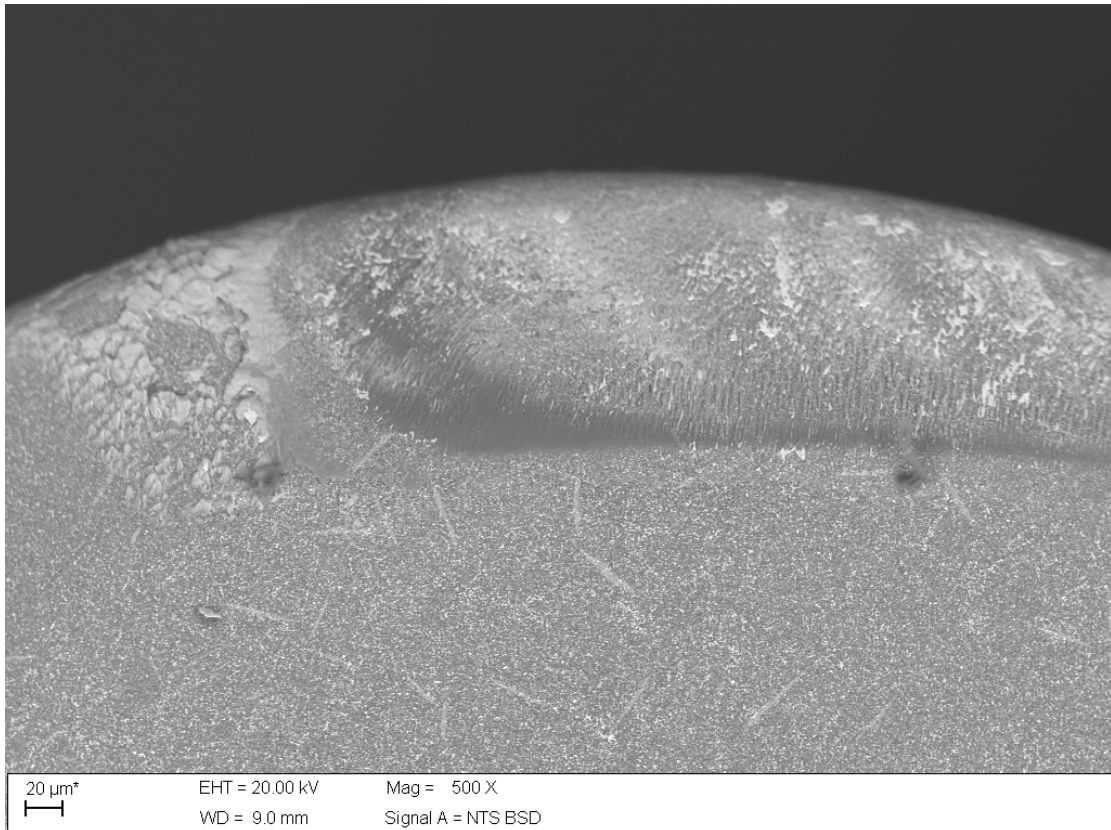
**Figura 55: MEV da aresta de corte / superfície de saída -  $V_c=170$  m/min;  $f=0,13$  mm/rev;  $a_p=0,2$ mm.**



**Figura 56: MEV da aresta de corte / superfície de saída -  $V_c=105$  m/min;  $f=0,13$  mm/rev;  $a_p=0,2$ mm.**



**Figura 57: MEV da aresta de corte / superfície de saída -  $V_c=170$  m/min;  $f=0,13$  mm/rev;  $a_p=0,4$ mm.**



Os resultados demonstram que considerando a  $V_c$  no limite inferior, quanto maior  $a_p$ , maior a adesão de material na superfície da ferramenta, a  $V_c$  no limite superior, quanto maior o  $a_p$ , menor a adesão, o  $a_p$  no limite superior, quanto menor a  $V_c$ , maior a adesão e o  $a_p$  no limite inferior, quanto maior a  $V_c$ , maior a adesão de material. A maior adesão de material na superfície de saída do inserto ocorreu utilizando maior  $V_c$  e menor  $a_p$ .

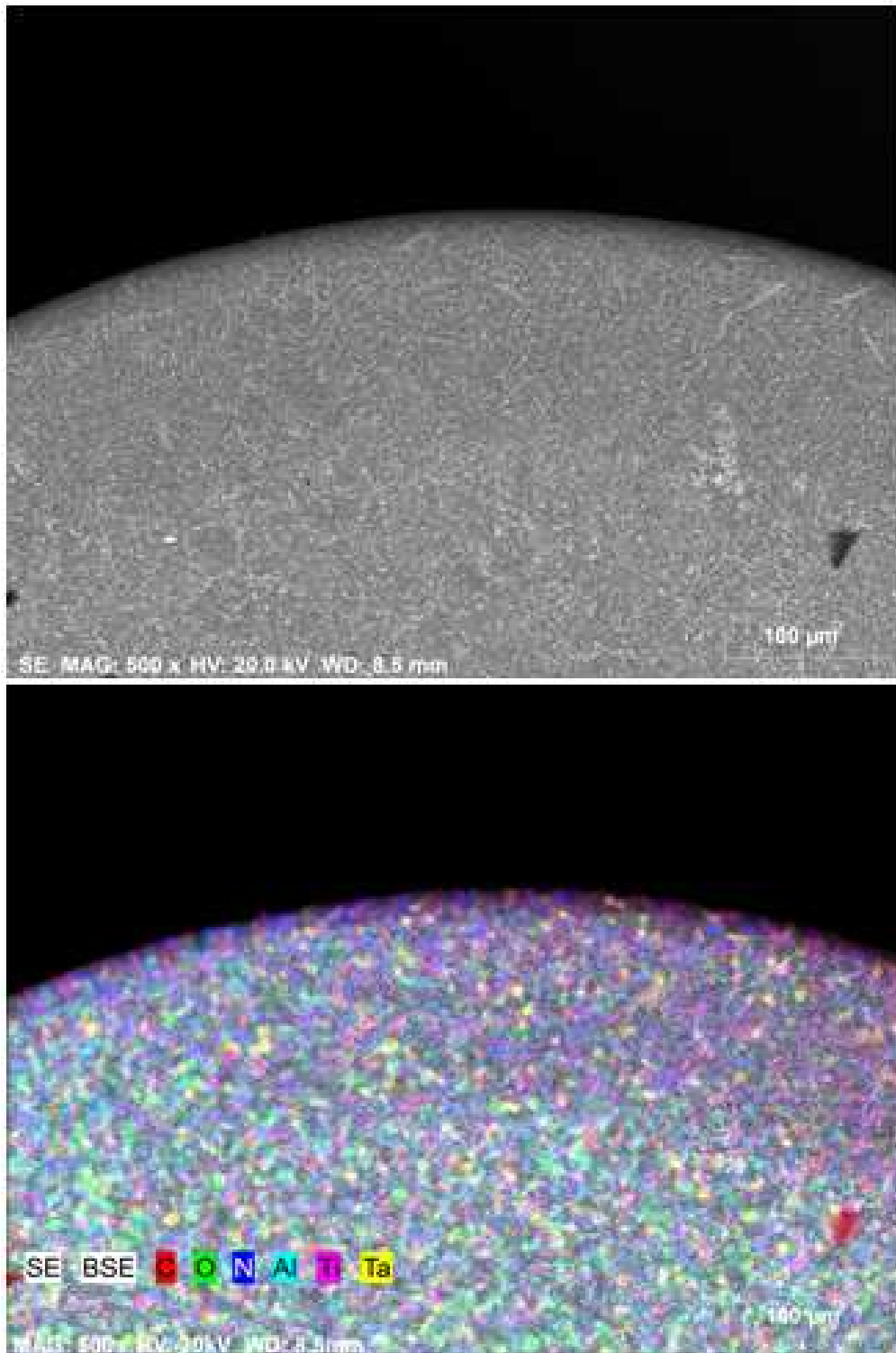
#### 4.5.3 MEV do inserto novo

Pela técnica de mapeamento do MEV pode-se observar na Figura 58 e Figura 59 a análise dos materiais presentes na superfície de um inserto novo que não foi utilizado na usinagem.

