

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE O
FRESAMENTO FRONTAL DO AÇO ASTM 743 CA6NM
COM FERRAMENTA DE METAL-DURO

Mateus André Sponchiado

Passo Fundo

2019



Mateus André Sponchiado

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE O
FRESAMENTO FRONTAL DO AÇO ASTM 743 CA6NM COM
FERRAMENTA DE METAL-DURO**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Airton Consalter

Projeto de dissertação apresentado 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

2019

CIP – Catalogação na Publicação

S763i Sponchiado, Mateus André
Influência dos parâmetros de corte sobre o fresamento
frontal do aço ASTM 743 CA6NM com ferramenta de metal-
duro / Mateus André Sponchiado. -2019.
85 f. : il. Color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Airton Consalter.
Dissertação (Mestrado em Projetos e Processos de
Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2019.

1. Metais – Corte. 2. Fresamento (Trabalhos em metal).
3. Aço inoxidável. 4. Usinagem. I. Consalter, Luiz Airton,
coorientador. II. Título.

CDU: 621.9

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues – CRB 10/1569

Mateus André Sponchiado

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE SOBRE O
FRESAMENTO FRONTAL DO AÇO ASTM 743 CA6NM COM
FERRAMENTA DE METAL-DURO**

Projeto de dissertação apresentado 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:

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 William Haupt
Universidade de Passo Fundo- UPF

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Universidade de Passo Fundo- UPF

Passo Fundo

2019

Dedicatória

A Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe que me apoiou nos momentos difíceis e estendeu sua mão para que eu não caísse.

A meu pai que me ensinou a batalhar, honestamente, pelos meus sonhos.

A minhas irmãs que estiveram presentes nos momentos de fraqueza.

A minha esposa pela motivação dada, pela compreensão nos momentos em que estive ocupado e pelo amor oferecido, possibilitando a realização deste trabalho.

À minha Vó pelo carinho e orações que me confortaram.

Ao professor orientador Luiz Airton Consalter por corrigir, sempre que optei por caminhos errados.

Ao professor André João de Souza, pelos ensinamentos compartilhados.

Ao professor Thiago Martins, por guiar-me.

Aos colaboradores da UPF, em especial aos do Núcleo de Tecnologia Mecânica, pela disponibilidade.

A empresa HISA/ WEG, pelos materiais disponibilizados.

A Deus, pela proteção.

RESUMO

A pesquisa estuda a influência dos parâmetros de corte sobre o fresamento frontal do aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA6NM utilizando ferramenta de metal-duro com revestimento PVD. Foi avaliado o efeito da velocidade de corte (v_c) e do avanço por dente (f_z) sobre o desgaste da ferramenta de corte e também sobre a rugosidade da superfície usinada do componente. Para tal, foram delineados experimentos e analisados estatisticamente por meio de um planejamento fatorial. Os resultados indicaram que velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z) possuem influência significativa no desgaste da ferramenta de corte. Além disso, que o acréscimo nos valores de avanço por dente (f_z) aumentou os valores de rugosidade da superfície usinada. As análises realizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), auxiliado por um Sistema de Energia Dispersiva (EDS), possibilitou compreender que vários mecanismos de falha atuam simultaneamente com influência predominante de aderência e arrastamento (*attrition*).

Palavras-chave: Fresamento frontal. Aço inoxidável martensítico. ASTM 743 CA6NM. Ferramenta de metal-duro. Aderência e arrastamento.

ABSTRACT

This study shows the influence of the cutting parameters in the face milling of ASTM 743 CA6NM martensitic stainless steel with PVD coated carbide tool. It was analyzed the effect of cutting speed (v_c) and feed per tooth (f_z) on tool wear and also on the surface roughness. Thus, experiments were designed and they were statistically analyzed through a factorial design. The results indicate that cutting speed (v_c) and feed per tooth (f_z) have significant influence on the tool wear. Furthermore, the values of the surface roughness increased when the feed per tooth (f_z) was also increased. The analyses were done using the Scanning Electron Microscope (SEM), aided by the Energy Dispersive Spectrometry (EDS), and have shown us that several wear mechanisms act simultaneously with predominant influence of attrition.

Keywords: Face milling. Martensitic stainless steel. ASTM 743 CA6NM. Carbide tool. Attrition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Profundidade de corte (a_p) e largura de corte (a_e).....	22
Figura 2- Usinabilidade relativa de diversos aços inoxidáveis.....	24
Figura 3- Ângulo de posição 90° (a), 45° (b) e ângulo variável do inserto redondo (c).	25
Figura 4- Ângulo de posição em insertos redondos	26
Figura 5- Diferentes geometrias de quebra-cavaco	27
Figura 6- Dureza dos materiais das ferramentas <i>versus</i> temperatura.	27
Figura 7- Dureza e tenacidade nos materiais das ferramentas de corte.....	28
Figura 8- Movimento relativo entre peça e ferramenta.	30
Figura 9- Tipos de fresamento simétrico (a) (b) e a sua variação da direção das forças de corte (c).....	31
Figura 10- Variação da direção das forças de corte no fresamento assimétrico (a) e fresamento assimétrico comum com fresa de facear (b).	32
Figura 11- Posicionamento e contato da ferramenta com a peça no corte assimétrico, onde (a) para dentro, (b) alinhado e (c) para fora.	33
Figura 12- Diferentes contatos da ferramenta na saída do corte quando varia o seu posicionamento com a peça, onde (a) para fora, (b) alinhado e (c) para dentro.....	33
Figura 13- Representação do experimento realizado.	34
Figura 14- Diâmetro efetivo de corte nos insertos redondos.....	36
Figura 15- Desgastes nas ferramentas de corte.	39
Figura 16- Avarias nas ferramentas de corte.	40
Figura 17- Deformação plástica e aresta postiça nas ferramentas de corte.....	41
Figura 18- Medição do desgaste das ferramentas de corte.....	43
Figura 19- Desvio médio aritmético (R_a).	45
Figura 20- Cavaco comprimido contra a superfície usinada.	47
Figura 21- Fluxograma para execução do experimento.	48
Figura 22- Corpos de prova brutos de fundição.	49
Figura 23- Dimensão do corpo de prova (mm), após a usinagem de preparação.....	50
Figura 24- Macrografia do inserto e <i>cross section</i> da aresta cortante.	51
Figura 25- Espectrômetro e durômetro utilizados nos ensaios.....	52
Figura 26- Microscópio estéreo e eletrônico de varredura (MEV).	53
Figura 27- Pontos de medição da rugosidade.....	54
Figura 28- Configuração do experimento.....	55

Figura 29- Posicionamento relativo entre peça e ferramenta.	57
Figura 30- Micrografia (500x) dos corpos de prova dos ensaios realizados com $f_z = 0,4$ mm/dente. Sendo (a) e (b) a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I e II respectivamente. Enquanto que (c) e (d) representam a $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV e I respectivamente.	61
Figura 31- Micrografia (500x) dos corpos de prova dos ensaios realizados com $f_z = 0,7$ mm/dente. Sendo as figuras (e) e (f) $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II e IV respectivamente. Enquanto que (g) e (h) representam o $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I e III respectivamente.	62
Figura 32- Média e erro padrão do desgaste de flanco médio VB_B de cada ensaio e valores de P do teste T. Valores de $P \leq 0,05$ considera-se diferença significativa.	63
Figura 33- Valores de desgaste de flanco médio VB_B , coletados em cada ensaio em três diferentes tempos.	64
Figura 34- Valores médios de desgaste VB_B e erro padrão, obtidos no modelo estatístico em cada intervalo de tempo para todas as condições ensaiadas. Para letras diferentes, consideram-se valores de $P \leq 0,05$	65
Figura 35- Média e erro padrão da rugosidade R_a de cada ensaio e valores de P obtidos no teste T. Valores de $P \leq 0,05$ considera-se diferença significativa e $P \geq 0,1$, adota-se como diferença não significativa.	66
Figura 36- Média aritmética e o erro padrão da média dos valores de rugosidade R_a coletados em três diferentes tempos de cada ensaio.	67
Figura 37- Valores de rugosidade R_a em cada intervalo de tempo para $f_z = 0,4$ mm/dente e $0,7$ mm/dente. Adotou-se * para valores de $P \leq 0,05$ e + para valores de P entre $0,05$ e $0,1$	68
Figura 38- Interação entre R_a e VB_B , em função do tempo, na condição $f_z = 0,4$ mm/dente, para $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I (a) e II (b) e para $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV (c) e I (d).	69
Figura 39- Interação entre R_a e VB_B , em função do tempo, na condição $f_z = 0,7$ mm/dente, para $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II (e) e IV (f) e para $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I (g) e III (h).	70
Figura 40- Material da peça comprimido na sua própria superfície. Condição $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição IV. Tempo de usinagem $6,3$ min (a) e 25 min (b).	71
Figura 41- Detalhe do inserto, antes do ensaio.	72

Figura 42- Espectro (EDS) da composição química na face da ferramenta antes dos ensaios.	72
Figura 43- Detalhe da ferramenta de corte ao final dos ensaios realizados com $f_z = 0,4$ mm/dente, sendo (a) e (b) a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I e II respectivamente, enquanto (c) e (d) representam a $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV e I respectivamente.	73
Figura 44- Detalhe da ferramenta de corte ao final dos ensaios realizados com $f_z = 0,7$ mm/dente, sendo as figuras (e) e (f) $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II e IV respectivamente, enquanto (g) e (h) representam o $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I e III respectivamente.	74
Figura 45- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição IV.	75
Figura 46- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,7$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição IV.	75
Figura 47- Falhas de fundição, detectada no ensaio $f_z = 0,7$ mm/dente e $v_c = 260$ m/min, lote de fundição III.	76
Figura 48- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição I.	83
Figura 49- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição II.	83
Figura 50- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição I.	84
Figura 51- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,7$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição II.	84
Figura 52- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,7$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição I.	85

Figura 53- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,7$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição III. 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço ASTM 743 CA6NM (% em peso).	23
Tabela 2- Propriedades mecânicas do aço grau CA6NM.....	23
Tabela 3- Valores dos critérios de fim de vida recomendados pela norma ISO 8688-1.	44
Tabela 4- Principais parâmetros de rugosidade.	45
Tabela 5- Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação.....	46
Tabela 6- Cabeçote utilizado no experimento	50
Tabela 7- Inseto utilizado no experimento.....	51
Tabela 8- Parâmetros de corte e níveis do experimento.....	56
Tabela 9- Delineamento do experimento.....	58
Tabela 10- Análise química (% peso) e ensaio de dureza dos corpos de prova (CP).	60
Tabela 11- Resultado das comparações entre as repetições dos ensaios, considerando os dados de rugosidade.....	66

NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

a_e	Largura de corte [mm]
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
a_p	Profundidade de corte [mm]
APC	Aresta Postiça de Corte
$APM_{X_{EFW}}$	Largura máx. do cabeçote [mm]
$APM_{X_{FFW}}$	Profundidade de corte máx. do cabeçote [mm]
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AZ	Profundidade máx. de mergulho do cabeçote [mm]
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DC	Diâmetro interno de corte do cabeçote [mm]
D_{cap}	Diâmetro efetivo de corte [mm]
DCON	Diâmetro de conexão do cabeçote [mm]
DCX	Diâmetro do cabeçote [mm]
EDS	Sistema de Energia Dispersiva
f_z	Avanço por dente [mm/dente]
h_{ex}	Espessura do cavaco [mm]
h_m	Espessura de corte [mm]
iC	Diâmetro do inserto [mm]
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K_T	Profundidade da cratera [mm]
LF	Comprimento funcional do cabeçote [mm]
l_n	Comprimento de avaliação [mm]
l_n	Comprimento de avaliação [mm]
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NbC	Carboneto de nióbio
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
R_a	Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade [μm]
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil de rugosidade

R_q	Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade [μm]
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil de rugosidade
RS_m	Valor médio da largura dos elementos do perfil [mm]
R_t	Altura total do perfil de rugosidade [μm]
R_z	Altura máxima do perfil de rugosidade [μm]
TaC	Carboneto de tântalo
TiAlN	Nitreto de Titânio Alumínio
TiC	Carboneto de titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
VB_B	Desgaste médio de flanco [mm]
VB_C	Desgaste de ponta [mm]
$VB_{m\acute{a}x}$	Desgaste máximo de flanco [mm]
VB_N	Desgaste de entalhe [mm]
v_c	Velocidade de corte [m/min]
WC	Carboneto de tungstênio
y_i	Afastamento vertical [μm]
γ	Ângulo de saída [$^\circ$]
χ_r	Ângulo de posição [$^\circ$]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa...	17
1.2 O problema da pesquisa.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Estrutura do documento	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Generalidade sobre a operação de fresamento frontal	21
2.2 Fresamento e suas variáveis independentes de entrada.....	22
2.2.1 Características do aço inoxidável ASTM 743 CA6NM e sua usinabilidade.....	22
2.2.2 Geometria e material da ferramenta de corte.....	25
2.2.3 Movimento e posicionamento relativo entre peça e ferramenta.....	29
2.2.4 Parâmetros de corte	35
2.3 Fresamento e suas variáveis dependentes de saída.....	37
2.3.1 Desgastes e avarias nas ferramentas de corte	37
2.3.2 Mecanismo causador de desgaste das ferramentas de corte	41
2.3.3 Critério de Fim de Vida da Ferramenta	43
2.3.4 Rugosidade da superfície usinada	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 Materiais e equipamentos	48
3.1.1 Corpo de prova	48
3.1.2 Cabeçote e inserto.....	50
3.1.3 Máquina ferramenta.....	52
3.1.4 Espectrômetro e durômetro	52
3.1.5 Microscópio estéreo e eletrônico de varredura (MEV)	53
3.1.6 Rugosímetro...	54
3.2 Métodos da experimentação	54
3.2.1 Parâmetros de corte	55
3.2.2 Posicionamento relativo entre peça e ferramenta	56

3.2.3 Intervalo de tempo das medições e critério de fim de vida	57
3.2.4 Planejamento do experimento e análise estatística.....	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 Análise química, micrográfica e dureza dos corpos de prova	60
4.2 Efeito dos parâmetros de corte sobre as falhas da ferramenta	62
4.3 Efeito dos parâmetros de corte sobre a superfície usinada	66
4.4 Interação das falhas da ferramenta com a rugosidade	69
4.5 Investigação das falhas e mecanismos de desgaste ocorridos na ferramenta	71
5. CONCLUSÕES.....	78
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	79
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE	83

1. INTRODUÇÃO

Atualmente nos países industrializados, a usinagem tem papel fundamental no processo produtivo, já que os custos com usinagem correspondem a mais de 15% do valor final dos produtos. Por este motivo, a usinagem, como parte da engenharia da fabricação e da tecnologia, é muito importante para a indústria moderna. Dentre os processos de usinagem de maior emprego na indústria, o fresamento é o método mais flexível, podendo usinar diversos formatos. O lado negativo desta flexibilidade é que muitas variáveis são incorporadas ao processo, tornando-o um desafio quanto à otimização (TRENT e WRIGHT, 2000), (DAVIM, 2008) e (SANDVIK, 2011).

O processo de usinagem baseia-se na remoção de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. O surgimento de novos materiais e ligas estruturais, com excelentes propriedades mecânicas, contribuiu para o desenvolvimento de novos materiais para confecção de ferramentas mais resistentes às operações de usinagem. Porém, a usinagem de materiais em operações de corte interrompido (neste caso, cita-se o processo de fresamento) requer materiais que componham ferramentas com propriedades suficientes (resistência a avarias) para suportar os choques e impactos inerentes ao processo de usinagem. Nessa perspectiva, o balanço de características e grandezas nos materiais de ferramentas de corte tornou-se um desafio para os fabricantes (MACHADO et al. 2015).

A natureza do desgaste das ferramentas de corte é resultado de fenômenos físicos, químicos e termomecânicos. Como vários mecanismos simples de desgaste (adesão, abrasão, difusão, oxidação, entre outras) atuam simultaneamente com uma influência predominante de um ou mais deles em diferentes situações, a identificação do mecanismo dominante é longe de ser simples e a maioria das interpretações está sujeita a controvérsia (DAVIM, 2008).

