

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO – MESTRADO PROFISSIONAL**

**Jéferson Hilário Wallendorff Nicolodi**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FERRAMENTA CERÂMICA  
MISTA TIPO “S” NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 4140  
ENDURECIDO**

Passo Fundo

2016

**Jéferson Hilário Wallendorff Nicolodi**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FERRAMENTA CERÂMICA  
MISTA TIPO “S” NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 4140  
ENDURECIDO**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Airton Consalter

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2016

Jéferson Hilário Wallendorff Nicolodi

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FERRAMENTA CERÂMICA  
MISTA TIPO “S” NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 4140  
ENDURECIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 19 de fevereiro de 2016.

Os componentes da banca examinadora abaixo aprovaram a dissertação:

Professor Doutor Luiz Airton Consalter  
Orientador

Professor Doutor André João de Souza  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Professor Doutor Márcio Walber  
Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Marcelo Hemkemeier  
Universidade de Passo Fundo - UPF

*Dedicatória*

*À Deus, por nunca me abandonar.  
À minha esposa, companheira, amiga e fonte inspiradora nesta jornada.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, Ele que é a vida, a sorte, o princípio e o fim, merece toda a glória e todo o louvor.

À minha esposa, amada, companheira, amiga e fonte inspiradora, a qual colaborou e motivou a vencer mais este desafio em minha vida.

Aos meus familiares e amigos, pela compreensão decorrente do pouco contato que tivemos neste período.

À Universidade de Passo Fundo, por ter concedido a bolsa do Mestrado, caso contrário não seria possível realizar esta conquista.

Ao meu orientador Luiz Airton Consalter pela disponibilidade, conhecimento transmitido e sinceridade.

Ao professor André João de Souza, pela disponibilidade e apoio nesta jornada.

Um especial agradecimento aos professores: Luiz Fernando Prestes, Agenor Dias de Meira Junior, Márcio Walber, José Antônio Portella, Marcelo Hemkemeier, Charles Leonardo Israel e Vagner Guimarães, pelo incentivo e apoio nos momentos necessários.

À secretaria do Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação da UPF, pelo apoio irrestrito durante o decorrer do curso, em especial à Helena Nadir.

A todos os colaboradores (engenheiros, técnicos, laboratoristas, estagiários, funcionários terceirizados) do Núcleo de Tecnologia Mecânica e do Laboratório de Ensaios Mecânicos da UPF, pela dedicação e disponibilidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação da UPF, pela excelente formação proporcionada.

À ARWI, Distribuidora Sandvik, pela doação das ferramentas cerâmicas utilizadas nos experimentos desta pesquisa.

À Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas - Não-Me-Toque/RS, pela doação do aço ABNT 4140 utilizado nos experimentos desta pesquisa.

## RESUMO

O presente trabalho mostra a avaliação do desempenho da ferramenta cerâmica mista, com microgeometria de gume tipo “S”, no torneamento a seco do aço ABNT 4140 endurecido a 55 HRC. Foi investigada a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) sobre as falhas da ferramenta, sobre a força de usinagem e sobre a rugosidade da superfície usinada. Os experimentos foram delineados e analisados com auxílio da técnica de planejamento fatorial completo. Os resultados observados indicaram que os maiores valores de velocidade de corte e avanço exerceram influência significativa sobre a vida da ferramenta. O avanço foi o parâmetro que exerceu a maior influência sobre a força de usinagem e sobre a qualidade da superfície usinada. O desgaste de cratera e o desgaste de ponta ( $VB_c$ ) ocorreram em todas as condições de corte. Os mecanismos de desgaste predominantes nas ferramentas foram a difusão, a abrasão e a adesão (*attrition*). A equação da curva de vida da ferramenta foi estabelecida para as condições de usinagem desta pesquisa visando a posterior otimização deste processo.

**Palavras-chave:** Torneamento de aço endurecido. Parâmetros de corte. Ferramenta cerâmica mista. Microgeometria do gume.

## ABSTRACT

The present work shows the performance evaluation of the mixed ceramic tool, type "S", on the ABNT 4140 hardened steel turning (55HRC). The influence of cutting parameters were investigated (cutting speed and feed rate) on the tool failure, cutting forces and surface roughness. A full factorial design of experiment was used to conduct and analyze the results. The results show that higher cutting speeds and feed rates to have more prominent effect on tool life. The parameter of greater influence on the cutting force and the surface roughness was the feed rate. Crater and the nose wear ( $VB_c$ ) occurred in all cutting conditions. The tool wear mechanisms predominant were diffusion, abrasion and adhesion (attrition). The equation of the tool life curve was established for the machining conditions to providing the optimization of this process in the future.

**Keywords:** Hardened turning steel. Cutting parameters. Mixed ceramic tool. Cutting edge microgeometry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relações de entrada e saída em torneamento.....	20
Figura 2 - Relação entre a tenacidade e a dureza entre os materiais aplicados como ferramentas de corte.....	22
Figura 3 - Variação da dureza a quente em função da temperatura para diferentes materiais de ferramenta.....	22
Figura 4 - Divisão e subdivisões dos grupos de materiais cerâmicos. ....	24
Figura 5 - Ângulos da ferramenta de torneiar.....	25
Figura 6 - Microgeometria dos perfis dos gumes das pastilhas de cerâmica. ....	27
Figura 7 - Tipo de cavaco “dente de serra” formado no torneamento dos aços duros. ....	30
Figura 8 - Representação das componentes das forças de corte atuantes no torneamento.....	31
Figura 9 - Zonas de deformação do material no processo de usinagem.....	32
Figura 10 - Comportamento das componentes da força de usinagem em relação a: (a) profundidade de corte; (b) avanço; (c) velocidade de corte. ....	33
Figura 11 - Tipos de falhas nas ferramentas de corte no torneamento.....	35
Figura 12 - Esquema dos tipos de desgaste da ferramenta de corte: (A) desgaste de cratera; (B) desgaste de flanco; (C) e (D) desgaste de entalhe.....	39
Figura 13 - Desgaste de cratera (a), desgaste de flanco e entalhe (b) no torneamento do aço SAE 4140 (55 HRC) com ferramentas de cerâmica.....	40
Figura 14 - Padronização de desgaste em ferramentas de torneiar monocortantes. ....	41
Figura 15 - Gráficos auxiliares para a determinação da curva de vida de uma ferramenta $T \times v_c$ .....	43
Figura 16 - Representação em escalas logarítmicas da curva de vida da ferramenta.....	43
Figura 17 - Classificação de acabamento superficial. ....	44
Figura 18 - Desvio médio aritmético ( $R_a$ ). ....	46
Figura 19 - Fluxograma do planejamento para a execução dos experimentos.....	50
Figura 20 - Dimensões dos corpos de prova em milímetros. ....	52
Figura 21 - Geometria ISO CNGA 120408 S 01525 6050 da pastilha de cerâmica mista. ....	52
Figura 22 - Sistema de medição de força em torneamento.....	53
Figura 23 - Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre o “ $VB_c$ ”.....	57
Figura 24 - Desgaste de ponta e entalhe após 50 minutos de usinagem, as figuras (a), (b) e (c) representam o avanço de 0,11 mm/volta e velocidades de corte de 120, 135 e 150 m/min	

respectivamente. As figuras (d), (e) e (f) representam o avanço de 0,22 mm/volta para as velocidades de corte de 120, 135 e 150 respectivamente. ....	58
Figura 25 - Desgaste de cratera após 50 minutos de usinagem, as figuras (a), (b) e (c) representam o avanço de 0,11 mm/volta e velocidades de corte de 120, 135 e 150 m/min respectivamente. As figuras (d), (e) e (f) representam o avanço de 0,22 mm/volta para as velocidades de corte de 120, 135 e 150 respectivamente. ....	59
Figura 26 - Efeitos da variação da velocidade de corte para o avanço de $f=0,11$ mm/volta, sobre as componentes da força de usinagem. Força de avanço (a), força de corte (b) e força passiva (c). ....	60
Figura 27 - Efeitos da variação da velocidade de corte para o avanço de $f=0,22$ mm/volta, sobre as componentes da força de usinagem. Força de avanço (a), força de corte (b) e força passiva (c). ....	61
Figura 28 - Efeito da variação dos parâmetros de corte sobre a rugosidade “ $R_a$ ” ....	64
Figura 29 - Interações entre o $VB_c$ e o $R_a$ , na condição de $f = 0,11$ mm/volta. Velocidades de corte ( $v_c$ ): (a) 120 m/min; (b) 135 m/min e (c) 150 m/min. ....	65
Figura 30 - Interações entre o $VB_c$ e o $R_a$ , na condição de $f = 0,22$ mm/volta. Velocidades de corte ( $v_c$ ): (a) 120 m/min; (b) 135 m/min e (c) 150 m/min. ....	65
Figura 31 - Interações entre o desgaste de ponta ( $VB_c$ ) e as componentes da força de usinagem. Condições: $v_c = 120$ (a), 135 (b) e 150 (c) m/min, $f = 0,11$ mm/volta. ....	67
Figura 32 - Interações entre o desgaste de ponta ( $VB_c$ ) e as componentes da força de usinagem. Condições: $v_c = 120$ (a), 135 (b) e 150 (c) m/min, $f = 0,22$ mm/volta. ....	67
Figura 33 - Detalhes da pastilha de cerâmica antes dos ensaios (zero minuto de usinagem). .	69
Figura 34 - Espectro (EDS) da composição química sobre a face da ferramenta antes dos ensaios. ....	69
Figura 35 - Detalhes da ferramenta cerâmica apontando as falhas comuns que ocorreram ao final dos ensaios (50 minutos de usinagem). ....	70
Figura 36 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição de corte de $v_c = 120$ m/min e $f = 0,11$ mm/volta (a) e, região analisada via EDS: [A] cratera, [B] gume e [C] flanco (ponta) (b). ....	70
Figura 37 - Composição química da cratera realizada na região [A] da Figura 36 (b). ....	71
Figura 38 - Composição química do gume realizada na região [B] da Figura 36 (b). ....	71
Figura 39 - Composição química do flanco (ponta) realizada na região [C] da Figura 36 (b). .	71

Figura 40 - Desgaste de ponta em função do tempo de corte para a condição de avanço de $f = 0,11$ mm/volta. ....	73
Figura 41 - Desgaste de ponta em função do tempo de corte para a condição de avanço de $f = 0,22$ mm/volta. ....	73
Figura 42 - Gráfico da curva de vida da ferramenta cerâmica em escala logarítmica, $f = 0,11$ mm/volta. ....	74
Figura 43 - Gráfico de superfície dos efeitos combinados da $v_c$ e $f$ sobre o tempo de vida da ferramenta (T). ....	75
Figura 44 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição $v_c = 135$ m/min e $f = 0,11$ mm/volta. ....	85
Figura 45 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” Figura 44 (b). ....	85
Figura 46 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 44 (b). ....	85
Figura 47 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 44 (b). ....	86
Figura 48 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição $v_c = 150$ m/min e $f = 0,11$ mm/volta. ....	86
Figura 49 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 48 (b). ....	86
Figura 50 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 48 (b). ....	87
Figura 51 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 48 (b). ....	87
Figura 52 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição $v_c = 120$ m/min e $f = 0,22$ mm/volta. ....	87
Figura 53 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 52 (b). ....	88
Figura 54 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 52 (b). ....	88
Figura 55 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 52 (b). ....	88
Figura 56 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição $v_c = 135$ m/min e $f = 0,22$ mm/volta. ....	89

Figura 57 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 56 (b). .....	89
Figura 58 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 56 (b). .....	89
Figura 59 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 56 (b). .....	90
Figura 60 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição $v_c = 150$ m/min e $f = 0,22$ mm/volta. ....	90
Figura 61 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 60 (b). .....	90
Figura 62 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 60 (b). .....	91
Figura 63 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 60 (b). .....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT/SAE 4140 deste experimento.....	51
Tabela 2 - Parâmetros de corte e seus referidos níveis.....	55
Tabela 3 - Vida da ferramenta cerâmica para o “VB <sub>c</sub> ” de 0,1mm. ....	74
Tabela 4 - Definição da equação de vida da ferramenta para os diferentes avanços. ....	75

## NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio (Alumina)
a <sub>p</sub>	Profundidade de corte [mm]
CBN	Nitreto de boro cúbico
Cermet	Material composto de ferramenta de corte (cerâmica + metal)
CNC	Comando numérico computadorizado
DIN	<i>Deutsches institut für normung</i>
EDS	Espectrômetro de Energia Dispersiva de raios-x
<i>f</i>	Avanço por volta [mm/volta]
F	Força de usinagem [N]
F <sub>f</sub>	Força de avanço [N]
F <sub>c</sub>	Força de corte [N]
F <sub>p</sub>	Força passiva [N]
HRC	Escala de dureza Rockwell-C
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NBR	Norma brasileira
O	Oxigênio
PCBN	Nitreto de boro cúbico policristalino
r <sub>ε</sub>	Raio de ponta da ferramenta [mm]
R <sub>a</sub>	Parâmetro de desvio médio aritmético [μm]
R <sub>q</sub>	Parâmetro de desvio médio quadrático [μm]
R <sub>t</sub>	Parâmetro de rugosidade total (atual R <sub>z</sub> ) [μm]
R <sub>y</sub>	Parâmetro de rugosidade máxima [μm]
R <sub>z</sub>	Parâmetro de rugosidade da altura total do perfil [μm]
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nitreto de silício
SiC	Carboneto de Silício
T	Tempo de vida da ferramenta de corte [min]
Ti(C,N)	Carbonitreto de titânio

TiAlN	Nitreto de alumínio titânio
TiC	Carboneto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
UPF	Universidade de Passo Fundo
VB <sub>c</sub>	Desgaste de ponta
v <sub>c</sub>	Velocidade de corte [m/min]
WC	Carboneto de tungstênio
ZrC	Carboneto de zircônio
ZrO <sub>2</sub>	Zircônio
$\alpha$	Ângulo de folga ou incidência [°]
$\beta$	Ângulo de cunha da ferramenta [°]
$\gamma$	Ângulo de saída [°]
$\epsilon_r$	Ângulo de ponta da ferramenta [°]
$\lambda$	Ângulo de inclinação [°]
$\chi_r$	Ângulo de posição ou de direção (entrada ou ataque) [°]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 O problema da pesquisa.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.3.1 Objetivo geral .....	18
1.3.2 Objetivos específicos .....	18
<b>1.4 Estrutura da dissertação.....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Variáveis envolvidas do processo .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Variáveis independentes de entrada no torneamento dos aços endurecidos .....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Material e dureza da peça .....	21
2.2.2 Material da ferramenta.....	21
2.2.3 Ferramentas de material cerâmico .....	23
2.2.4 Geometrias da ferramenta.....	24
2.2.5 Macrogeometria das ferramentas.....	25
2.2.6 Microgeometria das ferramentas .....	27
2.2.7 Parâmetros de corte.....	28
<b>2.3 Variáveis dependentes de saída.....</b>	<b>29</b>
2.3.1 Formação de cavaco de materiais endurecidos.....	29
2.3.2 Forças de corte no torneamento duro.....	30
2.3.3 Mecanismos de desgaste e falhas das ferramentas de corte.....	35
2.3.4 Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte.....	35
2.3.5 Falhas da ferramenta de corte .....	37
2.3.6 Fim de vida da ferramenta .....	41
2.3.7 Curva de vida da ferramenta.....	42
2.3.8 Acabamento superficial .....	43
2.3.9 Rugosidade da superfície usinada.....	44
<b>2.4 Torneamento dos aços endurecidos .....</b>	<b>46</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Materiais e equipamentos .....</b>	<b>51</b>
3.1.1 Material para usinagem.....	51
3.1.2 Corpos de prova .....	51
3.1.3 Suporte e pastilhas de corte .....	52
3.1.4 Máquina-ferramenta .....	53
3.1.5 Dinamômetro .....	53
3.1.6 Rugosímetro de bancada.....	54

3.1.7	MEV, estéreo microscópio e espectrômetro .....	54
3.1.8	Microdurômetro .....	54
<b>3.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>54</b>
3.2.1	Critério de fim de vida da ferramenta.....	55
3.2.2	Parâmetros de corte.....	55
3.2.3	Intervalos de tempo dos ensaios .....	55
3.2.4	Planejamento dos ensaios .....	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre as falhas da ferramenta.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre as componentes da força de usinagem.....</b>	<b>60</b>
4.2.1	Força de avanço ( $F_f$ ) .....	61
4.2.2	Força de corte ( $F_c$ ) .....	62
4.2.3	Força passiva ( $F_p$ ) .....	62
<b>4.3</b>	<b>Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre a superfície usinada .....</b>	<b>63</b>
<b>4.4</b>	<b>Interações das falhas da ferramenta com a rugosidade.....</b>	<b>65</b>
<b>4.5</b>	<b>Interações das falhas da ferramenta com a força de usinagem .....</b>	<b>66</b>
<b>4.6</b>	<b>Investigação das falhas e mecanismos de desgaste ocorridos na ferramenta .....</b>	<b>69</b>
<b>4.7</b>	<b>Curva de vida da ferramenta .....</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>Sobre os efeitos dos parâmetros de corte (<math>v_c</math> e <math>f</math>) nas falhas da ferramenta .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2</b>	<b>Sobre a influência dos parâmetros de corte na força de usinagem.....</b>	<b>77</b>
<b>5.3</b>	<b>Sobre os efeitos da velocidade de corte e do avanço na superfície usinada .....</b>	<b>77</b>
<b>5.4</b>	<b>Sobre as interações das falhas da ferramenta com a rugosidade.....</b>	<b>78</b>
<b>5.5</b>	<b>Sobre as interações das falhas da ferramenta com a força de usinagem .....</b>	<b>78</b>
<b>5.6</b>	<b>Sobre as falhas e mecanismos de desgaste nas ferramentas .....</b>	<b>78</b>
<b>5.7</b>	<b>Sobre a curva de vida da ferramenta .....</b>	<b>79</b>
<b>5.8</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>
<b>A.1</b>	<b>Certificado de qualidade dos resultados do processo de tratamento térmico.....</b>	<b>92</b>
<b>A.2</b>	<b>Documento de calibração do dinamômetro.....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, surgiram máquinas-ferramentas mais rígidas e com melhor precisão dimensional a altas rotações, juntamente com o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas, com características de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, o que propiciou a usinagem dos aços endurecidos pelo processo de torneamento (DAVIM, 2011).

São considerados aços endurecidos aqueles com dureza superior a 45 HRC. Para a usinagem deste material, sobretudo em operações de acabamento, empregava-se o processo de retificação, sendo este de alto custo e elevado tempo de fabricação (BOUACHA *et al.*, 2010).

O torneamento de aços endurecidos é um processo de usinagem largamente empregado na produção industrial moderna, utilizado em uma vasta gama de produtos industriais, tais como: eixos, rolamentos, cames, peças forjadas, matrizes e moldes (DUMPALA; CHANDRAN; RAO, 2015).

Os materiais de ferramentas mais indicados para o torneamento duro são as cerâmicas mistas ( $Al_2O_3 + TiC$ ) e o nitreto de boro cúbico (CBN), pois possuem certas características que melhoram o desempenho e representam benefícios quando comparado ao processo de retificação. O uso deles permite realizar operações de desbaste e acabamento no mesmo ciclo de trabalho, aumentando a flexibilidade; dispensa o uso de meios lubrificantes; propicia altas taxas de remoção de cavaco; possibilita a usinagem de peças com geometria complexa; reduz significativamente o tempo de preparação; gera menores custos de produção (CHAVOSHI; TAJDARI, 2010).

No entanto, para conseguir tais benefícios e melhor desempenho, deve-se optar por máquinas-ferramentas rígidas, geometria e microgeometria de ferramentas corretas e valores adequados para os parâmetros de corte. Tais benefícios também são comprometidos devido à carência de informações tecnológicas, referente ao correto planejamento e otimização deste processo (DAVIM, 2011).

Levando em consideração os aspectos mencionados acima, foi delineada a presente pesquisa por meio de um estudo planejado, visando analisar a influência de variáveis de entrada do processo sobre o comportamento das falhas e dos mecanismos de desgaste de ferramenta cerâmica, das forças de usinagem e da rugosidade da superfície usinada no torneamento longitudinal externo a seco do aço ABNT 4140 endurecido.

## 1.1 O problema da pesquisa

O processo de usinagem, por si só, é considerado relativamente complexo, em função da difícil predição dos efeitos das diversas variáveis envolvidas. Em se tratando do torneamento de aços endurecidos, caracterizados pela baixa usinabilidade<sup>1</sup>, depara-se com situações de grande geração de calor por atrito, tendência a vibrações por efeito da necessidade de um raio de ponta da ferramenta suficientemente grande e, conseqüentemente, possíveis oscilações das forças de usinagem no transcorrer do corte. Estas situações tendem a gerar avarias e aumentar a taxa de desgaste da ferramenta de corte (DAVIM, 2011).

O torneamento de aços endurecidos é um processo de usinagem que exige ferramentas e máquinas de alto desempenho (portanto, de alto custo), o que impacta sobre as despesas produtivas e implica na necessidade de otimização do processo. Além disso, o processo não é fácil, sendo necessário conhecer o comportamento do corte nestas condições e seus efeitos sobre as variáveis de saída, para então realizar o correto planejamento deste processo.

Há poucas informações sobre o desempenho da ferramenta cerâmica mista tipo “S” no torneamento de acabamento dos aços endurecidos, principalmente no que se referem à influência dos parâmetros de corte vinculados as falhas desta ferramenta sobre as forças de corte e a rugosidade das peças usinadas.

## 1.2 Justificativa

Esta pesquisa contribuirá com informações tecnológicas do desempenho da ferramenta cerâmica mista tipo “S” na operação de torneamento de acabamento do aço ABNT 4140 endurecido, principalmente no que se refere à influência da velocidade de corte e do avanço sobre as falhas da ferramenta, sobre a força de usinagem e sobre a qualidade da superfície usinada, auxiliando dessa forma, para o correto planejamento e otimização deste processo.

---

<sup>1</sup>A usinabilidade de um material é definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades (que influem sobre: a vida da ferramenta, os esforços de corte, o acabamento da superfície usinada, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco) em relação a outro material tomado como padrão. Em outras palavras, a usinabilidade expressa o grau de dificuldade de se usinar um determinado material (FERRARESI, 2011). A usinabilidade é uma propriedade que depende da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça. Algumas propriedades dos materiais podem influenciar na usinabilidade: *dureza e resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e taxa de encruamento.*

### 1.3 Objetivos

A seguir serão estabelecidos os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

#### 1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho da ferramenta cerâmica mista tipo “S” no torneamento do aço ABNT 4140 endurecido a 55 HRC, analisando a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte “ $v_c$ ” e avanço “ $f$ ”) sobre as falhas da ferramenta, sobre as forças de usinagem e sobre a rugosidade da superfície usinada.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- 1) Analisar os efeitos dos parâmetros de corte ( $v_c$  e  $f$ ) sobre as falhas na ferramenta.
- 2) Estudar as influências de  $v_c$  e  $f$  sobre as componentes da força de usinagem (força de avanço “ $F_f$ ”, força passiva “ $F_p$ ” e força de corte “ $F_c$ ”).
- 3) Analisar os efeitos dos parâmetros de corte ( $v_c$  e  $f$ ) sobre o desvio médio aritmético (“ $R_a$ ”).
- 4) Avaliar as interações das falhas da ferramenta com a rugosidade da superfície torneada e com as forças de usinagem.
- 5) Investigar as falhas e os mecanismos de desgaste ocorridos nas pastilhas de cerâmica.
- 6) Estabelecer a curva e equação do tempo de vida da ferramenta.

### 1.4 Estrutura da dissertação

O documento escrito foi organizado em cinco capítulos:

- Capítulo 1: *Introdução*

Breve contexto sobre o tema abordado, bem como o problema da pesquisa, a justificativa e os objetivos propostos para o estudo em questão.

- Capítulo 2: *Revisão Bibliográfica*

Revisão sucinta da literatura sobre usinagem dos aços endurecidos, ferramentas cerâmica, tipos de desgastes e avarias das ferramentas de torneamento e rugosidade.

- **Capítulo 3: *Materiais e Métodos***

Apresentação das características da máquina-ferramenta, da ferramenta de corte, do material utilizado para os experimentos, dos instrumentos de medição, dos parâmetros de corte e descrição dos procedimentos utilizados para executar os experimentos.

- **Capítulo 4: *Resultados e Discussão***

Abordagem com embasamento na literatura referente aos resultados obtidos da influência dos parâmetros de corte sobre avarias e desgastes da ferramenta cerâmica, sobre as forças de usinagem e sobre a rugosidade da superfície torneada.

- **Capítulo 5: *Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros***

Conclusões decorrentes dos resultados obtidos, com base nos efeitos dos parâmetros de entrada sobre as variáveis de saída e suas interações e propostas para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

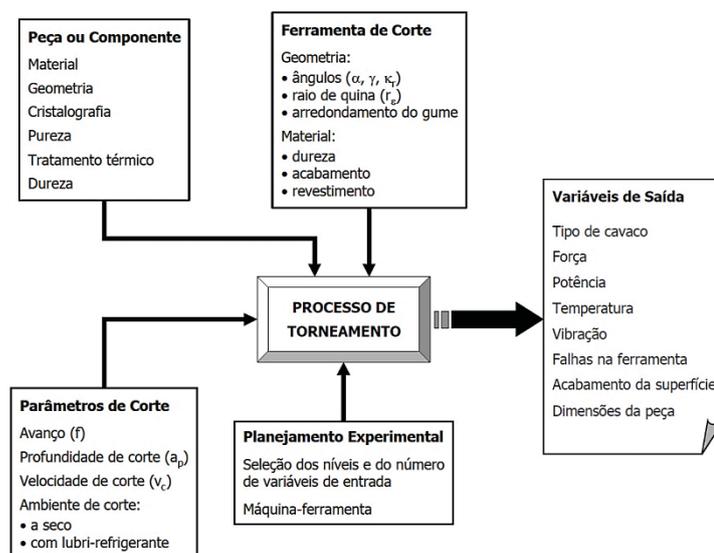
Na sequência será apresentada a revisão bibliográfica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, a qual foi organizada em quatro seções: 1) Variáveis envolvidas do processo; 2) Variáveis independentes de entrada no torneamento dos aços endurecidos; 3) Variáveis dependentes de saída; e 4) Torneamento dos aços endurecidos.

### 2.1 Variáveis envolvidas do processo

No que se refere aos processos de usinagem, existem variáveis que podem ser controladas (variáveis independentes de entrada), e variáveis que não podem ser controladas (variáveis dependentes de saída), já que são influenciadas pelas variáveis independentes de entrada (FERRARESI, 2011); (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Uma forma de controlar o processo de torneamento é intervir diretamente nas variáveis de entrada (independentes) e analisar seus efeitos nas variáveis de saída (dependentes). A taxa de remoção de material, o rendimento da ferramenta e a qualidade da superfície usinada são variáveis de saída que podem ser determinantes para as condições ideais nos processos de usinagem (SOUZA, 2011). A Figura 1 resume as relações de entrada/saída referentes às operações de torneamento.

Figura 1 - Relações de entrada e saída em torneamento.



## 2.2 Variáveis independentes de entrada no torneamento dos aços endurecidos

Dentre as diversas variáveis de entrada envolvidas no processo de torneamento duro, vale destacar as seguintes: material e dureza da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta e parâmetros de corte.

### 2.2.1 Material e dureza da peça

As propriedades físicas, químicas e mecânicas do material da peça bruta (dureza, resistência à tração, composição química, inclusões, afinidade química com o meio lubrificante ou com a ferramenta, microestrutura, encruamento) podem ser especificadas ou previamente conhecidas. Materiais como aço inoxidável, titânio, ou aços endurecidos de difícil usinabilidade podem gerar desgaste rápido da ferramenta, elevadas forças e potências de corte, e acabamento superficial de baixa qualidade. Estes problemas podem resultar em uma redução de tempo de vida da ferramenta de corte, ainda que estes materiais possam ser selecionados para satisfazer critérios funcionais importantes de projeto (SOUZA, 2004).