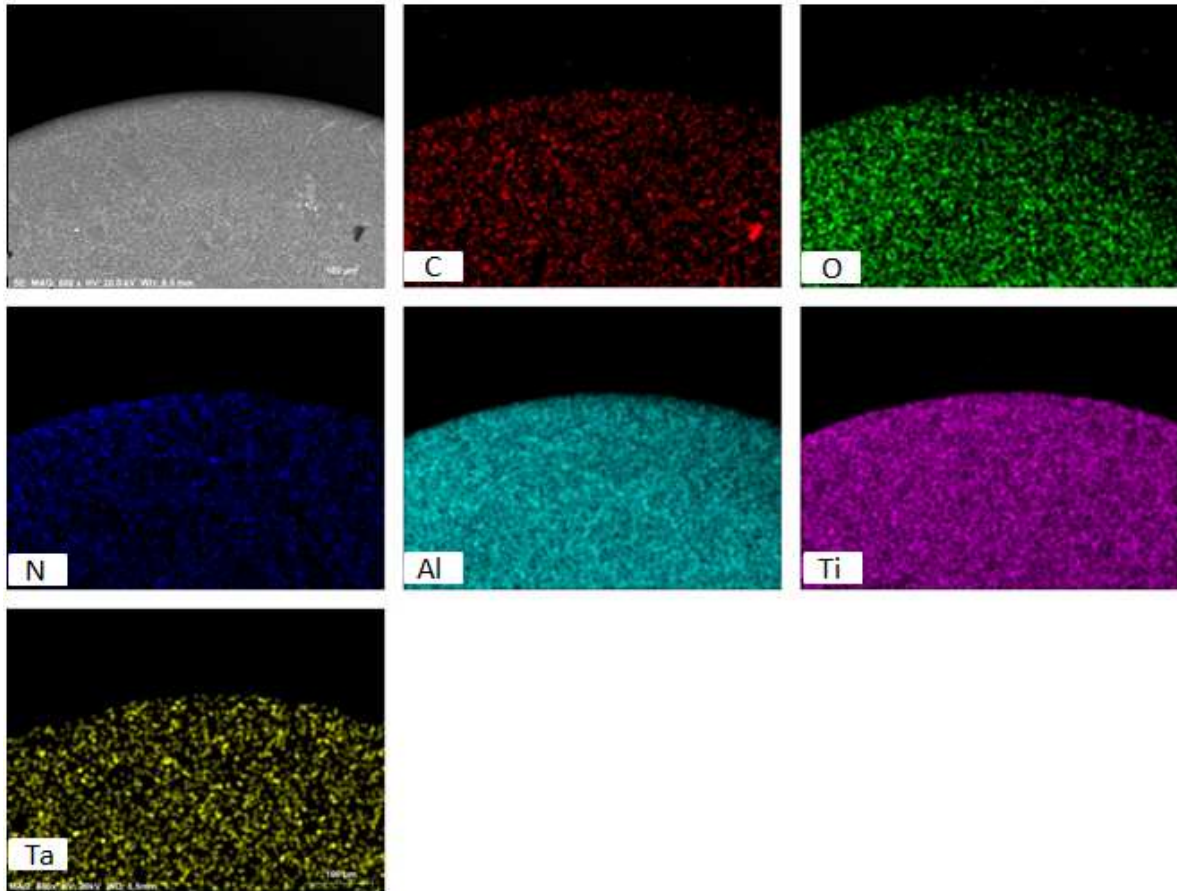
Observa-se a homogeneidade da distribuição dos elementos químicos na superfície do inserto novo. Nesta análise foram evidenciados os seguintes elementos: Carbono, Oxigênio, Nitrogênio, Alumínio, Titânio e Tântalo. Lembrando que os elementos Oxigênio e Carbono, devido ao seu baixo peso atômico, podem apresentar grandes variações durante a análise,

desta forma o percentual encontrado do elemento não condiz com o real percentual do elemento na peça e em alguns casos não sendo considerados os percentuais encontrados.

**Figura 58: Análise do MEV do inserto antes da usinagem (Novo).**



**Figura 59: Análise do MEV do inserto antes da usinagem (Novo) – Elementos isolados.**



Um fato que não era esperado e que deve ser ressaltado é a presença de tântalo (Ta) na composição química do inserto novo. Possivelmente o fornecedor está acrescentando este elemento químico para formação de um carboneto com o objetivo de elevar a resistência do seu inserto de material cerâmico.

Nas próximas análises realizadas no MEV com relação aos insertos que apresentaram os maiores esforços de corte, menores esforços de corte e um *center point*, foram encontrados elementos que não estão presentes no Aço ABNT 52100 e no inserto utilizado na usinagem, logo estes elementos (Cálcio, Flúor, Magnésio, Sódio) foram desconsiderados por tratar-se de uma possível contaminação.

#### 4.5.4 MEV dos insertos – Maiores esforços de corte – $f=0,13\text{mm/rev}$

Na Figura 60 até a Figura 64 são representadas a análise da superfície do inserto no qual foi evidenciado os maiores esforços de corte ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) durante a usinagem do corpo de prova.

Na Figura 60 até a Figura 63 foi realizado a análise utilizando amplificação (Mag) de 500 vezes e distância de trabalho (WD) de 8,6mm.

É ilustrado na Figura 60 os pontos que foram analisados e a Figura 61 os gráficos dos elementos químicos presentes em cada ponto analisado. Na análise de cada ponto o foco foi procurar os elementos químicos do material ABNT 52100 que possivelmente ficaram aderidos no inserto. Observou-se na Figura 61 que os principais elementos químicos do aço ABNT 52100 estão presentes nos pontos analisados.

**Figura 60: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos de análise –  $V_c=170\text{ m/min}$ ;  $f=0,13\text{ mm/rev}$ ;  $a_p=0,4\text{mm}$ .**

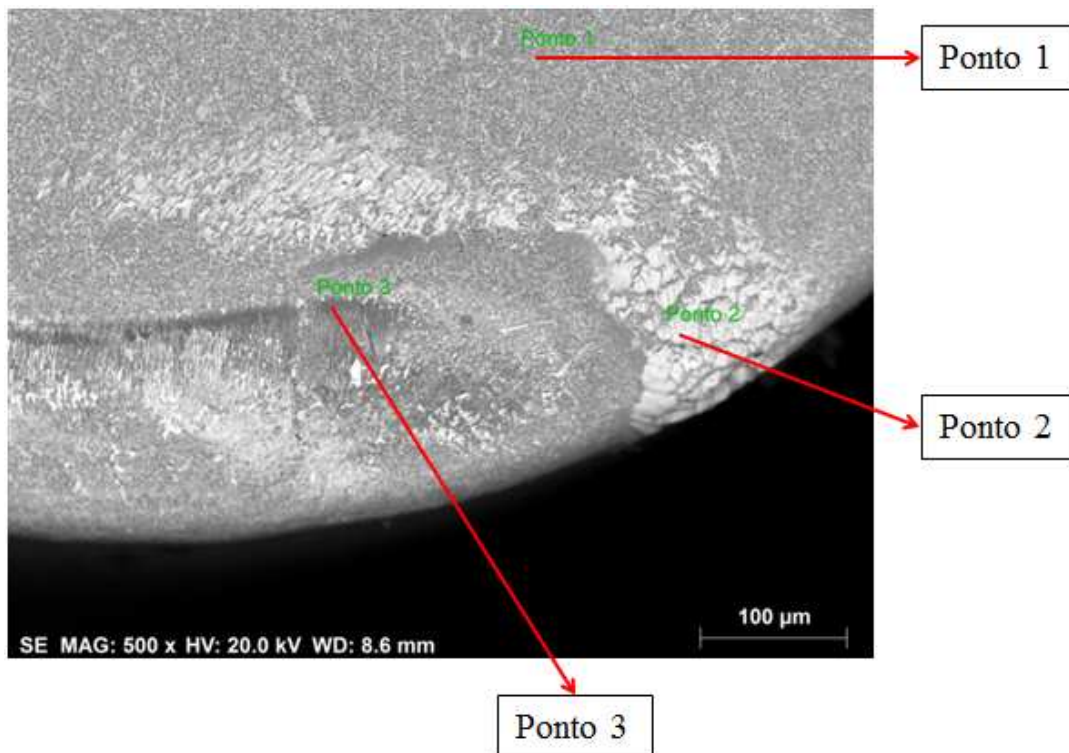
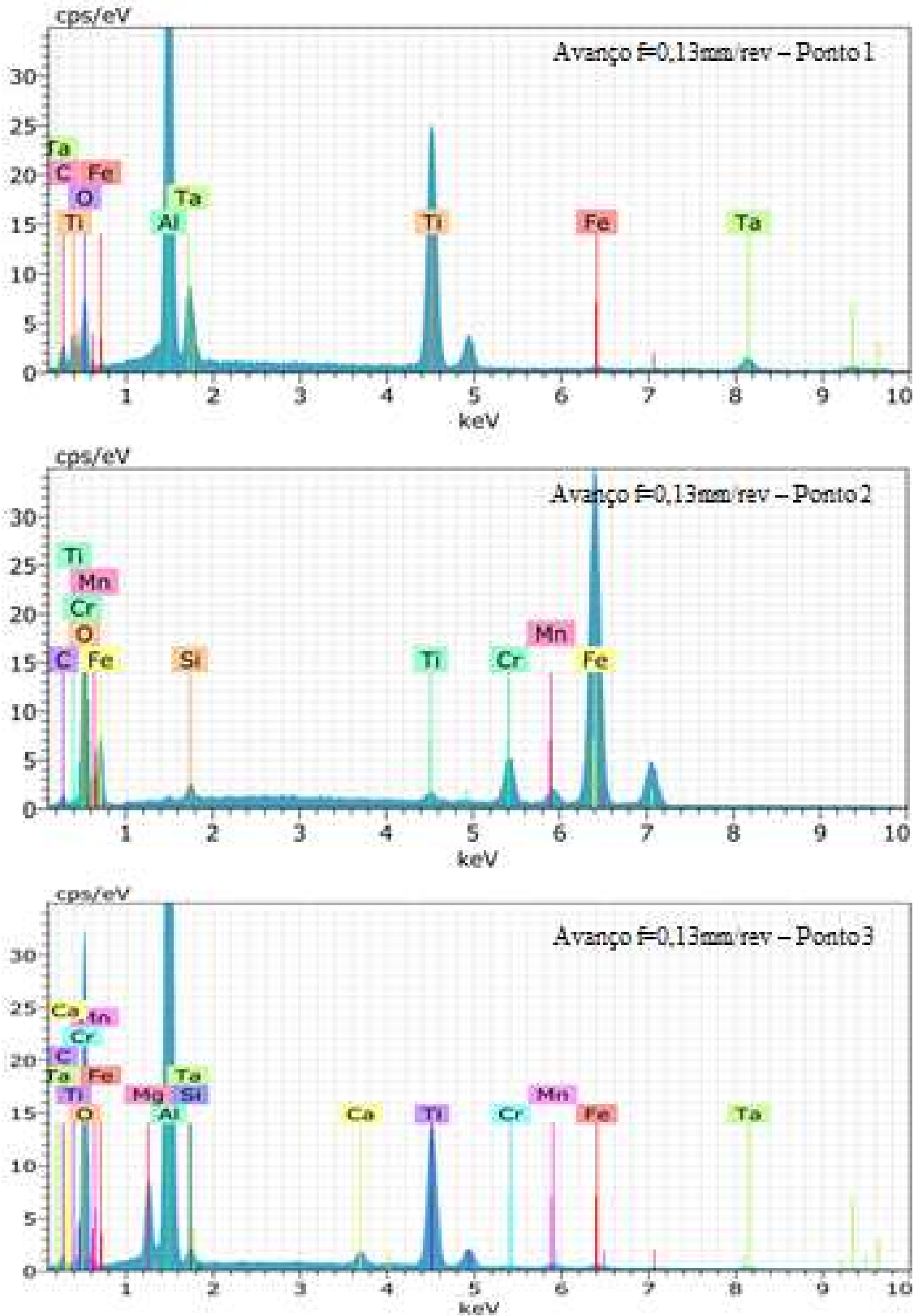