A partir da década de 60, os aços inoxidáveis martensíticos com baixo carbono (dentre eles o de especificação ASTM 743 CA6NM) foram desenvolvidos com objetivo de melhorar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis martensíticos convencionais. Devido a sua boa soldabilidade, o aço ASTM 743 CA6NM tem boa aceitação na fabricação de componentes de turbinas hidroelétricas, tais como rotores e pás diretrizes. A indústria petroquímica realiza pesquisas no aço inoxidável martensítico grau CA6NM, com a finalidade de oferecer uma alternativa prática e econômica para substituir equipamentos em meio a ambientes corrosivos. (GONÇALVES, 2014).

A liga ASTM 743 CA6NM é um aço inoxidável martensítico, fundido, resistente à corrosão, com 11,5% a 14% de cromo, teor de carbono máximo de 0,06%, contendo níquel (3,5% a 4,5%) e molibdênio (0,4% a 1,0%) como elementos de liga (ASTM 743, 2006). O baixo teor de carbono na sua composição melhora a tenacidade da martensita, propriedade esta que é fundamental para melhorar a soldabilidade. A presença de níquel, aliado ao alto percentual de cromo, melhora a resistência ao impacto. A presença de molibdênio proporciona acréscimo na resistência mecânica e resistência à corrosão (CASAS, HENKE e NOVICKI, 2009) e (DE PAULA, 2007).

No contexto apresentado, a pesquisa experimental possui um papel fundamental, uma vez que contribui diretamente para o crescimento do acervo técnico, que pode ser utilizado tanto no desenvolvimento de novas ferramentas, como para aperfeiçoar os processos de usinagem. A presente pesquisa procura avaliar, por meio de um experimento planejado, a influência das variáveis independentes de entrada (velocidade de corte e avanço por dente) no processo de fresamento frontal do aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA6NM, obtendo como resposta dados necessários que permitam, ao final, descrever e avaliar a natureza da falha da ferramenta (avarias e/ou desgastes), bem como seu impacto na rugosidade da superfície usinada.

1.1 Justificativa

Existe a convicção de que a competitividade, especialmente em escala global, ajuda a reduzir os desperdícios, a manter padrões de alta qualidade e, geralmente, promove o paradigma de fabricação "enxuta". Nesse sentido, melhorar as operações de um processo de fabricação deve ser uma tarefa contínua. O que pode ser suficientemente bom hoje, provavelmente não será amanhã. Novos desafios tornam-se oportunidades de melhoria (ERDEL, 2003).

Neste cenário de busca contínua pelo desenvolvimento dos processos de fabricação por usinagem, a presente pesquisa se justifica, pois, contribui com informações técnicas a respeito do desempenho de uma ferramenta de metal-duro revestida no fresamento frontal do aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA6NM, avaliando a influência dos parâmetros de corte sobre as falhas da ferramenta. Os resultados e conclusões obtidos no trabalho podem orientar a aplicação do objeto deste estudo em inúmeras situações, em especial no fresamento de componentes de pás de rotores e pás diretrizes de turbinas hidráulicas.

Além disso, é importante compreender que uma das características de pás de rotores e pás diretrizes de turbinas hidráulicas é sofrer o processo de esmerilhamento manual após o fresamento. Contudo, no âmbito industrial, é discutível a real necessidade desta operação. Deste modo, o trabalho colabora ao interagir a influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade da superfície usinada, obtendo dados que promovam o debate a respeito do tema.

1.2 O problema da pesquisa

A operação de fresamento frontal possui uma dinâmica de corte complexa e, por si só, implica em maiores dificuldades durante sua aplicação. Aliado a isto, o aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA6NM apresenta pontos desfavoráveis no que se refere à usinagem. O baixo teor de carbono, a ductilidade e a tenacidade da martensita dificultam o corte. A baixa condutividade térmica dissipa muito pouco o calor gerado, resultando em altas temperaturas na interface ferramenta-cavaco. Devido ao processo de fabricação do aço ser fundido, há presença de inclusões, porosidade e trincas muito duras e abrasivas.

A problemática desta pesquisa está relacionada justamente à dificuldade encontrada na usinagem desse material. Ao variar os parâmetros de corte, buscando a otimização do processo, observam-se diferentes tipos de falhas nos insertos de metal-duro revestido como desgastes de flanco, trincas, quebra e presença de adesão. Também se desconhecem os mecanismos causadores, bem como os métodos para minimizar as dificuldades elencadas.

Quanto à motivação para a pesquisa, é importante salientar que existem poucas informações sobre o desempenho de ferramentas de metal-duro revestidas no fresamento frontal do referido material, principalmente ao abordar a influência dos parâmetros de corte nas falhas da ferramenta e no acabamento da superfície usinada.

Em resumo, a pesquisa aborda um tema relevante e ascendente, uma vez que o material, objeto deste estudo, é encontrado em componentes de turbinas hidráulicas, além despertar o interesse da indústria petroquímica, tendo em vista as características e propriedades mecânicas da liga. Além disso, é problemático para a indústria metal mecânica do ponto de vista da baixa usinabilidade.

1.3 Objetivos

A seguir são descritos os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

Compreender a influência dos parâmetros de corte sobre o fresamento frontal do aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA6NM, relacionando com o desgaste da ferramenta e com o acabamento da superfície usinada, além de avaliar o mecanismo de falha da ferramenta de metal-duro revestida.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito dos parâmetros de corte sobre o desgaste da ferramenta de corte;
- Investigar a influência dos parâmetros de corte na rugosidade da superfície usinada;
- Analisar a interação do desgaste com a rugosidade;
- Examinar o mecanismo de falha ocorrido na ferramenta de corte.

1.4 Estrutura do documento

Nesta seção serão apresentados os seis capítulos, em que foi subdividido este trabalho:

1. Introdução: breve introdução dos assuntos abordados no experimento, apresentando a justificativa, o problema da pesquisa e os objetivos do trabalho;
2. Revisão bibliográfica: aprofundamento dos conceitos bibliográficos dos principais assuntos que norteiam esta pesquisa, bem como o embasamento teórico que justifica as decisões tomadas no decorrer do experimento;
3. Materiais e métodos: neste capítulo são apresentadas as características dos equipamentos utilizados, também são descritos os procedimentos adotados na pesquisa.

4. Resultados e discussões: apresentação dos resultados obtidos no experimento, buscando atender os objetivos propostos neste trabalho. Além de discutir e justificar, por meio da revisão bibliográfica, os fenômenos ocorridos no decorrer dos ensaios,
5. Conclusões: Neste capítulo, baseados nos resultados discutidos serão elencados as conclusões obtidas na pesquisa, buscando responder o objetivo do trabalho. Também, por meio das experiências alcançadas, serão sugeridos trabalhos que colaborem com o acervo técnico a respeito do tema desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados assuntos que fundamentam esta pesquisa. Sendo subdividido em três subtítulos: Generalidades, Variáveis independentes de entrada e Variáveis dependentes de saída. Sendo assim, fundamentam-se os dados de entrada e também, os dados de resposta do experimento.

2.1 Generalidade sobre a operação de fresamento frontal

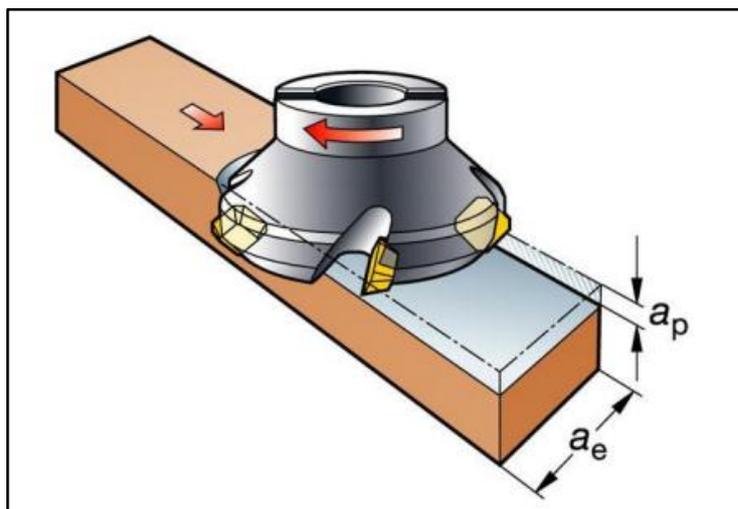
Ferraresi (1970), Groover (2010) Diniz, Marcondes e Coppini (2010) definem fresamento frontal como um processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana, perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. São operações nas quais os dentes ativos estão na superfície frontal da ferramenta.

Reybeka (2016, p. 56) afirma que

Uma operação muito comum é chamada de faceamento. Pode-se usar uma fresa de topo ou um cabeçote de fresar. Neste caso, a ferramenta é posicionada até à profundidade de corte (a_p) desejada e uma porção da peça chamada largura de corte (a_e), é removida em uma passada. Recomenda-se, na maioria dos casos, que a largura de corte seja menor que o diâmetro da ferramenta.

Nesse contexto, nas palavras de Ferraresi (1970), Diniz, Marcondes e Coppini (2010) e Machado, et al. (2015), no fresamento frontal, conforme Figura 1, a profundidade de usinagem (a_p) é a profundidade de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. A penetração de trabalho (a_e) é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço.

Figura 1- Profundidade de corte (a_p) e largura de corte (a_e).



Fonte: Sandvik (2011, p. D6).

2.2 Fresamento e suas variáveis independentes de entrada

As variáveis independentes de entrada são os fatores controláveis em um processo de fabricação, ou seja, são os elementos no qual se pode intervir de forma direta. Em um experimento, é possível fazer alterações nestas variáveis para observar os dados de saída do sistema (MONTGOMERY, 2016).

2.2.1 Características do aço inoxidável ASTM 743 CA6NM e sua usinabilidade

O aço inoxidável martensítico, ASTM 743 CA6NM, é uma liga de ferro-cromo-níquel-molibdênio que é endurecível por tratamento térmico. A adição de níquel e molibdênio à composição melhora sua resistência ao ataque de água do mar, além de apresentar ótima resistência ao impacto e aos danos causados pela cavitação. A liga é magnética e possui um coeficiente de expansão térmica inferior ao do aço carbono. A condutividade térmica do material é cerca de 45% menor que a do aço carbono, enquanto que a resistividade elétrica é aproximadamente cinco vezes maior (STEEL CASTINGS HANDBOOK, 2004).

Outrossim, Steel Castings Handbook (2004) reitera que os atributos mencionados são fundamentais para fabricação de diversos componentes de turbinas hidráulicas, citando os rotores. Contudo, esse material possui emprego também nas indústrias químicas, petroquímicas, entre outras.

O aço inoxidável martensítico, ASTM 743 CA6NM, em sua maioria, é obtido pelo processo de fundição com posteriores tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Para tal, devem ser obedecidos os requisitos de aquecimento até 1010°C no mínimo e resfriamento ao ar até 95°C ou menos para a têmpera. Já para o revenimento final, o material deverá ser aquecido entre 565°C e 620°C (ASTM 743, 2006). Os requisitos de composição química normatizados pela ASTM 743 devem atender às faixas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química do aço ASTM 743 CA6NM (% em peso).

C		Mn		Si		P		S		Cr		Ni		Mo	
Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
-	0,06	-	1,0	-	1,0	-	0,04	-	0,03	11,5	14,0	3,5	4,5	0,4	1,0

Fonte: Adaptado de ASTM 743 (2006).

Já as propriedades mecânicas do aço grau CA6NM são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades mecânicas do aço grau CA6NM.

Limite de resistência mín. (MPa)	Limite de escoamento mín. (MPa)	Alongamento mín. (%)	Redução de área mín. (%)	Dureza máx. (HB)
755	550	15	35	285

Fonte: Adaptado de ASTM 743 (2006).

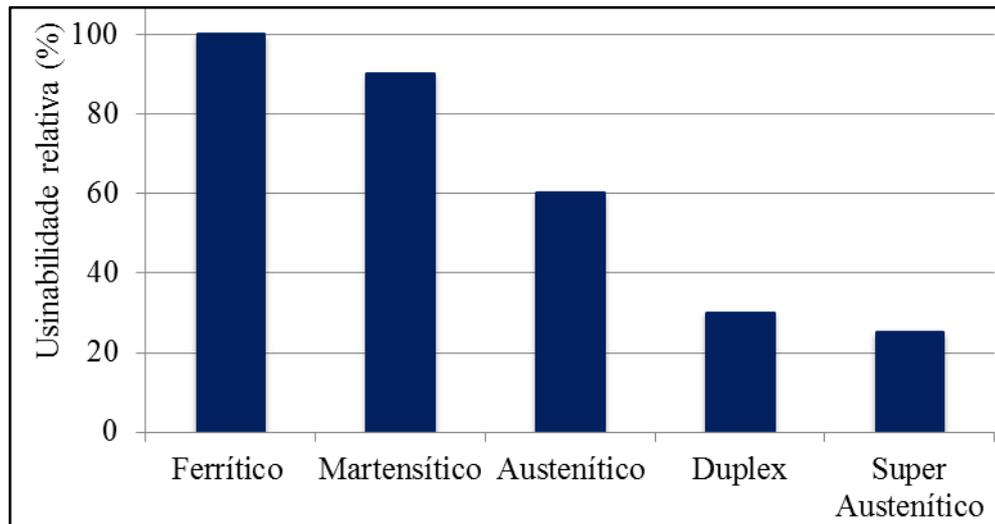
Para Machado et. al. (2015, p. 384),

Os aços inoxidáveis representam também uma significativa parcela dos materiais submetidos a operação de usinagem. Neste caso, o Cr é o principal elemento de liga com conteúdo superior a 12% e, se associado a uma alta porcentagem de carbono, seu desempenho em usinagem pode ser bastante comprometido.

A usinabilidade dos aços inoxidáveis difere dependendo dos elementos de liga, tratamento térmico e processo de fabricação (forjado, fundido, etc.). Em geral, a usinabilidade diminui com um maior teor de liga, mas materiais de corte livre ou de usinabilidade aprimorada estão disponíveis em todos os grupos de aços inoxidáveis (SANDVIK, 2011).

A Figura 2 compara a usinabilidade entre diferentes tipos de aços inoxidáveis.

Figura 2- Usinabilidade relativa de diversos aços inoxidáveis.



Fonte: Adaptado de < www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx >. Acesso em 15 jan. 2018.

Em geral, a usinabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos é muito semelhante à dos aços baixa-liga. É comum a usinagem criar desgaste de flanco e craterizações com alguma aresta postíça de corte (SANDVIK, 2011).

Machado et. al. (2015, p. 376) explica que “os aços inoxidáveis são caracterizados pela sua baixa condutividade térmica e pela alta capacidade de endurecimento por deformação, além de serem materiais que aderem à aresta de corte formando Aresta Postíça de Corte (APC)”.

Um fator metalúrgico que influencia na usinabilidade dos aços inoxidáveis fundidos é a presença de inclusões, porosidade e trincas geradas durante o processo de fabricação do material. As partículas são, em geral, muito duras e abrasivas, promovendo a quebra súbita da ferramenta de usinagem (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

A respeito do tema, a Steel Castings Handbook (2004) reitera que a maioria das operações de usinagem pode ser realizada de forma satisfatória em peças fundidas de liga CA6NM. A taxa de endurecimento por deformação deste material é muito menor que a dos aços ferro-cromo-níquel. Ferramentas de metal-duro podem ser utilizadas com sucesso. A baixa condutividade térmica reduz a dissipação do calor e prejudica a usinagem.

2.2.2 Geometria e material da ferramenta de corte

Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 231) descrevem considerações importantes sobre a geometria dos dentes da fresa. “Primeiramente com relação ao ângulo de posição χ_r . Normalmente, só se utiliza fresa com $\chi_r = 90^\circ$ quando é necessário fresar um encaixe com este ângulo. Se isto não acontece, é recomendável usar uma fresa com ângulo de posição menor”.