### 2.2.2 Material da ferramenta

A usinagem fundamenta-se na remoção de material usando uma ferramenta de dureza e resistência mecânica maiores que a peça. No caso dos aços endurecidos, a usinagem com ferramentas de geometria definida é praticável devido à evolução de máquinas e materiais de ferramentas capazes de suportar as elevadas forças de corte, altas temperaturas, grandes tensões de ruptura e de alívio causadas pela formação do cavaco (MACHADO *et al.*, 2012).

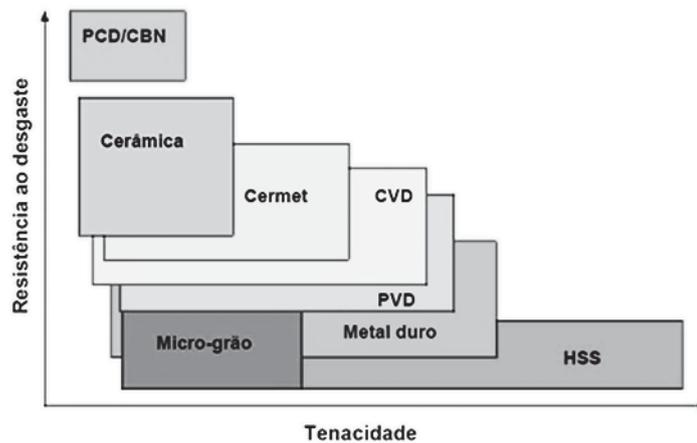
Diante dessas particularidades, há uma série de requisitos em alto grau para uma correta seleção do material da ferramenta no torneamento duro, tais como: dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade, resistência à compressão, resistência ao choque térmico e resistência às reações químicas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As ferramentas que satisfazem tais condições são as classes cerâmicas e PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino) (MACHADO *et al.*, 2012); (GODOY; DINIZ, 2011), (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

No geral, a dureza e tenacidade são duas propriedades antagônicas (alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais de

ferramentas de corte se tornou um desafio para os fabricantes. A Figura 2 mostra o comportamento de cada material, em relação a estas duas propriedades. A conciliação destas propriedades foi conseguida com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento dos grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que lhes confere graus compatíveis de pureza e qualidade (SOUZA, 2011).

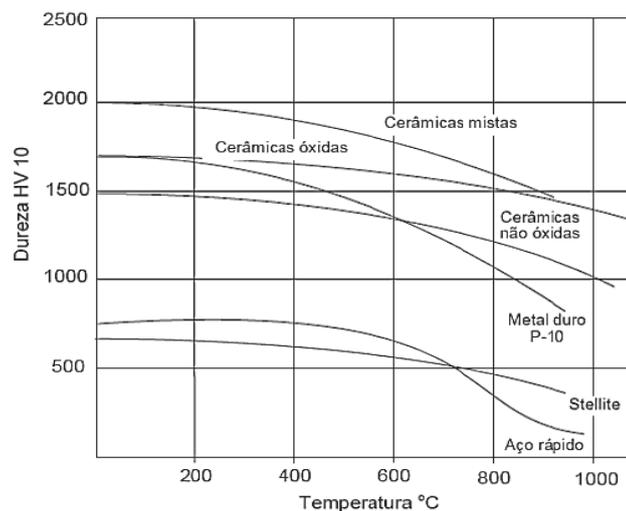
Figura 2 - Relação entre a tenacidade e a dureza entre os materiais aplicados como ferramentas de corte.



Fonte: Souza (2011, p. 30).

A Figura 3 mostra a dureza a quente dos principais materiais de ferramentas.

Figura 3 - Variação da dureza a quente em função da temperatura para diferentes materiais de ferramenta.



Fonte: Souza (2011, p. 65).

Observa-se na Figura 3 que, apesar da baixa tenacidade, as cerâmicas apresentam altíssima resistência ao calor, principalmente a cerâmica mista.

Apesar de as ferramentas PCBN terem um ótimo comportamento no torneamento dos aços endurecidos, seu alto custo em relação às pastilhas de cerâmica restringem sua utilização.

Assim, a classe das ferramentas cerâmicas tem maior representatividade na usinagem dos aços endurecidos (KLOCKE, 2011). Estes motivos incentivaram a escolha da ferramenta de cerâmica para a realização dos experimentos deste trabalho.

### 2.2.3 Ferramentas de material cerâmico

A matriz das pastilhas de cerâmicas é constituída de elementos metálicos e não metálicos no formato de óxidos, carbonetos ou nitretos, e isto lhes confere certas características, dentre as quais, destacam-se as seguintes: grande dureza a quente e a frio, boa resistência ao desgaste, ótima estabilidade química (característica que inibe o mecanismo de difusão para algumas classes desse material), alta resistência à compressão e baixa resistência à tração (MACHADO *et al.*, 2012).

Apenas no início do século XX o material cerâmico passou a ser largamente utilizado na fabricação de ferramentas de corte, principalmente na usinagem dos aços endurecidos e superligas. Até este período, a fragilidade era o fator que restringia sua utilização. Mas com o advento de novas tecnologias de fabricação de ferramentas, surgiram novos compostos de cerâmica, que melhoraram muito sua tenacidade, alavancando sua utilização e competitividade em relação às outras ferramentas nos processos de usinagem (principalmente no torneamento de acabamento e fresamento de aços duros) (MACHADO *et al.*, 2012).

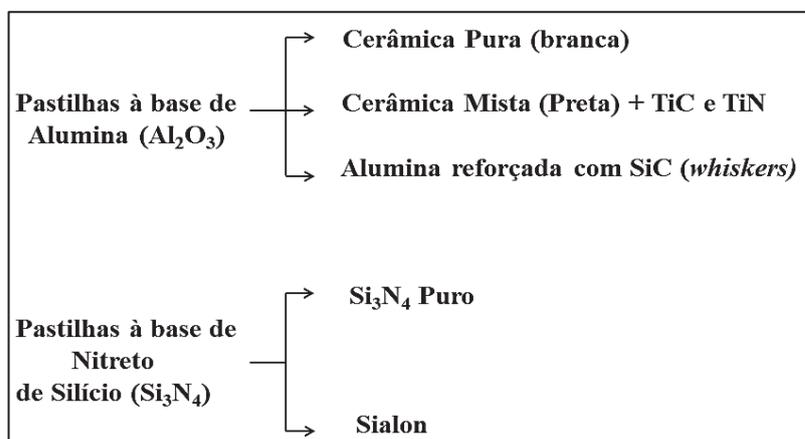
As cerâmicas são utilizadas quando são necessárias maiores durezas, estabilidade química e resistência ao desgaste no processo, características intrínsecas destes materiais. Porém, por ser um material com baixa tenacidade, as pastilhas de cerâmica não podem ser confeccionadas com quebra cavacos, fator que limita sua aplicação na usinagem dos aços-carbono de baixa liga (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As ferramentas cerâmicas são classificadas em dois grandes grupos em função das propriedades de sua matriz (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013); (FERRARESI, 2011); (MACHADO *et al.*, 2012):

- À base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  - alumina)
- À base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Estes grupos possuem subdivisões decorrentes das características e propriedades dos materiais que as constituem (Figura 4).

Figura 4 - Divisão e subdivisões dos grupos de materiais cerâmicos.



Fonte: Adaptado de Campos (2011, p. 38).

Será abordada aqui, somente a cerâmica mista, uma vez que foi a ferramenta escolhida para esta pesquisa.

A cerâmica mista (preta) apresenta um excelente desempenho no torneamento de acabamento dos aços endurecidos, sendo esta a sua principal indicação, decorrente da elevada dureza a quente e boa estabilidade química. A adição de TiC eleva a tenacidade, a condutividade térmica, a dureza e a resistência ao desgaste em relação a cerâmica pura. Porém, a adição de TiC acima de 30% pode resultar em uma maior afinidade química da ferramenta com o material da peça, promovendo durante a usinagem o mecanismo de desgaste por difusão. Além da adição de TiC, é acrescentado em menores proporções o TiN, melhorando sua eficiência (FERRARESI, 2011).

Devido à baixa tenacidade apresentada pelas pastilhas de cerâmicas, sua utilização requer atenção especial relativo à geometria da ferramenta, ao tipo de suporte das pastilhas e aos cuidados na entrada e saída da ferramenta em relação à peça (KLOCKE, 2011).

#### 2.2.4 Geometrias da ferramenta

A ferramenta de corte é geralmente designada para realizar uma operação específica de usinagem, e a geometria (ângulos) desta ferramenta deve ser devidamente escolhida para poder executá-la com precisão. A importância da geometria da ferramenta na usinagem por

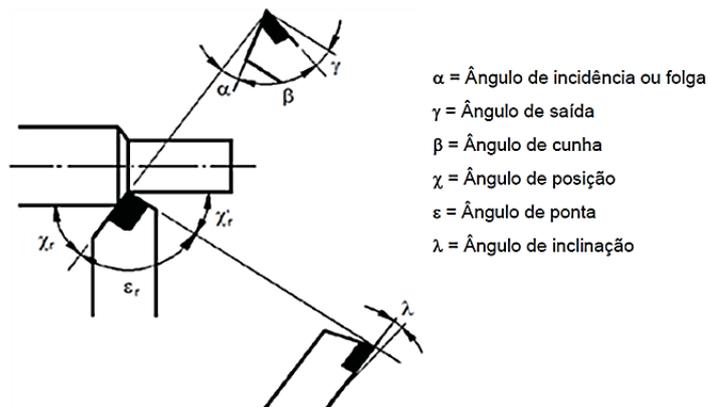
torneamento é altamente significativa no que se refere à formação do cavaco, a saída dos cavacos, as componentes da força de usinagem, o desgaste da ferramenta, o acabamento e a integridade superficial da peça (DOGRA; SHARMA; DUREJA, 2011); (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

A geometria das ferramentas para o torneamento duro comumente é definida em macrogeometria e microgeometria.

### 2.2.5 Macrogeometria das ferramentas

A macrogeometria das ferramentas (Figura 5) está relacionada ao tamanho e formato da pastilha, ângulo de saída, ângulo de folga, ângulo de posição, ângulo de ponta, ângulo de cunha, ângulo de inclinação e raio da ponta (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Figura 5 - Ângulos da ferramenta de torneiar.



Fonte: Adaptado de Souza (2011, p. 39).

A seguir, são destacados alguns aspectos importantes na macrogeometria para as ferramentas no torneamento duro (SOUZA, 2013):

O ângulo de saída ( $\gamma$ ) deve possuir valores negativos, pois esta geometria coloca a ponta da ferramenta sob a ação de forças de compressão, o que resulta na eliminação da formação de trincas em razão das forças trativas. Porém, ângulos de saída maiores (mais positivos) favorecem a formação de cavacos longos (dificulta a quebra) e assim o cavaco é afastado da peça, melhorando o acabamento.

O ângulo de folga (incidência) ( $\alpha$ ) deve possuir tamanho razoável a fim de reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça. Sua importância está ligada ao fato de que o desgaste de flanco da ferramenta ocorre na superfície de folga.

O ângulo de posição ( $\chi_r$ ) fica localizado no suporte da pastilha e o que define sua grandeza (pode variar de 45° a 107°) é a geometria da peça usinada. As ferramentas com  $\chi_r > 90^\circ$  geram superfícies com acabamento superior àqueles obtidos com ferramentas com  $\chi_r < 90^\circ$ . Segundo Souza (2011), as melhores condições de rugosidade são obtidas com  $\chi_r = 95^\circ$ ; abaixo desse valor o desvio médio aritmético ( $R_a$ ) tende a piorar. Isto devido ao aumento da força passiva, que faz com que o sistema ferramenta-peça fique menos rígido e mais suscetível a trepidações.

O ângulo de posição secundário ( $\chi'_r$ ) exerce influência significativa sobre o “ $R_a$ ” e, a ocorrência de trepidações pode ser controlada pela adoção apropriada do ângulo de posição secundário na geometria da ferramenta. Desta forma, o valor de  $\chi'_r$  pode afetar diretamente o acabamento e a exatidão dimensional da peça e a vida da ferramenta de corte. Uma redução neste ângulo aumenta a força passiva, uma vez que, o gume secundário torna-se mais ativo e pode causar trepidações. Ainda,  $\chi'_r$  protege o gume secundário contra arranhões e cortes, reduzindo o atrito entre a superfície secundária de folga e a superfície usinada da peça. Deve-se observar que, o decréscimo de  $\chi'_r$  contribui para aumentar a resistência da ponta da ferramenta de corte devido ao consequente aumento do ângulo de ponta ( $\epsilon_r$ ) (SOUZA *et al.*, 2011).

Pequenas alterações no ângulo de folga e do raio de quina não provocam efeitos significativos sobre as componentes da força de usinagem (KLOCKE, 2011). Vale salientar que quanto maiores os ângulos de saída ( $\gamma$ ) e de inclinação ( $\lambda$ ), menores serão as deformações e o trabalho de separação do cavaco da peça e, por conseguinte, menores serão: a temperatura, a pressão específica de corte e o desgaste da ferramenta. Porém, com o aumento do ângulo “ $\gamma$ ”, a resistência da cunha da ferramenta diminui e a sua sensibilidade aos choques aumenta. Assim, recomenda-se o uso de ângulos “ $\gamma$ ” negativos para fortalecer o gume, principalmente na usinagem de materiais endurecidos ou frágeis (com formação de cavacos segmentados ou curtos) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A substituição de um ângulo de saída positivo por um negativo, nas mesmas condições de usinagem, exige uma potência de corte maior. Uma vez que esta potência é transformada em calor, o ângulo “ $\gamma$ ” negativo acarreta um aumento da temperatura no gume. Materiais endurecidos apresentam a zona de maior pressão mais próxima ao gume da ferramenta. E a

zona de maior pressão sobre a ferramenta é, também, a de maior aquecimento. Esta é uma das razões por que o ângulo “ $\gamma$ ” negativo é empregado somente na usinagem com pastilhas de metal-duro, cerâmica e de PCBN (FERRARESI, 2011).

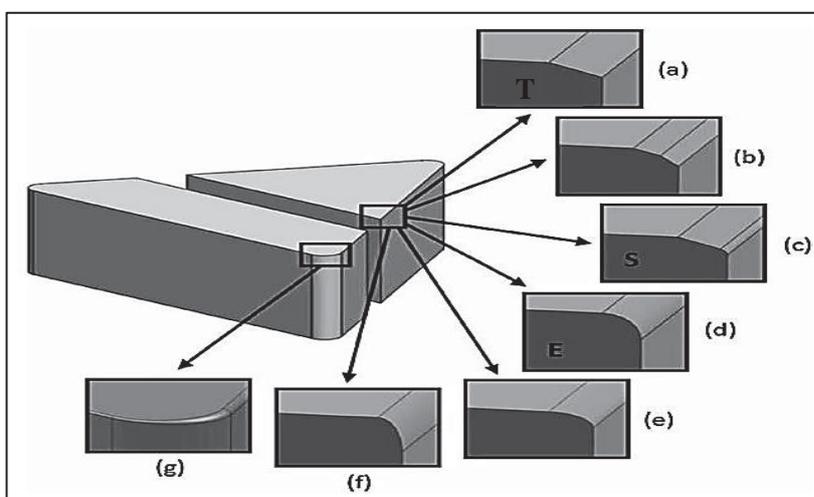
### 2.2.6 Microgeometria das ferramentas

A microgeometria usualmente refere-se à geometria do gume, isto é, os tipos de tratamentos que o gume recebe em sua fabricação. No torneamento dos aços endurecidos com pastilhas de cerâmica, os gumes desses materiais não devem ser afiados, pelo contrário, devem conter sempre chanfros e, se possível, arredondamentos após a operação de chanfro. A utilização de gumes chanfrados ajuda no direcionamento das forças para o centro da ferramenta, diminuindo a probabilidade de quebra da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2012).

Para a usinagem dos aços duros, geralmente os perfis dos gumes mais utilizados são: apenas chanfrado (tipo T), com o gume arredondado (tipo E) e gume chanfrado e arredondado (tipo S) (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Exemplos dos diversos tipos de perfis que podem ser preparados para a microgeometria dos gumes estão representados na Figura 6, sendo assim classificados: apenas chanfrado tipo T (a), chanfro duplo (b), chanfro com arredondamento tipo S (c), gume apenas arredondado tipo E (d), gume com arredondamento parabólico tipo corneta (e), gume arredondado tipo cascata (f) e gume com variação no arredondamento (g).

Figura 6 - Microgeometria dos perfis dos gumes das pastilhas de cerâmica.



Fonte: Adaptado Souza (2014, p. 765).

Estas alterações no gume protegem a pastilha contra quebras e lascamentos. Porém deve-se ter cuidado na escolha correta do perfil para cada aplicação. A utilização incorreta resultará em elevadas tensões residuais trativas e alterações nas camadas subsuperficiais da peça (KLOCKE, 2011); (DOGRA; SHARMA; DUREJA, 2011).

A microgeometria do gume tem um papel significativo no desempenho do processo, afetando diretamente a vida útil da ferramenta, o acabamento superficial e as forças de corte.

Davoudinejad e Noordin (2014) estudaram o efeito da microgeometria da ferramenta apenas chanfrada (tipo “T”) e apenas arredondada (tipo “E”) no torneamento de um aço endurecido com ferramentas de cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ). Os autores constataram vidas de ferramenta maior ao usar ferramentas com gumes chanfrados em várias condições de corte, sendo predominantes os desgastes de flanco, desgaste de cratera, mecanismo de desgaste abrasivo. O desgaste de cratera, segundo os pesquisadores, surgiu devido ao maior teor de Carbono (C) presente no Carboneto de Titânio (TiC) na matriz da ferramenta, o que propiciou uma maior afinidade química entre peça/ferramenta resultando no mecanismo de desgaste difusivo. Os autores ainda constataram que, o melhor acabamento superficial foi obtido com a ferramenta apenas chanfrada, e as forças de corte decresceram com o aumento da velocidade de corte, também verificaram que as ferramentas com o gume apenas arredondado resultaram em maiores valores para a força de usinagem.

A pesquisa realizada por Wyen e Knapp (2012) aborda a necessidade da padronização para descrever corretamente a microgeometria da ferramenta, visto que há muitas divergências nos trabalhos publicados nos últimos anos, e clamam por uma normatização internacional. Eles apresentam uma revisão dos métodos de caracterização existentes na atualidade, e propõem em seu trabalho ideias diferentes para modelar o gume da ferramenta.

### 2.2.7 Parâmetros de corte

Para cada operação de usinagem é necessário decidir quais serão os parâmetros de corte utilizados, tais como, a velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ).

Conforme Souza (2011), o trabalho realizado e o calor gerado dependem das propriedades do material da peça e da ferramenta, da geometria da ferramenta e das condições de corte. O calor aumenta com a taxa de remoção de material, seja por meio do aumento da velocidade de corte, do avanço ou da profundidade de corte. Entre esses parâmetros, a  $v_c$  é a mais influente, seguida por  $f$  e depois  $a_p$ . Sabe-se que a temperatura

afeta as propriedades mecânicas do material da peça e, por conseguinte, a interação das forças entre a ferramenta e a peça; sabe-se também que a temperatura tem uma considerável influência nas falhas da ferramenta, tanto no flanco quanto na face, por efeitos dos mecanismos de desgaste.

Para um mesmo par ferramenta/peça, a quantidade de calor gerada na usinagem aumenta diretamente com a velocidade de corte e com a força de corte ( $F_c$ ) (ÇIÇEK *et al.*, 2013). Como a força de corte (principal componente da força de usinagem) é proporcional ao avanço (não diretamente) e à profundidade de corte (diretamente), pode-se afirmar que para uma maior produtividade em usinagem, os parâmetros de corte devem ser incrementados (MEDDOUR *et al.*, 2015). Contudo, esse aumento deve ser limitado, pois ocorrerá ao mesmo tempo o acréscimo da temperatura, e esta, por sua vez, altera as propriedades mecânicas da ferramenta, que se desgasta rapidamente, o que reduz de maneira drástica a sua produtividade. Daí a importância de estudos criteriosos para a otimização, a fim de realizar uma operação de usinagem economicamente viável (SOUZA, 2011); (SAINI; AHUJA; SHARMA, 2012).

### 2.3 Variáveis dependentes de saída

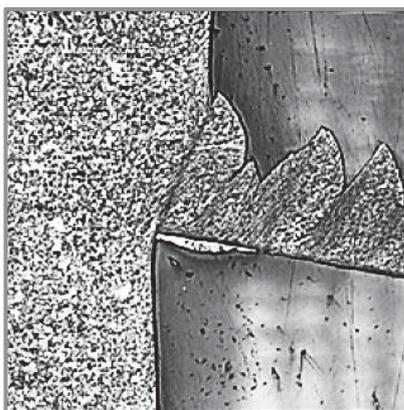
Dentre as diversas variáveis de saída envolvidas no processo de torneamento dos aços duros, vale destacar as seguintes: formação do cavaco de materiais endurecidos, força e potência de usinagem, falhas na ferramenta de corte e acabamento da superfície usinada.

#### 2.3.1 Formação de cavaco de materiais endurecidos

O cavaco formado no torneamento dos aços endurecidos é normalmente denominado de cavaco “segmentado” (lamelar) ou “dente de serra”, devido à forma de sua seção transversal Figura 7 (FERRARESI, 2011).

Na região de formação de cavacos, quando se usinam materiais endurecidos, há altos valores de temperatura (maior calor), altas tensões de ruptura para a formação de cavacos, além de altas tensões aliviadas pela remoção destes. A microestrutura de aços endurecidos é formada principalmente de martensita e de carbonetos livres, que possuem alta dureza e funcionam como abrasivos em um processo de retificação, já que suas durezas são análogas às encontradas em materiais usados em rebolos ( $Al_2O_3$ ) (MACHADO *et al.*, 2012).

Figura 7 - Tipo de cavaco “dente de serra” formado no torneamento dos aços duros.



Fonte: Souza (2011, p. 54).

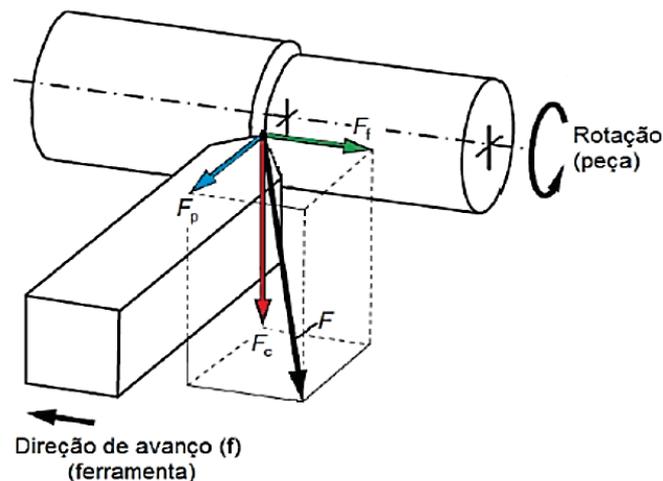
Devido à utilização de ferramentas com ângulo de saída negativo na usinagem de aços endurecidos, ocorre uma maior deformação do cavaco, resultando em elevadas temperaturas e, aparece tanto na ferramenta como na peça grandes tensões de compressão. Como o material é frágil, a alta tensão de compressão não conduz inicialmente à deformação plástica, mas sim à formação de uma trinca. Essa trinca inicia-se na superfície livre (não sujeita a pressões hidrostáticas) e aprofunda-se na direção da ponta da ferramenta. Assim, a trinca formada alivia a energia armazenada e age como uma superfície deslizante ao segmento de material. Ao mesmo tempo, ocorrem aquecimento e deformação plástica no material. Depois do segmento de cavaco ter deslizado, a pressão de corte é renovada, dando início a uma nova trinca e reiniciando o ciclo. Os segmentos de cavaco assim formados são ligados por uma pequena porção de material, a qual foi deformada plasticamente e aquecida à alta temperatura, dando ao cavaco uma aparência serrilhada (FERRARESI, 2011).

### 2.3.2 Forças de corte no torneamento duro

A força de usinagem “ $F$ ” é a força que atua sobre o gume da ferramenta durante a operação de corte. As suas componentes são obtidas mediante uma decomposição ortogonal (Figura 8), de acordo com as considerações tecnológicas e físicas da formação do cavaco. Diversos fatores influenciam as componentes ortogonais na força de usinagem (força de corte “ $F_c$ ”, força passiva “ $F_p$ ” e força de avanço “ $F_f$ ”). Destes, segundo Machado *et al* (2012), destacam-se os efeitos do material da peça (pressão específica de corte), do avanço, da profundidade (área da seção de corte) e a macro e microgeometria da ferramenta.

Segundo Souza (2011), as componentes da força de usinagem durante a operação de corte podem estar muitas vezes sujeitas a alguma flutuação dinâmica ao longo do tempo por variações nos parâmetros de usinagem e/ou oscilações do sistema porta-ferramenta(s). As duas principais causas são: instabilidade dinâmica provocada pela variação da velocidade da ferramenta com relação à velocidade da peça e a influência do achatamento da ponta da ferramenta com o desgaste na ação de corte. A pressão específica de corte  $K_s$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] equivale à energia de corte por unidade de volume [ $\text{J}/\text{cm}^3$ ], ou seja, a energia necessária para remover uma unidade de volume do material da peça. Equivale ainda à potência de corte necessária para remover uma unidade de volume de material da peça por unidade de tempo [ $\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$ ].

Figura 8 - Representação das componentes das forças de corte atuantes no torneamento.



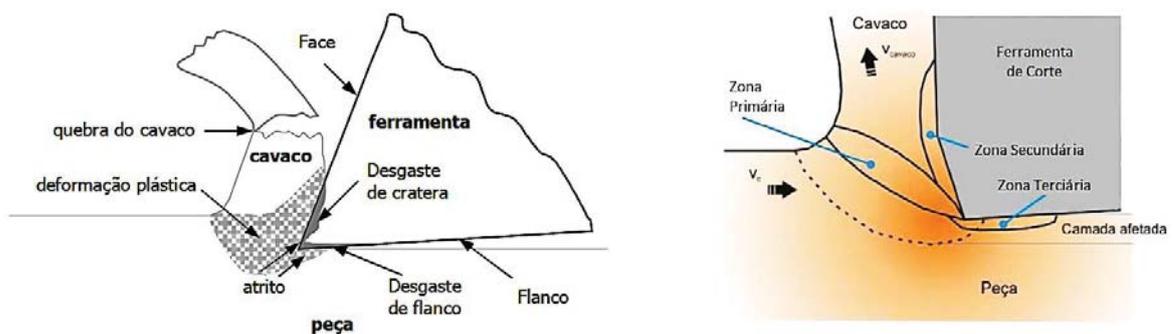
Fonte: Rosa e Souza (2014).

O conceito de energia de corte pode ser compreendido pelos mecanismos de deformação plástica e rupturas inerentes aos processos de usinagem. No corte com ferramentas de geometria definida, cerca de  $\frac{3}{4}$  da energia total é associada ao cisalhamento do cavaco na zona de deformação primária, na direção do plano de cisalhamento, e o  $\frac{1}{4}$  restante está associada aos efeitos nas interfaces cavaco/superfície de saída da ferramenta (zona secundária) e peça/flanco da ferramenta (zona terciária). A energia consumida no corte essencialmente converte-se em calor. Desse calor, aproximadamente de 80% a 90% é transferido para o cavaco, 5% a 10% à peça e 5% a 10% à ferramenta. A Figura 9 mostra as zonas de deformação do material (EZILARASAN; KUMAR; VELAYUDHAM, 2013).

Os fatores que influenciam a energia de corte (ou pressão específica de corte) e, conseqüentemente, as componentes da força de usinagem, são: material da peça; material e geometria da ferramenta; parâmetros de corte e estado da ferramenta.