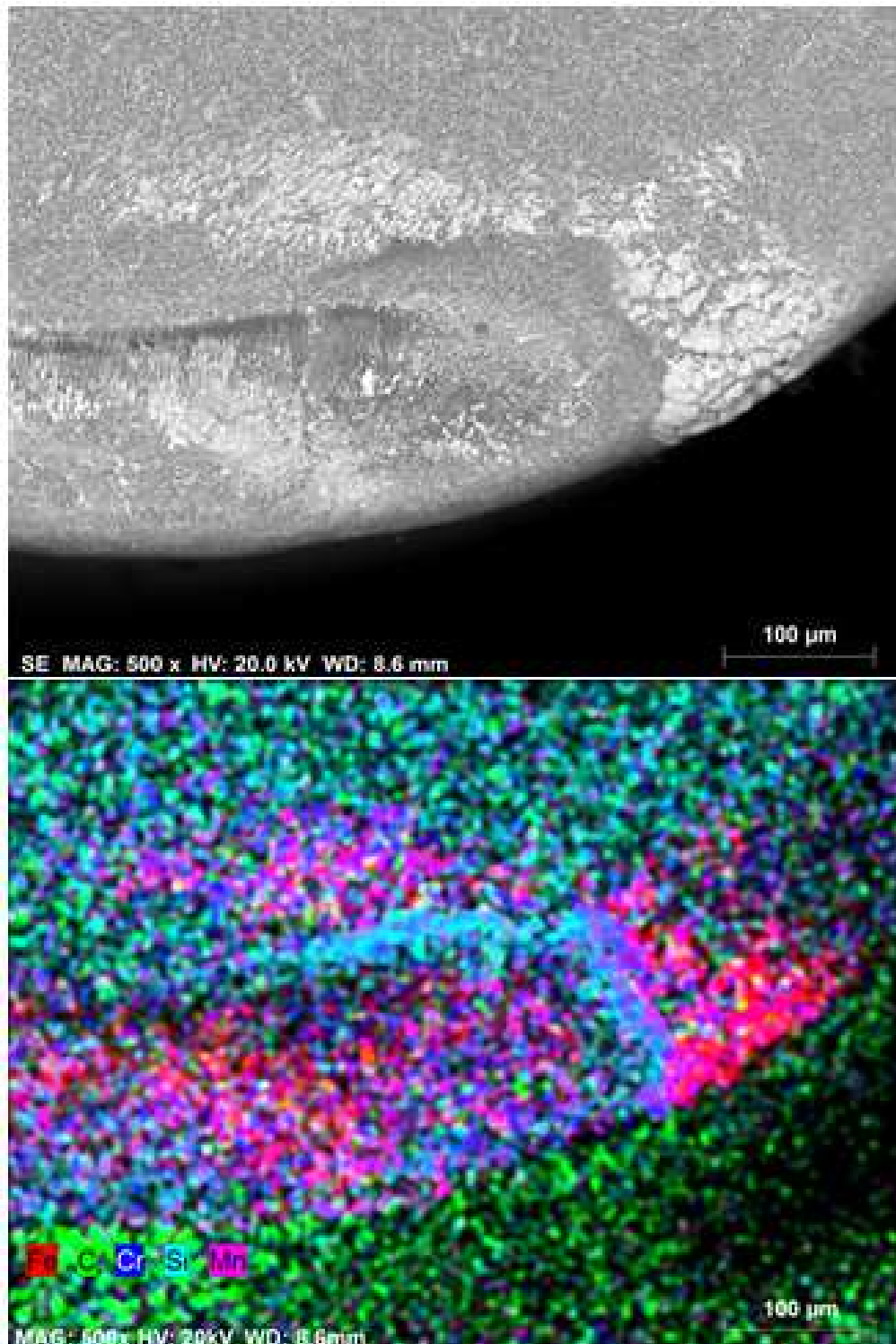
Figura 61: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos – Vc=170 m/min; f=0,13 mm/rev; ap=0,4mm.



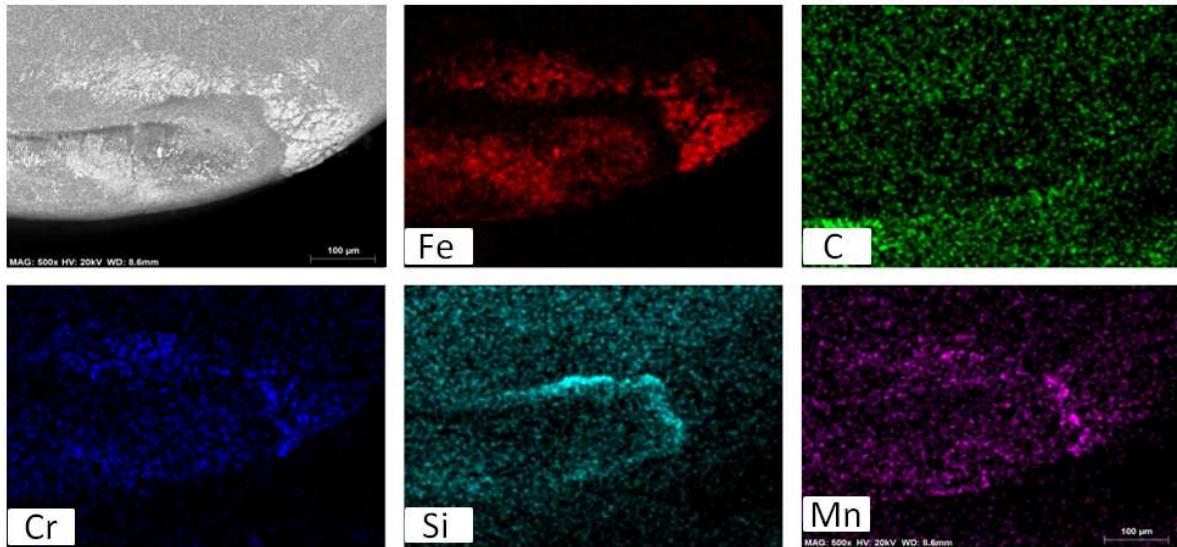
Na análise da Figura 62 e Figura 63 o foco foi verificar os principais elementos químicos da composição do material ABNT 52100, sendo que é exibido na Figura 62 a

superfície de saída do inserto e a distribuição dos elementos nesta superfície. Já na Figura 63 foi visualizado cada elemento isoladamente. Nesta figura observou-se a concentração de cada elemento químico nos locais de adesão do material.