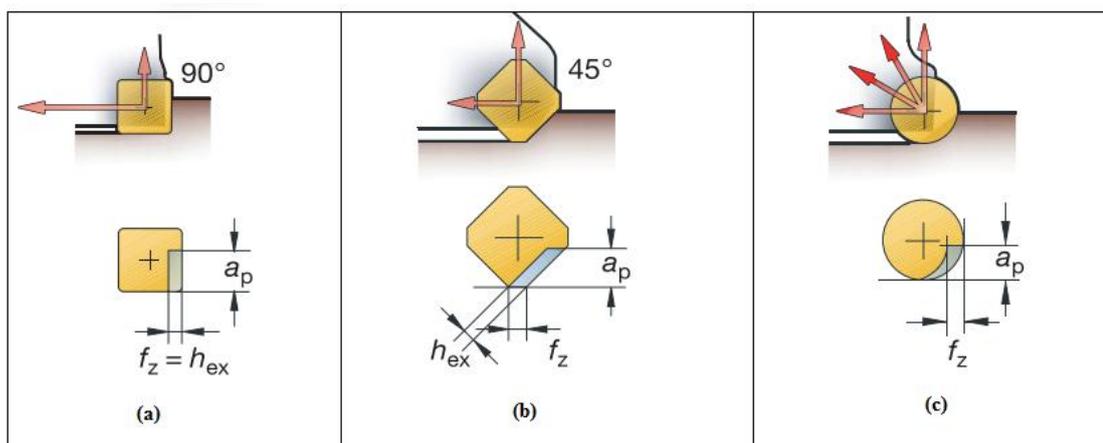
Outrossim, Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 232) complementam que

Quão menor for o ângulo de posição, menor espessura de corte terá o cavaco distribuído sobre um comprimento maior da aresta de corte. A carga sobre a aresta será menor, pois a mesma força será feita em um comprimento maior de aresta. Por outro lado, quanto menor for o ângulo de posição, menor a profundidade de usinagem que a pastilha é capaz de cortar [...]. Além disso, apesar de uma carga menor sobre a aresta, a pressão específica de corte é maior para menores ângulos de posição, pois a espessura de corte é menor.

Deste modo, para fresas com menor ângulo de posição χ_r , o avanço deve ser maior para aumentar a espessura de corte e a profundidade de corte deve ser baixa. Essa ação torna essas ferramentas bastante adequadas para o faceamento em desbaste de superfícies planas, pois, a pequena profundidade de usinagem é largamente compensada pelo alto avanço (DINIZ, MARCONDES E COPPINI 2010).

A Figura 3 mostra o ângulo de posição em função da geometria do inserto

Figura 3- Ângulo de posição 90° (a), 45° (b) e ângulo variável do inserto redondo (c).

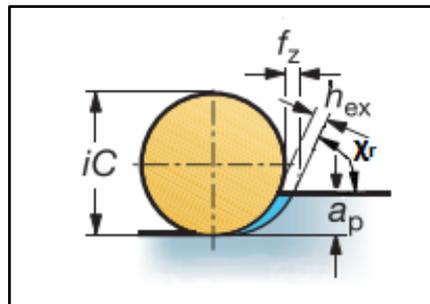


Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

Neste estudo, utilizaram-se insertos com geometria redonda, como mostra a Figura 3 (c).

A espessura do cavaco h_{ex} varia com insertos redondos e depende do ângulo de posição. Com baixa relação a_p/iC , o avanço pode ser elevado, com o intuito de aumentar a espessura de cavacos até o nível desejado. O melhor desempenho é obtido quando o ângulo de posição, χ_r , permanece abaixo de 60° , ao usar fresas com insertos redondos. Isto significa que a profundidade de corte não deve exceder 25% do diâmetro do inserto. Além disso, os insertos redondos possuem uma capacidade de espessura de cavacos máxima (h_{ex}) mais alta do que as soluções de aresta reta, devido ao formato mais robusto e ao comprimento de corte mais longo, conforme Figura 4 (SANDVIK, 2011).

Figura 4- Ângulo de posição em insertos redondos

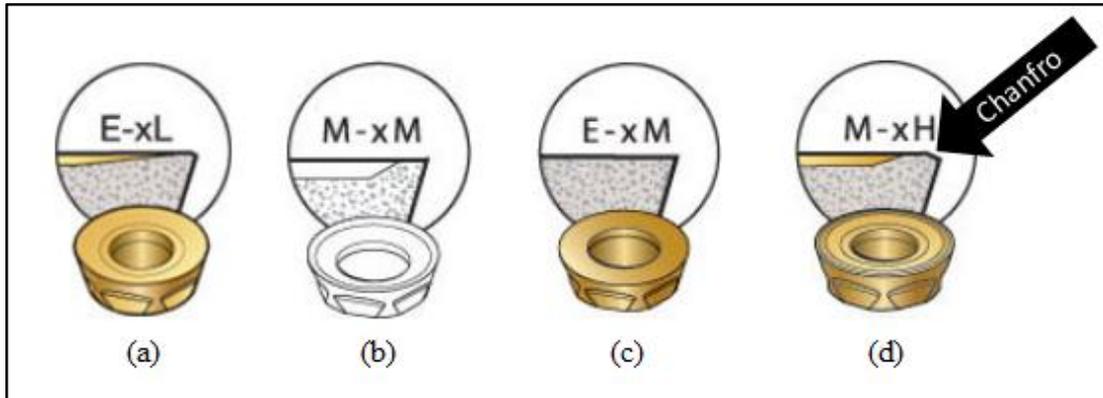


Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

O fresamento frontal é uma operação caracterizada pelo corte interrompido, sendo assim, a quebra do cavaco nunca foi um problema. No entanto, devido à possibilidade de entupimento dos bolsões, deve-se tomar cuidado com o fluxo do cavaco. Para minimizar os esforços de corte, melhorar o acabamento da superfície e reduzir o congestionamento dos bolsões, recomendam-se insertos com quebra-cavaco positivo. Por outro lado, quanto maior o ângulo de saída (γ) das ferramentas, menor é a resistência da aresta de corte (DINIZ, MARCONDES E COPPINI 2010).

Para insertos redondos, a Sandvik Coromant possui quatro geometrias de quebra-cavaco, conforme Figura 5. As geometrias (a) e (b) possuem maior ângulo de saída ($\gamma > 0$) indicadas para acabamento. A geometria (c) é neutra, ou seja, o ângulo de saída $\gamma = 0$, é indicado para operações de semiacabamento e usinagem de aços endurecidos. Por fim, a geometria (d) possui um ângulo de saída também positivo, entretanto, o chanfro na aresta de corte torna a geometria robusta para as operações de desbaste (SANDVIK, 2011).

Figura 5- Diferentes geometrias de quebra-cavaco

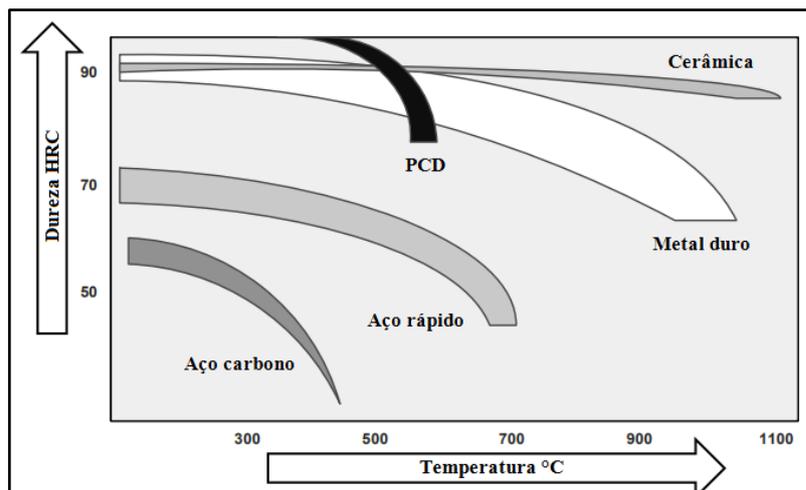


Fonte: Adaptado de < www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coromill_300/Pages/Product-details.aspx >. Acesso em 10 jan. de 2018.

Acerca dos materiais das ferramentas de corte em usinagem, Davim (2008) e Machado et. al. (2015), destacam três principais propriedades:

- **Dureza**, por via de regra, a ferramenta deve possuir material com maior dureza e mecanicamente mais resistente que o da peça. À medida que a dureza aumenta, melhora a resistência ao desgaste. Na maior parte dos casos, a usinagem eleva muito a temperatura da ferramenta. Deste modo, a dureza a quente é uma importante característica, uma vez que permite que as ferramentas mantenham alta dureza a temperaturas elevadas. A Figura 6 correlaciona dureza em função da temperatura.

Figura 6- Dureza dos materiais das ferramentas *versus* temperatura.



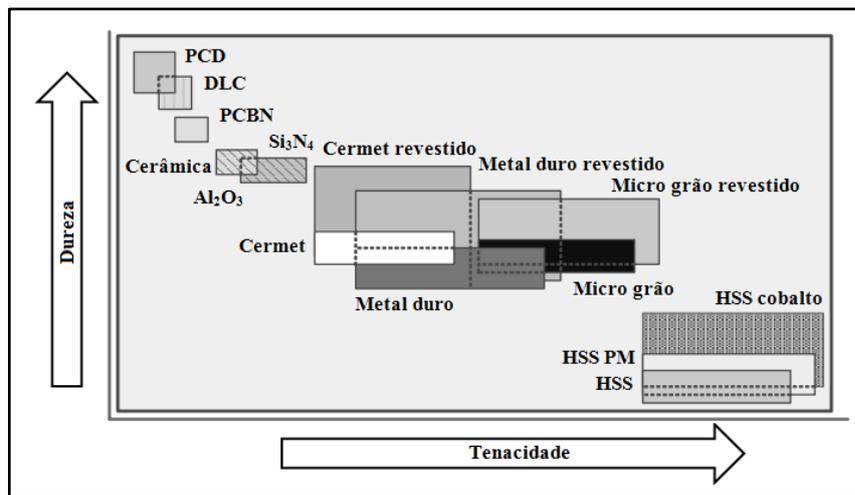
Fonte: Adaptado de Davim (2008, p.37).

- **Tenacidade** é definida como a capacidade do material em absorver energia antes da fratura. Quanto maior a tenacidade do material de uma ferramenta, melhor é a sua

resistência ao choque, fratura, vibração, desalinhamentos e outras imperfeições no sistema de usinagem. Em geral, dureza e tenacidade são propriedades distintas. Normalmente, à medida que aumenta a dureza de uma ferramenta de corte diminui sua tenacidade e vice-versa. Uma grande tendência no desenvolvimento de materiais de ferramentas é aumentar sua tenacidade mantendo a dureza.

A Figura 7 mostra que, para diferentes materiais de ferramentas, dureza e tenacidade mudam em direções opostas.

Figura 7- Dureza e tenacidade nos materiais das ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Davim (2008, p.38).

- **Resistência ao desgaste** é definida como a obtenção de uma vida útil aceitável antes que a ferramenta precise ser substituída. Está diretamente relacionada à dureza da ferramenta. Porém, diversos fatores podem comprometer a resistência ao desgaste de uma ferramenta.

Como foi observado, existem atualmente diversos materiais de ferramentas, cada um com propriedades específicas para determinadas aplicações. Como este trabalho trata de uma ferramenta de metal-duro revestido pelo processo de PVD, apenas esse assunto será fundamentado.

A respeito do assunto, Rebeyka (2016) explica que as ferramentas de metal-duro são produzidas por meio de sinterização. Neste processo, os carbonetos metálicos e os elementos de liga em formato de partículas são misturados na proporção adequada. O principal componente é o carboneto de tungstênio (WC), que confere ao material elevada dureza e resistência ao desgaste. Já o elemento de liga é o cobalto (Co), que aumenta a tenacidade do

material. Outras partículas muito duras, tais como o carboneto de titânio (TiC), o carboneto de tântalo (TaC) e o carboneto de nióbio (NbC), também podem ser empregadas na mistura para atribuir características específicas.

Para melhorar o desempenho das ferramentas de metal-duro, é possível adicionar camadas de revestimento superficial. Com essa composição, as ferramentas de metal-duro revestidas combinam dureza, tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade química. As coberturas das ferramentas podem ser aplicadas por meio dos métodos de PVD ou CVD (REBEYKA, 2016).

O revestimento PVD (*Physical Vapor Deposition*), ou deposição física de vapor, é formado em temperaturas relativamente baixas, de 400 a 600°C. O processo envolve a evaporação de um metal que reage, por exemplo, com nitrogênio para formar uma cobertura de nitreto dura na superfície da ferramenta de corte. Dentre os principais revestimentos PVD, cita-se o TiN (nitreto de titânio), o TiCN (carbonitreto de titânio) e o TiAlN (nitreto de titânio alumínio). As camadas podem ser únicas ou múltiplas. É possível também combinar diferentes constituintes em camadas sequenciais (SANDVIK, 2011).

Prengel, et al. (2001) realizaram um experimento com o objetivo de avaliar a vida útil da ferramenta no fresamento frontal. Na ocasião, para as mesmas condições de usinagem, aplicou-se ferramentas intercambiáveis de metal-duro revestidas pelo processo de PVD com monocamada de TiAlN, multicamadas de TiAlN e multicamadas combinadas de TiN/ TiCN/ TiAlN. Na condição de usinagem sem refrigeração, a cobertura multicamadas de TiAlN apresentou vida útil 50% maior que as demais.

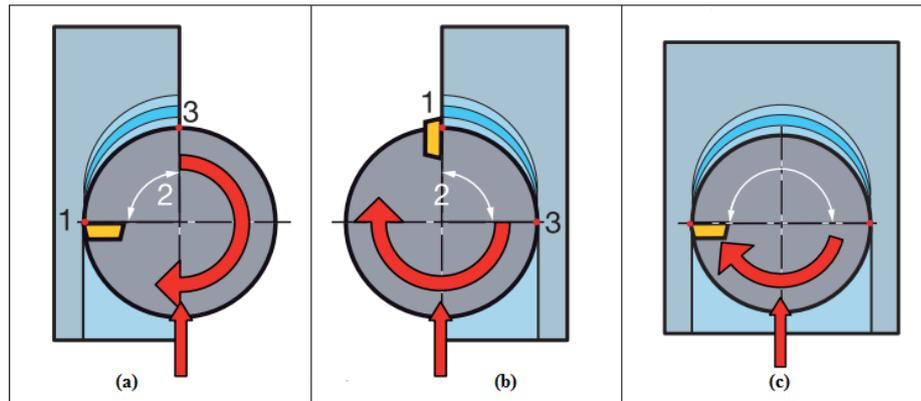
A cobertura PVD é recomendada para arestas de corte tenazes e afiadas, bem como para materiais com tendência à abrasão. Além disso, reduz a formação da aresta postiça de corte, sendo indicada em ferramentas para a usinagem de aços inoxidáveis. Sugere-se também aplicar o revestimento em PVD quando a espessura de corte (a_c) é pequena. Neste caso, a espessura de cavacos é normalmente menor e a aresta das classes com cobertura PVD gera menos calor e forças de corte reduzidas (MACHADO et. al., 2015).

2.2.3 Movimento e posicionamento relativo entre peça e ferramenta

Relacionado ao movimento relativo entre peça e ferramenta, o faceamento subdivide-se em:

- **Discordante:** onde a fresa e a peça deslocam-se em sentidos contrários, conforme Figura 8 (a). Sendo assim, a espessura de corte (h_m) cresce, iniciando de um valor menor e finalizando com um valor maior (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010), (MACHADO, et al., 2015).
- **Concordante:** caracterizado pelo movimento oposto ao discordante, nele a fresa e a peça se deslocam no mesmo sentido, conforme Figura 8 (b). Nesse caso, a espessura de corte (h_m) decresce, ou seja, é maior no início do corte e menor no final (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010), (MACHADO, et al., 2015).
- **Combinado:** Acontece quando a fresa tem todo seu eixo dentro do campo de corte da peça, conforme Figura 8 (c). Desta forma, parte do corte ocorre através da fresamento concordante e parte através da discordante. A espessura de corte (h_m) cresce até um valor máximo e decresce até o valor inicial (SOUZA, 2016).

Figura 8- Movimento relativo entre peça e ferramenta.



Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

Sobre os movimentos entre peça e ferramenta, Rebeyca (2016, p. 58) salienta que

O movimento discordante gera mais atrito sobre a aresta de corte, justamente porque o corte tem início com espessura mínima do cavaco. À medida que aumenta a pressão de corte, a aresta vai penetrando na peça, fazendo a usinagem do material, e o cavaco finaliza com sua máxima espessura. Por outro lado, a usinagem concordante gera mais impacto na aresta de corte no início da usinagem, porque tem início na máxima espessura do cavaco e termina aliviando a pressão de corte.

Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 229) afirmam que “nas fresas frontais com insertos de metal-duro, devido a sua sensibilidade aos choques, é necessário que se estude a posição em que a ferramenta deve tocar o material quando ela entra no corte a cada rotação.

Tal posição de ataque vai depender dos ângulos da ferramenta e da posição relativa da fresa com a peça”.

O guia técnico de fresamento, apresentado pela Sandvik (2011), sugere que o diâmetro da fresa seja de 20 a 50% maior que a largura da superfície usinada a_e .

Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 228) explicam que

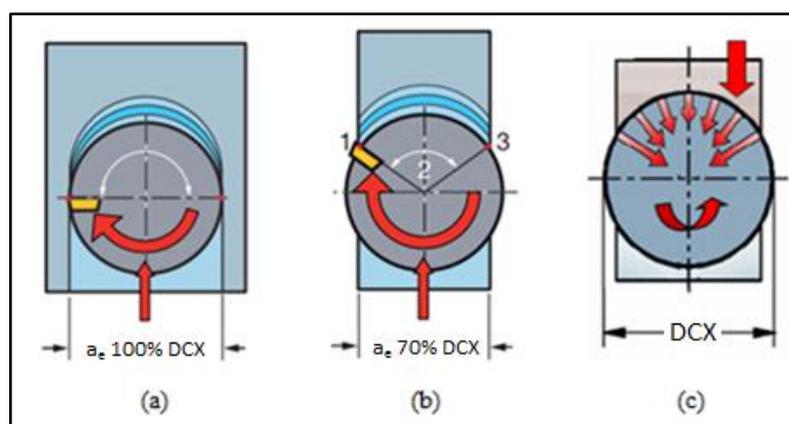
Isso se deve ao fato de o contato fresa-peça não deve se dar com $h_m=0$ ou próximo a este valor, pois, se isso acontecer (e acontece quando a fresa tem diâmetro igual ou pouco maior que a largura da peça), os cavacos formados no início do corte serão muito finos com grande valor de pressão específica de corte.

Entretanto, na prática isso nem sempre é possível, pois diversos componentes a serem fresados possuem descontinuidades, tais como rebaixos e furações, que obrigam ferramentas de grande diâmetro facear pequenas larguras de corte (a_e).

Quanto ao posicionamento relativo entre peça e ferramenta, o fresamento frontal pode ser classificado em simétrico e assimétrico.

O fresamento simétrico acontece quando o deslocamento do eixo da fresa se faz sobre o eixo de simetria da peça em usinagem, conforme Figura 9. Nessa perspectiva, Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 224), mencionam que “o sentido das forças radiais de corte pode variar à medida que a aresta de corte penetra na peça, o que pode acarretar vibrações e quebra prematura da aresta”.

Figura 9- Tipos de fresamento simétrico (a) (b) e a sua variação da direção das forças de corte (c).



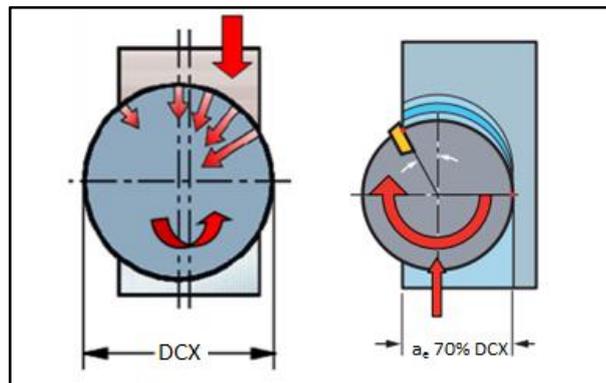
Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

Já o fresamento assimétrico é um posicionamento caracterizado quando o corte não se dá sobre o eixo de simetria da peça na usinagem. Quando toda uma superfície plana está

sendo fresada, tem-se $a_e < DCX$. Observa-se o posicionamento na Figura 10 (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Ainda, Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 224) defendem que “quando o corte é assimétrico, a variação da direção da componente radial da força de usinagem é menor e, com isso, menor tendência à vibração”.

Figura 10- Variação da direção das forças de corte no fresamento assimétrico (a) e fresamento assimétrico comum com fresa de facear (b).

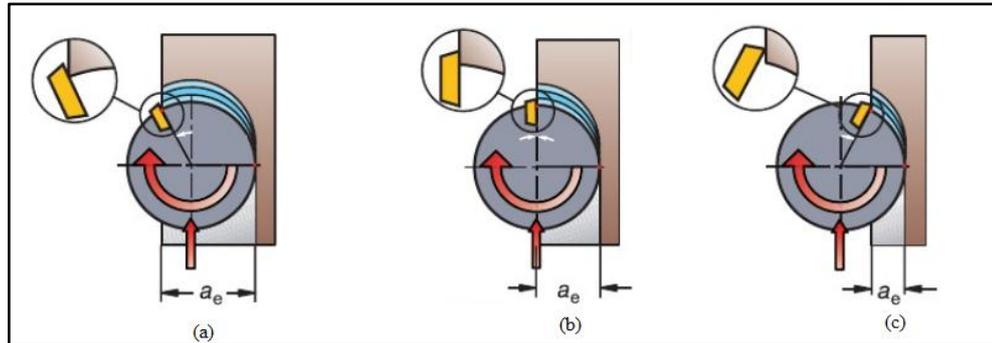


Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

No corte assimétrico, é possível que a ferramenta esteja com seu centro posicionado de três maneiras em relação à largura da peça: para dentro, alinhado ou para fora da borda da peça, conforme Figura 11. Além do mais, é importante frisar que o contato do inserto é diferente para cada uma das três posições. Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 230) explicam que

[...] no caso em que a fresa de facear tem seu centro fora da largura da peça (Figura 11c) o corte começa com a parte mais extrema da pastilha tocando a peça, o que pode causar a quebra da aresta. Se o centro da fresa está dentro da largura da peça (Figura 11a), o contato inicial é feito com a parte interior da pastilha, onde a secção para resistir ao choque é maior.

Figura 11- Posicionamento e contato da ferramenta com a peça no corte assimétrico, onde (a) para dentro, (b) alinhado e (c) para fora.

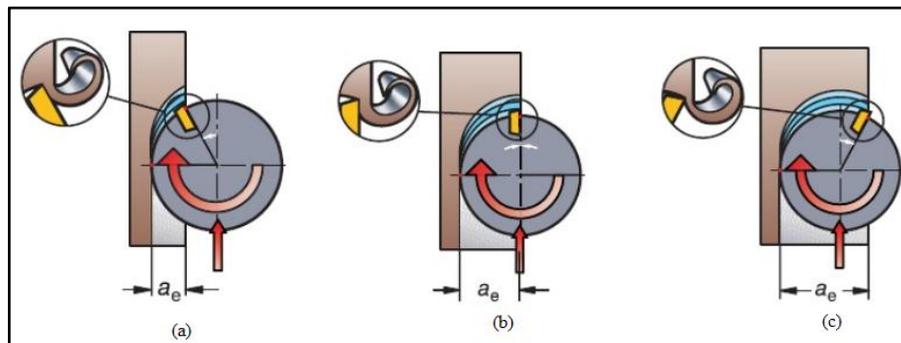


Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

Além disso, quando a posição no corte assimétrico é alterada, a saída da ferramenta também varia, (Figura 12). Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 231) alertam para

Na saída do corte haverá súbita diminuição das forças de corte. Por isto, é importante que a espessura de corte (h) neste momento seja a menor possível, para minimizar a formação de rebarba em aços. Além disso, a variação brusca da solicitação sobre a ferramenta que ocorre quando a aresta sai da peça no momento de h_{max} , pode causar trinca por fadiga mecânica na ferramenta, já que este fenômeno se repete várias vezes por segundo.

Figura 12- Diferentes contatos da ferramenta na saída do corte quando varia o seu posicionamento com a peça, onde (a) para fora, (b) alinhado e (c) para dentro.



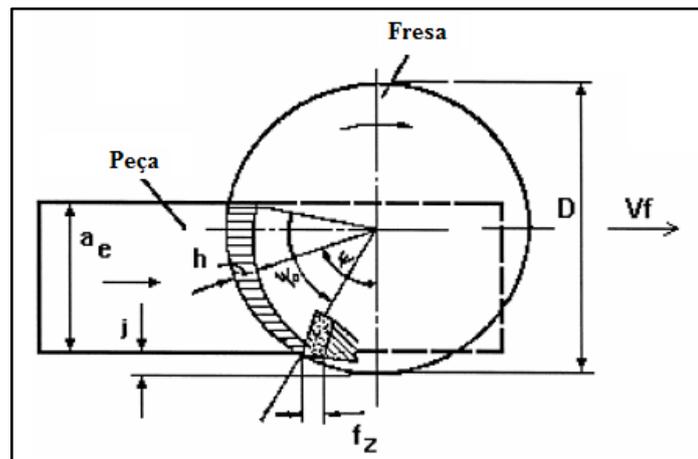
Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

Diniz, Marcondes e Coppini (2010) sugerem que as posições (a) e (c) da Figura 12 são favoráveis no que diz respeito à saída do dente da peça, e a posição (b) é desfavorável, já que é neste momento que a espessura de corte é máxima. Entretanto, o guia técnico de fresamento da Sandvik (2011) indica como favorável apenas a posição (c), e destaca que um cavaco espesso, geralmente, causará uma redução drástica na vida útil de ferramentas de metal-duro. O cavaco não tem apoio no final do ponto de corte e tenta curvar-se, gerando uma força de tração no metal-duro, que pode danificar a aresta.

Caldeirani e Diniz (1999) publicaram um estudo sobre a influência da posição relativa da fresa e da peça (aço AISI 1045) na vida da ferramenta durante o processo de fresamento frontal. Os ensaios consistem em variar o valor j (ver

Figura 13), desde um valor de 3,8% do diâmetro da fresa, até um valor de 26,2 %, passando pelo corte simétrico, onde j era 15% do diâmetro da fresa, já que a largura da peça era de 70% do diâmetro da fresa. Os resultados obtidos demonstram que à medida que j cresce, a vida da ferramenta diminui. Os autores concluíram, portanto, que as condições de corte assimétricas com valor de j pequeno são recomendadas em termos de vida da ferramenta, além de que as posições relativas da ferramenta e da peça não influenciaram a rugosidade da peça no início da vida útil da ferramenta.

Figura 13- Representação do experimento realizado.



Fonte: Adaptado de Caldeirani e Diniz (1999).

Igualmente, Bagci e Aykut (2014) avaliaram os efeitos da posição da fresa, do revestimento e dos parâmetros de corte na força, potência, desgaste da ferramenta e taxa de remoção de material durante o fresamento frontal. Os resultados obtidos com o experimento demonstram que os valores das componentes das forças de usinagem são maiores no corte simétrico. Observaram também que, durante o corte simétrico, o desgaste da ferramenta é mais evidente do que na usinagem assimétrica. Por fim, verificaram que a estratégia de faceamento assimétrica é superior quando comparada com a estratégia simétrica, apresentando maior taxa de remoção de material.

2.2.4 Parâmetros de corte

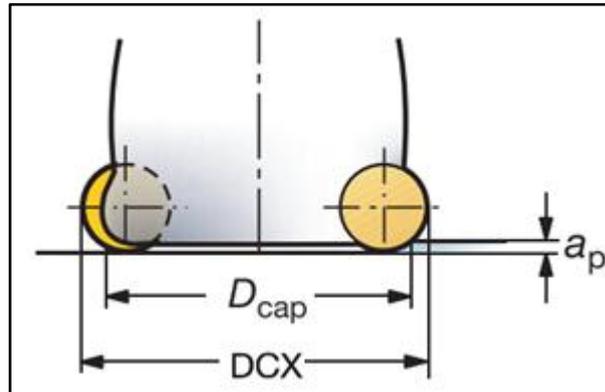
Rohloff (2012) estudou a usinagem por fresamento do aço inoxidável martensítico AISI 420. A abordagem avaliou a influência dos parâmetros de usinagem: velocidade de corte ($v_c= 90; 135; e 180$ m/min), avanço por dente ($f_z= 0,1; 0,15; e 0,2$ mm/dente) e profundidade de corte ($a_p= 0,25; 0,5; e 0,75$ mm) no desgaste da ferramenta. O inserto de metal-duro utilizado no procedimento experimental foi de formato redondo, com revestimento em PVD. Os resultados estatísticos mostraram que v_c possui maior influência no desgaste, seguidas por a_p e f_z . Sendo assim, notou-se a possibilidade de utilizar elevados valores de f_z , aumentando a produtividade sem comprometer a ferramenta de corte.

Caldeirani e Diniz (2002) avaliaram a influência das condições de corte na vida da ferramenta no processo de fresamento frontal do aço AISI 1045. Para tanto se utilizou um inserto de metal-duro revestido com TiCN ($1,5 \mu\text{m}$) e TiN ($2,0 \mu\text{m}$), e a operação conduzida foi um corte frontal assimétrico. Os resultados mostram que a variação da velocidade de corte tem influência predominante em relação ao avanço por dente, ou seja, a frequência de entrada da aresta de corte na peça é o fator que mais influencia no desgaste e na vida útil da ferramenta.

O grande objetivo na escolha da velocidade de corte (v_c) mais adequada ainda recai sobre obter uma vida econômica para a ferramenta de corte, principalmente, porque a v_c exerce maior influência sobre os desgastes da ferramenta que o avanço por dente (f_z), a profundidade de corte (a_p) e a largura de corte (a_e). Ainda, no fresamento, o incremento de v_c aumenta a força de impacto do dente da fresa contra a peça, o que acarreta maior ocorrência de trincas e lascamentos de origem mecânica (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2010).

Para a determinação do avanço por dente e da velocidade de corte, é necessário definir o diâmetro efetivo de corte (D_{cap}). Fresas de insertos redondos possuem o diâmetro efetivo de corte diretamente proporcional à profundidade de corte (a_p), ou seja, à medida que se aumenta o a_p , cresce também o D_{cap} , conforme Figura 14 (SANDVIK, 2011).

Figura 14- Diâmetro efetivo de corte nos insertos redondos.



Fonte: Adaptado de Sandvik (2011).

Para cálculo do diâmetro efetivo de corte (D_{cap}), utiliza-se a Equação 1 (SANDVIK, 2011).

$$D_{cap} = DCX - iC + \sqrt{iC^2 - (iC - 2 \cdot a_p)^2} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Onde:

DCX= diâmetro do cabeçote [mm];

iC= diâmetro do inserto [mm];

a_p = profundidade de corte [mm].

Para Machado, et al. (2015) e Sandvik (2011) ferramentas que possuem mais de um dente, como as fresas, distingue-se ainda o avanço por dente (f_z), que representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta, nesse sentido vale mencionar que há duas fórmulas para o cálculo do valor do avanço por dente (f_z) de fresas com inserto redondo que são diferenciadas pelos seguintes critérios:

Equação 2, aplicada quando $a_e > D_{cap}/2$ e inserto redondo $a_p < iC/2$,

$$f_z = \frac{h_m \cdot iC}{2 \cdot \sqrt{a_p \cdot iC - a_p^2}} \quad [\text{mm/dente}] \quad (2)$$

Equação 3, aplicada quando $a_e < D_{cap}/2$ e inserto redondo $a_p < iC/2$,

$$f_z = \frac{h_m \cdot iC \cdot D_{cap}}{4 \cdot \sqrt{a_p \cdot iC - a_p^2} \cdot \sqrt{D_{cap} \cdot a_e - a_e^2}} \quad [\text{mm/dente}] \quad (3)$$

Onde:

h_m = espessura de corte [mm];

iC = diâmetro do inserto [mm];

D_{cap} = diâmetro efetivo de corte [mm];

a_p = profundidade de corte [mm];

a_e = largura de corte [mm].