Em geral, quando a dureza da peça cresce,  $K_s$  também cresce, mas isso não pode ser uma regra, já que materiais com dureza semelhantes podem ter  $K_s$  bem diferentes em função dos diferentes elementos de liga presentes em suas matrizes. Dentre as propriedades de um material, aquela que mais se correlaciona com  $K_s$  é a tensão de ruptura (ou de escoamento) ao cisalhamento do material. Mesmo assim, esta correlação deve ser feita com cuidados, pois esta tensão é obtida em ensaios estáticos e o processo de formação de cavacos é bastante dinâmico (DOGRA; SHARMA; DUREJA, 2011).

Figura 9 - Zonas de deformação do material no processo de usinagem.



Fonte: Adaptado de Souza (2011, p. 59).

A força de avanço e a força passiva são em grande parte determinadas pela microgeometria da ferramenta, e tendem a aumentar com o aumento do arredondamento do gume e/ou a adição de um chanfro (AOUICI *et al.*, 2012).

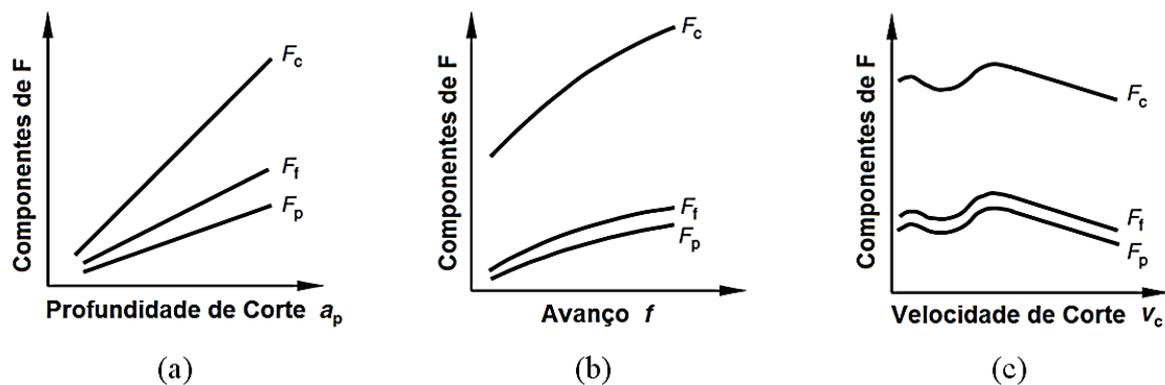
Uma alteração do ângulo de folga ( $\alpha$ ) na faixa de  $5^\circ$  a  $12^\circ$  não tem nenhum efeito evidente sobre as componentes da força de usinagem. Entretanto, ângulos muito pequenos (menores que  $5^\circ$ ) promovem um aumento do atrito entre a peça e a ferramenta (superfície de folga), fazendo com que  $K_s$  aumente. Da mesma forma, uma alteração do raio de quina ( $r_e$ ) não exerce nenhuma influência significativa sobre as forças, enquanto for obedecida a exigência:  $a_p \geq 2 r_e$  (MACHADO *et al.*, 2012).

Um ângulo de inclinação ( $\lambda$ ) negativo produz força no sentido longitudinal da ferramenta (força passiva  $F_p$ ), tendendo a afastá-la da peça. Esta força tende a reduzir os inconvenientes de folgas e apertos deficientes da ferramenta, forçando o carro porta-ferramenta contra seu fuso de acionamento (DAVIM, 2011).

A ação do ângulo de posição ( $\chi_r$ ) sobre as forças de avanço ( $F_f$ ) e passiva ( $F_p$ ) ocorre devido à localização geométrica do gume com relação ao eixo da peça. Com maiores valores de  $\chi_r$  a componente da força de usinagem aumenta na direção de avanço ( $F_f$ ), diminui na direção passiva ( $F_p$ ) e têm seu máximo em  $\chi_r = 90^\circ$ . Se  $\chi_r$  for aumentado, a espessura “h” do cavaco aumenta na mesma proporção que a largura “b” diminui. Como a força de corte ( $F_c$ ) é diretamente proporcional à profundidade de corte (equivalente a “b”), ela aumenta de maneira inversamente proporcional ao avanço (equivalente a “h”), resultando em uma pequena redução de  $F_c$  com aumento de  $\chi_r$  (SOUZA, 2011).

A influência dos parâmetros de corte sobre as componentes da força podem ser visualizados na Figura 10.

Figura 10 - Comportamento das componentes da força de usinagem em relação a: (a) profundidade de corte; (b) avanço; (c) velocidade de corte.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011, p. 58).

A pressão específica de corte ( $K_s$ ) diminui com o aumento do avanço ( $f$ ), já que com o crescimento de  $f$ , a velocidade de avanço aumenta e, por conseguinte, o coeficiente de atrito diminui, pois o corte se torna mais dinâmico (CHENG *et al.*, 2016).

O aumento da profundidade de corte ( $a_p$ ) praticamente não altera o valor de  $K_s$  (a não ser para pequenos valores de  $a_p$ ), pois o crescimento de  $a_p$  só faz aumentar o comprimento de contato ferramenta/peça sem aumentar as velocidades envolvidas. Assim, pode-se dizer que o crescimento das componentes da força de usinagem é diretamente proporcional ao de  $a_p$  (Figura 10 (a)); contudo, quando  $f$  cresce, as componentes também crescem, mas não na mesma proporção, já que ocorre diminuição do valor de  $K_s$  (Figura 10 (b)) (KLOCKE, 2011); (RAO; RAO; SRIHARI, 2013).

O aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ) resulta no aumento da temperatura, promovendo a redução dos valores da  $K_s$ , reduzindo dessa forma as componentes da força de usinagem (Figura 10 (c)) devido a diminuição da dureza do cavaco e dos coeficientes de atrito nas interfaces ferramenta-peça e cavaco-ferramenta (SOUZA, 2011).

Segundo Klocke (2011), as componentes da força de usinagem podem ser influenciadas por alguns tipos de desgastes que ocorrem na ferramenta durante o corte. O desgaste de cratera (o qual conduz a um ângulo de saída  $\gamma$  mais positivo) pode produzir uma diminuição destas componentes. Se, no entanto, ocorrer um predomínio de desgaste de flanco, as forças tendem a aumentar de maneira continuada, pois a área de contato entre a peça e o flanco aumenta (aumentando o atrito).

Algumas das limitações inerentes na abordagem destas componentes são as perturbações causadas pelas variações no material da peça, na velocidade de corte, na profundidade de corte e na geometria da ferramenta. Estas variações podem gerar a mesma ordem de magnitude que os diferentes níveis de desgastes e avarias em ferramentas de corte. Por exemplo, pode-se observar uma redução das forças com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ); isto se dá devido à redução da resistência do material em altas temperaturas. As forças aumentam proporcionalmente com a profundidade de corte ( $a_p$ ); entretanto, isto vale somente se  $a_p$  for maior que o raio de ponta ( $r_e$ ) da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Pal *et al.* (2014) realizaram estudos para avaliar a influência dos parâmetros de corte sobre as componentes da força de usinagem e sobre as falhas das ferramentas no torneamento do aço AISI 4340, utilizando pastilhas de cerâmica mista. Os resultados indicaram que as componentes das forças de usinagem diminuíram com o aumento da velocidade de corte. Isso aconteceu devido ao fato de que, com o aumento da velocidade de corte, a maior porcentagem do calor gerado ficou concentrada na raiz do cavaco, promovendo um amolecimento do material usinado, facilitando o corte. Os pesquisadores relatam que o desgaste de cratera identificado nas ferramentas também influenciou na redução das componentes da força de usinagem, pois este tipo de desgaste provocou um aumento do ângulo de saída da ferramenta, o que possibilitou uma melhor penetração do gume na peça. A componente da força de usinagem “ $F_p$ ” foi maior em todas as condições ensaiadas, e concluíram que isto ocorreu devido às profundidades de corte relativamente menores que o raio de ponta da ferramenta, tal como a utilização de ferramentas com ângulo de saída negativo. Resultados semelhantes a esse foram relatados por Kurt *et al.* (2015), Azizi *et al.* (2012) e Aouici *et al.* (2012), na usinagem de aços endurecidos com ferramentas de cerâmica.

### 2.3.3 Mecanismos de desgaste e falhas das ferramentas de corte

A deterioração da ferramenta sempre ocorrerá durante a usinagem, e sua substituição será inevitável. O correto entendimento sobre o processo e as causas dos desgastes auxiliará nas tomadas de decisões coerentes e efetivas no intuito de aumentar a vida útil das ferramentas, reduzindo o máximo possível sua degradação. Ademais, pesquisas destes fenômenos trarão recursos para o avanço tecnológico em usinagem, resultando em diminuição dos impactos destrutivos sobre as ferramentas de corte (MACHADO *et al.*, 2012).

A Figura 11 demonstra o aspecto da ferramenta de corte com os principais tipos de falhas que ocorrem nas operações de torneamento. Os desgastes (no flanco e face) são representados pelos efeitos superficiais e as avarias (trincas e quebras) os volumétricos.

Figura 11 - Tipos de falhas nas ferramentas de corte no torneamento.



Fonte: Souza (2011, p. 73)

### 2.3.4 Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte

Durante a usinagem, as ferramentas de corte sofrem a ação dos diversos mecanismos (processos) de falhas simultaneamente. Assim, dificilmente as causas e seus efeitos poderão ser diferenciados entre si (KLOCKE, 2011). Na prática, todos serão percebidos. Contudo, um prevalecerá sobre os demais, derivando principalmente do material da peça e da ferramenta, da operação de usinagem, das condições de corte, da geometria da ferramenta e da utilização do meio lubrificante (MACHADO *et al.*, 2012).

Diversas literaturas apresentam variações quanto à classificação dos mecanismos e processos de falhas em ferramentas de corte. Contudo, a grande maioria dos trabalhos disponíveis levam em conta 5 (cinco) diferentes mecanismos (processos): solicitações

térmicas e mecânicas excessivas; abrasão; adesão (*attrition*); difusão e oxidação (KLOCKE, 2011); (MACHADO *et al.*, 2012), cujos princípios serão abordados a seguir:

- Solicitações mecânicas e térmicas excessivas: resultam em processos de avarias tais como trincas (transversais e longitudinais), lascamentos e deformação plástica. Ferramentas de cerâmica e metal-duro que possuem grande resistência ao desgaste, principalmente em seções de corte muito pequenas, são mais susceptíveis a estes tipos de avarias. Na maioria dos casos, forças excessivas durante a usinagem provocam lascamentos do gume ou da quina, principalmente quando o material da ferramenta é relativamente frágil, ou quando o ângulo de cunha ( $\beta$ ) ou de ponta ( $\epsilon_r$ ) da ferramenta for muito pequeno (KLOCKE, 2011).
- Abrasão: um dos principais mecanismos de desgaste da ferramenta. O desgaste de flanco e o desgaste de cratera poderão ser originados deste mecanismo. A abrasão ocorre devido ao atrito entre ferramenta-peça (no flanco) e entre o cavaco-ferramenta (cratera), causando a remoção de partículas do material da ferramenta de corte. Geralmente é provocado pelos fragmentos duros do material da peça (carbonetos livres). Altas velocidades e temperaturas (maior calor) também influenciam, pois, reduzem a dureza a quente das ferramentas. A escolha por ferramentas com maior dureza a quente amenizará os efeitos deste mecanismo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013)
- Adesão (*attrition*): conforme relatado por Machado *et al.* (2012), este mecanismo comumente é chamado de “adesão”. O *attrition* também é responsável pelos desgastes de flanco e cratera. Ocorre quando há um fluxo irregular de material sobre a superfície da ferramenta. Partículas microscópicas são desprendidas da superfície da ferramenta e arrastados pela continuidade do movimento de escorregamento entre as duas superfícies (cavaco-ferramenta ou ferramenta-peça), permanecendo aderidas ao fluxo de cavaco ou na peça. Por serem muito duros, estes fragmentos ao se atritarem com as outras regiões da ferramenta, desgastam-se por abrasão.
- Difusão: este mecanismo ocorre entre a ferramenta e o cavaco, tendo como principal catalizador as elevadas temperaturas, o tempo de contato e a afinidade química entre o material da ferramenta e o material da peça durante o corte. Acontece em níveis microscópicos, e quando ocorre no estado sólido, há a transferência de átomos de um metal a outro (KLOCKE, 2011) e (ASLANTAS; UCUN; ÇICEK, 2012).
- Oxidação: as elevadas temperaturas na região de corte e a presença de ar promovem o surgimento da oxidação para a maioria dos metais. Acontece principalmente nas

extremidades do contato cavaco-ferramenta, decorrente da maior facilidade de acesso do ar nestas regiões. Este mecanismo pode explicar em parte o aparecimento do desgaste de entalhe nas ferramentas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Godoy *et al.* (2011) avaliaram o comportamento de ferramentas de cerâmica mista e CBN no torneamento a seco do aço AISI 4340 endurecido. Os pesquisadores revelaram que os desgastes predominantes foram o desgaste de flanco e de cratera. A abrasão foi o principal mecanismo de desgaste que aconteceu nas ferramentas de cerâmica, indicado pelas marcas verticais paralelas à direção do corte. Segundo os autores, isto se deve ao atrito entre a ferramenta e a peça causado pelos elementos duros (carbonetos, nitretos ou óxidos) do material usinado, e também pela remoção de fragmentos duros da própria ferramenta (*attrition*). Também verificaram, em certa situação, que houve redução da rugosidade com o tempo de usinagem, explicando que isso aconteceu possivelmente devido a não ocorrência de alterações no gume (manteve-se afiado com a progressão do desgaste de flanco e de cratera) e do aumento do ângulo de saída causado pela evolução do desgaste de cratera, o qual afastou o cavaco da superfície da peça, provocando um melhor acabamento durante o corte.

Wang *et al.* (2015) investigaram os mecanismos de desgaste de ferramentas de cerâmica mista (70% de  $Al_2O_3$ , 28% de TiC e 2% de outros elementos) no torneamento do aço endurecido 300M. Os pesquisadores detectaram via EDS a presença de elementos químicos do material usinado (principalmente o Ferro) sobre o flanco e no interior da cratera das ferramentas, e concluíram que isto ocorreu devido a ação conjunta do mecanismo abrasivo, do mecanismo de adesão (*attrition*) e o mecanismo de difusão. O mecanismo de difusão resultou da afinidade química do C (presente no TiC) adicionado na matriz da ferramenta de cerâmica.

### 2.3.5 Falhas da ferramenta de corte

Altas temperaturas na região de corte promovem a ativação ou aceleração das falhas de uma ferramenta. A velocidade de corte é fortemente responsável pelo aumento da temperatura na formação dos cavacos e, portanto, é o parâmetro de maior influência no desgaste de uma ferramenta de corte (MACHADO *et al.*, 2012).

Singh e Rao (2010) elaboraram um modelo para prever falhas das ferramentas de cerâmica mista durante o torneamento do aço AISI 5200 endurecido. Relataram que o desgaste da ferramenta evoluía na medida em que a velocidade de corte aumentava devido às

altas temperaturas desenvolvidas na zona de corte em função das maiores velocidades de corte (maior fricção entre ferramenta/peça). Citaram também que o desgaste da ferramenta aumentou com o aumento do avanço devido às condições mais severas para a deformação do material na formação do cavaco impostas pelo aumento da área de corte.

Três fenômenos distintos que agem sobre a ferramenta durante o corte, resultando na sua ineficiência, são: avarias, desgastes e deformação plástica. Estes fenômenos alteram a geometria do gume da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2012) e serão descritos a seguir:

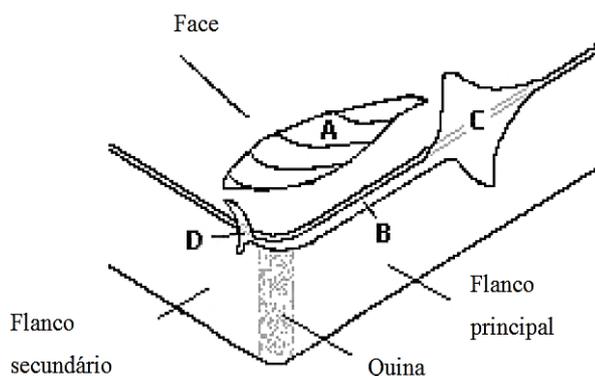
- Avarias: trincas, lascamentos ou quebra no gume, de forma repentina e inesperada. A substituição da ferramenta nesse caso deverá ser feita imediatamente. Geralmente, as quebras estão relacionadas às ferramentas com pouca tenacidade, como as pastilhas de cerâmica e PCBN (FERRARESI, 2011).
  - Trincas: avarias de origem mecânica ou térmica. As trincas de origem mecânica podem ocorrer devido aos “choques mecânicos” ocorridos durante a entrada ou a saída do gume da peça. As trincas de origem térmica (ou fadiga térmica) ocorrem em consequência da flutuação cíclica de carga e temperatura (MACHADO *et al.*, 2012).
  - Lascamento: tipo de avaria que resulta na retirada de grandes partículas da ferramenta de forma súbita. A grande incidência desta falha recai sobre as ferramentas frágeis, ou em gumes pouco robustos. Interferem negativamente na superfície usinada, e seu crescimento leva a quebra da pastilha (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).
  - Quebra: quando ocorre, esta avaria pode resultar em danos de grande valia, visto que não somente a pastilha deverá ser substituída, mas muitas vezes outros componentes da máquina-ferramenta poderão ser prejudicados decorrentes deste acontecimento (MACHADO *et al.*, 2012).
- Desgastes: fenômeno proveniente da perda sucessiva de material no momento do corte, alterando o formato primário do gume. Diferentemente ao que acontece com a avaria, o desgaste ocorre de forma constante e gradativa, em tamanhos pequenos, ocasionalmente a níveis atômicos e granulares. A alta temperatura gerada durante o corte é o principal fator desta degradação. Ocorrem tanto nas superfícies de folga quanto na superfície de saída das pastilhas, em cortes contínuos ou interrompidos (MACHADO *et al.*, 2012).

A ação de corte durante a usinagem modifica a geometria original da ferramenta de corte, em razão do desgaste crescente no flanco (superfície de folga) e do desgaste

crescente de cratera na face (superfície de saída) da ferramenta. A Figura 12 ilustra os tipos de desgaste presentes na ferramenta de corte.

- Desgaste de flanco: resultado do contato ferramenta-peça, e é o desgaste que mais se pronuncia nas ferramentas, influenciado, sobretudo pelo aumento da velocidade de corte. Tem início no flanco principal, na quina (ou ponta) e no flanco secundário da pastilha. Conforme este desgaste evolui, o ângulo de folga diminui, aumentando a área de contato entre a ferramenta e a peça, alterando as condições de corte e interferindo no acabamento superficial da peça. Geralmente o critério de fim de vida é relacionado a este desgaste pela sua presença constante e sua fácil visualização e mensuração (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 12 - Esquema dos tipos de desgaste da ferramenta de corte: (A) desgaste de cratera; (B) desgaste de flanco; (C) e (D) desgaste de entalhe.



Fonte: Adaptado de Machado (2012, p. 267)

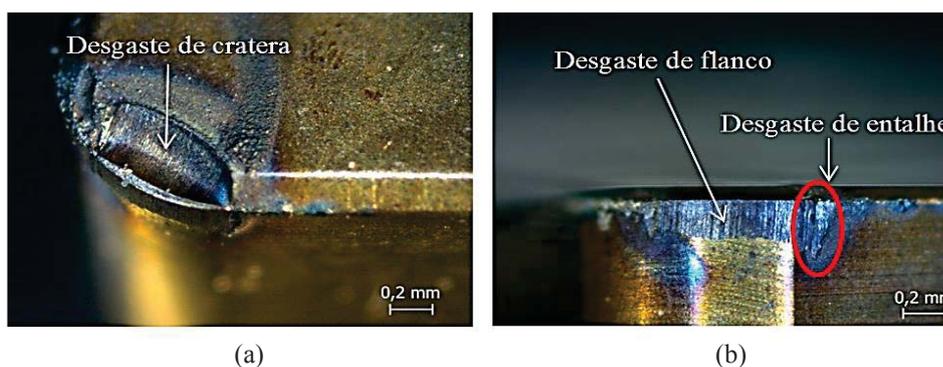
- Desgaste de cratera: tipo de desgaste que produz uma cavidade na superfície de saída da ferramenta (face). Pronuncia-se devido às altas temperaturas, ao atrito e a afinidade química entre a ferramenta e cavaco, podendo influenciar na quebra da ferramenta caso a cratera coincida com o desgaste de flanco (MACHADO *et al.*, 2012).
- Desgaste de entalhe: tipo de desgaste que modifica o formato da ponta da pastilha, podendo surgir nos dois extremos de contato entre a ferramenta e peça, prejudicando a superfície usinada. É resultado das altas temperaturas, do aumento da velocidade de corte e do escoamento das rebarbas laterais dos cavacos sobre a ferramenta (MACHADO *et al.*, 2012).
- Deformação plástica: tipo de falha que altera o formato do gume, geralmente ocasionada pela alta pressão aplicada na ponta da pastilha aliada a alta temperatura. Este fenômeno

resulta no descontrole do fluxo do cavaco e na piora do acabamento superficial da peça usinada. Ocorre principalmente em ferramentas com maior tenacidade, dificilmente ocorre em ferramentas de cerâmica. Algumas literaturas tratam a deformação plástica como desgaste, pois ambos resultam na mudança da geometria do gume, levando ao fim de vida da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2012).

Das *et al.* (2015b) tornearam o aço AISI 4140 endurecido com ferramentas de cerâmica mista. Os resultados apontaram que o desgaste de flanco é diretamente influenciado pela velocidade de corte. Eles explicam que o aumento da velocidade de corte aumenta a temperatura na região de corte devido à rápida fricção entre a ferramenta e a superfície usinada. Isto leva a exceder os limites de estabilidade térmica do material da ferramenta, provocando o desgaste de flanco. Os autores também comentaram que o desgaste de cratera foi provocado pelo atrito entre ferramenta-cavaco, sobre a superfície de saída da ferramenta, devido às altas velocidades de corte (maior calor) e elevadas pressões (que podem ser originadas do avanço ou do aumento deste), o que resultou na remoção de partículas da superfície de saída da ferramenta. Resultados semelhantes também foram relatados nas seguintes literaturas: El Hakim *et al.* (2011), Saini *et al.* (2012), Zhu *et al.* (2013), Das *et al.* (2015a), Cheng *et al.* (2016) e Bensouilah *et al.* (2016).

Singh e Rao (2010), ao pesquisarem o desenvolvimento de um modelo para prever os desgastes que se pronunciam nas ferramentas de cerâmica no torneamento dos aços duros, realizaram uma vasta revisão da literatura, e revelaram que os desgastes mais relevantes são: o desgaste de flanco (Figura 13 (b)), o desgaste de cratera (Figura 13 (a)) e o desgaste de entalhe (Figura 13 (b)). Segundo estes autores, o desgaste de flanco ocorre na superfície de folga logo abaixo do gume devido ao contato da ferramenta com a superfície usinada.

Figura 13 - Desgaste de cratera (a), desgaste de flanco e entalhe (b) no torneamento do aço SAE 4140 (55 HRC) com ferramentas de cerâmica.



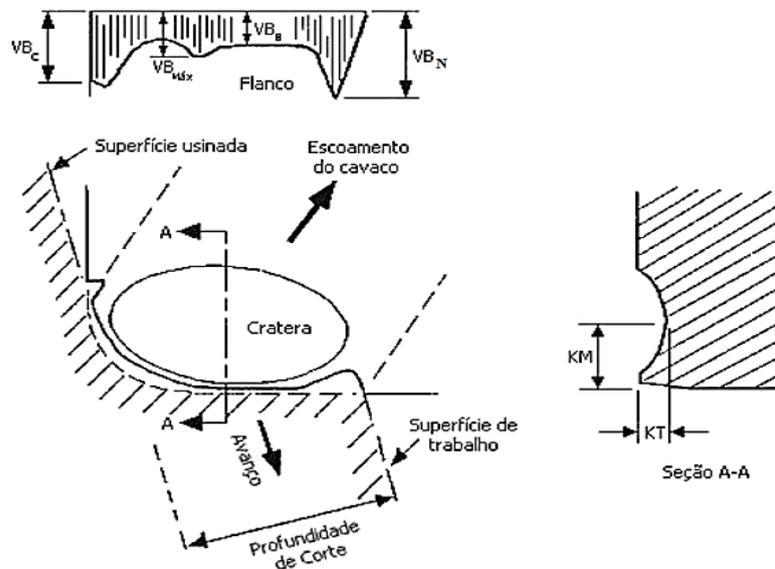
### 2.3.6 Fim de vida da ferramenta

Segundo Diniz *et al* (2013) e Ferraresi (2011), a vida de uma ferramenta é definida em função do tempo efetivo de trabalho, mantendo a capacidade de corte dentro de um critério previamente estabelecido. Geralmente os critérios que definem a substituição da ferramenta ocorrem quando: a ferramenta atinge valores elevados de desgaste; a ferramenta atinge temperaturas excessivas; as tolerâncias dimensionais fogem do controle; o acabamento superficial não é mais satisfatório; há aumento excessivo das forças de usinagem.

Para proporcionar as exigências na qualidade das peças usinadas, a identificação ou controle dos desgastes é de suma importância. Danos à máquina-ferramenta, à peça e ao suporte da ferramenta poderão ocorrer caso os desgastes, avarias ou os mecanismos que os geram não sejam corretamente identificados (EL HAKIM *et al.*, 2011).

Todos os tipos de desgaste das ferramentas de usinagem estão especificados nos padrões da norma ISO. A Figura 14 esquematiza uma ferramenta de toronar, onde as principais regiões de desgaste e formas estão definidas conforme a norma ISO 3685 (1993) - Teste de vida das ferramentas de toronar monocortantes (DAVIM, 2011).

Figura 14 - Padronização de desgaste em ferramentas de toronar monocortantes.



Fonte: Souza (2011, p. 75).

Vários são os critérios na usinagem para estipular o fim de vida de uma ferramenta. Na maioria dos casos é definido um valor para a marca de desgaste no flanco (VB). Tem-se como

desgastes na superfície de folga: desgaste médio de flanco ( $VB_B$ ), desgaste máximo de flanco ( $VB_{m\acute{a}x}$ ), desgaste de ponta (ou de quina) ( $VB_C$ ) e desgaste de entalhe ( $VB_N$ ) (vide Figura 14). As medições da cratera são realizadas na face da ferramenta: profundidade da cratera ( $K_T$ ) e distância do centro da cratera ao gume original ( $K_M$ ).

A norma ISO 3685 (1993) recomenda para os ensaios de fim de vida em ferramentas de aço rápido, metal-duro e cerâmica um desgaste de ponta  $0,3 \text{ mm} \leq VB_C \leq 0,6 \text{ mm}$ , ou um desgaste médio  $VB_B = 0,3 \text{ mm}$ , ou um desgaste máximo  $VB_{m\acute{a}x} = 0,6 \text{ mm}$ . Apesar de tais valores serem sugeridos pela norma, industrialmente estas larguras de desgaste podem assumir valores diferentes, pois dependem das condições de trabalho de cada empresa. Diniz *et al.* (2013) relatam que para operações de torneamento de acabamento  $VB_B \leq 0,2 \text{ mm}$  para uma qualidade IT7 e  $VB_B \leq 0,3 \text{ mm}$  para uma qualidade IT8.

### 2.3.7 Curva de vida da ferramenta

A curva de vida da ferramenta é aquela que associa a vida da ferramenta (conforme critério previamente estabelecido) à velocidade de corte, que é um dos parâmetros de maior influência no desgaste de uma ferramenta na usinagem, assim, a equação simplificada de Taylor (Equação 1) é muito utilizada para a determinação da vida da ferramenta. A vida da ferramenta ( $T$ ) é usualmente expressa em minutos.