**Figura 62: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos do aço ABNT 52100 –  $V_c=170$  m/min;  $f=0,13$  mm/rev;  $a_p=0,4$ mm.**

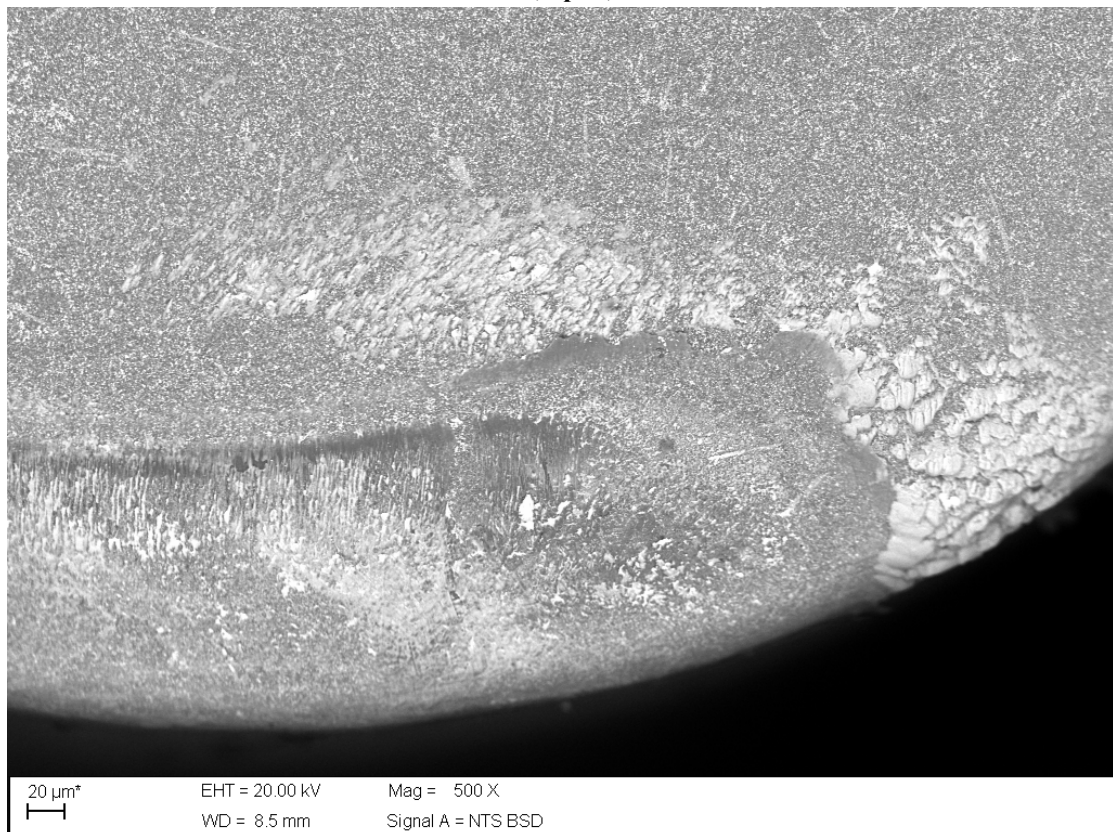


**Figura 63: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos (Isolados) do aço ABNT 52100 – Vc=170 m/min; f=0,13 mm/rev; ap=0,4mm.**



A topologia do inserto após a usinagem é representada na Figura 64.

**Figura 64: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Superfície do inserto – Vc=170 m/min; f=0,13 mm/rev; ap=0,4mm.**



Durante a análise deste inserto que realizou a usinagem que apresentou os maiores esforços de corte, não foram evidenciados desgastes da ferramenta e também aresta postiça de

corde, portanto estes fatores não influenciaram nos resultados encontrados. Outro fator que deve ser observado foi que todos os parâmetros de usinagem estavam nos limites superiores.

#### 4.5.5 MEV dos insertos – *Center point* – $f=0,09\text{mm/rev}$

Na Figura 65 até a Figura 69 são representados a análise da superfície do inserto utilizado para usinagem de um dos corpos de prova de *center point*. Esta análise seguiu os mesmos princípios da análise anterior.

Na Figura 65 até a Figura 68 foi realizado a análise utilizando amplificação (Mag) de 500 vezes e distância de trabalho (WD) de 8,4mm.

É mostrado na Figura 65 os pontos que foram analisados e a Figura 66 os gráficos dos elementos químicos presentes em cada ponto que foi analisado. Na análise de cada ponto o foco foi procurar os elementos químicos do material ABNT 52100 que possivelmente ficaram aderidos no inserto. Observou-se na Figura 66 que os principais elementos químicos do aço ABNT 52100 estão presentes nos pontos analisados.

Figura 65: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos de análise –  $V_c=137\text{ m/min}$ ;  $f=0,09\text{ mm/rev}$ ;  $ap=0,3\text{mm}$ .

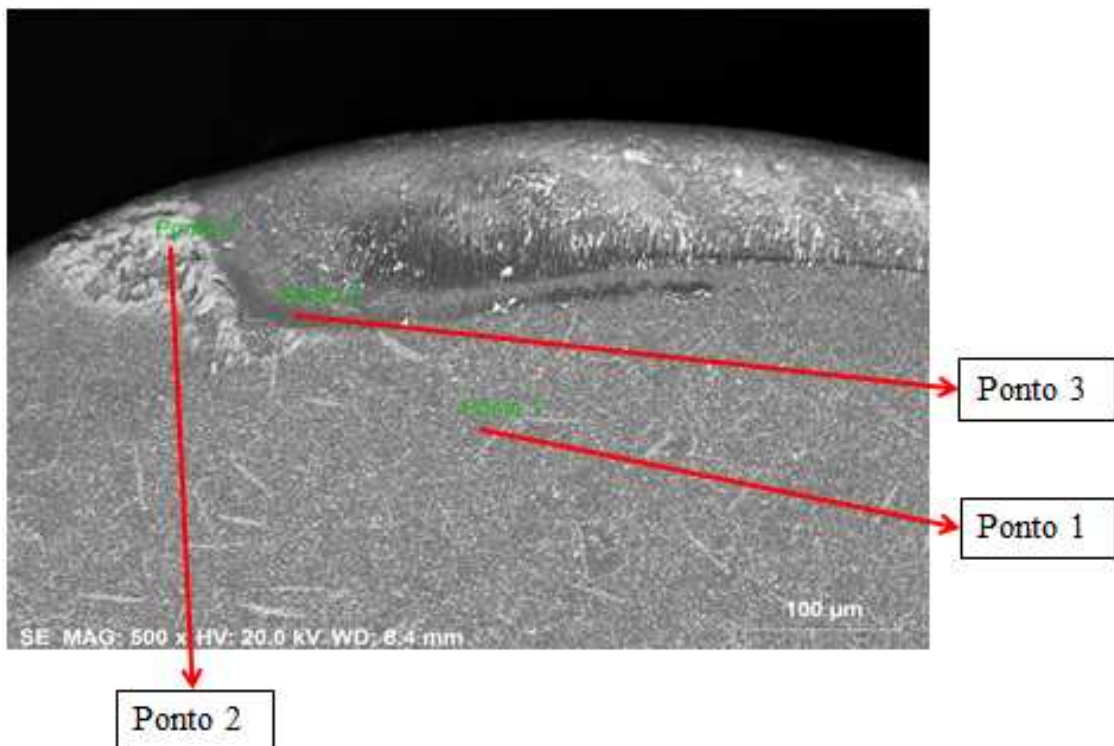
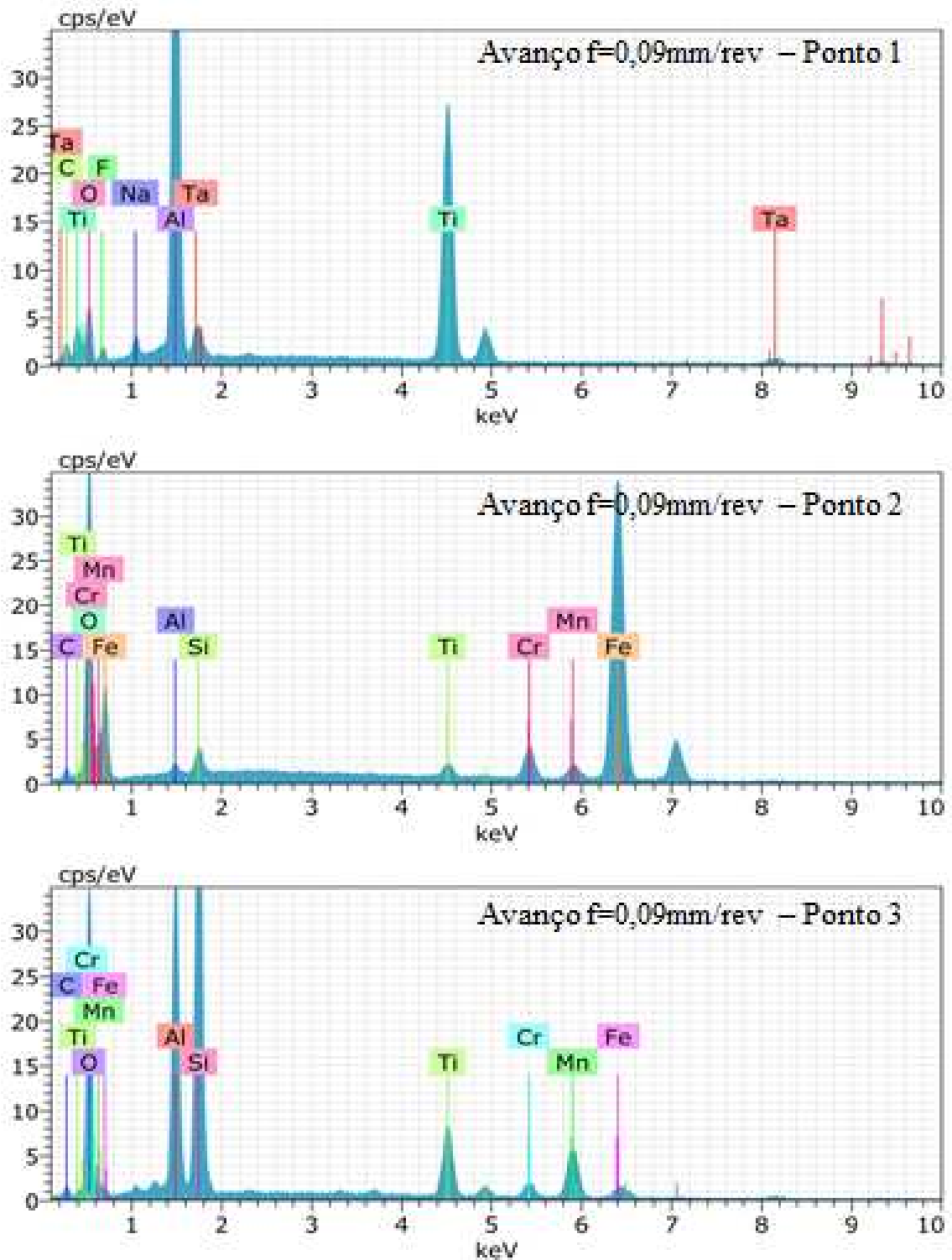