Quando $a_e < D_{cap}/2$ a espessura de corte (h_m) é muito baixa, a ferramenta irá comprimir o material, ocorrendo deformação elástica, dificultando o cisalhamento do material e conseqüentemente a formação de cavaco. Por este motivo, sugere-se o aumento do f_z como uma das técnicas para aumentar a espessura de corte (ARAMCHAROEN e MATIVENGA, 2009) apud (PROTÁZIO 2016).

Nesse âmbito, é relevante salientar que o catálogo técnico da Sandvik (2011) recomenda uma espessura média de cavaco (h_m) na ordem de 0,2 mm.

2.3 Fresamento e suas variáveis dependentes de saída

As variáveis dependentes de saída são os elementos no qual não se pode intervir de forma direta, pois, resultam e dependem da configuração dos fatores controláveis de entrada do processo de fabricação. Em um experimento, em geral, são observados os dados de saída do sistema resultante e então se faz uma análise acerca de quais variáveis independentes de entrada são responsáveis pelas mudanças observadas no desempenho de saída (MONTGOMERY, 2016).

2.3.1 Desgastes e avarias nas ferramentas de corte

Machado et al. (2015, p. 261) introduz que

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte

sofrerá um processo de desgaste que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. Estudar e entender o processo pelo qual as ferramentas se desgastam é muito importante, pois pode permitir ações coerentes e efetivas para reduzir a taxa desse processo, prolongando a vida da aresta de corte. [...]. Além disso, o conhecimento do processo de desgaste da aresta fornecerá subsídios para que haja evolução dos materiais das ferramentas, tornando-as mais resistentes aos fenômenos negativos que ocorrem durante o processo de usinagem.

Davim (2008, p.48) complementa que “geralmente, o desgaste das ferramentas de corte depende da geometria e material da ferramenta, do material da peça, dos parâmetros de corte, dos fluidos de corte e das características da máquina”.

Liu, et al. (2015) realizaram um estudo sobre os danos da ferramenta de corte e seus efeitos na rugosidade da superfície usinada. Para tal, aplicou-se um fresamento frontal como processo de usinagem do aço inoxidável martensítico 17-4PH. Os resultados apontaram que a velocidade de corte tem uma influência significativa no desgaste do inserto. Em todos os ensaios foram detectados desgastes de entalhe, sendo que a geração do mecanismo de falha do inserto foi acelerado pelo aumento da velocidade de corte. Uma das razões apontadas pelos autores recai sobre a maior frequência de impacto mecânico, causada pela maior velocidade de corte. Também foram comprovados, por meio de um Sistema de Energia Dispersiva (EDS), os mecanismos de difusão e adesão do material usinado no inserto.

Nordin, et al. (2000) estudaram os mecanismos de desgaste e falha de ferramentas de metal-duro, com diferentes revestimentos de PVD no fresamento frontal do aço inoxidável AISI 316. A pesquisa concluiu que diversos mecanismos ocorrem simultaneamente. Constatou-se em todos os ensaios a formação de trincas como resultado do ciclo térmico entre o período ativo e inativo de corte. Para os autores, o aço AISI 316 possui baixa condutividade térmica e forte tendência a endurecer, favorecendo a adesão e abrasão. Em consequência disto, a ferramenta apresentou desgaste de flanco e entalhe. Durante os testes, a velocidade de corte é alta o suficiente para causar desgaste de cratera, e conclui-se que, se o revestimento é removido da ferramenta e o substrato é exposto, o desgaste da cratera é substancialmente acelerado.

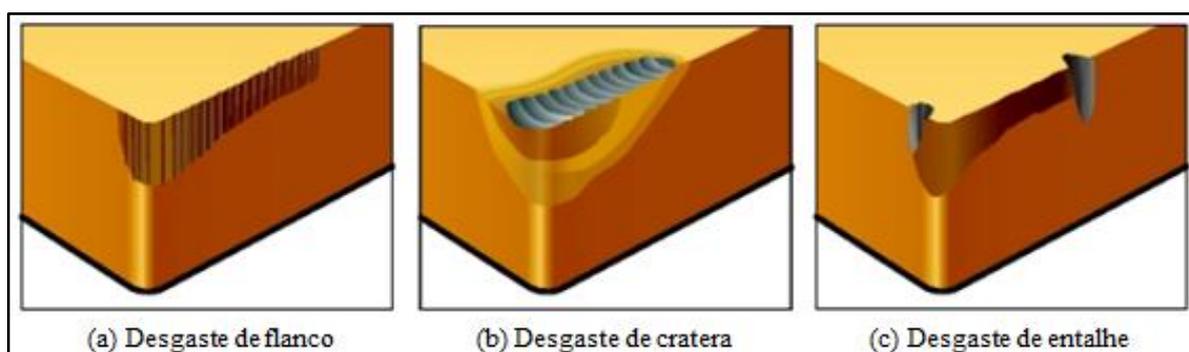
Lacerda (2014) avaliou o processo de fresamento em 5 eixos do aço ASTM 743 grau CA6NM. Para tal, aplicou um inserto com geometria redonda, revestido com óxido de alumínio aplicado pelo processo de CVD. Na ocasião, percebeu-se que todos os ensaios apresentaram desgaste de flanco e concluiu que este fenômeno foi o causador do fim de vida da ferramenta.

Não é consenso para os autores Trent e Wright (2000), Diniz, Marcondes e Coppini (2010) e Machado et al. (2015) quanto aos fenômenos que atuam sobre a ferramenta durante o corte, responsáveis pelo encerramento da sua vida. Nesse âmbito, é pertinente citar os fenômenos de desgaste, avaria e deformação plástica.

Desgaste é definido como a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte, alterando sua forma original. Ele pode ser subdividido em desgaste de flanco, cratera e entalhe, conforme Figura 15 (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

- Desgaste de flanco ou frontal: é o mais comum dos tipos de desgaste, ocorre em todo processo de usinagem. Em geral, é incentivado pelo aumento da velocidade de corte. O desgaste reduz o tamanho do inserto, prejudicando os ajustes dimensionais (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010);
- Desgaste de cratera: perda gradual de material na face da ferramenta durante a usinagem. Fragiliza a aresta de corte podendo levar à quebra, o que resulta em acabamento ruim. Forças e temperaturas elevadas atuam na interface de contato entre ferramenta e cavaco, contribuindo para a ação de desgaste de cratera (GROOVER, 2010) e (MACHADO et al., 2015);
- Desgaste de entalhe: desgaste que modifica a forma da aresta cortante e, com isso, influencia no acabamento da superfície usinada. É incentivado pelo aumento da temperatura e da velocidade de corte (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Figura 15- Desgastes nas ferramentas de corte.

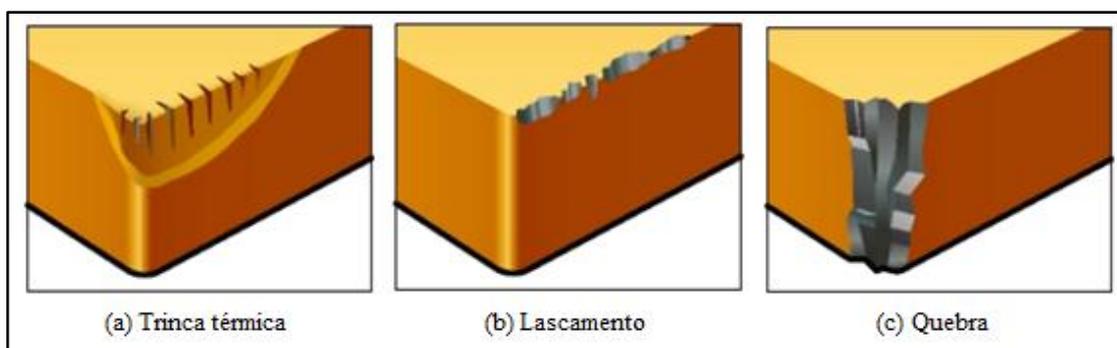


Fonte: Adaptado de < www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/>. Acesso em 20 jan. de 2018.

Avaria é definida como um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, promovendo a substituição da ferramenta imediatamente (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010). Possuem origem térmica ou mecânica e podem ser classificadas em:

- Trincas de origem térmica: são avarias provocadas pela variação da temperatura. São comuns no processo de fresamento frontal, onde cada aresta da ferramenta atravessa uma fase ativa, período em que há geração de cavaco e calor; e uma fase inativa, período sem corte que resfria a ferramenta. Essa oscilação térmica provoca flutuações cíclicas de tensão, causadas pela diferença de dilatação térmica da superfície e do núcleo do inserto. Como consequência, há o surgimento de vários sulcos perpendiculares à aresta cortante e paralelos a si mesmo, conforme Figura 16 (a) (MACHADO et al., 2015);
- Trincas de origem mecânica: são avarias provocadas pelo movimento cíclico de entrada e saída da ferramenta na peça, potencializando os choques mecânicos. No fresamento frontal, cada giro da fresa expõe a ferramenta a um impacto causado pela mudança súbita de carga zero, no ciclo inativo, para carga total na fase ativa. Ao contrário das trincas térmicas, as mecânicas surgem paralelas à aresta cortante (MACHADO et al., 2015);
- Lascamento: ao contrário dos desgastes de flanco e cratera, no lascamento, partículas maiores são removidas subitamente, conforme Figura 16 (b). Ocorrem em ferramentas com materiais frágeis e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Prejudicam o acabamento e provocam a quebra da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).
- Quebra: ocorre subitamente. Geralmente relaciona-se à alta dureza do inserto, cargas excessivas sobre a ferramenta, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos bolsões de armazenamento dos cavacos, entre outros (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Figura 16- Avarias nas ferramentas de corte.

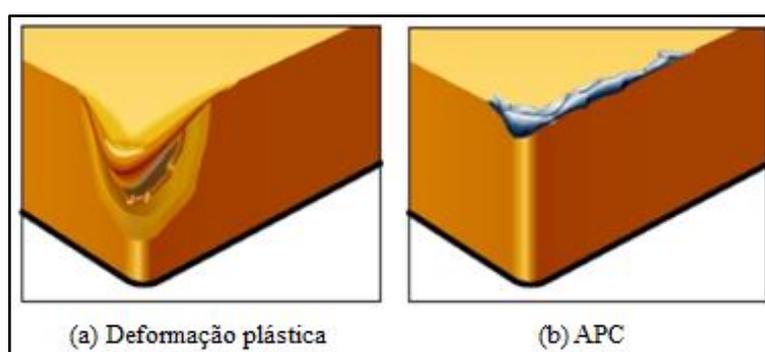


Fonte: Adaptado de < www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/>. Acesso em 20 jan. de 2018.

Deformação plástica é caracterizada pela mudança da geometria da aresta de corte devido às altas temperaturas e tensões atuantes na ferramenta durante o corte, conforme Figura 17 (a). Diniz, Marcondes e Coppini (2010) enquadram a deformação plástica como um tipo de avaria, enquanto Trent e Wright (2000) tratam como desgaste. Este fenômeno gera uma deformação plástica na aresta que provoca deficiência no corte e deterioração do acabamento da peça. Pode ser minimizada aplicando ferramentas com maior dureza e/ou alterando as condições de usinagem (MACHADO et al., 2015).

Aresta postiça de corte (APC) é uma porção de material da peça que fica aderido à aresta de corte, conforme Figura 16 (b). Com isso, compromete a eficiência da ferramenta com relação à resistência ao desgaste e ao acabamento da peça. Devido ao forte encruamento das partículas do material que constituem as APCs, elas desempenham a função de uma aresta cortante. A APC tende a aumentar gradativamente, até um determinado momento em que se rompe bruscamente. Quando esse fenômeno acontece, partículas da ferramenta são arrancadas e parte do material se adere à peça, gerando desgaste excessivo e prejudicando o acabamento da superfície. A aresta postiça de corte geralmente é formada em baixas velocidades de corte (v_c); à medida que v_c aumenta, a temperatura de corte cresce e não há mais formação da APC. Além disso, à medida que a ductilidade do material diminui, decresce a ocorrência da APC (FERRARESI, 1970) e (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Figura 17- Deformação plástica e aresta postiça nas ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de < www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/>. Acesso em 20 jan. de 2018.

2.3.2 Mecanismo causador de desgaste das ferramentas de corte

Vários são os fenômenos causadores dos desgastes. É importante compreender estes mecanismos para encontrar a causa raiz responsável pela deterioração das ferramentas de corte. Os principais são:

Aderência e arrastamento (*attrition*), também pode ser chamada de **adesão**, ocorre quando o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta é irregular. A aresta postiça de corte (APC) pode aparecer, e na sua presença fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface. Contudo, pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação da aresta postiça. Em geral, o corte interrompido, a profundidade de corte variável e as baixas velocidades de corte promovem o fluxo irregular de material e favorecem o mecanismo de desgaste por *attrition*. Certos materiais dúcteis, como titânio e aços inoxidáveis, tendem a promover a adesão completa do cavaco na aresta de corte, que permanecem ali durante o tempo inativo de um ciclo e quando a ferramenta entra na fase ativa promove problemas extras (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010) e (MACHADO et al., 2015).

Abrasão é o principal mecanismo causador do desgaste de flanco das ferramentas. O atrito de partículas duras do material com a ferramenta gera uma abrasão mecânica que remove pequenas porções do inserto. Há casos em que partículas da própria ferramenta são arrastadas pelo movimento de corte e causam o desgaste abrasivo (GROOVER, 2010) e (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Difusão é um processo em que há transferência de elementos químicos a nível atômico de um metal para outro. No caso do desgaste da ferramenta, a difusão ocorre no limiar entre o cavaco e a ferramenta, fazendo com que a superfície do inserto se esgote dos átomos responsáveis pela sua dureza. À medida que esse processo continua, a superfície da ferramenta torna-se mais suscetível a abrasão e aderência. A difusão é considerada o principal mecanismo de desgaste de cratera (TRENT e WRIGHT 2000) e (GROOVER, 2010).

Oxidação é um mecanismo causador do desgaste resultante de reações químicas nas superfícies das ferramentas expostas às altas temperaturas e desprotegidas. A camada oxidada é removida por abrasão, expondo o material para sustentar um novo processo de reação. O desgaste gerado pela oxidação se forma, especialmente, nas extremidades do contato entre cavaco e ferramenta, devido ao fluxo de ar nesta região, o que pode ser uma explicação para o desgaste de entalhe (GROOVER, 2010) e (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

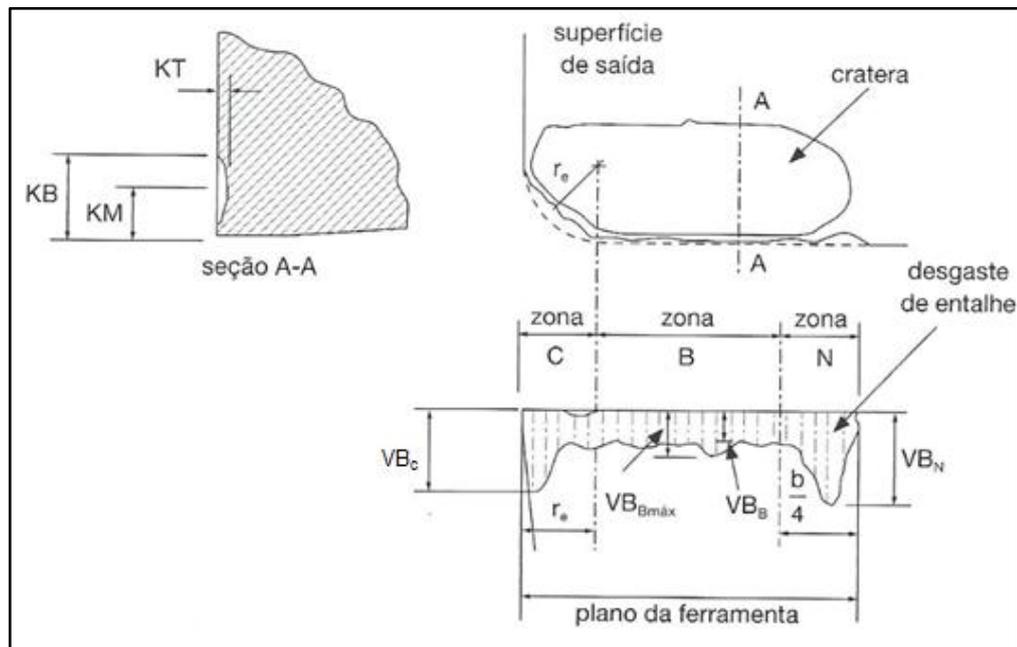
Solicitações mecânicas e térmicas que atuam na aresta cortante, quando excessivas, contribuem para as avarias da ferramenta, tais como, deformação plástica, trincas mecânicas e térmicas, lascamento e quebra (GROOVER, 2010).