Para a obtenção dessas curvas ( $T \times v_c$ ), conforme exemplo da Figura 16, há a necessidade de construir gráficos auxiliares (Figura 15) que indiquem o desgaste da ferramenta em função do tempo, para várias velocidades de corte (MACHADO *et al.*, 2012), assim, representado pela equação simplificada de Taylor (Equação 1).

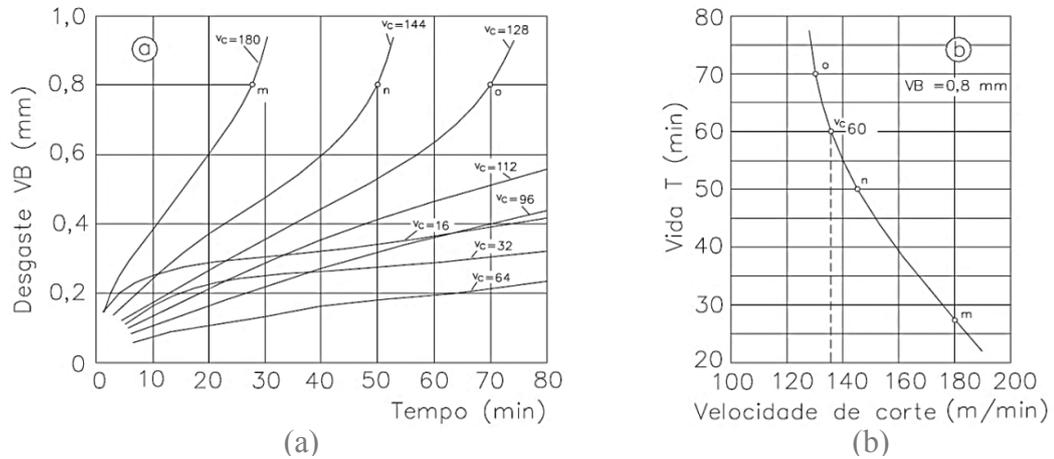
$$T = K * v_c^{-x} \quad [1]$$

Onde:  $T$  = tempo de vida da ferramenta [min];

$K$  e  $x$  = constantes do material para determinadas condições de usinagem;

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

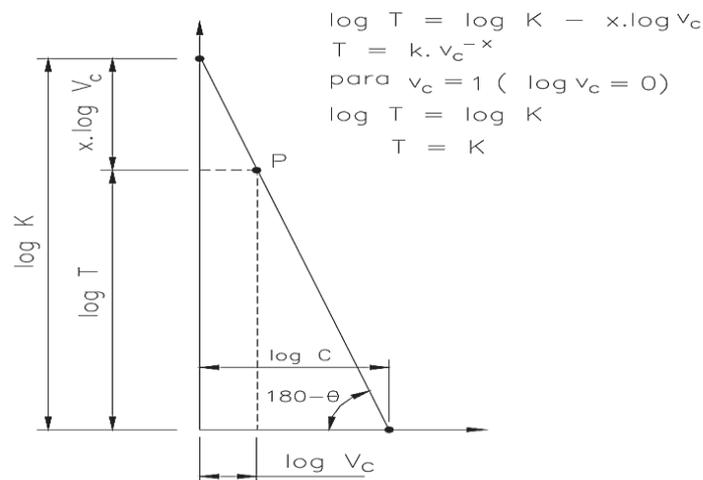
Figura 15 - Gráficos auxiliares para a determinação da curva de vida de uma ferramenta  $T \times v_c$ .



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2012, p. 288 e 289).

O gráfico ( $T \times v_c$ ) observado na Figura 15(b), quando representado em escala logarítmica, se aproxima de uma reta (Figura 16).

Figura 16 - Representação em escalas logarítmicas da curva de vida da ferramenta.



Fonte: Adaptado de Ferraresi (2011, p. 460).

### 2.3.8 Acabamento superficial

O acabamento superficial resultante da usinagem tem uma relação direta com o desempenho e a qualidade de um produto. A finalidade de analisar o acabamento da peça após o processo de fabricação é de explicar as alterações ocorridas na superfície e na subsuperfície da mesma, no intuito de obter o máximo de informações advindas do próprio material

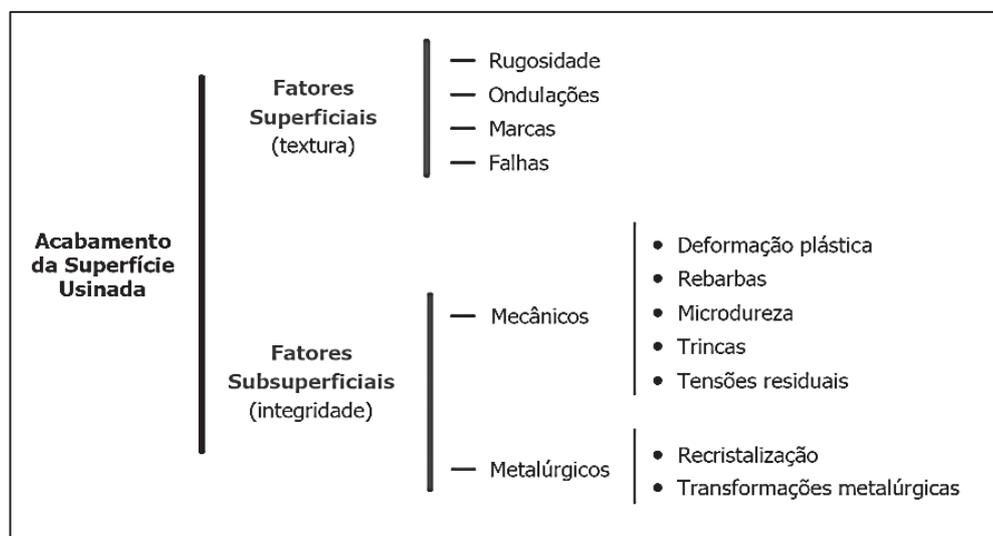
usinado. Assim, o conceito de acabamento superficial relaciona várias características da superfície usinada (textura) e das camadas logo abaixo desta (integridade) (MACHADO *et al.*, 2012). O diagrama da Figura 17 mostra a classificação de acabamento superficial e fatores relacionados que podem ocorrer em superfícies usinadas.

Em razão das características deste trabalho, será destacada a textura da superfície, em específico, a rugosidade, com o objetivo de verificar o efeito do desgaste da ferramenta sobre a qualidade da superfície.

### 2.3.9 Rugosidade da superfície usinada

A rugosidade é definida como o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície, que podem ser resultantes de vários fatores: marcas de avanço, desgaste da ferramenta, gume postiço etc.

Figura 17 - Classificação de acabamento superficial.



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2012, p. 297).

Machado *et al.* (2012) explicam que a rugosidade da superfície usinada é avaliada pelo modo de como é medida. Existem várias normas técnicas para a sua quantificação e, dentre as principais, estão: ISO, DIN e JIS. O método da “Linha Média” (LM) é largamente utilizado em muitos países, e foi adotado pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR ISO 4287 (2002). Este método consiste em definir todas as grandezas de medição por

meio de uma linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem. A “Linha Média” é a média entre os picos e vales (reentrâncias) dos desvios microgeométricos.

Os sistemas de medição fundamentados na linha média são assim divididos:

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

Os principais parâmetros utilizados na mensuração da rugosidade de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) são:

- $R_a$ : Desvio médio aritmético.
- $R_q$ : Desvio médio quadrático.
- $R_t$  ou  $R_{max}$ : Altura total do perfil (atual  $R_z$ ).
- $R_z$ : Altura máxima do perfil.
- $R_{sk}$ : Fator de assimetria do perfil.
- $R_{ku}$ : Fator de achatamento do perfil.

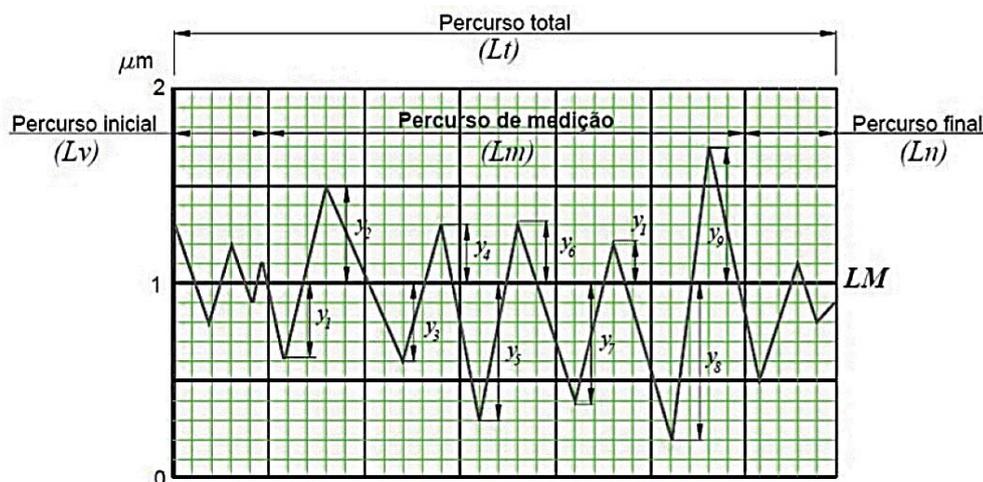
Neste trabalho será abordado somente o parâmetro  $R_a$  do sistema fundamentado na medida da profundidade da rugosidade.

A rugosidade média ( $R_a$ ) é definida como o desvio médio aritmético dos valores das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média (LM), dentro do percurso de medição ( $L_m$ ). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o valor  $L_m$ .

$R_a$  é o parâmetro de rugosidade mais utilizado nas indústrias, uma vez que mudanças no seu valor representam mudanças no processo, principalmente no desgaste da ferramenta (SOUZA, 2011). O conceito é ilustrado na

Figura 18, a partir da qual se define a Equação 2:

$$R_a = \frac{(y_1 + y_2 + \dots + y_n)}{n} \quad [2]$$

Figura 18 - Desvio médio aritmético ( $R_a$ ).

Fonte: Adaptado de Jesus (2013).

Kaçal (2014) realizou um estudo sobre o torneamento a seco do aço fabricado pela metalurgia do pó PMD23 (60 HRC) com ferramentas de cerâmica mista revestidas com TiN, com o objetivo de investigar os efeitos da variação dos parâmetros de corte sobre a rugosidade ( $R_a$ ) e sobre o desgaste da ferramenta. Os resultados apontaram que o avanço foi o parâmetro de maior influência sobre a rugosidade, uma vez que, com o aumento do avanço houve o aumento significativo dos valores da rugosidade devido às marcas mais expressivas do avanço sobre a superfície usinada. Um aumento do avanço tende a aumentar a rugosidade da superfície, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço são proporcionais ao quadrado desse avanço. Os resultados deste estudo estão em consonância com as pesquisas realizadas por Elbah *et al.* (2013), Samardžiová e Neslušán (2013) e Makadia e Nanavati (2013).

## 2.4 Torneamento dos aços endurecidos

No passado, a retificação era um processo de acabamento comum para peças com durezas superiores a 45 HRC, denominados de “aços duros” (SRITHAR; PALANIKUMAR; DURGAPRASAD, 2014); (BARTARYA; CHOUDHURY, 2012).

No processo de torneamento duro, comumente se usinam peças de difícil fabricação, como por exemplo, eixos de engrenagem, ferramentas de corte especiais, matrizes, moldes, aços ferramentas, aços para rolamentos e aços cementados (ÅNMARK *et al.*, 2015).

A possibilidade de substituir a retificação é o mais atrativo do torneamento de aços duros. Hoje o processo é visto como uma opção eficiente, com boa relação custo/benefício, podendo impulsionar a produtividade de maneira significativa e, ao mesmo tempo, gerar benefícios ao meio ambiente (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Davim (2008) cita que dentre as principais características do torneamento duro, destaca-se a capacidade de produzir tensões residuais de compressão sobre a peça usinada (o que não é possível com o processo de retificação). No entanto, para que isto aconteça, é de extrema importância a correta seleção das ferramentas e parâmetros de corte. O autor também relaciona algumas diferenças entre o torneamento duro e a retificação:

- A possibilidade de realizar operações de torneamento a seco reduz os custos decorrentes da compra, manutenção e descarte dos fluidos de corte.
- Centros de torneamento oferecem maior flexibilidade e produtividade, possibilitando usinar peças em um único passe e tornear perfis complexos.
- Operações de desbaste e acabamento podem ser efetuadas em uma única programação no torno CNC, sem necessidade de remoção da peça.
- Centros de torneamento possuem torres com várias posições de ferramentas, proporcionando maior automatização para várias operações na mesma programação.

Porém, em uma fabricação com alta repetitividade, quando se comparam as rugosidades geradas pelos processos de torneamento duro e retificação, faz-se necessária uma análise mais criteriosa para a sua execução (ÖZEL; KARPAT; SRIVASTAVA, 2008).

Muitas vezes a usinagem destes materiais é realizada de forma errônea, seja na escolha das ferramentas de corte (escolha somente pensando no baixo custo) ou a usinagem em máquinas-ferramentas sem rigidez ou potência necessárias (a pressão específica de corte pode ser duas vezes maior que o torneamento em aços de baixa dureza), resultando num processo pouco eficaz e com acabamentos superficiais indesejáveis (AOUICI *et al.*, 2014). Além disso, a compreensão dos custos por unidade fabricada tem que ser analisado caso a caso, pois depende de muitas variáveis que diferem de um processo ao outro (AGRAWAL *et al.*, 2015).

O processo de torneamento duro de acabamento, se corretamente planejado, poderá resultar em rugosidades médias ( $R_a$ ) entre 0,1 e 0,8  $\mu\text{m}$ , e circularidade e tolerâncias dimensionais com valores excelentes (GODOY; DINIZ, 2011). Tal desempenho somente é alcançado se realizado na mesma máquina em que o material foi previamente usinado, antes de passar pelo processo de endurecimento, pois desta forma minimiza possíveis erros

advindos da máquina-ferramenta. Devido às profundidades de corte relativamente menores usadas no torneamento dos aços duros, a preparação da peça no estado sem tratamento (não endurecido) beneficiará o alcance destes resultados. Por exemplo, chanfros e raios na peça irão facilitar a entrada e saída da ferramenta, aumentando sua vida útil. Do ponto de vista metalúrgico, materiais com pequeno desvio de dureza ao longo da profundidade de corte permitem melhores resultados no processo (DAVIM, 2011).

Com relação à fixação, a peça deve estar fixada o mais próximo possível do fuso da máquina. Recomendam-se relações aproximadas de comprimento/diâmetro de 2:1 a 4:1 para peças que serão fixadas somente em uma extremidade, e 8:1 para peças fixadas adicionalmente com contraponto (DAVIM, 2011).

O grau de rigidez da máquina-ferramenta indica o grau de precisão do torneamento duro. A maioria das máquinas fabricadas na última década possui rigidez suficiente para tais operações. Em muitos casos, as condições gerais das máquinas são mais importantes que o seu tempo de uso. Um torno, mesmo antigo, pode ser utilizado para o torneamento duro. Contudo, para melhores valores de acabamentos superficiais e tolerâncias dimensionais, tornam-se necessárias máquinas mais rígidas. Desse modo, as escolhas por tornos CNC e máquinas especiais são a melhor opção na usinagem de materiais duros (DAVIM, 2011).

Assim, para que o processo de torneamento dos aços endurecidos seja altamente eficaz, considerar somente a rigidez da máquina-ferramenta não é suficiente, mas sim a maximização da rigidez de todo o sistema, o que ainda não é bem compreendido pelas indústrias deste setor. Maximizar a rigidez do sistema significa minimizar todos os efeitos negativos das variáveis do processo, tais como a escolha correta das ferramentas, parâmetros de corte e fixação da peça (GAITONDE *et al.*, 2011) (ABBAS, 2016).

Como a grande maioria destas operações é realizada a seco, torna-se um desafio controlar de maneira eficiente todas as variáveis envolvidas no processo. A eliminação dos meios lubrificantes (chamados também de fluido de corte, óleo de corte, meio de lubrificação e arrefecimento, líquido refrigerante) reduz os custos, facilita o manuseio dos cavacos e causa menos impacto ao meio ambiente. Porém, em certos casos, o uso de fluidos de corte é necessário, seja para facilitar a quebra dos cavacos, controlar a estabilidade térmica da peça e da ferramenta ou remover o calor durante o corte (NESLUŠAN *et al.*, 2015).

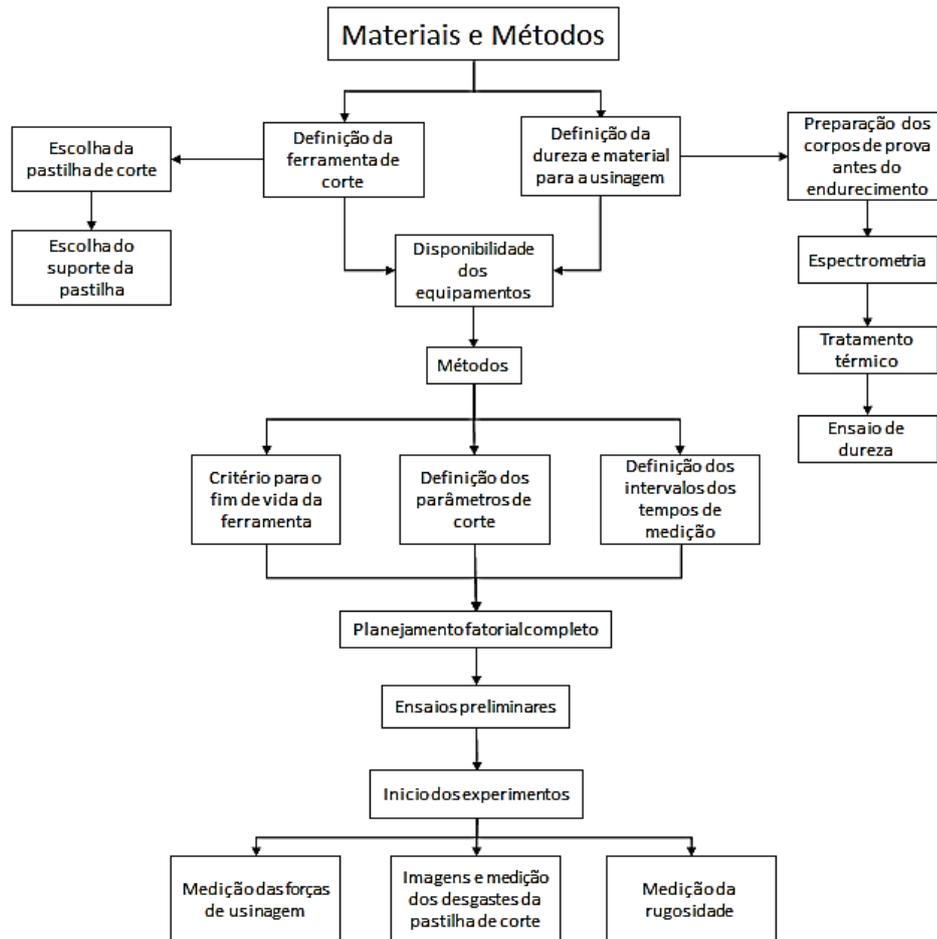
No corte contínuo a seco, os cavacos tendem escoar em forma de fitas e de cor alaranjada, demonstrando que a maior porcentagem do calor está sendo conduzida pelo cavaco, confirmando uma adequada configuração do processo (DAVIM, 2011).

A seleção apropriada do material de ferramenta (PCBN, Cermet ou cerâmica) é vital para a eficiência do processo e depende das exigências e precisão da superfície final da peça. Em virtude da variedade de materiais ofertados pelo mercado de maneira genérica, ou seja, sem as especificações das principais características técnicas relacionadas ao material, torna-se um desafio a escolha da ferramenta mais adequada, considerando o tipo de pastilha, o suporte da ferramenta e a melhor condição de corte. Portanto, o conhecimento técnico e a experiência são os pré-requisitos para otimização do torneamento duro (SAHOO; SAHOO, 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 19 mostra a sequência dos experimentos deste projeto de pesquisa, e foi planejado para atender os objetivos propostos na seção 1.3.

Figura 19 - Fluxograma do planejamento para a execução dos experimentos.



Fonte: O Autor.

Para investigar a influência dos parâmetros de corte (variáveis de entrada) sobre as falhas da ferramenta, sobre a força de usinagem e sobre a rugosidade das peças usinadas (variáveis de saída), a metodologia empregada consiste na realização de experimentos sistemáticos, isto é, análise qualitativa e quantitativa do torneamento longitudinal externo a seco em corpos de prova do aço ABNT 4140 endurecido a  $(55 \pm 1)$  HRC.

Os resultados das falhas (desgaste e avarias) das pastilhas de cerâmica foram documentados com imagens ópticas (estéreo microscópio), microscópicas (MEV) e medições

das larguras das marcas de desgastes de flanco registradas em planilhas. Os dados registrados foram representados graficamente para melhor interpretação. Os experimentos contemplam também a medição das componentes da força de usinagem ( $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ ) e da rugosidade ( $R_a$ ).

Todos os experimentos foram realizados no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo (UPF), Campus I, Passo Fundo, RS.

### 3.1 Materiais e equipamentos

A seguir, serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados na execução dos experimentos deste trabalho.

#### 3.1.1 Material para usinagem

O material escolhido para ser usinado neste projeto de pesquisa foi o aço ABNT 4140. Este aço é muito utilizado na fabricação de peças para as máquinas e equipamentos no setor agrícola, e foi adquirido junto a Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas. Foram concedidas por doação cinco barras redondas maciças trefiladas (aproximadamente 200 kg no total), cada barra com 6 m de comprimento e 35 mm de diâmetro, cuja composição química pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT/SAE 4140 deste experimento.

ABNT	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Al	%Ti	%Nb	%Sn
4140	0,41	0,21	0,87	0,021	0,018	1,01	0,152	0,07	0,13	0,015	0,004	0,006	0,005

Fonte: O Autor.

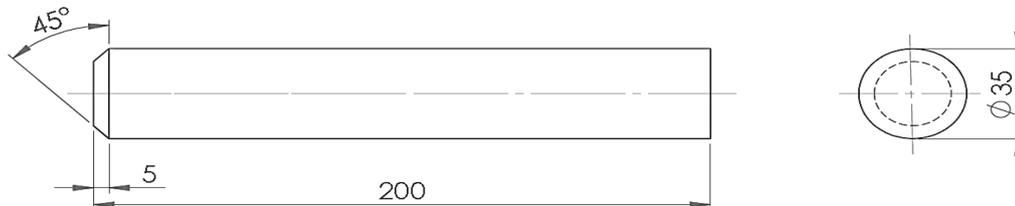
#### 3.1.2 Corpos de prova

As barras maciças do aço ABNT 4140 foram cortadas em tamanhos menores, resultando em 140 peças, e após foram torneadas para a confecção de chanfros. A dimensão final de cada corpo de prova pode ser visualizada na Figura 20.

Na sequência, os corpos de prova foram submetidos ao processo de tratamento térmico (têmpera e revenimento). O tratamento térmico foi realizado na empresa Temperatech Tratamentos Térmicos Ltda. de Canoas/RS. Após o tratamento térmico, os corpos de prova

apresentaram dureza de  $(55 \pm 1)$  HRC, permanecendo homogênea em todo o volume do corpo de prova. O certificado de qualidade dos resultados do processo de tratamento térmico pode ser visualizado no Anexo A1.

Figura 20 - Dimensões dos corpos de prova em milímetros.



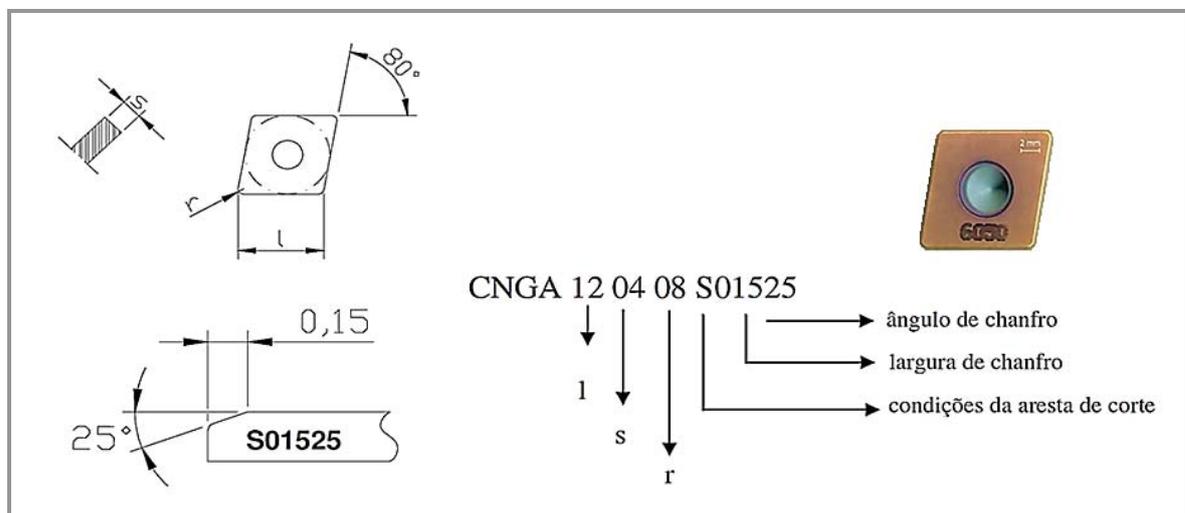
Fonte: O Autor.

### 3.1.3 Suporte e pastilhas de corte

Para garantir a rigidez na fixação das pastilhas, foi utilizado o suporte ISO DCLNL 2020K12, com ângulo de folga ( $\alpha$ ) de  $6^\circ$ , ângulo de posição ( $\chi_r$ ) com  $95^\circ$ , ângulo de saída ( $\gamma$ ) de  $-6^\circ$  e ângulo de inclinação ( $\lambda$ ) com  $-6^\circ$ , fabricante Sandvik.

Optou-se por utilizar pastilhas intercambiáveis de cerâmica mista (70% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 30% de TiC), ISO CNGA 120408 S 01525 6050, recobertas com uma camada de nitreto de titânio (TiN), com microgeometria de gume “S” chanfrado e arredondado (vide Figura 6), raio de ponta ( $r_e$ ) de 0,8 mm e ângulo de ponta ( $\epsilon_r$ ) de  $80^\circ$ , fabricante Sandvik. As dimensões geométricas estão representadas na Figura 21.

Figura 21 - Geometria ISO CNGA 120408 S 01525 6050 da pastilha de cerâmica mista.



Fonte: O Autor.

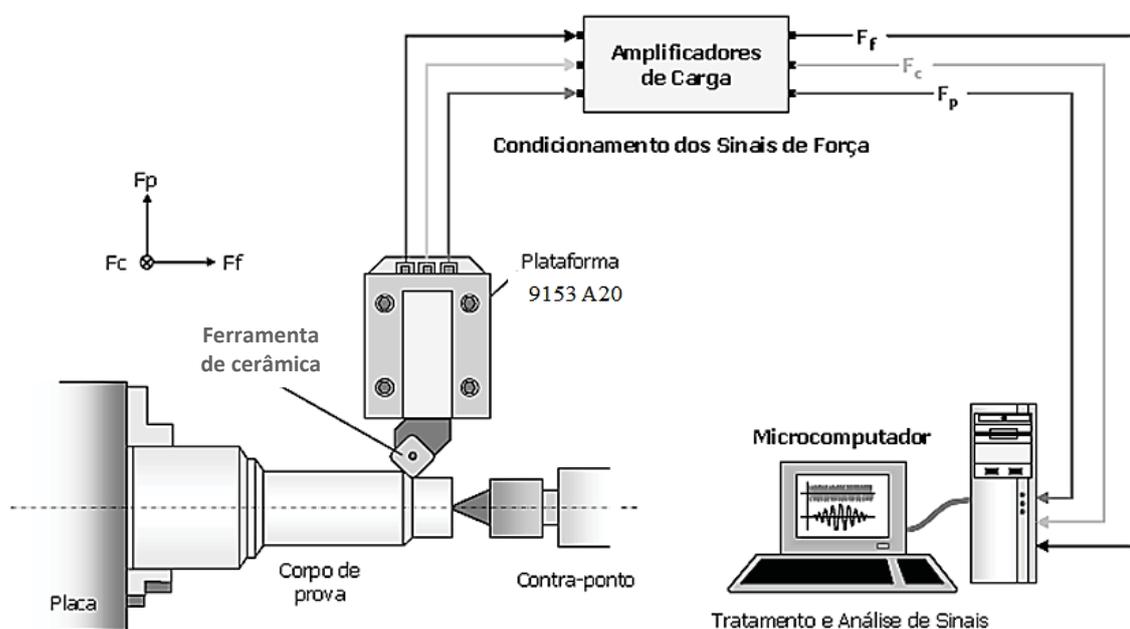
### 3.1.4 Máquina-ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada foi um centro de torneamento Romi modelo GL 240M com comando GE-Fanuc 0i-TC, mancais de rolamento e guias de escorregamento. A potência instalada no eixo árvore é de 20 CV (14,7 kW), a rotação máxima de 6000 rpm, e possui uma torre (cabecote revólver) de doze posições com travamento hidráulico, uma placa de três castanhas independentes e contra ponto com torque máximo de 110 N·m.