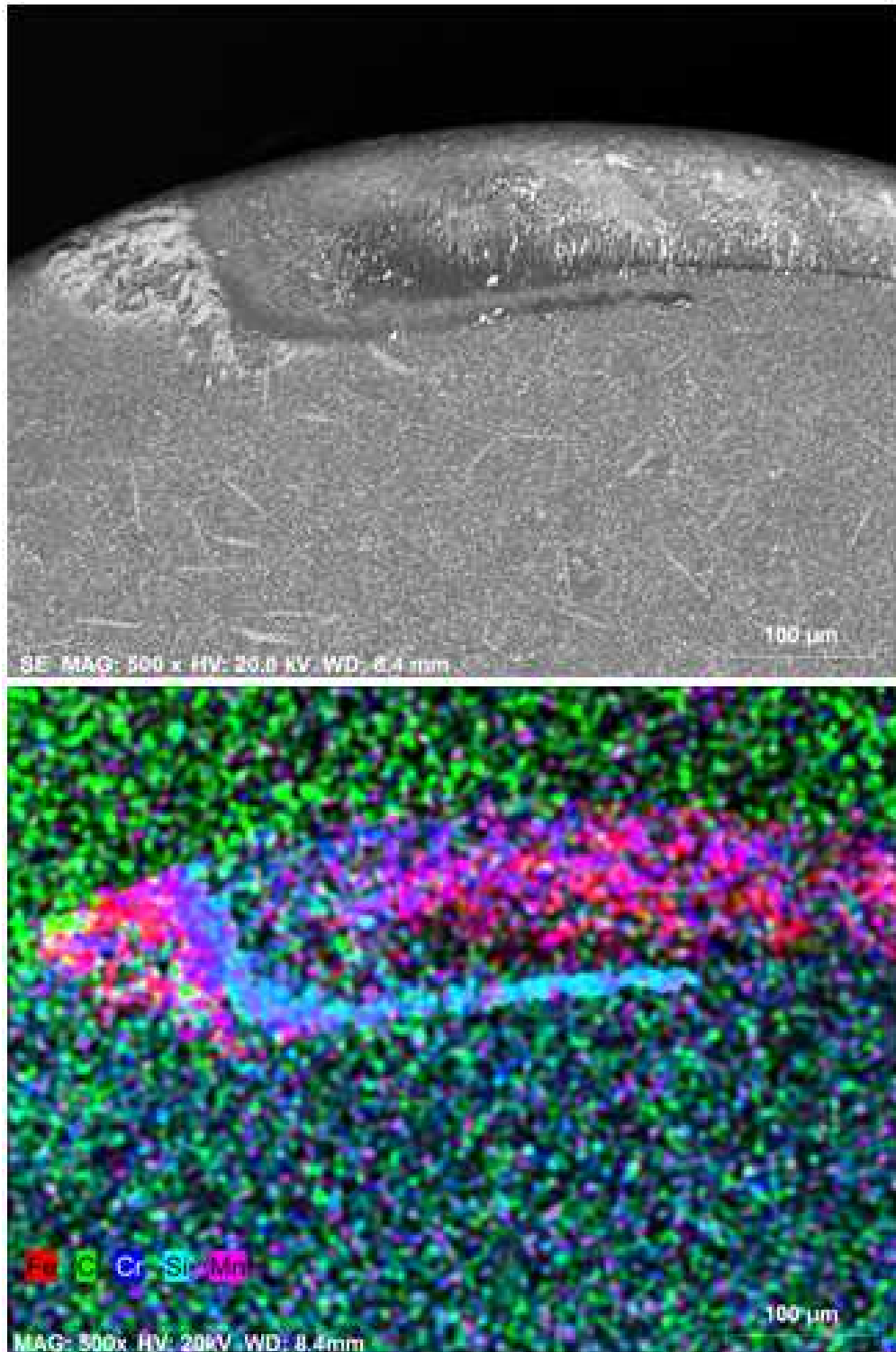
Figura 66: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos –  $V_c=137$  m/min;  $f=0,09$  mm/rev;  $a_p=0,3$ mm.



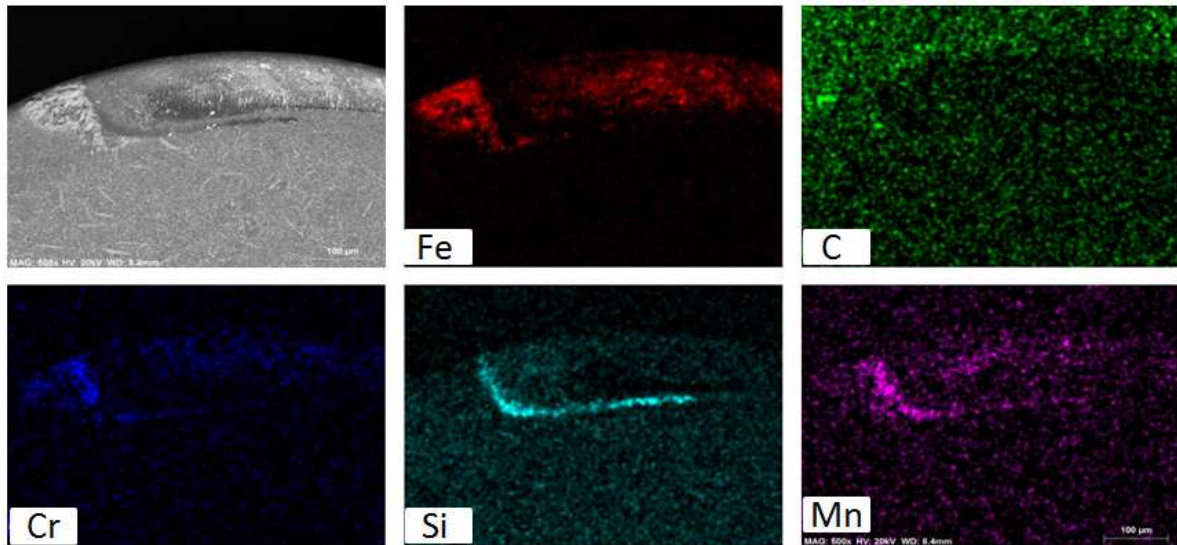
Na análise da Figura 67 e Figura 68 o foco foi verificar os principais elementos químicos da composição do material ABNT 52100, sendo que é ilustrado na Figura 67 a superfície do inserto e a distribuição dos elementos nesta superfície. Já na Figura 68 foi

visualizado cada elemento isoladamente. Nesta figura observou-se a concentração de cada elemento químico nos locais de adesão do material.