2.3.3 Critério de Fim de Vida da Ferramenta

Trent e Wright (2000, p. 251) definem vida da ferramenta como “a quantidade de material removido por uma ferramenta, em condições de corte padronizadas, antes do desempenho da ferramenta se tornar inaceitável ou a ferramenta ser usada por uma quantidade padrão”.

Ainda mais, pode ser expressa como o tempo em que uma aresta de corte trabalha efetivamente antes de ser substituída. Para isso, deve-se adotar um critério para determinar o fim de vida sem prejudicar as condições econômicas do processo produtivo. O desgaste pode ser medido e representado pelos parâmetros: desgaste médio de flanco (VB_B); desgaste máximo de flanco ($VB_{m\acute{a}x}$); desgaste de ponta (VB_C); desgaste de entalhe (VB_N); e profundidade da cratera (K_T), conforme Figura 18 (FERRARESI, 1977), (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Figura 18- Medição do desgaste das ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Rebeyka (2016, p.171).

A norma ISO 8688-1 (1989), que especifica os critérios para os ensaios de vida da ferramenta no fresamento frontal, determina que um tipo e um valor numérico de desgaste sejam predefinidos para estabelecer o fim de vida da ferramenta de corte. O desgaste de flanco (VB) é o tipo mais utilizado, mas salienta que o desgaste de cratera na face da ferramenta também pode ser utilizado.

Sobre o valor numérico da marca de desgaste, a norma aborda que a grandeza utilizada para determinar a vida útil da ferramenta depende da quantidade de material e, conseqüentemente, os custos associados aos ensaios. Se o valor limite for muito alto, o custo pode exceder o valor. Se o valor limite for muito baixo, o resultado pode não ser confiável. Deste modo, os valores dos critérios podem variar dependendo da operação e das variáveis independentes de entrada do ensaio. Para isso, a norma divide os critérios em pequeno, normal e grande e recomenda uma faixa de valores, conforme apresentado na Tabela 3 (ISO 8688-1, 1989).

Tabela 3- Valores dos critérios de fim de vida recomendados pela norma ISO 8688-1.

Desgaste de flanco (VB)	Critério (mm)		
	Pequeno	Normal	Grande
Uniforme	0,2	0,35	0,5
Não uniforme	0,9	1,2	1,5
Localizado	0,8	1	1,2

Fonte: Adaptado de ISO 8688-1 (1989).

O critério **pequeno** oferece menos informações sobre a capacidade de uma ferramenta nas condições do ensaio. O uso desses valores mínimos é permitido somente quando os custos com materiais forem muito alto ou quando as ferramentas de corte são muito resistentes ao desgaste. O critério **normal** é o equilíbrio entre a confiabilidade, os custos de teste e a intensidade de deterioração normal. Geralmente, um dos valores numéricos normais será alcançado antes da destruição total das ferramentas de corte. Já o critério **grande** fornece mais informações sobre a capacidade de uma ferramenta sob certas condições de teste. O uso desses valores é especialmente recomendado nos casos em que a causa da destruição da ferramenta deve ser avaliada. Em contrapartida, os custos dos ensaios são maiores e os equipamentos podem ser sobrecarregados, o que não é indicado (ISO 8688-1, 1989).

2.3.4 Rugosidade da superfície usinada

Machado, et al. (2015) explicam que a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos que são resultado da ação inerente do processo de corte. Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem. A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros, tais como os apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Principais parâmetros de rugosidade.

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

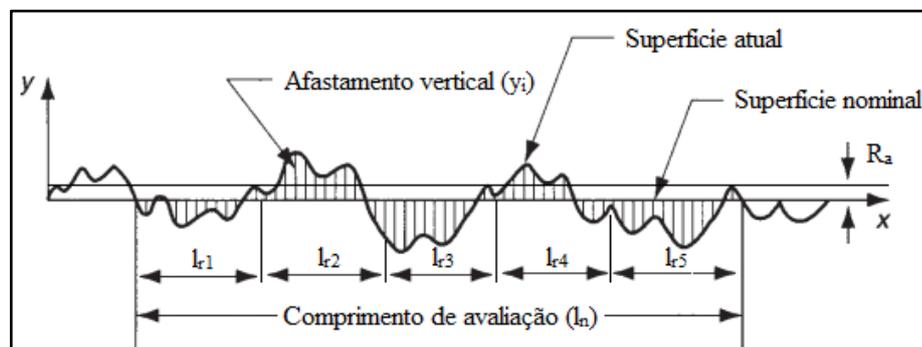
Fonte: Adaptado de Machado, et al. (2015, p.312).

Outrossim, Souza (2016, p. 233) afirma que

Dentre os parâmetros de rugosidade, o mais utilizado é o R_a (*Roughness Average*), amplamente empregado na indústria em controle de processos, em especial, no desgaste da ferramenta. Como representa um valor médio, é um parâmetro estável, que não recebe influência de efeitos ocasionais.

Ademais, Machado, et al. (2015) definem R_a como o desvio médio aritmético dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de avaliação (l_n), podendo ser ilustrado pela Figura 19.

Figura 19- Desvio médio aritmético (R_a).



Fonte: Adaptado de Groover (2010, p.89).

O comprimento de amostragem (l_r) ou *cut-off* é um parâmetro que deve ser observado durante a medição, segundo a ABNT NBR ISO 4287 (2002, p. 4), “é o comprimento na direção do eixo X, usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação”. Já o comprimento de avaliação (l_n) é definido como “comprimento na direção do eixo X, usado para estabelecer o perfil sob avaliação, [...] podendo conter um ou mais comprimentos de amostragem (l_r)”. Machado, et al. (2015) cita que, normalmente, é recomendado um comprimento de avaliação (l_n) equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem (l_r).

Para definição dos comprimentos de amostragem, a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008) instrui que se deve, primeiramente, observar a superfície e decidir se o perfil da rugosidade é periódico ou não. A Tabela 5 apresenta os valores dos comprimentos de amostragem e comprimentos de avaliação conforme a norma.

Tabela 5- Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação.

Perfil não periódico (retífica, esmerilhamento)	Perfil periódico (torneamento, fresamento)	Comprimento de	
		amostragem l_r (mm)	avaliação l_n (mm)
Ra (μm)	RS _m (mm) ¹		
Até 0,02	Até 0,04	0,08	0,4
De 0,02 a 0,1	De 0,04 a 0,13	0,25	1,25
De 0,1 a 2	De 0,13 a 0,4	0,8	4
De 2 a 10	De 0,4 a 1,3	2,5	12,5
De 10 a 80	De 1,3 a 4	8	40

Fonte: Adaptado ABNT NBR ISO 4288 (2008).

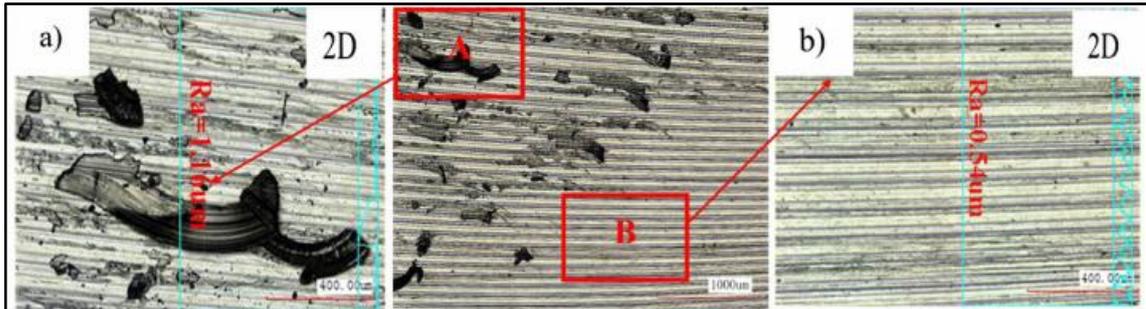
Em sua pesquisa, Rawangwong et al. (2014) investigaram a influência dos parâmetros de corte no fresamento frontal do AA 7075, utilizando uma ferramenta de metal-duro. As variáveis dependentes de saída foram a rugosidade da superfície e o desgaste da ferramenta. O estudo concluiu que a velocidade de corte e o avanço afetaram significativamente a rugosidade da superfície, e que um maior valor de v_c e menor de f_z diminuiriam a rugosidade.

Os resultados são semelhantes aos encontrados por Liu, et al. (2015) em suas pesquisas. Ao avaliar o efeito dos danos da ferramenta de corte na rugosidade da superfície usinada no fresamento frontal de um aço inoxidável martensítico, os autores concluíram que

¹ Segundo a ABNT NBR ISO 4287 (2002, p. 11) RS_m é o “valor médio da largura dos elementos do perfil, no comprimento de amostragem”, medido em mm.

durante a usinagem, o valor da rugosidade média (R_a) e seus desvios na superfície usinada aumentaram significativamente após a intensificação do desgaste. O grande espaço entre o inserto desgastado e a peça, bem como a intensa vibração do fuso, comprimiram os cavacos contra a superfície, motivando sua adesão na peça, o que contribuiu para o aumento da rugosidade. Este fenômeno pode ser visto na Figura 20.

Figura 20- Cavaco comprimido contra a superfície usinada.

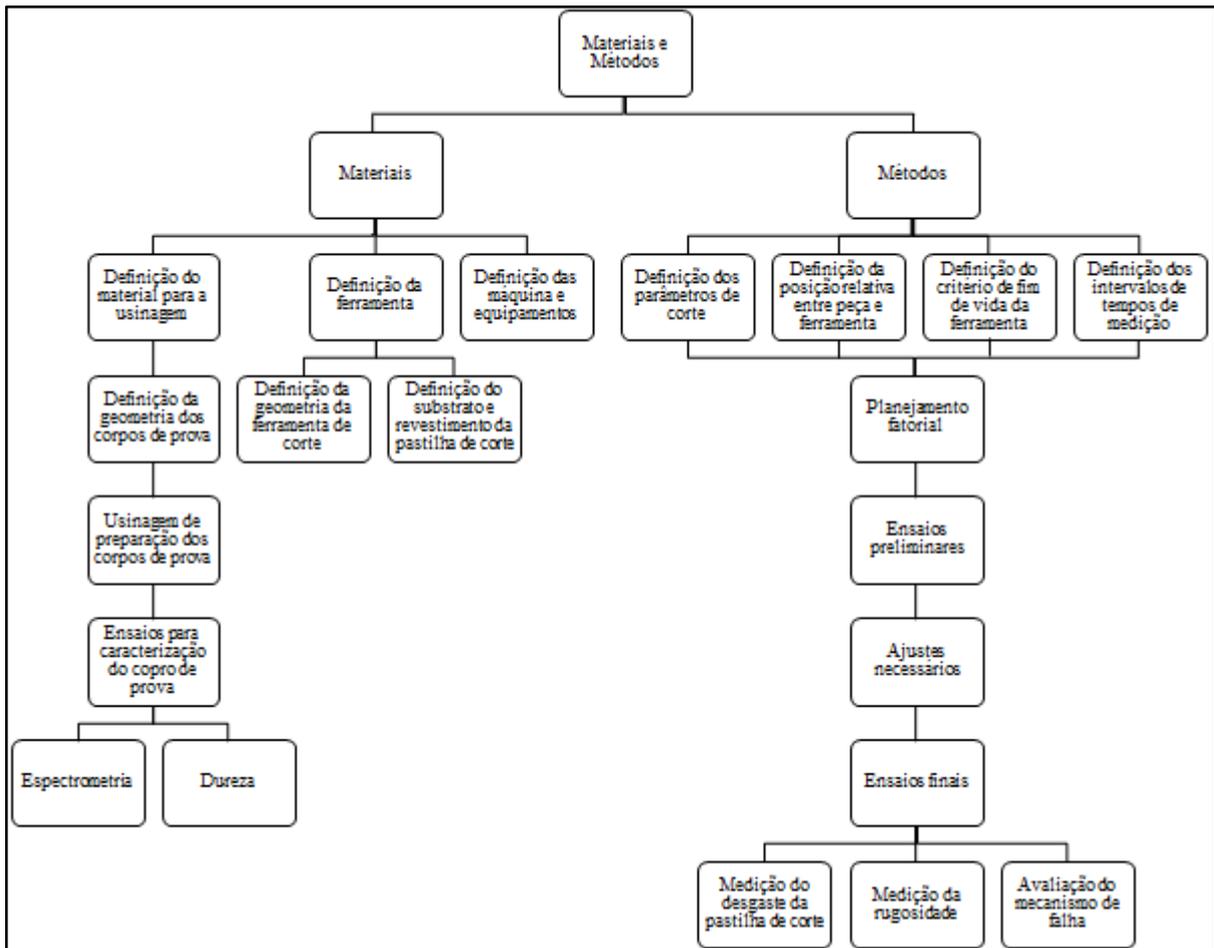


Fonte: Liu, et al. (2015, p.263).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 21 apresenta o fluxograma das atividades elaboradas para atingir os objetivos propostos neste trabalho.

Figura 21- Fluxograma para execução do experimento.



Fonte: O autor.

3.1 Materiais e equipamentos

A seguir, são apresentados os materiais e equipamentos utilizados no experimento.

3.1.1 Corpo de prova

O material dos corpos de prova é o aço inoxidável martensítico, obtido pelo processo de fundição pela Acearia Frederico Missner S/A, de Luiz Alves, SC, e atende a norma

ASTM 743, grau CA6NM. Foram fabricados dois corpos de prova para cada lote de fundição, sendo quatro diferentes lotes, totalizando oito corpos de prova (Figura 22).

Figura 22- Corpos de prova brutos de fundição.

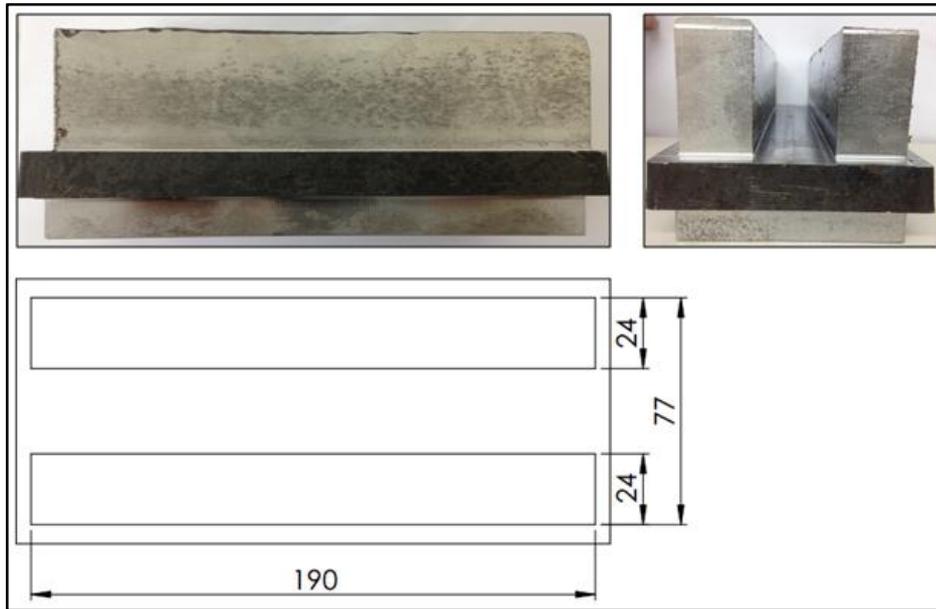


Fonte: O autor.