### 3.1.5 Dinamômetro

As medições da força de usinagem foram realizadas por meio de um dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9121 com capacidade de carga de  $\pm 6$  kN no eixo Z e de  $\pm 3$  kN em cada um dos eixos X e Y. O suporte da pastilha foi montado (acoplado) no porta-ferramentas da plataforma 9153 A20 do dinamômetro. O *software* Kistler *Dynoware* interligado a um computador registrou a aquisição dos dados em uma taxa de 1000 pontos por segundo (1 kS/s) das componentes das forças de usinagem ( $F_c$ ,  $F_p$  e  $F_f$ ). A Figura 22 ilustra o arranjo do sistema de aquisição de forças. O documento de calibração do dinamômetro fornecido pelo fabricante pode ser visualizado no Anexo A2.

Figura 22 - Sistema de medição de força em torneamento.



### 3.1.6 Rugosímetro de bancada

Como mencionado na Seção 2.3.9, foi adotado o desvio médio aritmético ( $R_a$ ) para as medições da rugosidade superficial das peças usinadas. Foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410, com resolução  $0,01 \mu\text{m}$  (*range*  $800 \mu\text{m}$ ),  $0,001 \mu\text{m}$  (*range*  $80 \mu\text{m}$ ) e  $0,0001 \mu\text{m}$  (*range*  $8 \mu\text{m}$ ), com raio de ponta do apalpador de diamante de  $5 \mu\text{m}$ .

### 3.1.7 MEV, estéreo microscópio e espectrômetro

Para o registro e mensuração das imagens ópticas foi utilizado um estéreo microscópio binocular, da marca ZEISS, modelo STEMI 2000-C com aumento máximo de 50x.

A documentação microscópica ocorreu por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) TESCAN modelo VEGA LM3, com capacidade de ampliações na ordem de 300.000 vezes. Também no mesmo equipamento foram realizadas as análises semiquantitativas das composições químicas presentes nas regiões desgastadas da ferramenta.

Para análise da composição química do aço ABNT 4140 (Tabela 1) utilizou-se o espectrômetro de energia dispersiva de raios-x (EDS) da marca OXFORD *Instruments*.

### 3.1.8 Microdurômetro

Para avaliar a uniformidade da dureza dos copos de prova, foram realizadas as durezas na escala HRC em um microdurômetro Shimadzu, modelo Série HMV-G20. A carga aplicada foi de 20 N durante 15 s por impressão, e a distância definida entre cada impressão foi de 1 mm, partindo da periferia até o centro da circunferência. As amostras foram escolhidas aleatoriamente e confirmaram os valores fornecidos pela empresa responsável pelo processo de tratamento térmico, conforme Anexo A1.

## 3.2 Métodos

Esta seção apresenta a sequência da metodologia utilizada para a execução dos experimentos.

### 3.2.1 Critério de fim de vida da ferramenta

Por se tratar de uma operação de acabamento, na qual as velocidades de corte são relativamente altas e, juntamente com baixas profundidades de corte, resultando desta forma, em uma pequena área do gume em contato com a peça, o controle do processo foi planejado para evitar possíveis avarias tanto nas ferramentas quanto na máquina-ferramenta. Assim, foi adotado como critério de fim de vida da ferramenta um desgaste de ponta ( $VB_c$ ) com valor maior ou igual a 0,1 mm.

### 3.2.2 Parâmetros de corte

A velocidade de corte ( $v_c$ ), o avanço ( $f$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ) foram determinados conforme faixa de valores usualmente utilizados pelas indústrias (para o aço ABNT 4140), permanecendo dentro dos limites de recomendação do fabricante da ferramenta para operações de acabamento. Com base nisso, os parâmetros de corte escolhidos para os ensaios de torneamento e seus referidos níveis estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de corte e seus referidos níveis.

Parâmetros	Símbolo	Unid.	Níveis		
			1	2	3
Velocidade de corte	$v_c$	m/min	120	135	150
Avanço	$f$	mm/volta	0,11	0,22	
Profundidade de corte	$a_p$	mm	0,3		

Fonte: O Autor.

### 3.2.3 Intervalos de tempo dos ensaios

Os intervalos de tempo para a coleta dos dados das variáveis de saída foram definidos com base na série normalizada de Renard (R10): 1; 2; 4; 6,3; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50 min. Assim, a interrupção dos ensaios se deu quando o tempo de corte atingiu 50 min.

### 3.2.4 Planejamento dos ensaios

Para combinar os parâmetros de corte com seus referidos níveis e auxiliar nas análises de seus efeitos sobre as variáveis de saída (forças,  $VB_c$  e  $R_a$ ), utilizou-se um planejamento fatorial completo, totalizando 6 (seis) ensaios de vida.

Os experimentos não tiveram repetições devido à morosidade dos ensaios e ao custo elevado dos materiais (tanto das peças como das ferramentas). Assim, os resultados foram analisados com base em efeitos de testes únicos.

Os seguintes passos foram realizados para o início dos ensaios:

- 1º) Instalação do dinamômetro. Após programar o centro de torneamento conforme os dados da Tabela 2, o dinamômetro na torre do torno foi instalado. Também foi instalada uma ferramenta diferente para realizar passes de limpeza.
- 2º) Testes preliminares. Ensaios foram realizados para ajustes e verificação do funcionamento geral do processo.
- 3º) Início dos experimentos. Com o corpo de prova fixado na placa e contra ponto, um 1º passe foi realizado com uma ferramenta distinta. Este 1º passe teve por objetivo amenizar quaisquer erros advindos do processo de tratamento térmico (empenamentos) e dimensionais do corpo de prova. Essa ferramenta não faz parte dos estudos deste trabalho, portanto não foi detalhada.
- 4º) Realização dos experimentos. Após o 1º passe, a torre altera de posição, iniciando o corte com a ferramenta de cerâmica. Os passes foram interrompidos nos tempos predefinidos (Seção 3.2.3). Em seguida, tanto a pastilha quanto a peça foram retiradas do centro de torneamento para as devidas análises. Esta sequência se repetiu até o fim dos ensaios.

Os dados das componentes das forças foram registrados pelo próprio *software* do dinamômetro, ficando armazenadas no computador. As medições da rugosidade ( $R_a$ ) sobre a peça ocorreram em três pontos distintos equidistantes de  $120^\circ$  ao longo da circunferência próximo à região de saída da ferramenta da peça nos intervalos de tempos pré-programados. O registro das imagens das falhas das pastilhas e suas medições aconteceram no mesmo intervalo de tempo das medições da rugosidade. Para auxiliar na elaboração, geração de gráficos e interpretação dos dados, o planejamento fatorial foi desenvolvido por meio do *software* estatístico Minitab<sup>®</sup> 17.

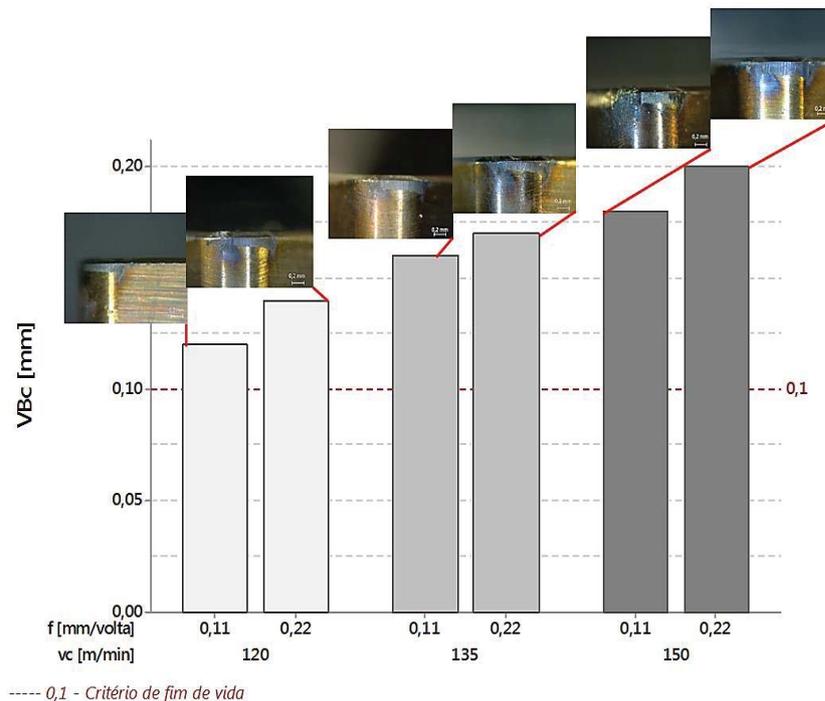
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos do torneamento longitudinal externo a seco do aço ABNT 4140 endurecido a  $(55 \pm 1)$  HRC com ferramenta cerâmica mista tipo “S”, analisando a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) sobre as falhas da ferramenta, sobre as forças de usinagem e sobre a rugosidade da superfície usinada, visando atender os objetivos propostos na Seção 1.3.

### 4.1 Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre as falhas da ferramenta

A Figura 23 ilustra a evolução do desgaste de ponta ( $VB_c$ ) da ferramenta de cerâmica no tempo de 50 min de usinagem utilizando os dados da Tabela 2.

Figura 23 - Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre o “ $VB_c$ ”.



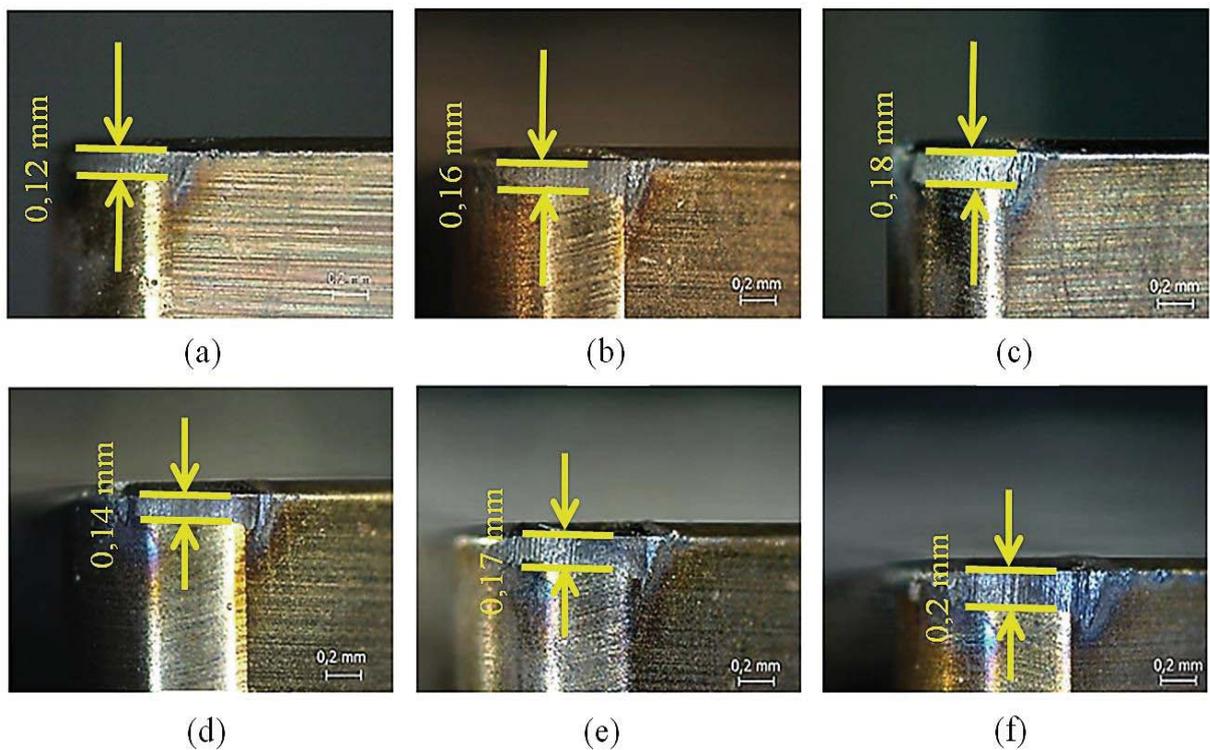
Fonte: O Autor.

Observa-se na Figura 23 que, os maiores valores do “ $VB_c$ ” foram registrados na condição de usinagem com a velocidade de corte em seu maior nível (150 m/min). Por outro lado, os menores valores foram registrados para a condição com a menor velocidade de corte

(120 m/min). Nota-se também, mas com menor representatividade, o aumento do “ $VB_c$ ” com o aumento do avanço. O desgaste de ponta ( $VB_c$ ) observado nos ensaios foi diretamente influenciado pela velocidade de corte, devido à intensa fricção entre a ferramenta e a superfície usinada, uma vez que, o mecanismo de desgaste predominante na ponta da ferramenta foi a abrasão mecânica, resultante do atrito da ferramenta contra uma peça com alta dureza. Esses resultados assemelham-se com os encontrados nas pesquisas realizadas por Das *et al.* (2015b), El Hakim *et al.* (2011), Bensouilah *et al.* (2016), Cheng *et al.* (2016) e Saini *et al.* (2012).

As imagens dos desgastes de ponta ( $VB_c$ ) e entalhe ( $VB_N$ ) em função da variação velocidade de corte ( $v_c$ ) e do avanço ( $f$ ) no tempo de 50 min de usinagem podem ser visualizadas na Figura 24. O entalhe não foi mensurado durante os ensaios desta pesquisa.

Figura 24 - Desgaste de ponta e entalhe após 50 minutos de usinagem, as figuras (a), (b) e (c) representam o avanço de 0,11 mm/volta e velocidades de corte de 120, 135 e 150 m/min respectivamente. As figuras (d), (e) e (f) representam o avanço de 0,22 mm/volta para as velocidades de corte de 120, 135 e 150 respectivamente.



Fonte: O Autor.

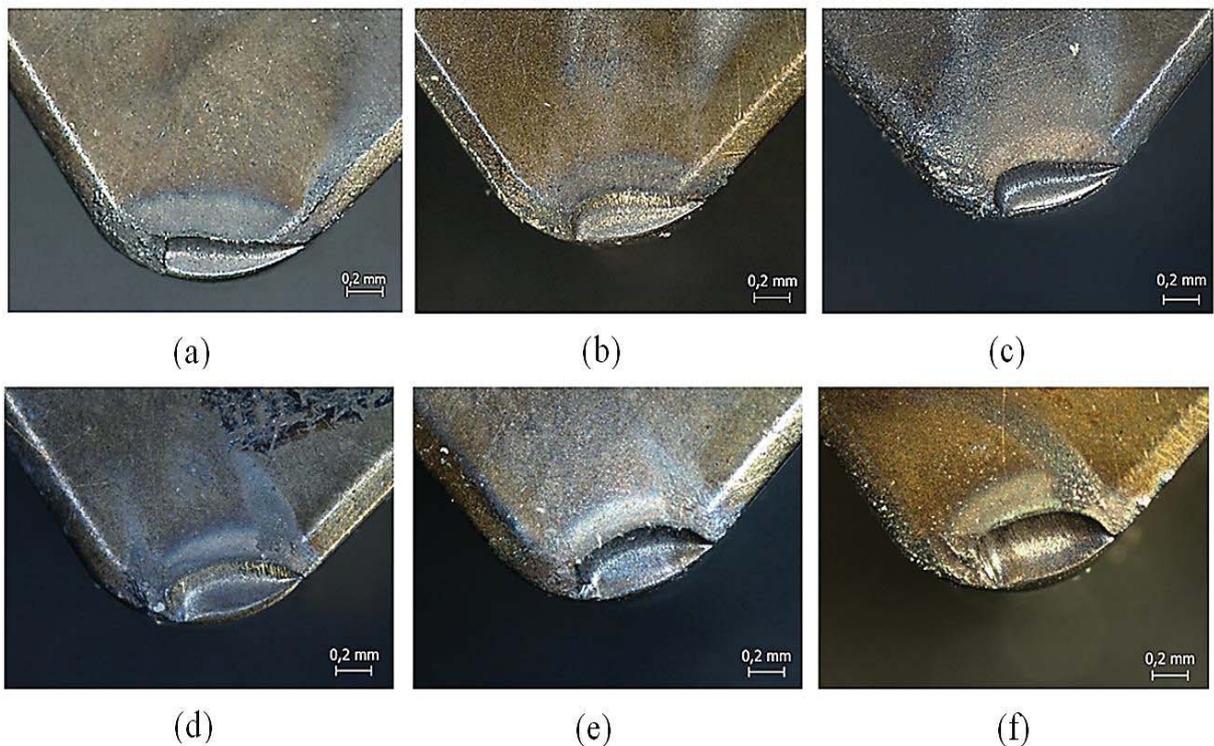
Percebe-se claramente nas imagens da Figura 24 a influência da velocidade de corte sobre o desgaste de ponta e sobre o entalhe. Da mesma forma, o efeito do aumento do avanço resultou em maiores valores do “ $VB_c$ ”. O desgaste de entalhe provavelmente ocorreu devido ao surgimento de óxidos que se formaram continuamente e se aderiram à ferramenta nas

regiões coincidentes com as laterais do cavaco (áreas C e D da Figura 12), e a quebra das junções de aderência entre os óxidos e a ferramenta, promovidos pelo mecanismo de *attrition*, resultando na remoção de material da superfície da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2012). Outra causa possível do desgaste de entalhe é a fadiga da ferramenta resultante da variação da força na superfície livre que acompanha pequenos movimentos laterais das arestas dos cavacos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Não foi possível mensurar o desgaste de cratera. Porém, imagens deste desgaste foram analisadas relacionando-as com as condições de corte utilizadas nos experimentos, conforme Seção 3.2.2. Todas as imagens foram registradas com aumento de 50 vezes.

As imagens da Figura 25 ilustram o desgaste de cratera sob a influência da variação da velocidade de corte ( $v_c$ ) e do avanço ( $f$ ) para o tempo de 50 min de usinagem.

Figura 25 - Desgaste de cratera após 50 minutos de usinagem, as figuras (a), (b) e (c) representam o avanço de 0,11 mm/volta e velocidades de corte de 120, 135 e 150 m/min respectivamente. As figuras (d), (e) e (f) representam o avanço de 0,22 mm/volta para as velocidades de corte de 120, 135 e 150 respectivamente.



Fonte: O Autor.

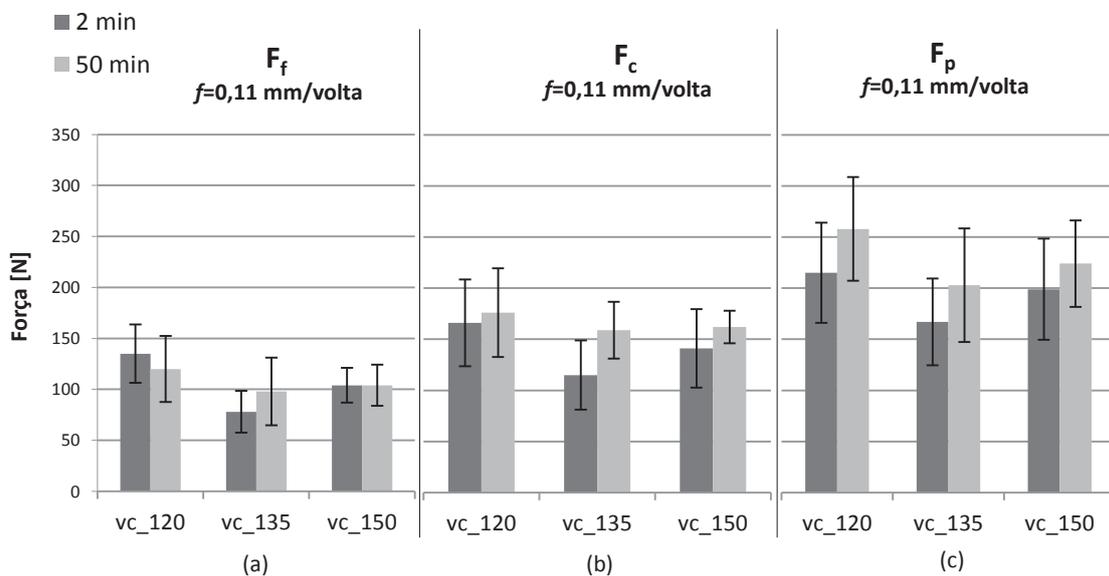
O desgaste de cratera identificado nos ensaios foi provocado pelo atrito entre ferramenta-cavaco, sobre a superfície de saída da ferramenta (face), decorrente das altas velocidades de corte (maior calor), ativando o mecanismo de desgaste por difusão, uma vez que, a presença de 30% de TiC na matriz da ferramenta elevou a afinidade química do C

(presente no elemento químico TiC) com os elementos químicos presentes no material da peça, o que resultou na remoção de partículas da superfície de saída da ferramenta. Esses resultados estão em consonância com os encontrados nas pesquisas realizadas por Aslantas *et al.* (2012), Zhu *et al.* (2013) e Das *et al.* (2015a).

#### 4.2 Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre as componentes da força de usinagem

A influência da variação da velocidade de corte e do avanço sobre o comportamento das componentes da força de usinagem ( $F_f$ ,  $F_p$  e  $F_c$ ), resultante dos ensaios delineados na seção 3.2.4, estão representados nos gráficos da Figura 26 e da Figura 27. Os valores expressos representam a média e a dispersão máxima e mínima dos valores registrados das componentes da força de usinagem nos tempos de corte de 2 min (início de vida da ferramenta) e 50 min (fim de vida da ferramenta).

Figura 26 - Efeitos da variação da velocidade de corte para o avanço de  $f=0,11$  mm/volta, sobre as componentes da força de usinagem. Força de avanço (a), força de corte (b) e força passiva (c).

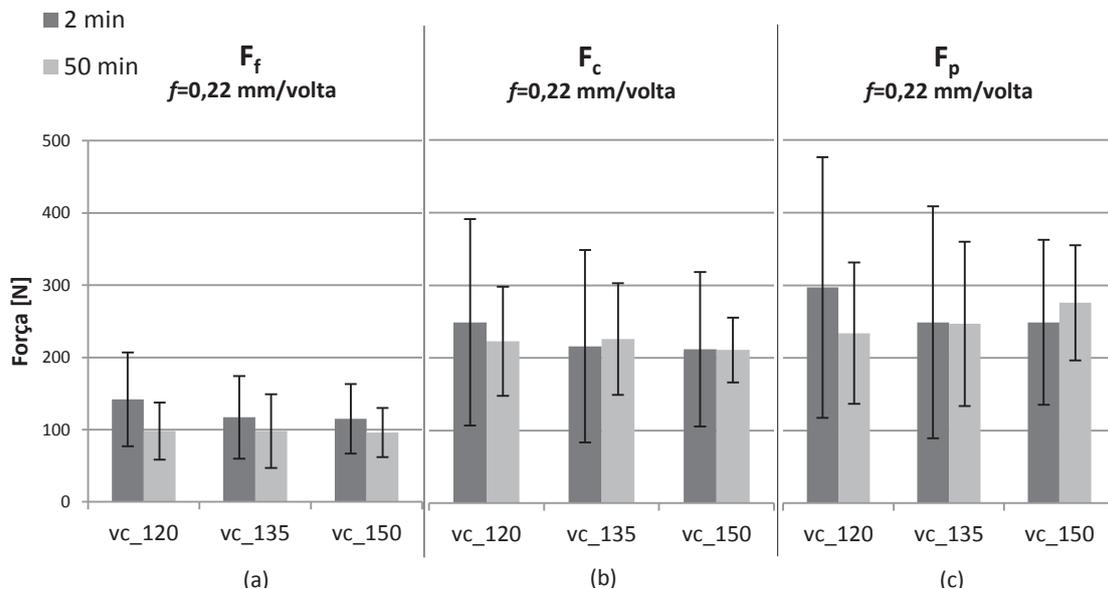


Fonte: O Autor.

#### 4.2.1 Força de avanço ( $F_f$ )

Observa-se tanto no gráfico da Figura 26 (a) quanto no gráfico da Figura 27 (a), que houve uma leve tendência na redução dos valores da  $F_f$  com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ). Este fato evidencia-se principalmente com ferramenta no fim de vida (50 min de usinagem), provavelmente devido à evolução do desgaste de cratera, uma vez que este desgaste altera a geometria da ferramenta, gerando um aumento do ângulo de saída ( $\gamma$ ) (fica mais positivo), facilitando o corte do material (diminui o ângulo de cunha ( $\beta$ )) e o escoamento do cavaco, contribuindo para a redução da força de avanço.

Figura 27 - Efeitos da variação da velocidade de corte para o avanço de  $f=0,22$  mm/volta, sobre as componentes da força de usinagem. Força de avanço (a), força de corte (b) e força passiva (c).



Fonte: O Autor.

Para a ferramenta no início de vida (2 min de usinagem) percebeu-se também uma leve tendência na redução da  $F_f$  com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ). Isto provavelmente ocorreu devido a maior facilidade de formação do cavaco, resultante do maior calor gerado na região do corte pelo aumento da  $v_c$ . Na condição de menor avanço ( $f=0,11$  mm/volta), percebe-se que há um aumento da  $F_f$  com o aumento da  $v_c$  de 135 para 150 m/min (Figura 26 (a)). A ocorrência deste fato, possivelmente, foi provocado pelo desgaste de ponta da ferramenta ( $VB_c$ ), uma vez que maiores velocidades de corte aceleram este tipo de desgaste, resultando numa maior área de contato entre a superfície de folga da ferramenta com a superfície da peça usinada.

#### 4.2.2 Força de corte ( $F_c$ )

De maneira análoga à  $F_f$ , os gráficos das Figura 26 (b) e Figura 27 (b) apontam uma redução da  $F_c$  com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ). Isto é percebido principalmente com a ferramenta no fim de vida (50 min de usinagem), uma vez que o corte foi facilitado com a evolução do desgaste de cratera, e então com o aumento do ângulo de saída efetivo.

Maiores valores da  $F_c$  foram registrados com o maior avanço ( $f = 0,22$  mm/volta) possivelmente devido à ocorrência da maior área de contato entre a ferramenta e a peça, promovido pelo aumento de  $f$ , uma vez que este efeito provoca maiores taxas de remoção de cavaco, resultando num aumento desta componente da força de usinagem.