**Figura 67: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos do aço ABNT 52100 – Vc=137 m/min; f=0,09 mm/rev; ap=0,3mm.**



**Figura 68: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos (Isolados) do aço ABNT 52100 – Vc=137 m/min; f=0,09 mm/rev; ap=0,3mm.**



A topologia do inserto após a usinagem é representada na Figura 69.

**Figura 69: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Superfície do inserto – Vc=137 m/min; f=0,09 mm/rev; ap=0,3mm.**



Durante a análise deste inserto que realizou a usinagem do corpo de prova utilizado como *center point*, assim como na análise do inserto anterior que apresentou os maiores

esforços de corte, não foram evidenciados desgastes da ferramenta e também aresta postiça de corte, portanto estes fatores não influenciaram nos resultados encontrados.

#### 4.5.6 MEV dos insertos – Menores esforços de corte – $f=0,05\text{mm/rev}$

Na Figura 70 até a Figura 74 são representados a análise da superfície do inserto no qual foi evidenciado os menores esforços de corte ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) durante a usinagem do corpo de prova. Esta análise seguiu os mesmos princípios das análises dos insertos anteriores.

Na Figura 70 até a Figura 73 foi realizado a análise utilizando amplificação de 500 vezes e distância de trabalho de 8,2mm.

É indicado na Figura 70 os pontos que foram analisados e na Figura 71 os gráficos dos elementos químicos presentes em cada ponto que foi analisado. Na análise de cada ponto o foco foi procurar os elementos químicos do material ABNT 52100 que possivelmente ficaram aderidos no inserto. Observou-se na Figura 71 que os principais elementos químicos do aço ABNT 52100 estão presentes nos pontos analisados.

**Figura 70: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos de análise –  $V_c=105\text{ m/min}$ ;  $f=0,05\text{ mm/rev}$ ;  $ap=0,2\text{mm}$ .**

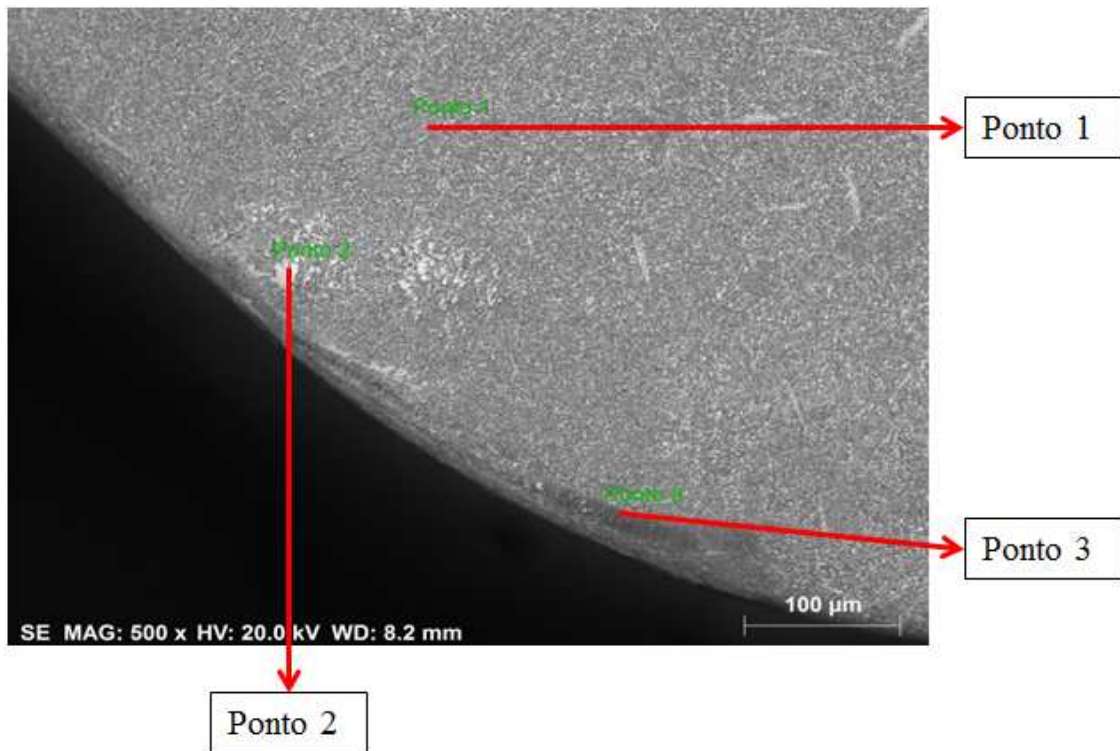
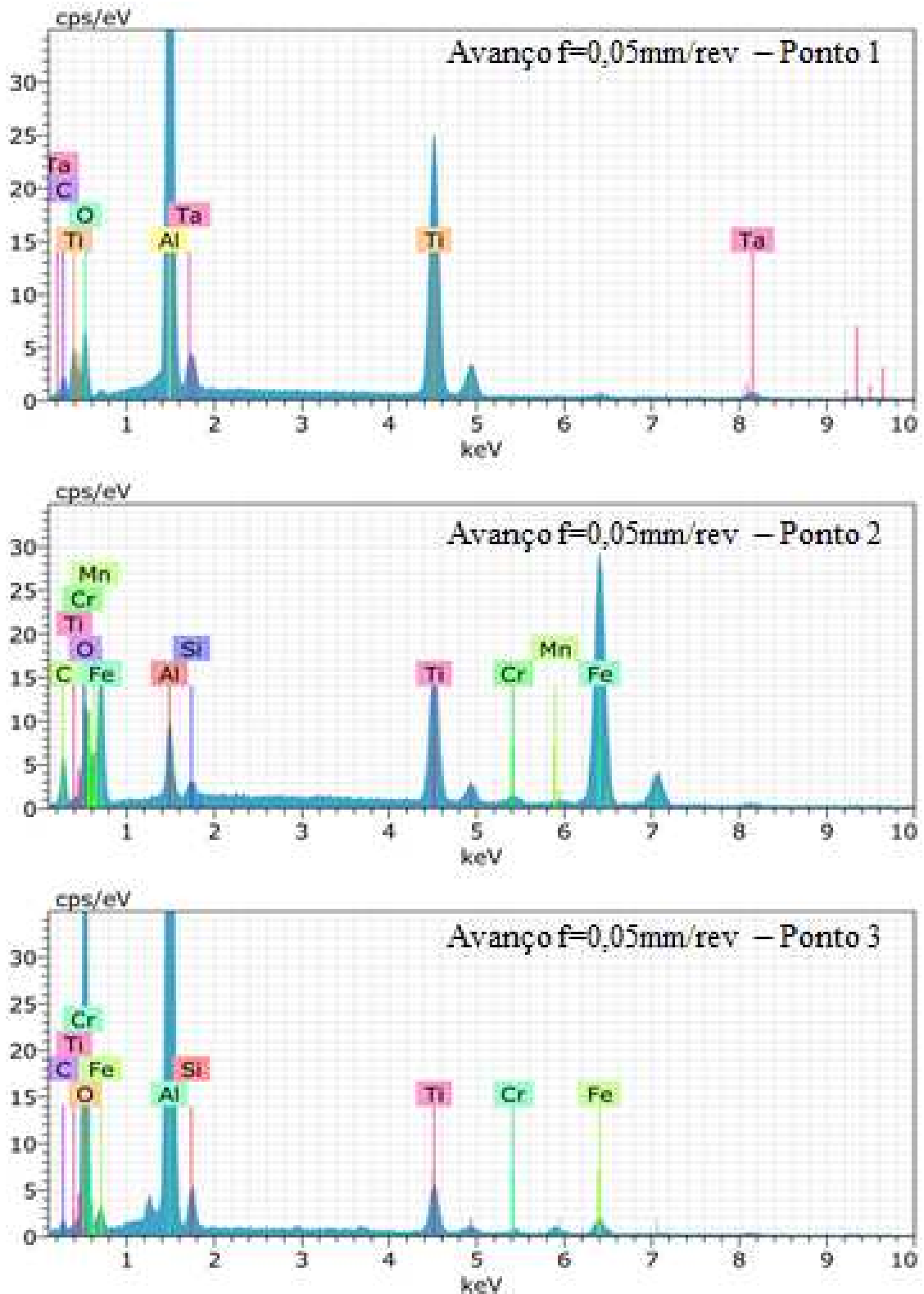