Em seguida, foi necessário usinar os corpos de prova, com o intuito de padronizar sua geometria, regularizar a superfície e remover a carepa de fundição da região do corpo de prova que, posteriormente, será usinada. Este procedimento é fundamental, visto que, a camada superficial do material fundido apresenta propriedades diferentes do restante do material, podendo comprometer os resultados da pesquisa. Desta forma, obtiveram-se peças com as dimensões mostradas na Figura 23.

Neste momento, também, foram usinados rebaixos para fixação dos corpos de prova na máquina, garantindo a rigidez necessária para o experimento. A ferramenta utilizada para esta operação não faz parte deste estudo, portanto não será abordada.

Figura 23- Dimensão do corpo de prova (mm), após a usinagem de preparação.



Fonte: O autor.

3.1.2 Cabeçote e inserto

O cabeçote de fresamento utilizado no estudo é codificado pela Sandvik Coromant como R300-063Q22-16M, suas características são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6- Cabeçote utilizado no experimento

	Diâmetro máx. (DCX)	Ø63 mm
	Diâmetro interno de corte (DC)	Ø47 mm
	Profundidade máx. de mergulho (AZ)	3,8 mm
	Profundidade de corte máx. (APMX _{FFW})	8 mm
	Largura máx. (APMX _{EFW})	12 mm
	Comprimento funcional (LF)	50 mm
	Diâmetro de conexão (DCON)	Ø22 mm
	Número de dentes	4
	Passo	M- Fino
	Rotação máx.	18200 rpm

Fonte: Adaptado de <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/Pages/productdetails.aspx?c=R300-063Q22-16M> acesso em 28 jan. de 2018.

3.1.3 Máquina ferramenta

Para a usinagem dos corpos de prova, utilizou-se um centro de usinagem vertical ROMI, modelo Discovery D800; comando numérico computadorizado (CNC) Fanuc Oi Mc; cursos dos eixos x, y e z de 800, 530 e 580 mm respectivamente; potência do motor principal de 15 kW; rotação máxima do eixo árvore de 7500 rpm; avanço máximo dos eixos de 30 m/min e fixação do cabeçote por meio de cone ISO BT-40.

3.1.4 Espectrômetro e durômetro

As composições químicas dos corpos de prova foram analisadas em um espectrômetro de energia dispersiva da marca OXFORD *Instruments* modelo Foundry-Master Xline (Figura 25a). Já a dureza do material foi obtida com auxílio de um durômetro marca Heckert, pelo método Brinell, com penetrador esférico de $\varnothing 2,5$ mm, aplicando uma carga de 187,5 kgf (Figura 25b).

Figura 25- Espectrômetro e durômetro utilizados nos ensaios.



Fonte: O autor.

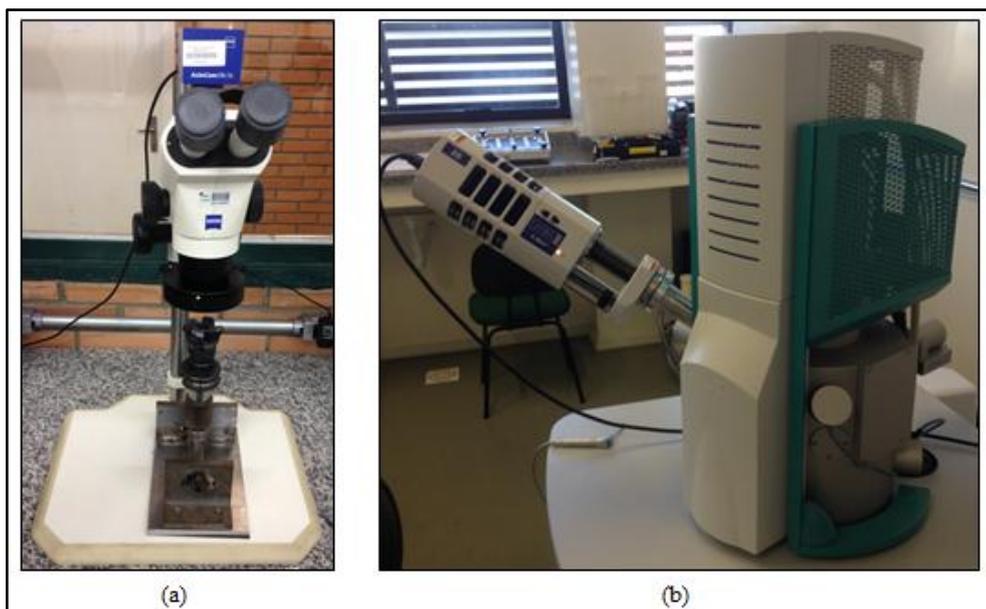
Com o objetivo de avaliar a homogeneidade da dureza, tendo em vista que se trata de um material obtido pelo processo de fundição, realizou-se a medição em três pontos do corpo de prova no início e no término de cada ensaio.

3.1.5 Microscópio estéreo e eletrônico de varredura (MEV)

Para obter as imagens ópticas e as dimensões para quantificar o desgaste da ferramenta de corte em cada intervalo de tempo, aplicou-se um microscópio estéreo, da marca ZEISS, modelo STEMI 2000-C, com ampliação máxima de cinquenta vezes (Figura 26a). Nesta etapa, o cabeçote é removido da máquina, mas o inserto não é removido do cabeçote, evitando o contato com a aresta cortante. Este procedimento é necessário, pois, ao manipular o inserto, o material aderido no ponto de contato entre ferramenta e peça pode ser removido, prejudicando os resultados do ensaio. Além disso, ao desmontar o inserto do cabeçote, existe a probabilidade de uma fixação incorreta ao montá-lo.

Para compreender o mecanismo de falha, após o término do ensaio, foi empregado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca TESCAN, modelo VEJA LM3, com aumento máximo de 300.000x (Figura 26b). Este equipamento possui um Sistema de Energia Dispersiva (EDS) que possibilita a análise da composição química do material presente na região desgastada da aresta de corte.

Figura 26- Microscópio estéreo e eletrônico de varredura (MEV).



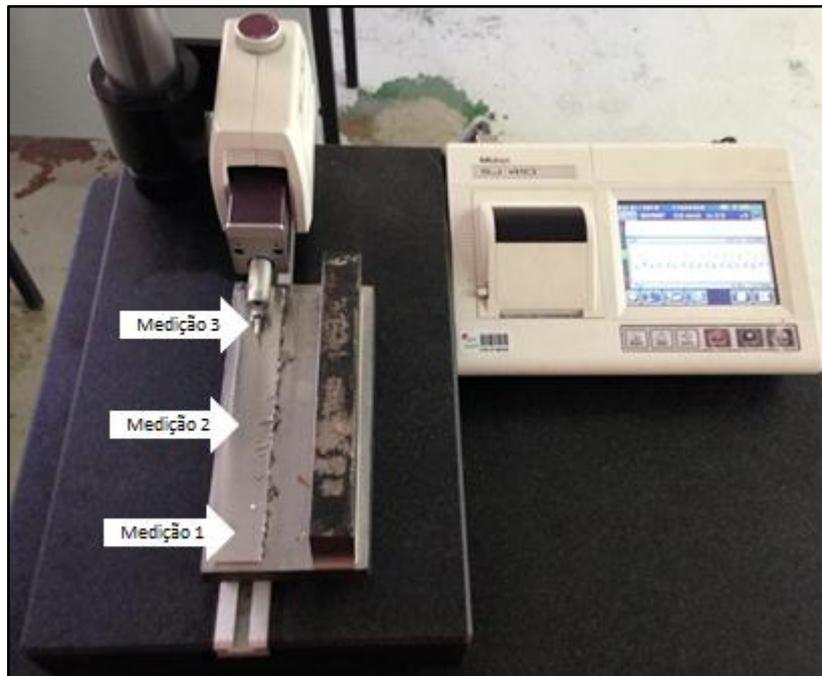
Fonte: O autor.

3.1.6 Rugosímetro

Para quantificar a qualidade da superfície usinada, empregou-se um rugosímetro, modelo Mitutoyo SJ-410, com raio de ponta do apalpador de 5 μm . Baseado na ABNT NBR ISO 4288 (2008), considerou-se o perfil da rugosidade periódico e os valores esperados de RS_m variam entre 0,4 e 1,3 mm, tendo em vista os parâmetros de avanço por dente (f_z) adotados nesta pesquisa (ver Tabela 8).

Sendo assim, assumiu-se como parâmetro dependente de saída, o desvio médio aritmético da rugosidade (R_a) com comprimento de amostragem (l_r) ou *cut-off* de 2,5 mm. O comprimento de avaliação (l_n) é equivalente a cinco vezes o comprimento de amostragem, totalizando assim a distância de 12,5 mm. Realizaram-se três medições na superfície usinada, conforme Figura 27.

Figura 27- Pontos de medição da rugosidade.



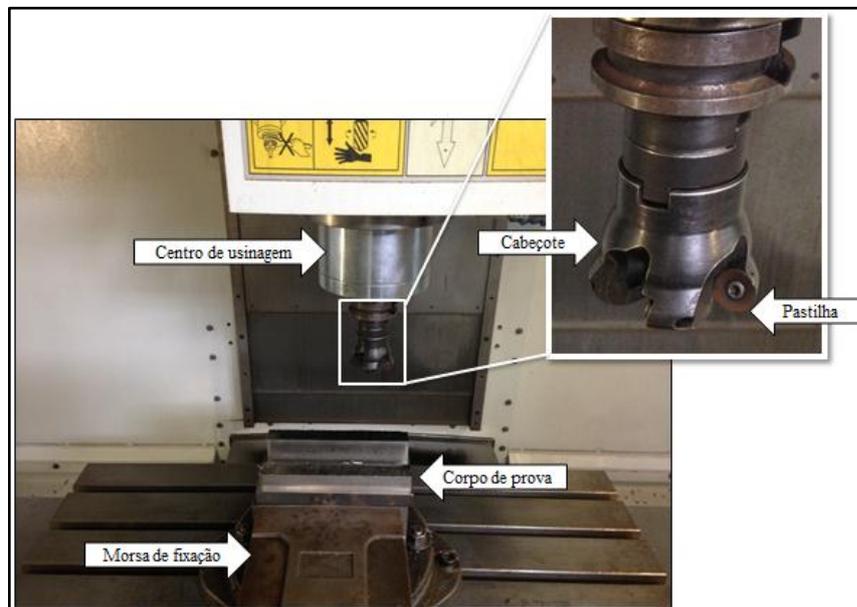
Fonte: O autor.

3.2 Métodos da experimentação

Inicialmente, para realização do experimento, é fundamental usar os corpos de prova, com objetivo de remover imperfeições (defeitos oriundos do processo de fundição do

material). Em seguida, são realizadas as medições de dureza e espectrometria, a fim de caracterizar o material a ser usinado. O ensaio em si consiste no fresamento frontal com cabeçote fresador de um corpo de prova com parâmetros definidos por um período de tempo pré-determinado de até 25 min. Em cada intervalo de tempo, são coletados os dados dependentes de saída, sendo eles: desgaste de flanco (VB_B) e rugosidade média (R_a). Ao final, são realizadas novas medições de dureza (verificar sua homogeneidade) e registradas as imagens para análise do mecanismo de falha do inserto por meio do MEV/EDS. A Figura 28 apresenta a configuração do experimento.

Figura 28- Configuração do experimento.



Fonte: O autor.

3.2.1 Parâmetros de corte

A profundidade de corte (a_p) foi definida para não exceder 25% do diâmetro do inserto (iC), conforme recomendação do fornecedor. A largura de corte (a_e) $<$ 50% do diâmetro efetivo da fresa descreve as condições encontradas no fresamento de pás de rotores e pás diretrizes de turbinas hidráulicas, devido à geometria do componente.

Para estabelecer o avanço por dente (f_z), é fundamental analisar o diâmetro da ferramenta e a profundidade de corte (a_p). Calculou-se, então, o diâmetro efetivo de corte ($D_{cap} = 52,57$ mm) por meio da Equação 1.

Neste caso, tem-se que $a_e < D_{cap}/2$ e $a_p < iC/2$. Mantendo-se a espessura média de cavaco recomendada pela Sandvik ($h_m \cong 0,2$ mm), determinou-se por intermédio da Equação 3 o avanço por dente recomendado de $f_z \cong 0,55$ mm/dente. Nesta pesquisa, optou-se por avaliar um nível acima do recomendado e um nível igualmente abaixo.

Por fim, adotaram-se nos ensaios as velocidades de corte (v_c) conforme faixas usualmente utilizadas na empresa HISA/WEG, devido aos longos anos de experiência empenhados no fresamento do aço inoxidável ASTM 743 CA6NM.

Os parâmetros de corte definidos para o experimento, bem como seus níveis estão representados na Tabela 8. Optou-se por uma usinagem sem adição de fluidos de corte.

Tabela 8- Parâmetros de corte e níveis do experimento.

Parâmetros de corte	Unid.	Níveis	
		-1	+1
Velocidade de corte (v_c)	m/min	220	260
Avanço por dente (f_z)	mm/dente	0,4	0,7
Profundidade de corte (a_p)	mm	0,5	---
Largura de corte (a_e)	mm	24	---
Comprimento de corte	mm	190	

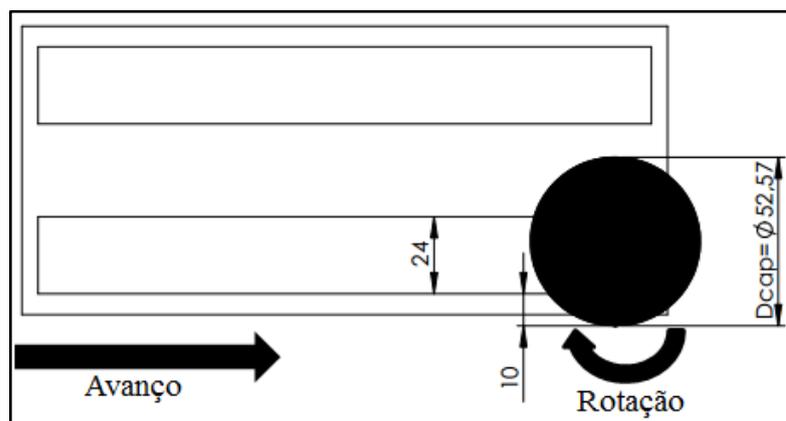
Fonte: O autor.

Como a usinabilidade do aço inoxidável martensítico assemelha-se à dos aços carbonos, os parâmetros de corte recomendados pelo fabricante do inserto utilizado nesta pesquisa são: para aços carbonos (ISO-P) $v_c = 135- 260$ m/min e $f_z = 0,07- 0,46$ mm/dente; e para aços inoxidáveis (ISO-M), $v_c = 115- 245$ m/min e $f_z = 0,07- 0,46$ mm/dente.

3.2.2 Posicionamento relativo entre peça e ferramenta

Conforme abordado no item 2.2.3, o posicionamento relativo entre peça e ferramenta é extremamente importante, uma vez que determina o mecanismo de formação do cavaco. Baseado nas pesquisas realizadas por Caldeirani e Diniz (1999) e Bagci e Aykut (2014), determinou-se o posicionamento da ferramenta e peça, conforme se verifica na Figura 29.

Figura 29- Posicionamento relativo entre peça e ferramenta.



Fonte: O autor.

Quanto ao sentido de avanço, a rotação da ferramenta e seu posicionamento em relação à peça, nota-se que a espessura de corte (h) cresce, iniciando de um valor menor e finalizando com um valor maior, caracterizando um corte discordante.

3.2.3 Intervalo de tempo das medições e critério de fim de vida

Os intervalos de tempo para obter os valores de rugosidade da peça e quantificar o desgaste da ferramenta de corte foram definidos com base na série de Renard (R5 e R10), sendo eles: 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 12,5; 16; 20 e 25 min. Portanto, para cada intervalo de usinagem descrito, os dados das variáveis dependentes de saída são coletados, com o objetivo de avaliar o comportamento da usinagem de cada ensaio até o tempo limite de 25 min.

O valor quantitativo de desgaste que caracteriza o fim de vida da ferramenta, definido neste experimento, considerou as características da usinagem e os parâmetros de corte aplicados, além da norma ISO 8688-1 que orienta este critério. Para tanto, se definiu como critério de fim de vida um desgaste de flanco médio VB_B igual ou maior que 0,3 mm.