#### 4.2.3 Força passiva ( $F_p$ )

Percebe-se, para a  $F_p$  no gráfico da Figura 26 (c), um comportamento similar tanto para a ferramenta no início de vida (2 min de usinagem) quanto para a ferramenta no fim de vida (50 min de usinagem), isto é, uma redução desta componente da força de usinagem com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ) de 120 para 135 m/min. Para a ferramenta no início de vida, isto provavelmente ocorreu devido ao maior calor gerado na região do corte promovido pela elevação da  $v_c$ , facilitando desta forma a usinagem do material e reduzindo a  $F_p$  na região do chanfro. Para a ferramenta no fim de vida, a redução do valor da  $F_p$  aconteceu possivelmente devido ao surgimento do desgaste de cratera, que provocou uma alteração geométrica na ferramenta, aumentando o ângulo de saída ( $\gamma$ ) no chanfro, diminuindo a pressão axial da ferramenta sobre a peça, facilitando o corte e, conseqüentemente, reduzindo a  $F_p$ .

Neste mesmo gráfico da Figura 26 (c), nota-se uma elevação da  $F_p$  com o aumento da  $v_c$  de 135 para 150 m/min, tanto para a ferramenta no início de vida quanto para a ferramenta no fim de vida. Isto ocorreu, provavelmente, devido a maior influência do desgaste de ponta ( $VB_c$ ) rebaixando o gume e, reduzindo neste caso, o efeito do desgaste de cratera, que até o momento favorecia o corte em função do maior ângulo de saída proporcionado por este tipo de desgaste. Os maiores valores de desgaste de flanco registrados nos experimentos ocorreram nas condições com as maiores velocidades de corte. Isto provocou uma maior área de contato entre a ferramenta e a peça, aumentando o atrito e vibrações, elevando desta forma as componentes da força de usinagem, em particular a  $F_p$ . Esta abordagem possivelmente

esclarece o efeito observado na transição da  $v_c$  de 135 para 150 m/min para a  $F_f$  e  $F_c$  na condição de avanço no seu menor nível (Figura 26 (a) e (b)).

Os maiores valores da  $F_p$  e  $F_c$  foram registrados na condição de maior  $f$  (Figura 27). Isto aconteceu devido à ocorrência da maior área da seção transversal de corte promovida pelo aumento do avanço, uma vez que, este efeito provoca maiores taxas de remoção de cavaco, elevando dessa forma, as componentes da força de usinagem.

Nota-se nos gráficos das Figura 26 e Figura 27 que  $F_p$  registrou os maiores valores das forças. Isto aconteceu devido à profundidade de corte ( $a_p$ ) relativamente baixa utilizada nesta operação, uma vez que  $a_p$  menor que o raio de ponta ( $r_e$ ), acarreta em maiores pressões em uma área relativamente pequena na ponta da ferramenta, refletindo diretamente sobre  $F_p$ . O ângulo de saída ( $\gamma$ ) negativo, o ângulo de posição ( $\chi_r$ ) de  $95^\circ$  e o chanfro da ferramenta também contribuíram para o aumento de  $F_p$ , uma vez que estas geometrias direcionam as tensões para o centro da ferramenta. Esses resultados estão em consonância com encontrados nas pesquisas realizadas por Azizi *et al.* (2012), Aouici *et al.* (2012), Bartarya *et al.* (2012), Ezilarasan *et al.* (2013), Rao *et al.* (2013), Çiçek *et al.* (2013), Pal *et al.* (2014), Kurt *et al.* (2015), Meddour *et al.* (2015) e Bensouilah *et al.* (2016).

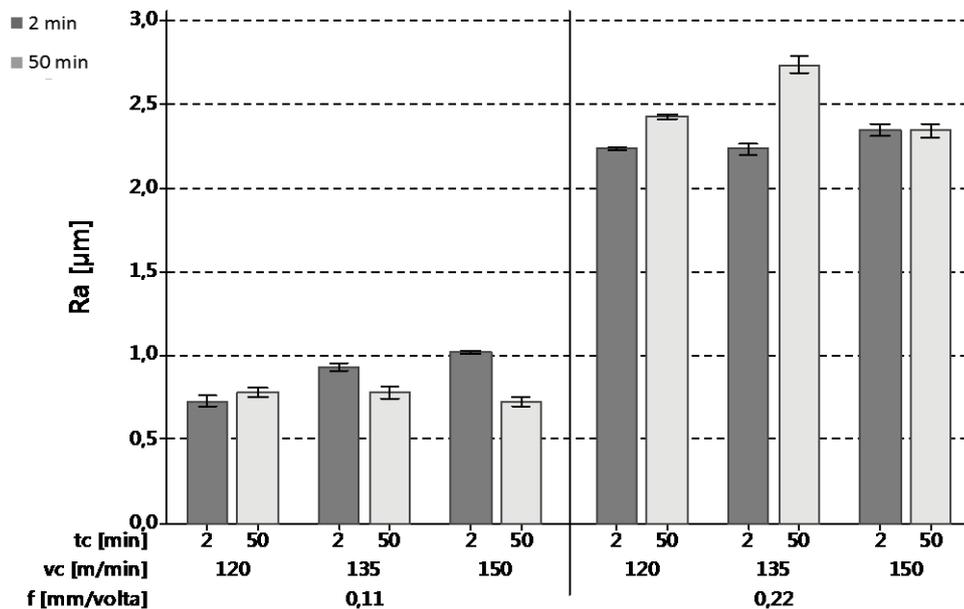
### 4.3 Efeitos da velocidade de corte e do avanço sobre a superfície usinada

A Figura 28 ilustra o comportamento do desvio médio aritmético de rugosidade ( $R_a$ ) aos 2 minutos de usinagem e aos 50 minutos de usinagem decorrente das variações das condições de usinagem. Percebe-se para a condição  $f=0,11$  mm/volta uma elevação dos valores do  $R_a$  com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ) para a ferramenta aos dois minutos de usinagem. Isto aconteceu possivelmente devido ao desgaste de ponta aumentar com maiores  $v_c$  e, inicialmente, a pastilha ter a geometria negativa de chanfro fazendo com que o cavaco seja jogado contra a peça, elevando desta forma os valores do  $R_a$ .

Em contrapartida, para a mesma condição de avanço ( $f=0,11$  mm/volta), percebe-se uma diminuição dos valores do  $R_a$  para a ferramenta aos 50 minutos de usinagem com o aumento de  $v_c$ . Este fato ocorreu provavelmente em função da evolução do desgaste de cratera, pois a formação da cratera deixa um ângulo de saída ( $\gamma$ ) mais positivo na ferramenta (apesar do  $VB_c$ ), favorecendo a formação de cavacos longos (dificulta a quebra) que se afastam da peça, melhorando o acabamento.

Na condição de corte de  $f = 0,22$  mm/volta para a ferramenta aos 2 minutos de usinagem percebe-se que com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ) os valores do  $R_a$  mantiveram-se iguais, uma vez que não apresentaram diferenças significativas entre si. O aumento do  $R_a$  para a ferramenta aos 50 minutos de usinagem, na transição da velocidade de corte de 120 para 135 m/min ( $f = 0,22$  m/min), ocorreu possivelmente, devido ao efeito mais representativo do desgaste de ponta sobre o desgaste de cratera. Porém, na transição de 135 para 150 m/min, a redução do valor do  $R_a$  aconteceu em função do efeito mais representativo do desgaste de cratera (aumento de  $\gamma$ ) em relação ao desgaste de ponta ( $VB_c$ ).

Figura 28 - Efeito da variação dos parâmetros de corte sobre a rugosidade “ $R_a$ ”.



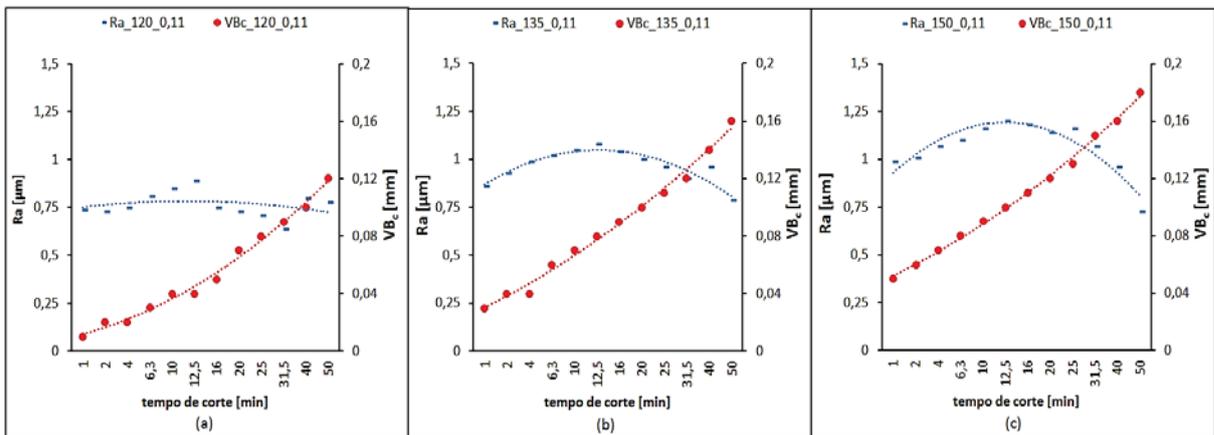
Fonte: O Autor.

Percebe-se na Figura 28 que os maiores valores para a  $R_a$  foram registrados nas condições de corte com o avanço em seu maior nível ( $f = 0,22$  mm/volta). Isto aconteceu devido ao surgimento de marcas mais representativas da ferramenta sobre a superfície usinada decorrentes do aumento do avanço, uma vez que, um aumento de  $f$  tende a aumentar a rugosidade da superfície numa razão aproximadamente quadrática, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço são proporcionais ao quadrado desse avanço. Esses efeitos são semelhantes aos relatados nas pesquisas realizadas por Elbah *et al.* (2013), Samardžiová *et al.* (2013), Makadia *et al.* (2013), Pal *et al.* (2014), Aouici *et al.* (2014), Kaçal (2014), Das *et al.* (2015a) e Abbas (2016).

#### 4.4 Interações das falhas da ferramenta com a rugosidade

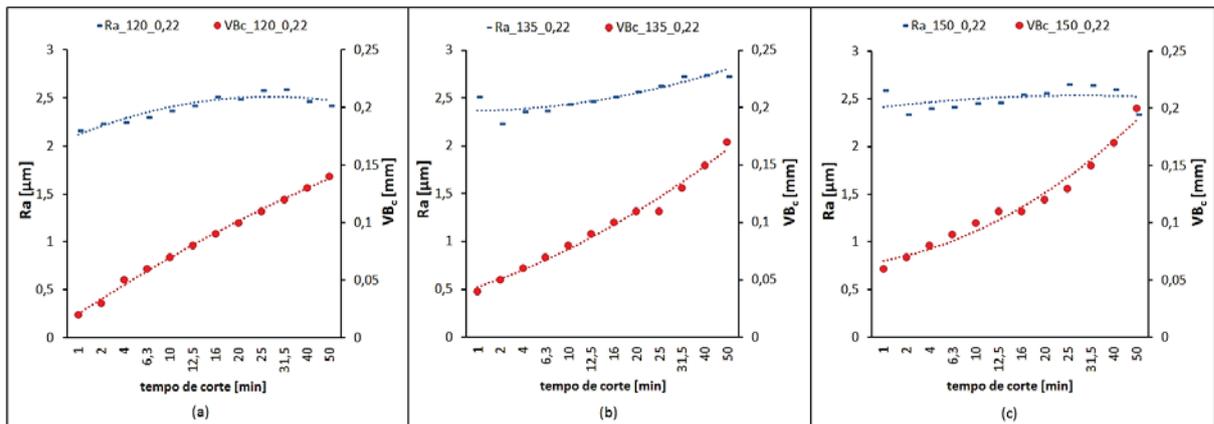
As falhas detectadas durante os experimentos foram o desgaste de entalhe, o desgaste de cratera e o desgaste de ponta ( $VB_c$ ). Devido a impossibilidade da medição do desgaste de entalhe e do desgaste de cratera, os gráficos desta seção mostram apenas a relação entre o ( $VB_c$ ) e o desvio médio aritmético ( $R_a$ ) das superfícies usinadas. O comportamento entre essas duas variáveis de resposta com os avanços  $f=0,11$  mm/volta e  $f=0,22$  mm/volta estão representados nos gráficos da Figura 29 e Figura 30 respectivamente. Para uma melhor interpretação gráfica, optou-se por representar o comportamento do  $R_a$  e o  $VB_c$  com uma linha de tendência polinomial de segunda ordem.

Figura 29 - Interações entre o  $VB_c$  e o  $R_a$ , na condição de  $f = 0,11$  mm/volta. Velocidades de corte ( $v_c$ ): (a) 120 m/min; (b) 135 m/min e (c) 150 m/min.



Fonte: O Autor.

Figura 30 - Interações entre o  $VB_c$  e o  $R_a$ , na condição de  $f = 0,22$  mm/volta. Velocidades de corte ( $v_c$ ): (a) 120 m/min; (b) 135 m/min e (c) 150 m/min.



Fonte: O Autor.

Na condição com  $f = 0,11$  mm/volta, representados nos gráficos da Figura 29, observa-se que, com o crescimento gradual do desgaste de ponta ( $VB_c$ ) houve uma tendência na redução do desvio médio aritmético ( $R_a$ ) com o tempo de corte. Possivelmente, isto ocorreu em função da interação do desgaste de cratera sobre  $R_a$ , pois ela altera a geometria da pastilha. Inicialmente, a pastilha tem geometria negativa (o cavaco é jogado contra a peça interferindo negativamente sobre a rugosidade); com o surgimento da cratera, ela passa a ser positiva, afastando o cavaco da peça e provocando, assim, uma interferência positiva (melhora) sobre a rugosidade. Ou seja, a interação  $VB_c \times R_a$  é apenas indireta, ou não existe significativamente, pois seu efeito é sobreposto por  $K_T$ .

Na condição com  $f = 0,22$  mm/volta, representados nos gráficos da Figura 30, nota-se que houve um aumento dos valores de  $R_a$  acompanhando o aumento gradual do  $VB_c$  relativos ao tempo de corte, demonstrando desta forma, uma interação mais efetiva entre ambos. Isto ocorreu provavelmente devido à sobreposição dos efeitos do  $VB_c$  sobre os da cratera.

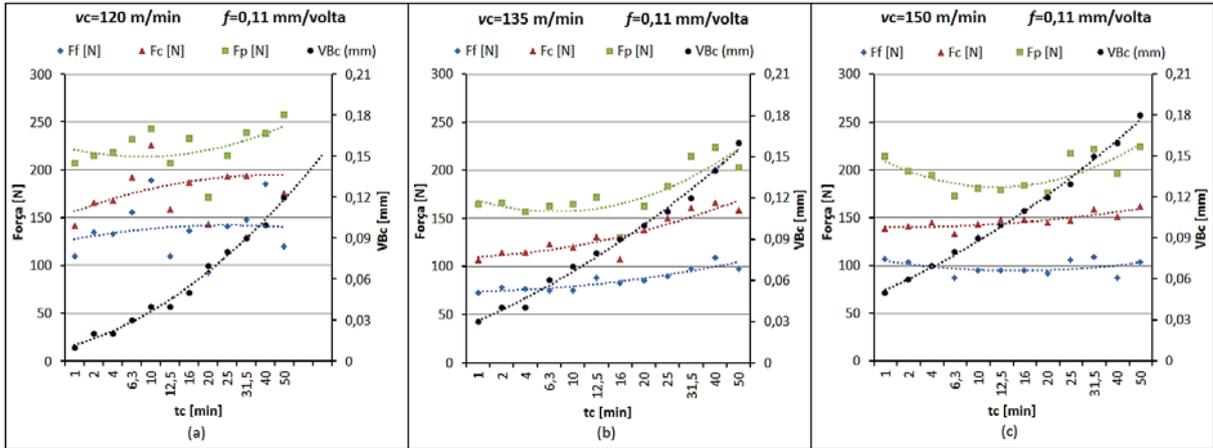
Maiores valores do  $VB_c$  provocam uma maior área de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, elevando o atrito e as vibrações, conseqüentemente, interferindo negativamente sobre a superfície usinada (agravando a rugosidade). Contudo, percebe-se uma tendência na redução dos valores de  $R_a$  próximo ao fim de vida da ferramenta, isto é, após os 31,5 minutos de usinagem para as velocidades de corte de 120 e 135 m/min (gráficos (a) e (b) da Figura 30), e após 25 minutos de usinagem para  $v_c = 150$  m/min (Figura 30 (c)). Isto aconteceu provavelmente devido ao desgaste de cratera ser mais representativo neste tempo de corte, sobrepondo-se ao desgaste de ponta ( $VB_c$ ). A cratera tende a aumentar o ângulo de saída ( $\gamma$ ) da ferramenta, resultando em efeitos similares aos mencionados na situação com o avanço em  $f = 0,11$  mm/volta, ou seja, redução da rugosidade média  $R_a$ .

Resultados semelhantes a esses são relatados nas pesquisas realizadas por Dogra *et al.* (2011), Elbah *et al.* (2013), Davoudinejad *et al.* (2014) e Das *et al.* (2015a).

#### 4.5 Interações das falhas da ferramenta com a força de usinagem

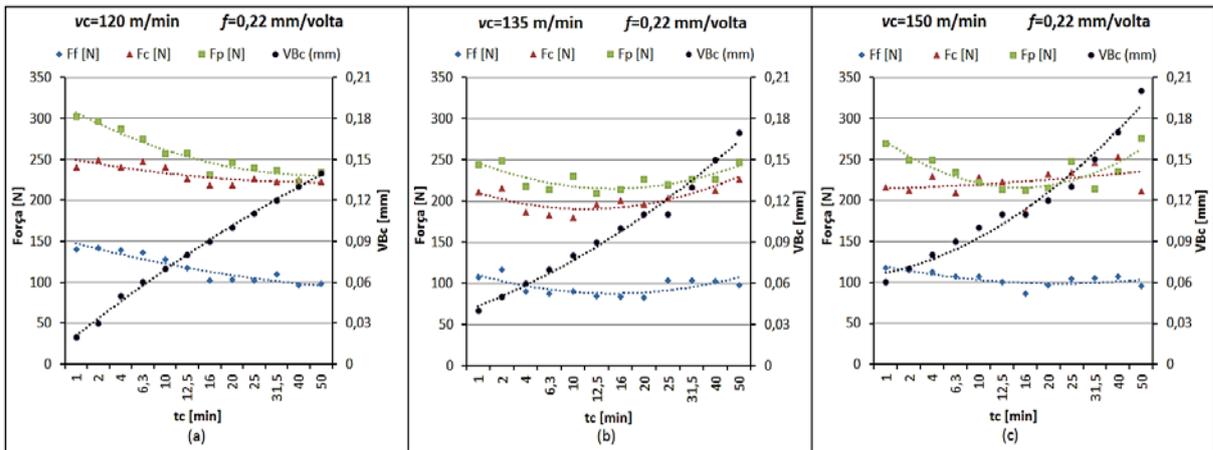
O comportamento das componentes da força de usinagem ( $F_f$ ,  $F_c$  e  $F_p$ ) e do desgaste de ponta ( $VB_c$ ) estão representados nos gráficos da Figura 31 ( $f = 0,11$  mm/volta) e da Figura 32 ( $f = 0,22$  mm/volta). Para uma melhor interpretação gráfica, optou-se por representar tais comportamentos de forças e  $VB_c$  com uma linha de tendência polinomial de segunda ordem.

Figura 31 - Interações entre o desgaste de ponta ( $VB_c$ ) e as componentes da força de usinagem. Condições:  $v_c = 120$  (a), 135 (b) e 150 (c) m/min,  $f = 0,11$  mm/volta.



Fonte: O Autor.

Figura 32 - Interações entre o desgaste de ponta ( $VB_c$ ) e as componentes da força de usinagem. Condições:  $v_c = 120$  (a), 135 (b) e 150 (c) m/min,  $f = 0,22$  mm/volta.



Fonte: O Autor.

Percebe-se no gráfico da Figura 31 (a) ( $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta) um comportamento similar entre todas as componentes da força de usinagem, isto é, uma interação direta entre o  $VB_c$  e as componentes da força de usinagem até os 10 min de usinagem. Após este tempo, houve uma redução (interação indireta ou inversa) das componentes até o tempo de corte de 20 min. Este fato aconteceu, possivelmente, em razão da evolução do desgaste de cratera, uma vez que, este desgaste promove um aumento do ângulo de saída ( $\gamma$ ) da ferramenta, facilitando o corte do material, reduzindo as componentes da força de usinagem. Observa-se também que, após 20 min de usinagem houve alternância de

predomínio de tipo de desgaste  $VB_c$  e de cratera, causando variações nas componentes da força de usinagem. No aspecto geral, o comportamento das forças foi crescente.

Nota-se no gráfico da Figura 31 (b) ( $v_c = 135$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta) o mesmo comportamento entre as componentes da força de usinagem e o desgaste de ponta, ou seja, uma interação direta entre a evolução de  $VB_c$  com o aumento das componentes demonstrando, para esta condição de corte, a influência mais representativa deste desgaste sobre  $F_f$ ,  $F_c$  e  $F_p$ .

Observa-se no gráfico da Figura 31 (c) ( $v_c = 150$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta) a redução da  $F_p$  conforme o  $VB_c$  evolui até o tempo de corte de 20 min. Isto aconteceu, provavelmente, devido ao crescimento do desgaste de cratera, já que, a cratera promove um aumento do ângulo  $\gamma$ , eliminando o chanfro do gume, provocando uma redução de  $F_p$ . Após 20 min de usinagem, nesta mesma condição de corte, a  $F_p$  tende a crescer, possivelmente, decorrente da conjunção entre os efeitos da evolução do  $VB_c$  e do desgaste de cratera.

Percebe-se no gráfico da Figura 32 (a) ( $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,22$  mm/volta) que, conforme o  $VB_c$  aumenta com o tempo de corte, os valores das componentes da força de usinagem tendem a diminuir. Isto ocorreu, provavelmente, devido ao efeito mais representativo do desgaste de cratera em relação ao  $VB_c$ .

Este efeito na redução das componentes da força devido ao desgaste de cratera também foi observado no gráfico da Figura 32 (b) ( $v_c = 135$  m/min e  $f = 0,22$  mm/volta). Contudo, após 20 min de usinagem, iniciou-se uma tendência no aumento das componentes da força decorrente dos efeitos evolutivos do  $VB_c$  sobre o desgaste de cratera.

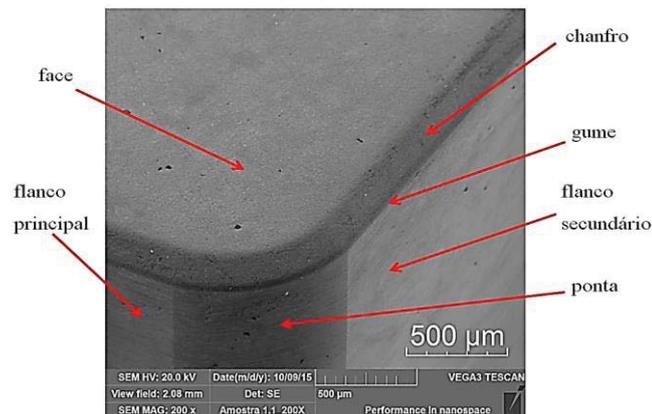
Observa-se no gráfico da Figura 32 (c) ( $v_c = 150$  m/min e  $f = 0,22$  mm/volta) uma redução nas componentes  $F_p$  e  $F_f$  até os 16 min de usinagem enquanto  $VB_c$  cresce. Isto aconteceu, possivelmente, devido à evolução do desgaste de cratera, uma vez que este desgaste altera a geometria do gume, promovendo um ângulo mais positivo e eliminando o chanfro da ferramenta, gerando uma diminuição dessas componentes. Após os 16 min de usinagem, ocorre o crescimento dessas componentes ( $F_p$  e  $F_f$ ) devido aos efeitos conjuntos do  $VB_c$  e do desgaste de cratera. Já para a  $F_c$ , nota-se uma evolução leve constante desta componente juntamente com o crescimento do  $VB_c$ . Isto ocorreu, provavelmente, devido ao aumento do coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça sem aumentar a profundidade da cratera. O aumento gradual de  $VB_c$  provoca uma maior área de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, elevando desta forma a força de corte ( $F_c$ ).

Resultados semelhantes a esses foram relatados nas pesquisas realizadas por Bouacha *et al.* (2010), Dogra *et al.* (2011) e Davoudinejad *et al.* (2014).

#### 4.6 Investigação das falhas e mecanismos de desgaste ocorridos na ferramenta

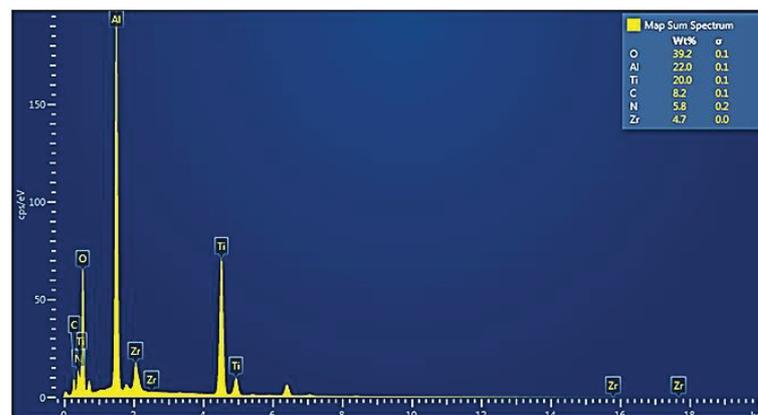
Com o propósito de investigar as falhas e mecanismos de desgastes, procurou-se aprofundar a análise dos desgastes das ferramentas mediante a utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e da sonda EDS para identificar a presença ou não, na face ou no flanco das ferramentas, de micro ou nanocamadas de materiais e respectivos elementos químicos que possam contribuir para explicar tais falhas. As análises foram realizadas nas ferramentas no fim de vida (50 min de usinagem) abrangendo todas as condições de corte utilizadas nos ensaios. A Figura 33 ilustra a pastilha cerâmica tipo “S” antes dos ensaios (zero minuto de usinagem) destacando os principais pontos analisados no MEV. A espectrometria (EDS) da composição química da ferramenta nesta condição identificou a presença dos seguintes elementos químicos: O, Al, Ti, C, N e Zr (Figura 34).

Figura 33 - Detalhes da pastilha de cerâmica antes dos ensaios (zero minuto de usinagem).



Fonte: O Autor.

Figura 34 - Espectro (EDS) da composição química sobre a face da ferramenta antes dos ensaios.

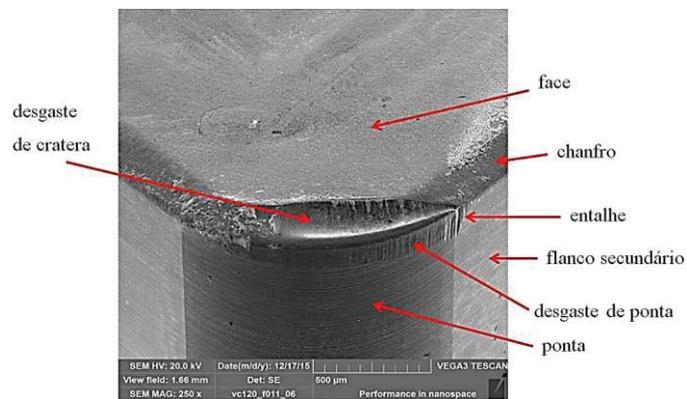


Fonte: O Autor.

As análises (MEV e EDS) realizadas na ferramenta antes dos ensaios foram repetidas em todas as pastilhas na condição de fim de vida (50 min de usinagem). Porém, nesta seção, será abordada somente a condição de corte com  $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta, uma vez que as falhas e mecanismos de desgastes detectados após as análises foram similares para todas as condições de corte. As imagens obtidas no MEV e espectrometria realizada nas demais condições de corte estão ilustradas no Apêndice deste trabalho.

Para ilustrar, a Figura 35 destaca as falhas comuns que ocorreram em todas as condições de corte após o tempo de 50 min de usinagem.