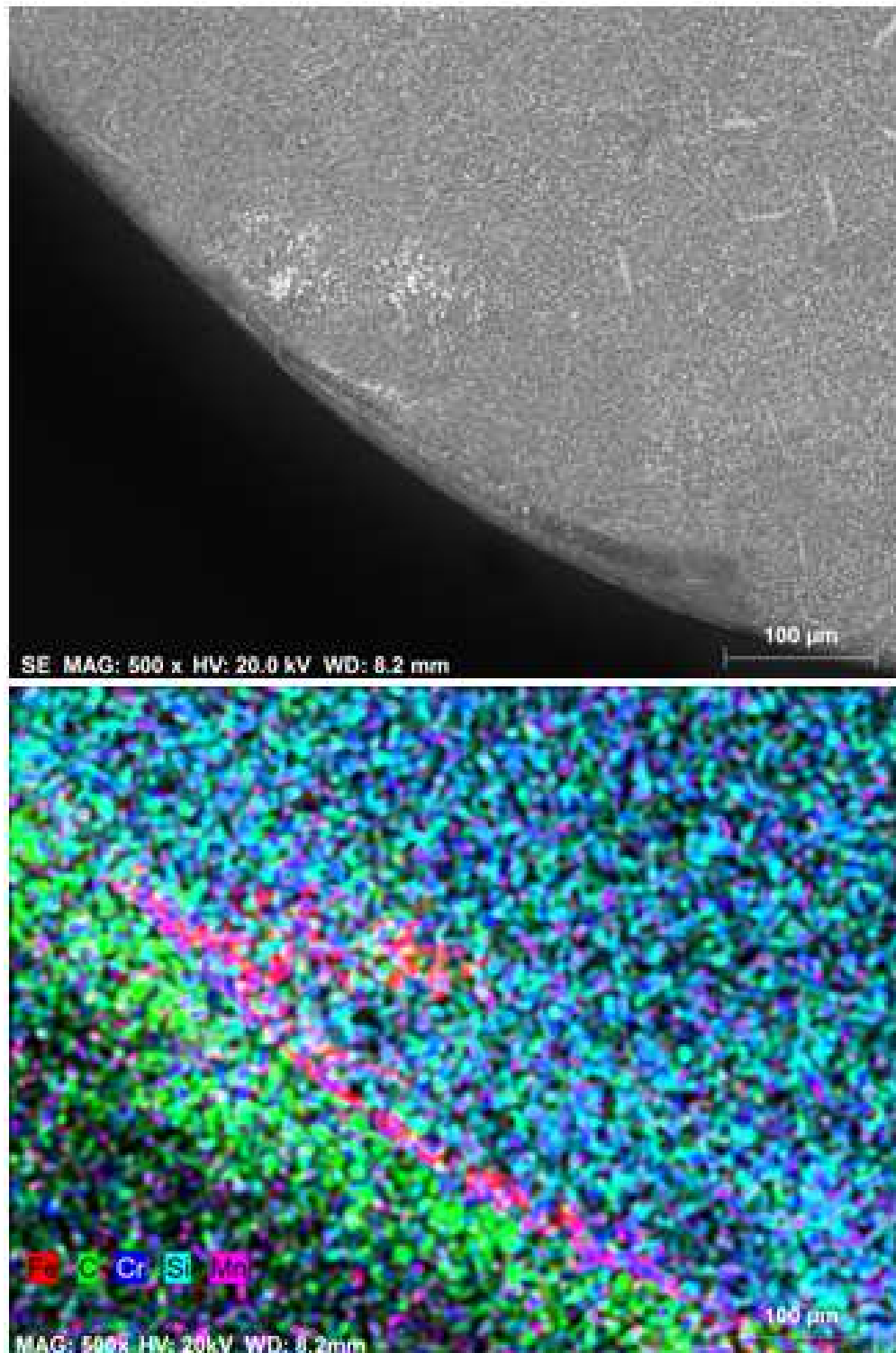
Figura 71: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Pontos – Vc=105 m/min; f=0,05 mm/rev; ap=0,2mm.



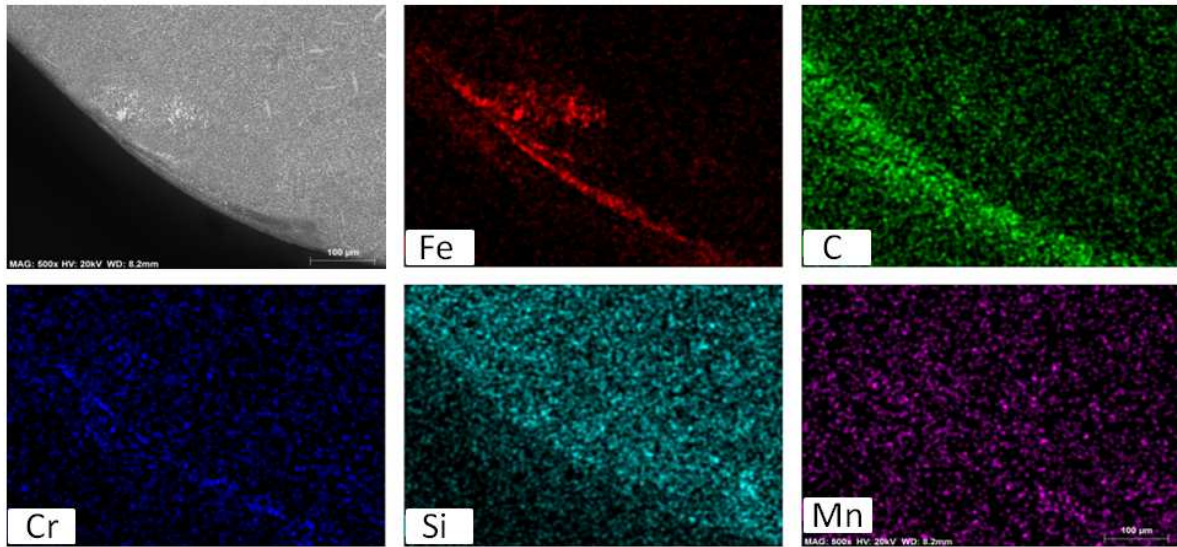
Na análise da Figura 72 e Figura 73 o foco foi verificar os principais elementos químicos da composição do material ABNT 52100, sendo que é mostrado na Figura 72 a

superfície do inserto e a distribuição dos elementos nesta superfície. Já na Figura 73 foi exibido cada elemento isoladamente. Nesta figura observou-se a concentração de cada elemento químico nos locais de adesão do material.

**Figura 72: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos do aço ABNT 52100 –  $V_c=105$  m/min;  $f=0,05$  mm/rev;  $a_p=0,2$ mm.**

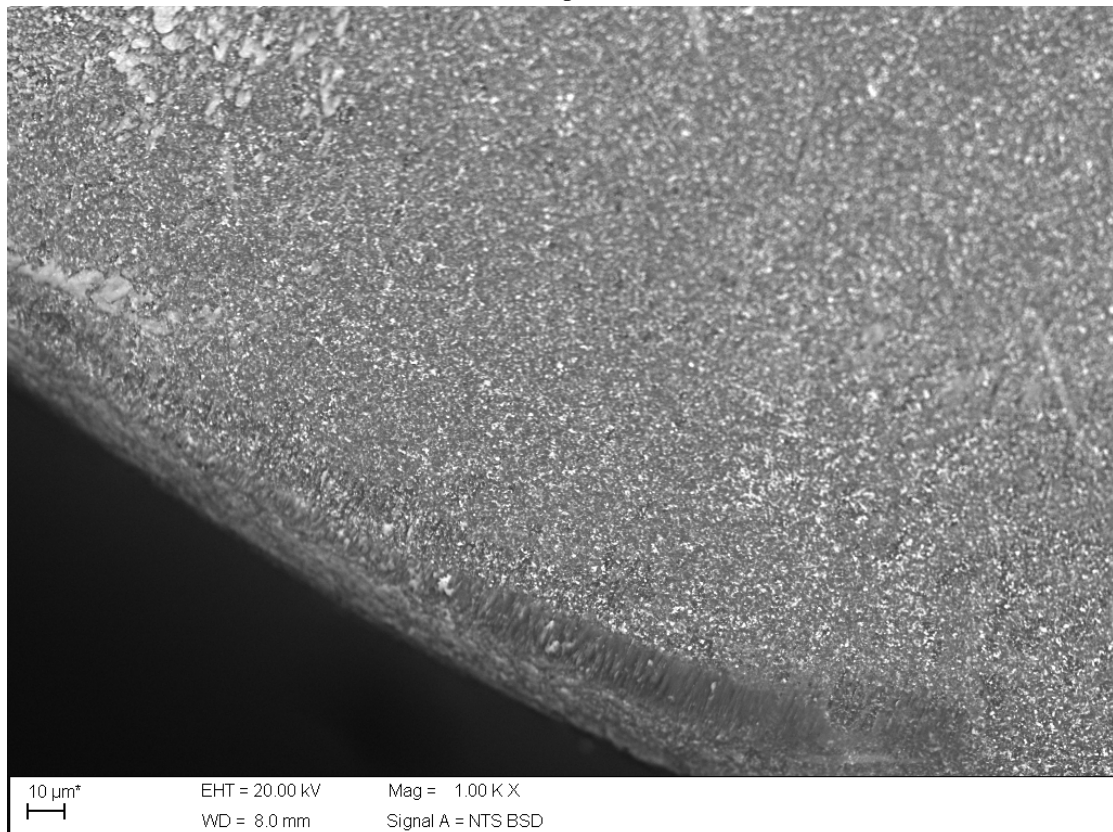


**Figura 73: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Elementos químicos (Isolados) do aço ABNT 52100 – Vc=105 m/min; f=0,05 mm/rev; ap=0,2mm.**



A topologia do inserto após a usinagem é representada na Figura 74.