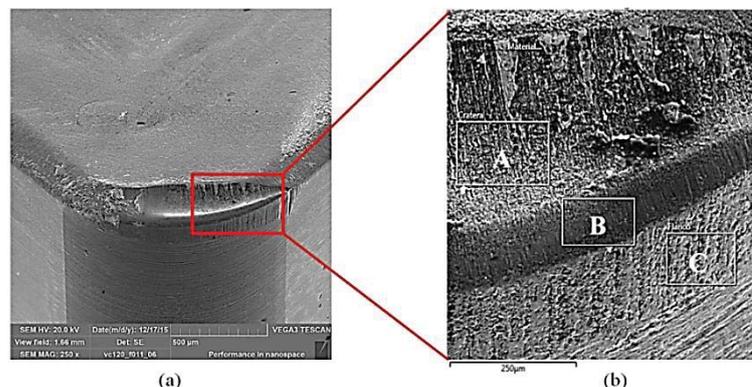
Figura 35 - Detalhes da ferramenta cerâmica apontando as falhas comuns que ocorreram ao final dos ensaios (50 minutos de usinagem).



Fonte: O Autor.

O local observado via EDS na condição com  $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta está demarcado na Figura 36 (a). Assim, as regiões analisadas do desgaste de cratera [A], gume [B] e flanco (ponta) [C] estão representados na imagem da Figura 36 (b).

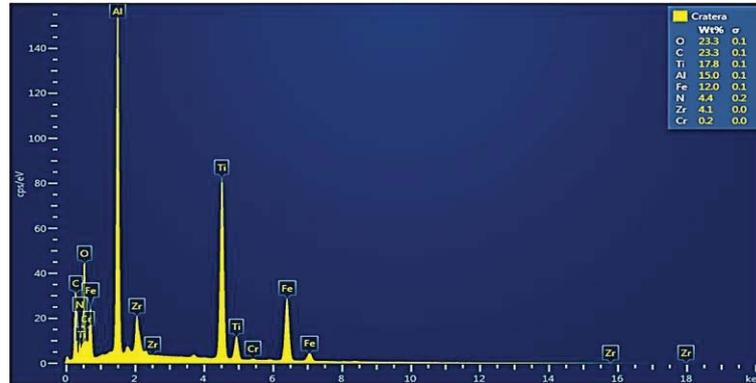
Figura 36 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição de corte de  $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta (a) e, região analisada via EDS: [A] cratera, [B] gume e [C] flanco (ponta) (b).



Fonte: O Autor.

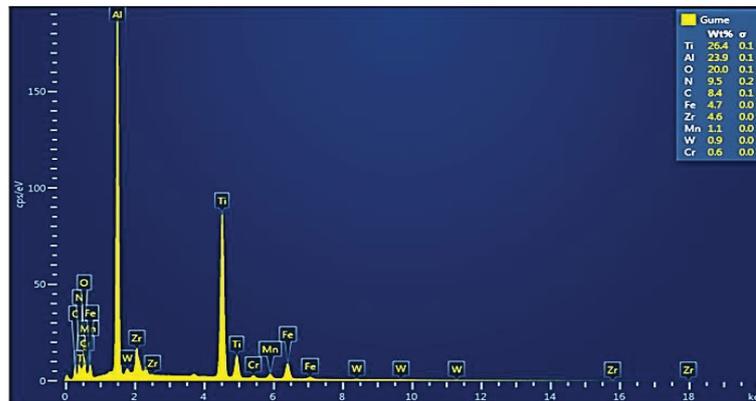
Os resultados das espectrometrias realizadas na cratera [A], no gume [B] e no flanco (ponta) [C] podem ser visualizados, respectivamente, na Figura 37, Figura 38 e Figura 39.

Figura 37 - Composição química da cratera realizada na região [A] da Figura 36 (b).



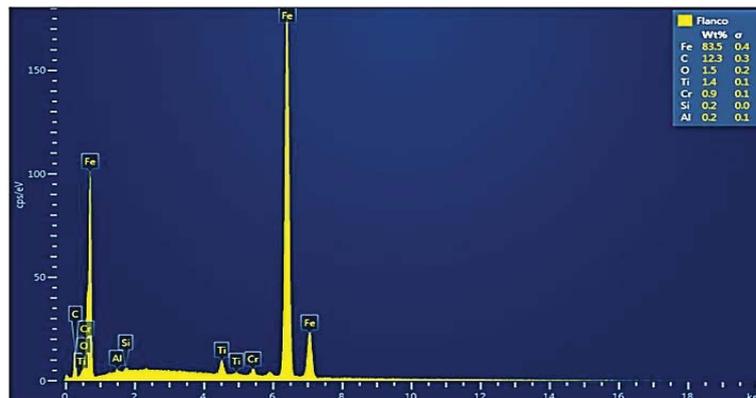
Fonte: O Autor.

Figura 38 - Composição química do gume realizada na região [B] da Figura 36 (b).



Fonte: O Autor.

Figura 39 - Composição química do flanco (ponta) realizada na região [C] da Figura 36 (b).



Fonte: O Autor.

As análises realizadas no MEV mostraram que as formas dominantes de falhas foram o desgaste de cratera, o desgaste de ponta e o entalhe. Não ocorreram avarias nas ferramentas durante os ensaios realizados. Quanto aos mecanismos de desgaste, pode-se dizer que, o mecanismo de desgaste por *attrition* (aderência e arrastamento de material aderido juntamente com partículas da ferramenta) esteve presente em todas as observações, tanto na ponta quanto no gume e na face da ferramenta.

A presença de marcas verticais paralelas à direção do corte devido ao atrito entre a peça e ponta da ferramenta, provocados pelos elementos duros (carbonetos, nitretos ou óxidos) presentes no material usinado e, pela remoção de fragmentos duros da própria ferramenta, evidenciaram o desgaste de ponta por abrasão mecânica.

Os resultados obtidos por meio da espectrometria (EDS) indicaram a presença de elementos químicos do material usinado (Fe, Cr, Mn, W e Si) sobre o flanco, sobre o gume e no interior da cratera. Isto ocorreu devido ao fato da ação conjunta dos mecanismos de desgaste de difusão, de abrasão e de *attrition* (aderência e arrastamento).

A cratera identificada nas ferramentas aconteceu, principalmente, devido ao mecanismo de desgaste de difusão, uma vez que, a presença de carbono (C) no carboneto de titânio (TiC) da matriz da pastilha de cerâmica provocou afinidade química entre os elementos presentes na matriz da peça usinada.

Resultados semelhantes foram citados nas pesquisas realizadas por Aslantas *et al.* (2012), Shalaby *et al.* (2014), Zhuang *et al.* (2015), Kurt *et al.* (2015), Abbas (2016), Wang *et al.* (2015), Singh *et al.* (2010), Das *et al.* (2015a) e Davoudinejad *et al.* (2014).

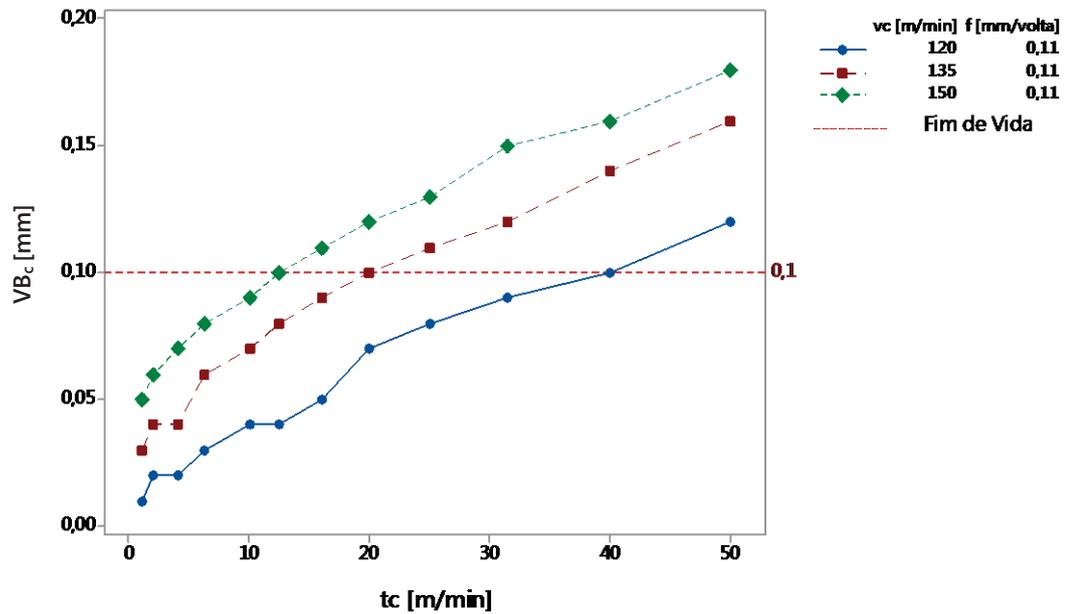
#### **4.7 Curva de vida da ferramenta**

Para propiciar a otimização do torneamento de acabamento a seco do aço AISI 4140 endurecido a  $(55 \pm 1)$  HRC, com ferramenta cerâmica mista, classe ISO CNGA 120408 S 01525 6050, foi realizado o planejamento dessa operação objetivando a elaboração da equação e curva de vida da ferramenta.

Os gráficos da Figura 40 e Figura 41 ilustram o desgaste de ponta em função do tempo de corte para diferentes velocidades de corte, considerando, respectivamente, os avanços  $f = 0,11$  mm/volta e  $f = 0,22$  mm/volta.

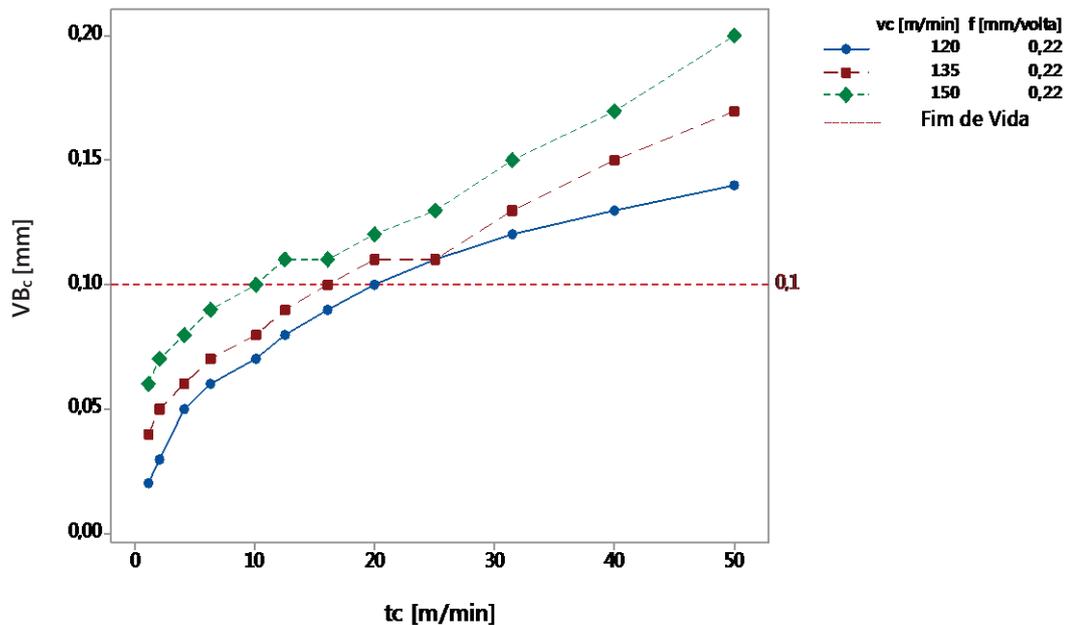
O desgaste de ponta  $VB_c \geq 0,1$  mm foi definido como o critério de fim de vida conforme apresentado na Seção 3.2.1. A Tabela 3 apresenta os resultados de vida da ferramenta para as diferentes condições de usinagem, no critério  $VB_c = 0,1$  mm.

Figura 40 - Desgaste de ponta em função do tempo de corte para a condição de avanço de  $f = 0,11$  mm/volta.



Fonte: O Autor.

Figura 41 - Desgaste de ponta em função do tempo de corte para a condição de avanço de  $f = 0,22$  mm/volta.



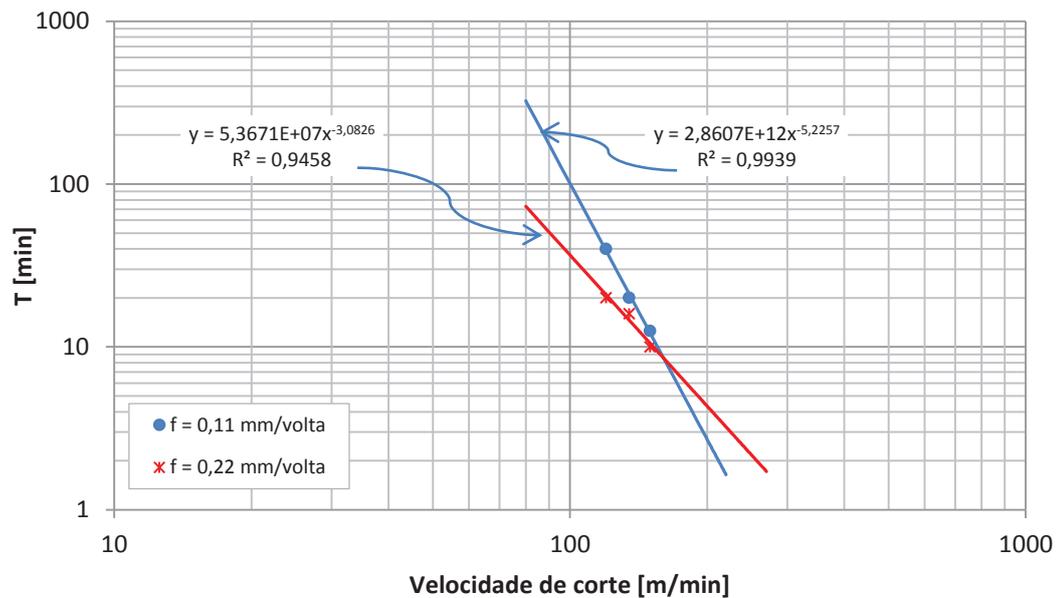
Fonte: O Autor.

Tabela 3 - Vida da ferramenta cerâmica para o “VB<sub>c</sub>” de 0,1mm.

$f$ [mm/volta]	$v_c$ [m/min]	$T$ [min]
0,11	120	40
0,11	135	20
0,11	150	12,5
0,22	120	20
0,22	135	16
0,22	150	10

Fonte: O Autor.

O gráfico da curva de vida da ferramenta está representado em escala logarítmica, e pode ser visualizado na Figura 42 para  $f = 0,11$  mm/volta e para  $f = 0,22$  mm/volta.

Figura 42 - Gráfico da curva de vida da ferramenta cerâmica em escala logarítmica,  $f = 0,11$  mm/volta.

Fonte: O Autor.

Observa-se no gráfico da curva de vida da ferramenta (Figura 42) que, na condição de menor avanço ( $f = 0,11$  mm/volta) o tempo de vida da ferramenta ( $T$ ) é mais sensível ao aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ) e as retas se cruzam no tempo de vida  $T = 8,5$  min na velocidade de corte  $v_c = 160$  m/min.

De acordo com o gráfico da curva de vida da ferramenta (Figura 42), obtêm-se os valores das constantes da equação de Taylor (Equação 1). O resultado da equação de vida da ferramenta é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Definição da equação de vida da ferramenta para os diferentes avanços.

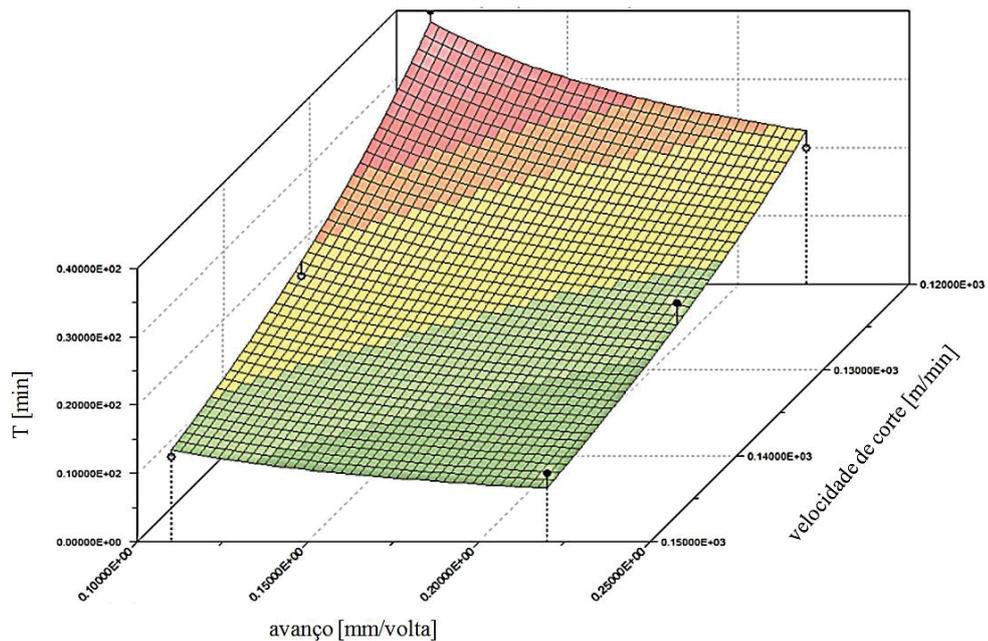
Avanço [mm/volta]	$v c_1$ [m/min]	$T_1$ [min]	$v c_2$ [m/min]	$T_2$ [min]	Constante x	Constante K	Equação de vida da ferramenta
0,11	120	40	150	12,5	5,2257	2,8607E+12	$T = 2,8607E+12 * v c^{-5,2257}$
0,22	120	20	150	10	3,0826	5,3671E+07	$T = 5,3671E+07 * v c^{-3,0826}$

Fonte: O Autor.

As equações de vida da ferramenta cerâmica CNGA 120408 S 01525 6050 podem ser utilizadas para a otimização do processo. Porém, a aplicação está condicionada à observação rigorosa da faixa dos parâmetros utilizados neste experimento.

Os efeitos combinados da velocidade de corte ( $v_c$ ) e do avanço ( $f$ ) sobre o tempo de vida da ferramenta ( $T$ ) estão representados na Figura 43.

Figura 43 - Gráfico de superfície dos efeitos combinados da  $v_c$  e  $f$  sobre o tempo de vida da ferramenta ( $T$ ).



Fonte: O Autor.

A Equação 3, com um coeficiente de determinação igual a  $R^2 = 0,953$ , rege a superfície do gráfico apresentado na Figura 43 (Fonte: LABFIT).

$$T = \frac{4,1435 \cdot 10^{10}}{f^{0,7729} \cdot v c^{4,7006}} \quad [3]$$

Observa-se a significativa superioridade da influência da velocidade de corte ( $v_c$ ) sobre o tempo de vida da ferramenta ( $T$ ) (expoentes da equação 3). Percebe-se que o efeito da velocidade de corte ( $v_c$ ) sobre o tempo de vida da ferramenta ( $T$ ) mostra-se mais influente no menor avanço e o efeito do avanço ( $f$ ) sobre o tempo de vida da ferramenta ( $T$ ) é mais pronunciado em menores velocidades de corte ( $v_c$ ).

## 5 CONCLUSÕES

A Usinagem do aço endurecido ABNT 4140 com pastilhas de cerâmica, com gume chanfrado e arredondado (tipo “S”) e, com base nos resultados experimentais e análises apresentadas no Capítulo 4, as principais conclusões foram as seguintes:

### 5.1 Sobre os efeitos dos parâmetros de corte ( $v_c$ e $f$ ) nas falhas da ferramenta

A velocidade de corte ( $v_c$ ) e o avanço ( $f$ ) exercem influência significativa no tempo de vida da ferramenta ( $T$ ), sendo que o aumento de cada um deles contribuiu para a redução do tempo  $T$ . O desgaste de ponta ( $VB_c$ ) observado nos ensaios foi diretamente influenciado por  $v_c$  devido à rápida fricção entre a ferramenta e a superfície usinada.

Na condição de menor avanço considerado ( $f = 0,11$  mm/volta) a vida da ferramenta é mais sensível ao aumento de  $v_c$ .

### 5.2 Sobre a influência dos parâmetros de corte na força de usinagem

Os maiores valores das componentes da força usinagem ( $F_p$ ,  $F_c$  e  $F_f$ ) foram registrados com o maior avanço considerado ( $f = 0,22$  mm/volta).

O aumento da velocidade de corte de 120 para 135 m/min resultou em uma redução das componentes da força de usinagem tanto no início quanto no fim de vida da ferramenta para ambos os avanços.

Ocorreu um aumento das componentes da força na transição de  $v_c$  de 135 para 150 m/min, tanto no início quanto no fim de vida da ferramenta para ambos os avanços.

### 5.3 Sobre os efeitos da velocidade de corte e do avanço na superfície usinada

O avanço ( $f$ ) é o parâmetro mais significativo sobre a rugosidade da superfície usinada. Na condição de início de vida da ferramenta, para ambos  $f$ , o aumento de  $v_c$  gerou maiores valores de rugosidade média ( $R_a$ ). Na condição de fim de vida da ferramenta, para ambos os avanços, o aumento de  $v_c$  provocou menores valores de  $R_a$ , com exceção para a transição de  $v_c$  de 120 para 135 m/min e  $f = 0,22$  mm/volta, quando ocorreu um aumento de  $R_a$ .

#### 5.4 Sobre as interações das falhas da ferramenta com a rugosidade

Na condição de corte com  $f = 0,11$  mm/volta, ocorreu interação direta entre o desgaste de ponta ( $VB_c$ ) e o desvio médio de rugosidade ( $R_a$ ) até o tempo de corte de 12,5 min. Contudo, a partir deste tempo, houve interação indireta entre os mesmos.

Para a condição de corte com  $f = 0,22$  mm/volta, houve interação direta entre  $VB_c$  e  $R_a$  até o tempo de corte de 31,5 min. Porém, após este tempo, a interação passou a ser indireta.

O desgaste de cratera interferiu sobre a rugosidade, uma vez que a evolução da cratera promoveu a redução dos valores de  $R_a$  em todas as condições de corte.

#### 5.5 Sobre as interações das falhas da ferramenta com a força de usinagem

Em todas as condições de corte, porém em tempos de corte distintos, ocorreu a conjunção de efeitos da evolução do desgaste de ponta ( $VB_c$ ) e o aumento do desgaste de cratera sobre as componentes da força de usinagem ( $F_f$ ,  $F_c$  e  $F_p$ ). A evolução do desgaste de cratera provocou a redução das componentes da força de usinagem, principalmente quando usinado na condição com  $f = 0,22$  mm/volta. Em contrapartida,  $VB_c$  promoveu o aumento das componentes da força de usinagem.

#### 5.6 Sobre as falhas e mecanismos de desgaste nas ferramentas

Não ocorreram avarias nas ferramentas durante os ensaios. Os desgastes predominantes nas ferramentas de cerâmica foram os desgastes de cratera, de flanco e de entalhe. Os mecanismos de desgaste presentes foram a abrasão, o *attrition* (aderência e arrastamento de material aderido juntamente com partículas da ferramenta) e a difusão.

A abrasão mecânica foi o principal mecanismo atuante no desgaste de ponta  $VB_c$ .

A afinidade química entre o carbono (C) presente no carboneto de titânio (TiC) na matriz da pastilha de cerâmica (adição de 30% de TiC na matriz) e, juntamente com as elevadas temperaturas do processo, ativaram o mecanismo de desgaste por difusão, contribuindo para o surgimento do desgaste de cratera.

## 5.7 Sobre a curva de vida da ferramenta

A otimização deste processo foi definida por meio dos gráficos da curva de vida e das equações de vida da ferramenta cerâmica (CNGA 120408 S 01525 6050). Porém, a aplicação está condicionada a uma observação mais rigorosa da faixa de valores dos parâmetros utilizados neste experimento.

A vida da ferramenta com base na equação simples de Taylor mostrou-se mais sensível ao aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ) com a condição de avanço em  $f = 0,11$  mm/volta do que com  $f = 0,22$  mm/volta.

Considerando os efeitos combinados da velocidade de corte ( $v_c$ ) e do avanço ( $f$ ), o maior tempo de vida da ferramenta ( $T$ ) ocorre na condição de menores valores de ambos, com efeito predominante da  $v_c$  sobre  $f$ . Quanto à sensibilidade dos efeitos conjuntos, constata-se a maior influência do  $f$  em baixas  $v_c$  e a maior influência da  $v_c$  em baixos  $f$ .

## 5.8 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar experimentos similares ao deste trabalho, utilizando ferramentas cerâmicas com geometrias de gume (tipo T ou E) e ferramentas de PCBN.
- Aplicar os resultados do trabalho proposto acima, para fins de predição e de otimização do processo de usinagem, fazendo o uso de ferramentas (técnicas) estatísticas e/ou inteligência computacionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, A. T. M. Comparative Assessment of Wiper and Conventional Carbide Inserts on Surface Roughness in the Turning of High Strength Steel. **Journal of Materials Science Research**, v. 5, n. 1, p. 32, 2016.

ABNT NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

AGRAWAL, A. et al. Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC). **Applied Soft Computing**, v. 30, p. 279-286, 2015.

ÅNMARK, N. et al. The effect of inclusion composition on tool wear in hard part turning using PCBN cutting tools. **Wear**, v. 334, p. 13-22, 2015.

AOUICI, H. et al. Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization. **Measurement**, v. 45, n. 3, p. 344-353, 2012.

AOUICI, H. et al. Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 9-12, p. 1775-1788, 2014.

ASLANTAS, K.; UCUN, I.; ÇICEK, A. Tool life and wear mechanism of coated and uncoated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN mixed ceramic tools in turning hardened alloy steel. **Wear**, v. 274, p. 442-451, 2012.

AZIZI, M. W. et al. 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, n. 12, p. 4105-4114, 2012.

BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S. K. State of the art in hard turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 53, n. 1, p. 1-14, 2012.

BENSOUILAH, H. et al. Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. **Measurement**, 2016. 1-18.

BOUACHA, K. et al. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 28, n. 3, p. 349-361, 2010.

CAMPOS, P. H. D. S. **Otimização robusta multivariada do processo de torneamento do aço endurecido ABNT 52100 com ferramenta cerâmica alisador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal De Itajubá. Itajubá, p. 93. 2011.

CHAVOSHI, S. Z.; TAJDARI, M. Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool. **International journal of material forming**, v. 3, n. 4, p. 233-239, 2010.

CHENG, Y. et al. Experimental study on the cutting performance of microwave sintered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC ceramic tool in the machining of hardened steel. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 55, p. 39-46, 2016.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Machining of hardened steel - Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 89, p. 95-109, 2015.

ÇIÇEK, A. et al. Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 41, p. 461-469, 2013.

DAS, S. R.; DHUPAL, D.; KUMAR, A. Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool. **Measurement**, v. 62, p. 108-126, 2015a.

DAS, S. R.; DHUPAL, D.; KUMAR, A. Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 29, n. 10, p. 4329-4340, 2015b.

DAVIM, J. P. **Machining - Fundamentals and Recent Advances**. Londres: Springer, 2008. 361 p. ISBN 978-1-84800-212-8.

DAVIM, J. P. **Machining of Hard Materials**. Londres: Springer, 2011. 211 p. ISBN 978-1-84996-449-4.

DAVOUDINEJAD, A.; NOORDIN, M. Y. Effect of cutting edge preparation on tool performance in hard-turning of DF-3 tool steel with ceramic tools. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 28, n. 11, p. 4727-4736, 2014.

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

DOGRA, M.; SHARMA, V. S.; DUREJA, J. Effect of tool geometry variation on finish turning—A Review. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 4, n. 1, p. 1-13, 2011.

DUMPALA, R.; CHANDRAN, M.; RAO, M. S. R. Engineered CVD Diamond Coatings for Machining and Tribological Applications. **JOM**, Vol. 67, No. 7, p. 1-13, 2015.