**Figura 74: MEV da aresta de corte / superfície de saída – Superfície do inserto – Vc=105 m/min; f=0,05 mm/rev; ap=0,2mm.**



Durante a análise deste inserto que realizou a usinagem do corpo de prova que apresentou os menores esforços de corte, assim como na análise dos inserts anteriores

(maiores esforços de corte e *center point*), não foram evidenciados desgastes da ferramenta e também aresta postiça de corte, portanto estes fatores não influenciaram nos resultados encontrados. Outro fator que deve ser observado foi que todos os parâmetros de usinagem estavam nos limites inferiores e que ocorreu pouca adesão de material na superfície do inserto.

## Capítulo 5

### CONCLUSÕES

Conforme os resultados encontrados durante as análises realizadas neste trabalho, apresentam-se as seguintes conclusões:

- Com os resultados obtidos neste trabalho foi demonstrado que é possível em superfícies torneadas do aço ABNT 52100 temperado e revenido com 58 – 62 HRC, sem a utilização de refrigeração, não utilizar o processo de retificação na manufatura de um determinado produto quando o requisito é a rugosidade Ra menor que  $0,80\mu\text{m}$ .
- O avanço (f) foi o principal fator que influenciou em todas as respostas analisadas, exceto na força de avanço  $F_x$  na qual o avanço foi o segundo fator mais importante e a profundidade de corte (ap) foi o fator de maior significância.
- O DOE demonstrou que a interação entre o aumento do avanço (f) utilizando profundidade de corte (ap) no limite inferior ou superior, tende a aumentar o valor de todos os resultados analisados (Aumento das rugosidades e dos esforços corte).

#### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Estudar a influência da geometria da aresta de corte da ferramenta na rugosidade do aço ABNT 52100 temperado e revenido com 58 – 62HRC (653 – 746HV), considerar neste estudo a utilização de ferramentas de superfície alisadora visando otimizar o tempo de usinagem.

Investigar a influência dos parâmetros de usinagem do torneamento na tensão residual do material. Considerar neste estudo o material desde recebido até a usinagem dos corpos de prova visando definir o tipo e intensidade de tensão residual que o processo de torneamento introduz no material.

Analisar o efeito do desgaste da ferramenta na rugosidade do material, considerando a temperatura durante a usinagem e possíveis vibrações durante o torneamento.

Estudar a influência dos parâmetros de usinagem no tempo de vida da ferramenta, considerar diferentes tipos de geometrias de arestas de corte.

Realizar um estudo comparativo entre ferramentas de material cerâmico e CBN, investigando a influência no tempo de vida da ferramenta e rugosidade do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287:** Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18 p.

ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K. The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. **Wear**, v. 196, p. 279-284, August 1996.

AGHA, S. R.; LIU, C. R. Experimental study on the performance of superfinish hard turned surfaces in rolling contact. **Wear**, v. 244, p. 52-59, 2000.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. 3ª reimpressão. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1986. 295p.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Failure analysis and prevention**. v. 11, 2002. 2909 p.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Metallography and microstructures**. v. 9, 2004. 2733 p.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Properties and selection: Irons, steels and high performance alloys**. v. 1 of the 10<sup>th</sup>, edition Metals Handbook, 1990. 2521 p.

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

AZIZI, M. W.; BELHADI, S.; YALLESE, M. A.; MABROUKI, T.; RIGAL, J. F. Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 26, p. 4105-4114, December 2012.

BHADESHIA, H. K. D. H. Steels for bearings. **Progress in Materials Science**, v. 57, p. 268-435, 2012.

BOUACHA, K.; YALLESE, M. A.; MADROUKI, T.; RIGAL, J. F. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, v. 28, p. 349-361, 2010.

CAMPOS, P. H. da S. **Metodologia DEA–OTS: Uma contribuição para a seleção ótima de ferramentas no torneamento do aço H13 endurecido**. 2015. 205 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

DAHLMAN, P.; GUNNBERG F.; JACOBSON, M. The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 147, p. 181-184, April 2004.

DAVIM, J. P. **Machining of hard materials**. London: Springer-Verlag, 2011. 211 p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ª Edição. São Paulo: Artliber, 2013. 270 p.

FARIAS, A. de. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado**. 2009. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GRZESIK, W.; RECH, J.; WANAT, T. Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, p. 255-262, 2007.

HASHIMOTO, F.; GUO, Y. B.; WARREN, A. W. Surface integrity difference between hard turned and ground surfaces and its impact on fatigue life. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 55, p. 81-84, 2006.

KISHAWY, H. A.; ELBESTAWI, W. A. Effects of process parameters on material side flow during hard turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 39, p. 1017-1030, 1999.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability profile of hard cutting and grinding processes. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 54, p. 22-45, 2005.

KURT, A.; YALÇIN, B.; YILMAZ, N. The cutting tool stresses in finish turning of hardened steel with mixed ceramic tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 80, p. 315-325, 2015.

MATSUMOTO, Y.; HASHIMOTO, F.; LAHOTI, G. Surface integrity generated by precision hard turning. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 48, p. 59-62, 1999.

MEDDOUR, I.; YALLESE, M. A.; KHATTABI, R.; ELBAH, M.; BOULANOUAR, L. Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI

52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, p. 1387-1399, March 2015.

MIRIM, D. de C. **Investigação da tensão residual na soldagem laser entre o aço carbono AISI 1010 e o aço inoxidável AISI 304**. 2011. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8ª Edição. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 724 p.

NILO JÚNIOR, L. P. **Otimização de um processo de solda Mig/mag para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos**. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

OLIVEIRA, A. J. de.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, D. J. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5262-5270, 2009.

PERINI, R. **O uso da difração de raios X para determinação da tensão residual induzida pelo processo de roleteamento em uma camisa de cilindro de motor diesel**. 2008. 124 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo.

RAO, C. J.; RAO, D. N.; SRIHARI, P. Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation. **Procedia Engineering**, v. 64, p. 1405-1415, 2013.

RECH, J.; MOISAN, A. Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 543-550, 2003.

REVEL, P.; JOUINI, N.; THOQUENNE, G.; LEFEBRRE, F. High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel. **Precision Engineering**, v. 43, p. 24-33, 2016.

R.G.P. INTERNATIONAL. **AISI 52100 100Cr6 Chrome steel balls**. Revisão nº 4. Disponível em: < <http://www.rgpballs.com/en/products/BALLS/QUICK-SELECTION/STEEL/CHROME-STEEL/AISI-52100-100Cr6-CHROME-STEEL-BALLS>>. Acesso em: 01 julho 2015.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo técnico do fabricante de ferramentas – Corokey**. 2010. Disponível em: < <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/search.aspx?q=corokey&r=contentsource%3d^Catalogues%24> >. Acesso em: 02 abril 2016.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo técnico do fabricante de ferramentas – Ferramentas para torneamento. 2015.** Disponível em: < <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/downloads?Country=br> >. Acesso em: 02 abril 2016.

STICKELS, C. A. Carbide refining heat treatments for 52100 bearing steel. **Metallurgical Transactions**, v. 5, p. 865-874, April 1974.

THIELE, J. D.; MELKOTE, S. N. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 94, p. 216-226, 1999.

UNTERWEISER, P. M.; BOYER, H. E.; KUBBS, J. J. **The heat treater's guide.** 2ª edição. United States of America: American Society for Metals, 1982. 255 p.

USINAGEM CARILLO – UC. **Torneamento de peças de pequeno e grande porte com alta precisão e complexibilidade.** Disponível em: < <http://www.usinagemcarillo.com.br/servicos.html> >. Acesso em: 13 outubro 2016.

VIANA, C. V. **Otimização dos parâmetros laser na texturização de anéis de pistão com cobertura em PVD através da utilização do DOE.** 2014. 83 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

VILLARES METALS. **Aços especiais para aplicações mecânicas, V52100.** Junho/2005. Disponível em: < <http://www.proacos.com.br/images/stories/catalogos/V52100.pdf> >. Acesso em: 21 julho 2015.

YANG, KAI; EL-HAIK, B. S. **Design for six sigma – A roadmap for product development.** New York: McGraw-Hill, 2003. 624 p.