EL HAKIM, M. A. et al. Wear behavior of some cutting tool materials in hard turning of HSS. **Tribology International**, v. 44, n. 10, p. 1174-1181, 2011.

ELBAH, M. et al. Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel. **Measurement**, v. 46, n. 9, p. 3041-3056, 2013.

EZILARASAN, C.; KUMAR, V. S. S.; VELAYUDHAM, A. Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in Machining Nimonic C-263 Super Alloy Using Whisker-Reinforced Ceramic Insert. **Journal of materials engineering and performance**, v. 22, n. 6, p. 1619-1628, 2013.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 14<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2011. 751 p.

GAITONDE, V. N. et al. Performance comparison of conventional and wiper ceramic inserts in hard turning through artificial neural network modeling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 52, n. 1-4, p. 101-114, 2011.

GODOY, V. A. A. D.; DINIZ, A. E. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 6, p. 1014-1025, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685: tool life testing with single-point turning tools**. 2ed. Genève, p. 48. 1993.

JESUS, R. E. C. D. **Esforços, temperatura e integridade superficial em torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parâmetros de corte**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São João Del-Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. São João Del-Rei, MG, p. 84. 2013.

KAÇAL, A. Investigation of Cutting Performance of the Ceramic Inserts in Terms of the Surface Roughness and Tool Wear at Turning of PMD 23 Steel. **Applied Mechanics & Materials**, n. 686, 2014.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1 - Cutting**. RWTH. ed. Berlin: Springer, 2011. 504 p.

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**, p. 1-11, 2015.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 397 p.

MAKADIA, A. J.; NANAVATI, J. I. Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. **Measurement**, v. 46, n. 4, p. 1521-1529, 2013.

MEDDOUR, I. et al. 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, n. 5-8, p. 1387-1399, 2015.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NESLUŠAN, M. et al. Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates. **Measurement**, v. 70, p. 1-13, 2015.

ÖZEL, T.; KARPAT, Y.; SRIVASTAVA, A. Hard turning with variable micro-geometry PcBN tools. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 73-76, 2008.

PAL, A.; CHOUDHURY, S. K.; SATISHCHINCHANIKAR. Machinability Assessment through Experimental Investigation during Hard and Soft Turning of Hardened Steel. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 80-91, 2014.

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.

ROSA, G. C. D.; SOUZA, A. J. D. Estudo comparativo das ferramentas alisadora e convencional através das forças e rugosidades resultantes do processo de torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420C. **ABCM - CONEM 2014**, VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - Uberlândia-MG-Brasil, p.10, 10 a15 Agosto 2014.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Measurement**, v. 45, n. 8, p. 2153-2165, 2012.

SAINI, S.; AHUJA, I. S.; SHARMA, V. S. Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in hard turning of AISI H11 tool steel using ceramic tools. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 13, n. 8, p. 1295-1302, 2012.

SAMARDŽIOVÁ, M.; NESLUŠAN, M. Development of Surface Roughness in Hard Turning of 100Cr6 Using Mixed Ceramic Cutting Tool with Wiper Geometry and Conventional Geometry. **Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology**, v. 21, n. Special Issue, p. 193-198, 2013.

SHALABY, M. A. et al. Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of high carbon–chromium tool steel. **Tribology International**, v. 70, p. 148-154, 2014. 148-154.

SINGH, D.; RAO, P. V. Flank wear prediction of ceramic tools in hard turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 50, n. 5-8, p. 479-493, 2010.

SOUZA, A. J. D. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Santa Catarina, SC, p. 211. 2004.

SOUZA, A. J. D. **Processos de Fabricação por Usinagem - Parte 1**. [Apostila] - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Mecânica. Porto Alegre, RS, p. 89. 2011.

SOUZA, D. J. A. D. **Influência da microgeometria do gume e da classe dePCBN no corte ortogonal de aço rápido fabricado por metalurgia do pó**. Tese (doutorado) - Universidade

Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, SC, p. 146. 2013.

SOUZA, D. J. A. D. et al. Estudo da Influência da Geometria do Gume no Desgaste em Ferramentas de PcBN no Torneamento em Plunging. **ABCM - 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, Caxias do Sul - RS- Brasil, 11 a 15 de Abril. p.10, 2011.

SOUZA, D. J. A. D. et al. Influence of the cutting edge micro-geometry of PCBN tools on the flank wear in orthogonal quenched and tempered turning M2 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 36, n. 4, p. 763-774, 2014.

SRITHAR, A.; PALANIKUMAR, K.; DURGAPRASAD, B. Experimental Investigation and Surface roughness Analysis on Hard turning of AISI D2 Steel using Coated Carbide Insert. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 72-77, 2014.

WANG, D.; ZHAO, J. Design optimization of mechanical properties of ceramic tool material during turning of ultra-high-strength steel 300M with AHP and CRITIC method. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-10, 2015.

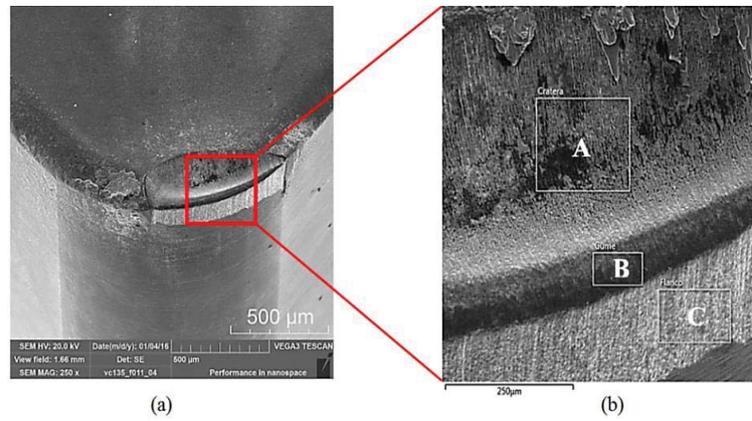
WYEN, C.-F.; KNAPP, W. A new method for the characterisation of rounded cutting edges. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, n. 9-12, p. 899-914, 2012.

ZHU, D.; ZHANG, X.; DING, H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 64, p. 60-77, 2013.

ZHUANG, K. et al. Employing preheating-and cooling-assisted technologies in machining of Inconel 718 with ceramic cutting tools: towards reducing tool wear and improving surface integrity. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 80, n. 9-12, p. 1815-1822, 2015.

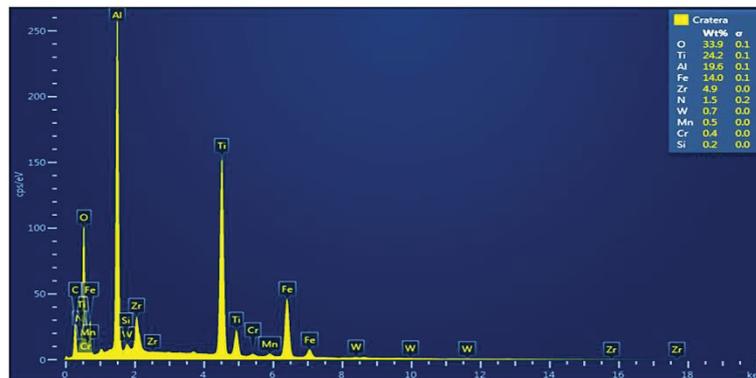
## APÊNDICE

Figura 44 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição  $v_c = 135$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta.



Fonte: O Autor.

Figura 45 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” Figura 44 (b).



Fonte: O Autor.

Figura 46 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 44 (b).



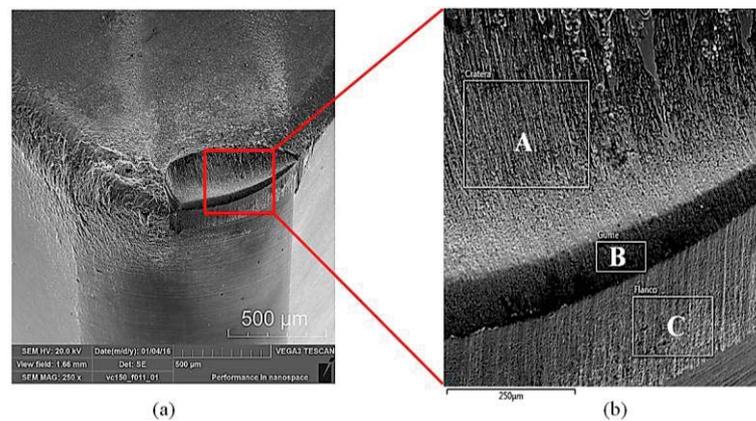
Fonte: O Autor.

Figura 47 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 44 (b).



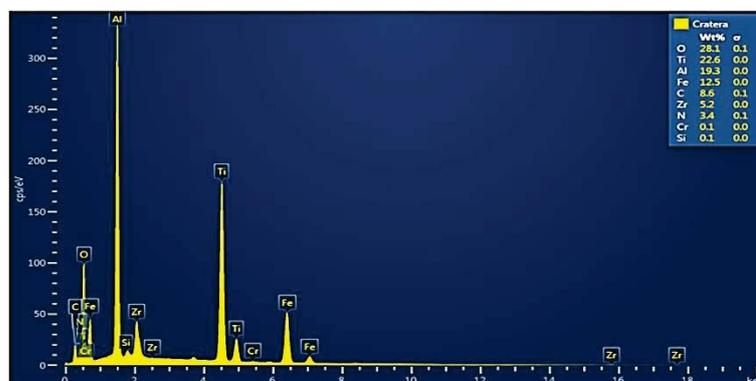
Fonte: O Autor.

Figura 48 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição  $v_c = 150$  m/min e  $f = 0,11$  mm/volta.



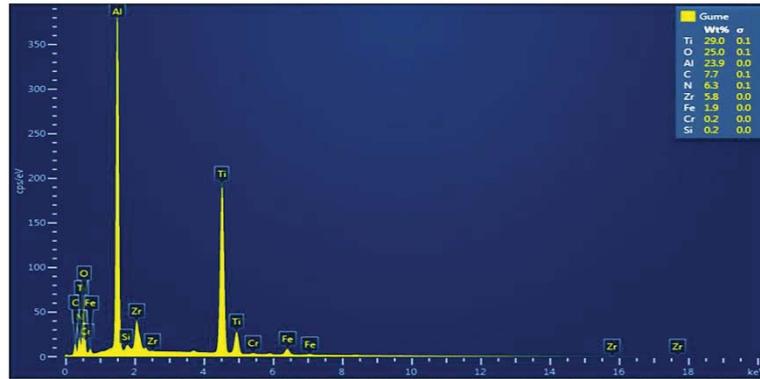
Fonte: O Autor.

Figura 49 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 48 (b).



Fonte: O Autor.

Figura 50 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 48 (b).



Fonte: O Autor.

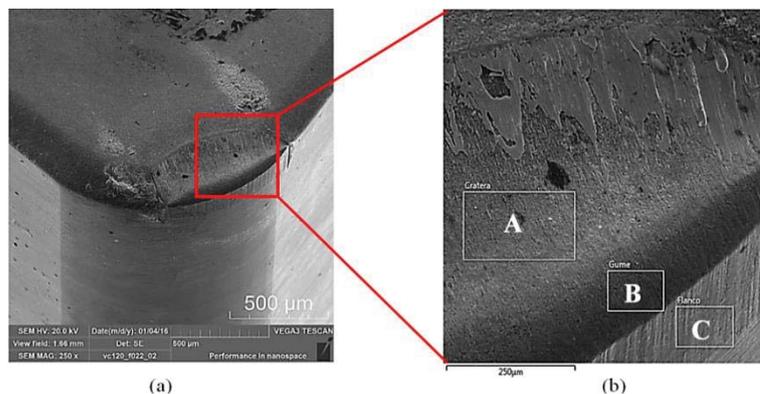
Figura 51 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 48 (b).



Fonte: O Autor.

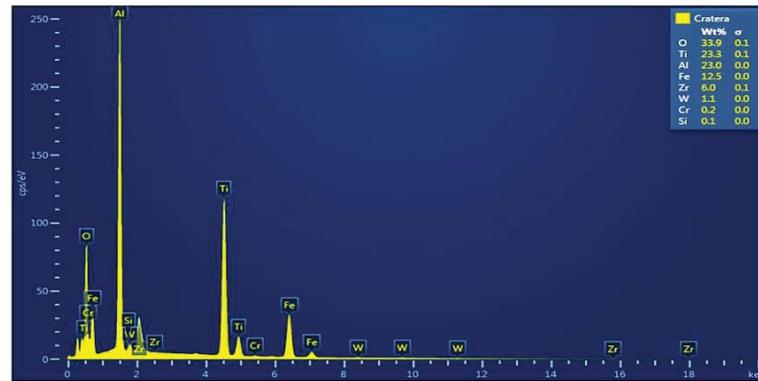
Os fenômenos observados nas avaliações após a usinagem com  $f=0,11$  mm/volta predominaram nas ferramentas após a usinagem com  $f=0,22$  mm/volta, e estão ilustrados nas imagens que se seguem.

Figura 52 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição  $v_c = 120$  m/min e  $f = 0,22$  mm/volta.



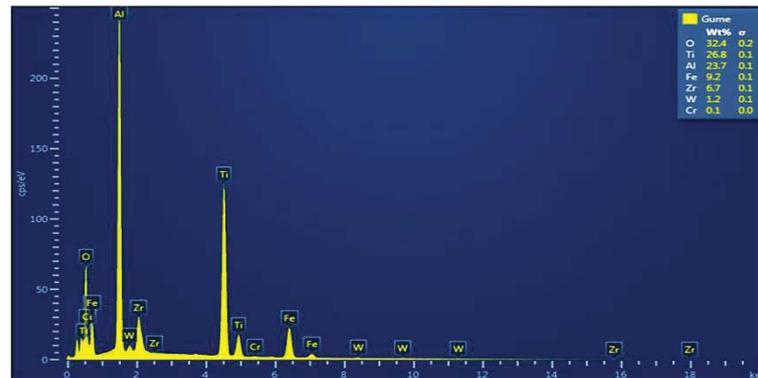
Fonte: O Autor.

Figura 53 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 52 (b).



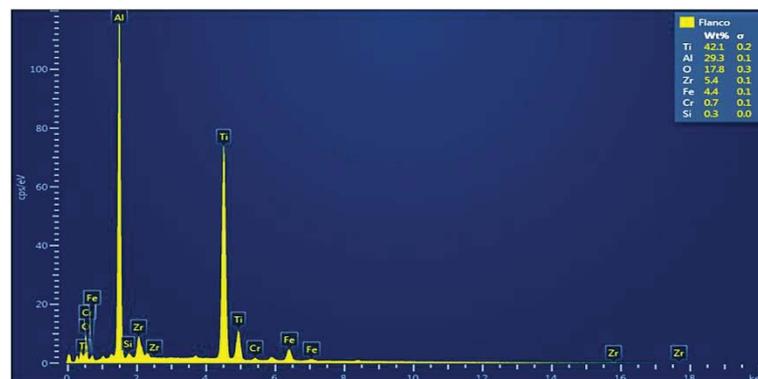
Fonte: O Autor.

Figura 54 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 52 (b).



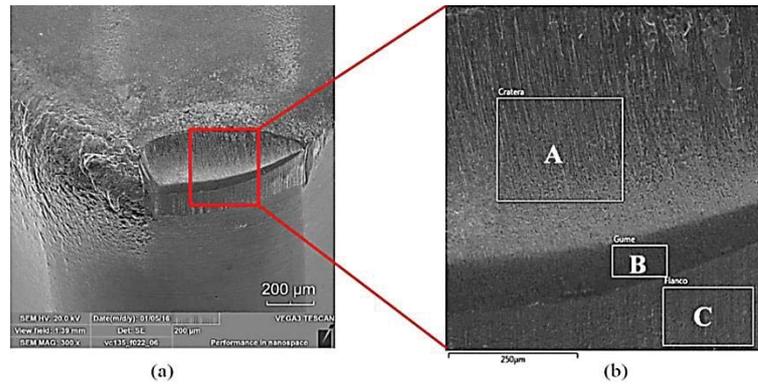
Fonte: O Autor.

Figura 55 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 52 (b).



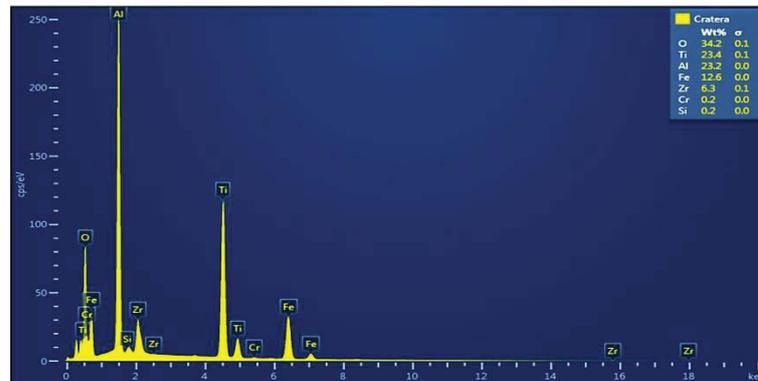
Fonte: O Autor.

Figura 56 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição  $v_c = 135$  m/min e  $f = 0,22$  mm/volta.



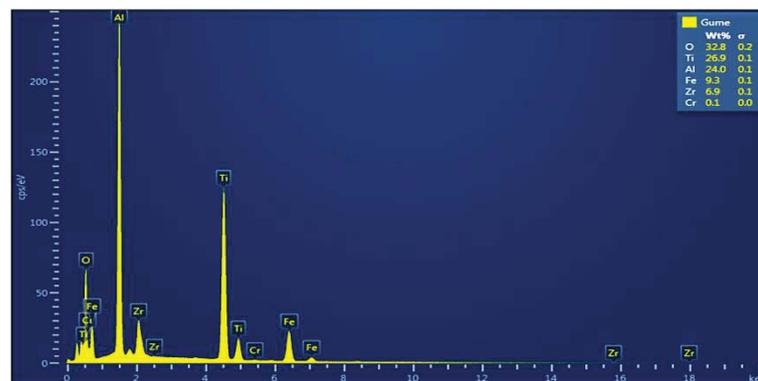
Fonte: O Autor.

Figura 57 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 56 (b).



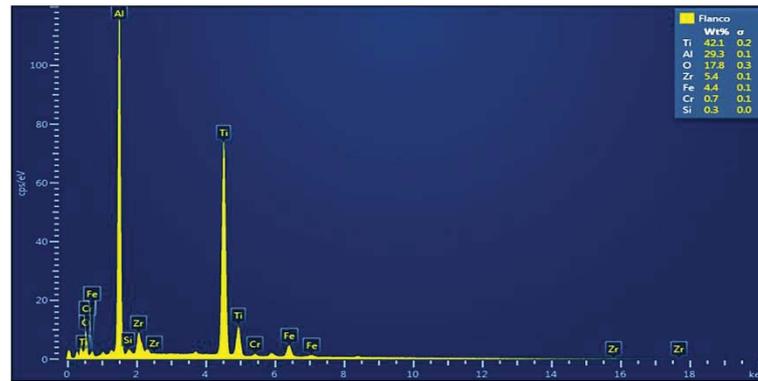
Fonte: O Autor.

Figura 58 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 56 (b).



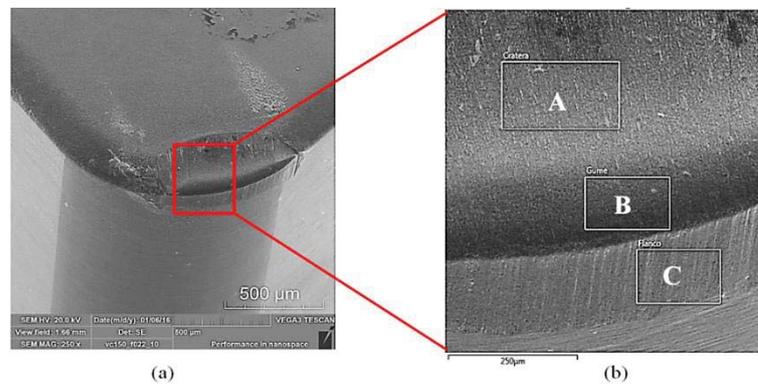
Fonte: O Autor.

Figura 59 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 56 (b).



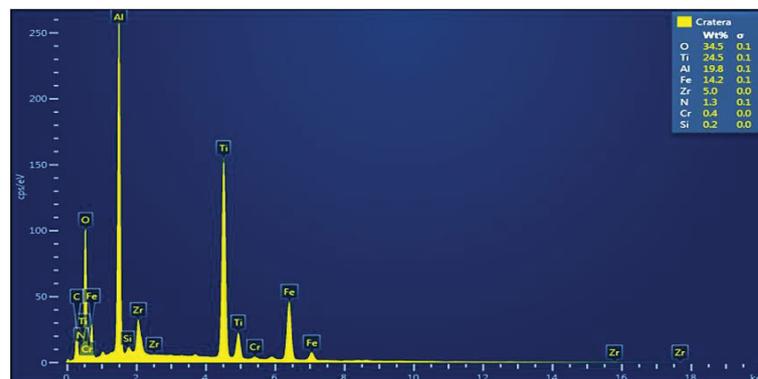
Fonte: O Autor.

Figura 60 - Falhas ocorridas na pastilha de cerâmica na condição  $v_c = 150$  m/min e  $f = 0,22$  mm/volta.



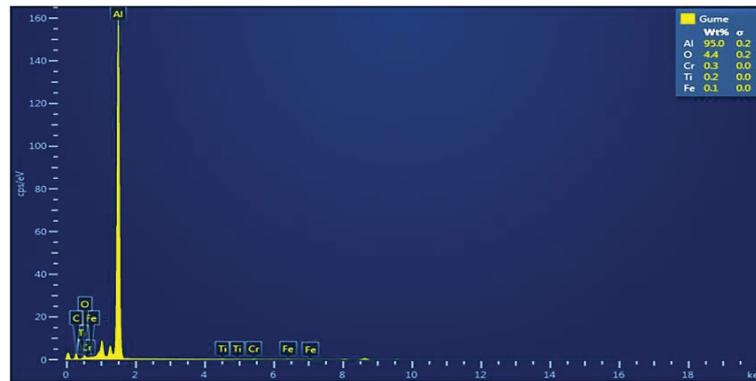
Fonte: O Autor.

Figura 61 - Composição química da cratera da área demarcada na região “A” da Figura 60 (b).



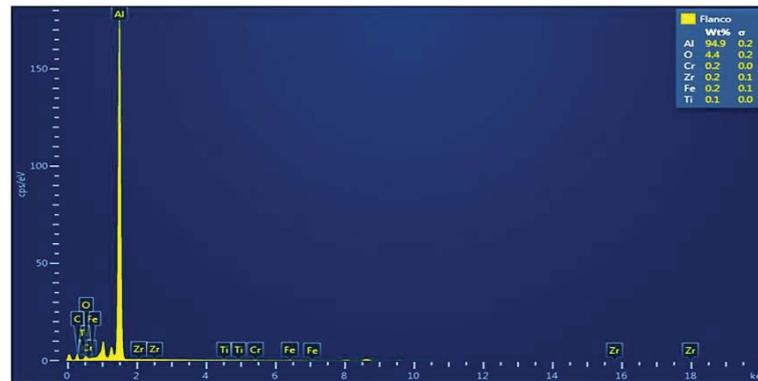
Fonte: O Autor.

Figura 62 - Composição química do gume da área demarcada na região “B” da Figura 60 (b).



Fonte: O Autor.

Figura 63 - Composição química do flanco da área demarcada na região “C” da Figura 60 (b).



Fonte: O Autor.

## ANEXOS

## A.1 Certificado de qualidade dos resultados do processo de tratamento térmico

CERTIFICADO DA QUALIDADE				
<b>Têmpera•Tech</b> <small>Tratamento Térmico</small>		<b>Certificado de Qualidade</b>		<b>Nº 2600/15</b>
Cliente	UPF	Código do Cliente		
Nome da Peça	BARRA TREFILA	Código da Peça	14.885	
Quantidade	200 KG	Peso Kg		
Data de Entrada	31/08/2015	NF do Cliente	21186	
<b>Especificações do Cliente</b>				
Material	SAE 4140			
Tratamento	TEMPERAR REVENIR			
<b>Resultados do Processo</b>				
	Especificado	Encontrado		
Dureza	54 56 HRC	54 56 HRC		
Camada	*	*		
Dureza núcleo	*	*		
Acabamento	*	*		
Tamanho grao	*	*		
<b>Fotos da Metalografia</b>				
<b>Observações</b>				
				Data da Aprovação 01/09/2015
SQ 012				
Página 1				

## A.2 Documento de calibração do dinamômetro



measure. analyze. innovate.

## Kalibrierschein Calibration Certificate

Type **Kistler 9121**                      Serial No. **4615088**

<b>Kalibriert durch</b> Calibration Technician	<b>Datum</b> Date
S. Mogavero	07. Jan. 2014

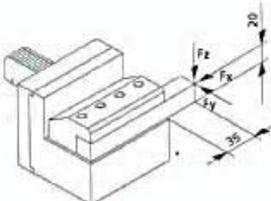
<b>Referenzgeräte</b> Reference Equipment	<b>Typ</b> Type	<b>Serien-Nr.</b> Serial No.
<b>Gebrauchsnorm</b> Working Standard	Kistler 96017629 Kistler 96017630 Kistler 96017633	4352333 4352310 4352327

<b>Ladungskalibrator</b> Charge Calibrator	Kistler 5395A	530623
---	---------------	--------

<b>Umgebungstemperatur</b> Ambient Temperature	<b>Relative Feuchte</b> Relative Humidity
24 °C	38 %



### Messergebnisse    Results of Measurement

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	Empfindlichkeit Sensitivity	Linearität Linearity	Übersprechen Cross talk	
kN	pC / N	≤ ± % FSO	%	%
$F_x$ 0 ... 3	-7,872	0,03	$F_x \rightarrow F_y$ 0,2	$F_x \rightarrow F_z$ 0,4
$F_x$ 0 ... 0,3	-7,868	0,06	$F_x \rightarrow F_y$ 0,2	$F_x \rightarrow F_z$ 0,6
$F_y$ 0 ... 3	-7,935	0,07	$F_y \rightarrow F_x$ 2,7	$F_y \rightarrow F_z$ -0,4
$F_y$ 0 ... 0,3	-7,940	0,07	$F_y \rightarrow F_x$ 2,4	$F_y \rightarrow F_z$ -0,1
$F_z$ 0 ... 6	-3,888	0,20	$F_z \rightarrow F_x$ -0,4	$F_z \rightarrow F_y$ 0,0
$F_z$ 0 ... 0,6	-3,855	0,10	$F_z \rightarrow F_x$ -0,3	$F_z \rightarrow F_y$ -0,1

**Messverfahren**                      **Kontinuierliche Kalibrierung, Vergleichsverfahren**  
Measurement Procedure:    Continuous Calibration, Comparison Method

Kistler betreibt die SCS Kalibrierstelle Nr. 049, akkreditiert nach ISO 17025. SCS Kalibrierzertifikate sind auf Bestellung erhältlich. \*  
Kistler operates the SCS Calibration Laboratory No. 049, which is accredited per ISO 17025. SCS Calibration Certificates are available on request;

### Bestätigung    Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein. Dieses Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Alle Messmittel sind auf nationale Normale rückverfolgbar. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Dieses Dokument ist ohne Unterschrift gültig.  
The equipment mentioned above and identified by Serial Number complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". All measuring devices are traceable to national standards. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document is valid without a signature.

<b>Kistler Instrumente AG</b> Eulachstrasse 22 PO Box CH-8408 Wintherthur	Tel. +41 52 224 11 11 Fax +41 52 224 14 14 Info@kistler.com	ZKB Winterthur BC 732 Swift: ZKBKCHZ80A Account: 1132-0374.628	IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8 VAT: 229 713 ISO 9001 certified
--	---	--	--

Seite page 1 / 1

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)