3.2.4 Planejamento do experimento e análise estatística

Considerando os parâmetros de corte e seus níveis definidos para realização dos ensaios, utilizou-se um planejamento fatorial 2^2 e duas repetições, totalizando oito ensaios. Vale salientar que o planejamento é completamente aleatorizado, sendo que o delineamento dos ensaios, a interpretação dos dados e o planejamento fatorial foram assistidos pelo *software* estatístico SAS[®] 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

A Tabela 9 apresenta o delineamento randômico do experimento;

Tabela 9- Delineamento do experimento.

Ensaio	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Ensaio	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)
1	220	0,40	5	220	0,70
2	260	0,40	6	260	0,70
3	260	0,70	7	260	0,40
4	220	0,70	8	220	0,40

Fonte: O autor.

Nesta pesquisa, foram gerados dois modelos estatísticos para análise de variância (ANOVA), para tanto se utilizou o procedimento *mixed* e o comando *repeated*. Adicionalmente realizou-se um teste T pareado, dois a dois, para se determinar a diferença, ou não, entre os ensaios repetidos.

Para análise da variável dependente de saída rugosidade (R_a), o modelo estatístico foi gerado considerando um delineamento em parcelas subdivididas com 4 fatores. Consideraram-se como efeitos fixos os fatores velocidade de corte (220 vs. 260 m/min), avanço por dente (0,4 vs. 0,7 mm/dente), pontos de medição de rugosidade (R_{a1} , R_{a2} , R_{a3}) e tempos (1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 12,5; 16; 20 e 25 min.). Todas as interações possíveis também foram testadas. O efeito aleatório de peça dentro da interação Velocidade*Avanço foi utilizado como erro termo para se determinar o efeito de tratamento, segundo arranjo fatorial dos tratamentos. A estrutura de variância-covariância que melhor se ajustou ao modelo estatístico, de acordo com critério de informação corrigido de Akaike (AICC), foi a estrutura AR (1). A premissa de normalidade do resíduo foi checada pelos gráficos de diagnóstico do *proc mixed* e pelo teste Shapiro-Wilk do *proc univariate* utilizando o resíduo estudentizado (*output* do *proc mixed*).

Para análise da variável desgaste (VB_B), utilizou-se um modelo semelhante ao descrito anteriormente. Entretanto, considerando-se três fatores de efeitos fixos: velocidade de corte, avanço por dente, tempo e todas as interações possíveis. A estrutura de variância-covariância que melhor se ajustou ao modelo foi a ARMA (1,1).

Os efeitos das variáveis independentes no *proc mixed* foram determinados pelo teste F utilizando a soma de quadrados tipo III. Quando necessário, as médias entre os tratamentos foram comparadas utilizando o teste T protegido (i.e., a opção *diff* do comando *lsmeans*) e o

comando *slice* foi adicionado ao procedimento, para identificar o efeito de tratamento em momentos específicos. Os resultados foram reportados como *lsmeans* \pm *epm*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de fresamento frontal do aço inoxidável martensítico ASTM 743 CA6NM com ferramenta de metal-duro revestida, realizado de acordo com os materiais e métodos descritos no capítulo anterior, buscando atender aos objetivos propostos na Seção 1.3.

4.1 Análise química, micrográfica e dureza dos corpos de prova

Os resultados da análise química e ensaio de dureza dos corpos de prova foram comparados com a especificação da norma ASTM 743, conforme Tabela 10. Também, os dados foram arranjados na tabela de modo a facilitar a comparação dos ensaios repetidos.

Tabela 10- Análise química (% peso) e ensaio de dureza dos corpos de prova (CP).

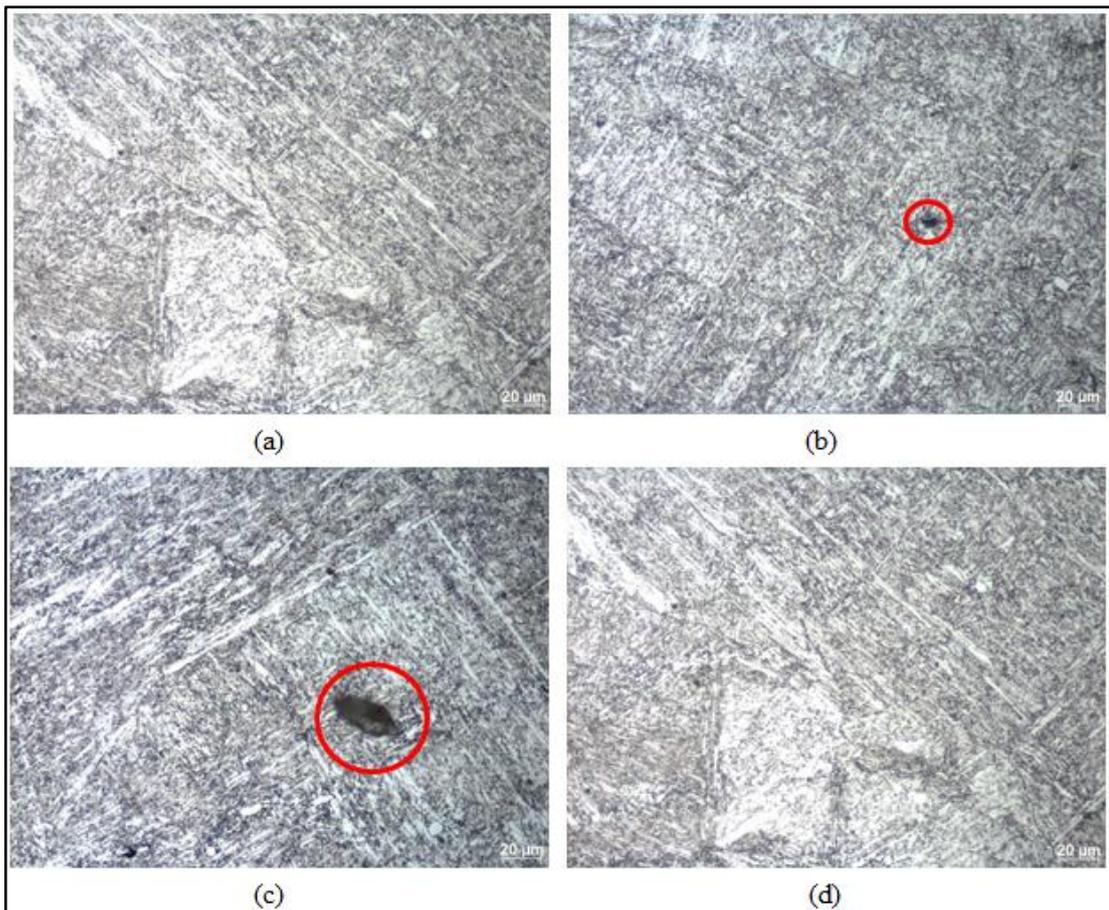
fz (mm/dente)	vc (m/min)	Lote de fundição	Norma ASTM 743	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Dureza
				Máx	Máx	Máx	Máx	Máx	Mín Máx	Mín Máx	Mín Máx	Máx
				0,06	1	1	0,04	0,03	11,5 14	3,5 4,5	0,4 1	285 HB
			CP									
0,4	220	I	1	0,087	0,774	0,794	0,055	0,023	14,5	4,25	0,591	273 HB
		II	4	0,069	0,791	0,77	0,053	0,022	13,8	3,96	0,544	269 HB
	260	IV	8	0,065	0,807	0,755	0,051	0,022	14,2	3,95	0,522	267 HB
		I	1	0,087	0,774	0,794	0,055	0,023	14,5	4,25	0,591	273 HB
0,7	220	II	4	0,069	0,791	0,77	0,053	0,022	13,8	3,96	0,544	269 HB
		IV	7	0,07	0,79	0,731	0,057	0,023	13,8	3,99	0,551	265 HB
	260	I	2	0,07	0,778	0,788	0,055	0,021	14,4	4,21	0,588	275 HB
		III	5	0,073	0,801	0,755	0,055	0,022	13,8	4,04	0,565	268 HB

Fonte: O autor.

Sobre a análise química, os valores apresentados correspondem à média aritmética de três ensaios em uma mesma amostra do corpo de prova, verificou-se divergência em relação à norma ASTM 743 nos valores de carbono (C), fósforo (P) e cromo (Cr). Quanto aos valores descritos de dureza, correspondem ao valor aproximado da média aritmética de seis pontos de medição coletados ao longo da superfície usinada. Os valores então dentro da especificação da norma ASTM 743.

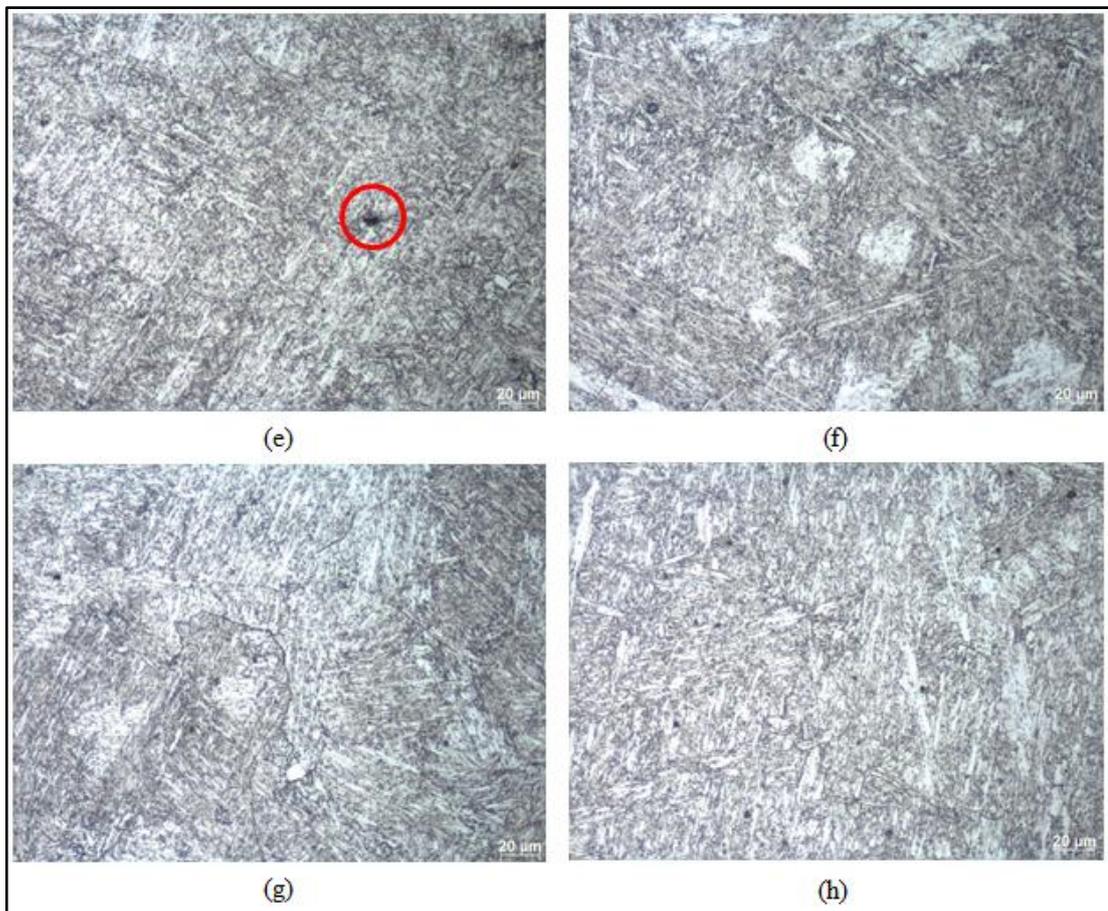
O ensaio micrográfico revelou uma estrutura martensítica que se cruzam entre elas, formando uma complexa rede. Há presença de ferrita e austenita retida, revelando que o tratamento térmico de têmpera e revenimento impediram a dissolução destas fases no material. Também, contatou-se micro inclusões resultantes do processo de fundição, indicado com círculos vermelhos na Figura 30 e Figura 31.

Figura 30- Micrografia (500x) dos corpos de prova dos ensaios realizados com $fz= 0,4$ mm/dente. Sendo (a) e (b) a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I e II respectivamente. Enquanto que (c) e (d) representam a $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV e I respectivamente.



Fonte: O autor.

Figura 31- Micrografia (500x) dos corpos de prova dos ensaios realizados com $f_z = 0,7$ mm/dente. Sendo as figuras (e) e (f) $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II e IV respectivamente. Enquanto que (g) e (h) representam o $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I e III respectivamente.



Fonte: O autor.

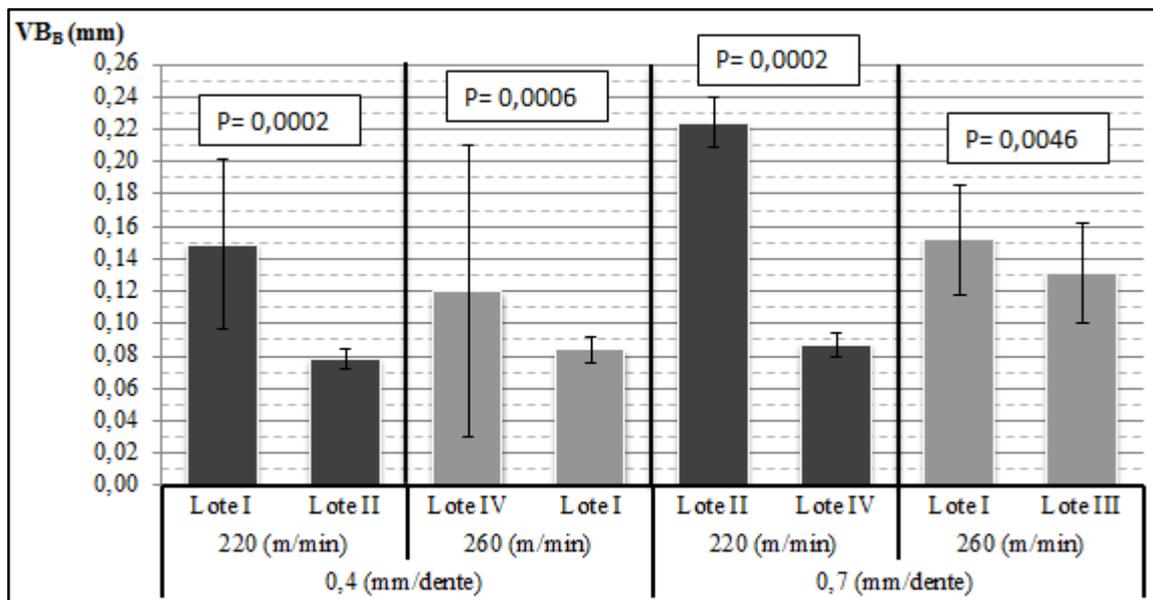
Em geral, é possível constatar que as microestruturas dos corpos de prova avaliados estão em acordo com as especificações do aço ASTM 743, contudo, as estruturas martensíticas em ripas, que se cruzam, e a proporção martensita x austenita são ligeiramente diferentes entre os corpos de prova. Este fenômeno é esperado, pois, existem diferenças de percentual dos elementos químicos que compõem o metal, além do processo de fabricação e as taxas de resfriamento do tratamento térmico sofrerem interferências comuns do processo de fundição.

4.2 Efeito dos parâmetros de corte sobre as falhas da ferramenta

O gráfico da Figura 32 representa a média aritmética e o erro padrão da média dos valores de desgaste de flanco médio VB_B de todas as medições colhidas em cada ensaio. Também expõe os valores de P obtidos nas comparações realizadas por meio de um teste T

com nível de confiabilidade de 95%. Neste modelo optou-se por testar a hipótese de a diferença entre as repetições dos ensaios divergirem de zero. Sendo que para valores de P menor ou igual a 0,05, considera-se diferença significativa; para valores de P entre 0,05 e 0,1, conceitua-se como tendência; já valores acima de 0,1, adota-se como diferença não significativa.

Figura 32- Média e erro padrão do desgaste de flanco médio VB_B de cada ensaio e valores de P do teste T. Valores de $P \leq 0,05$ considera-se diferença significativa.



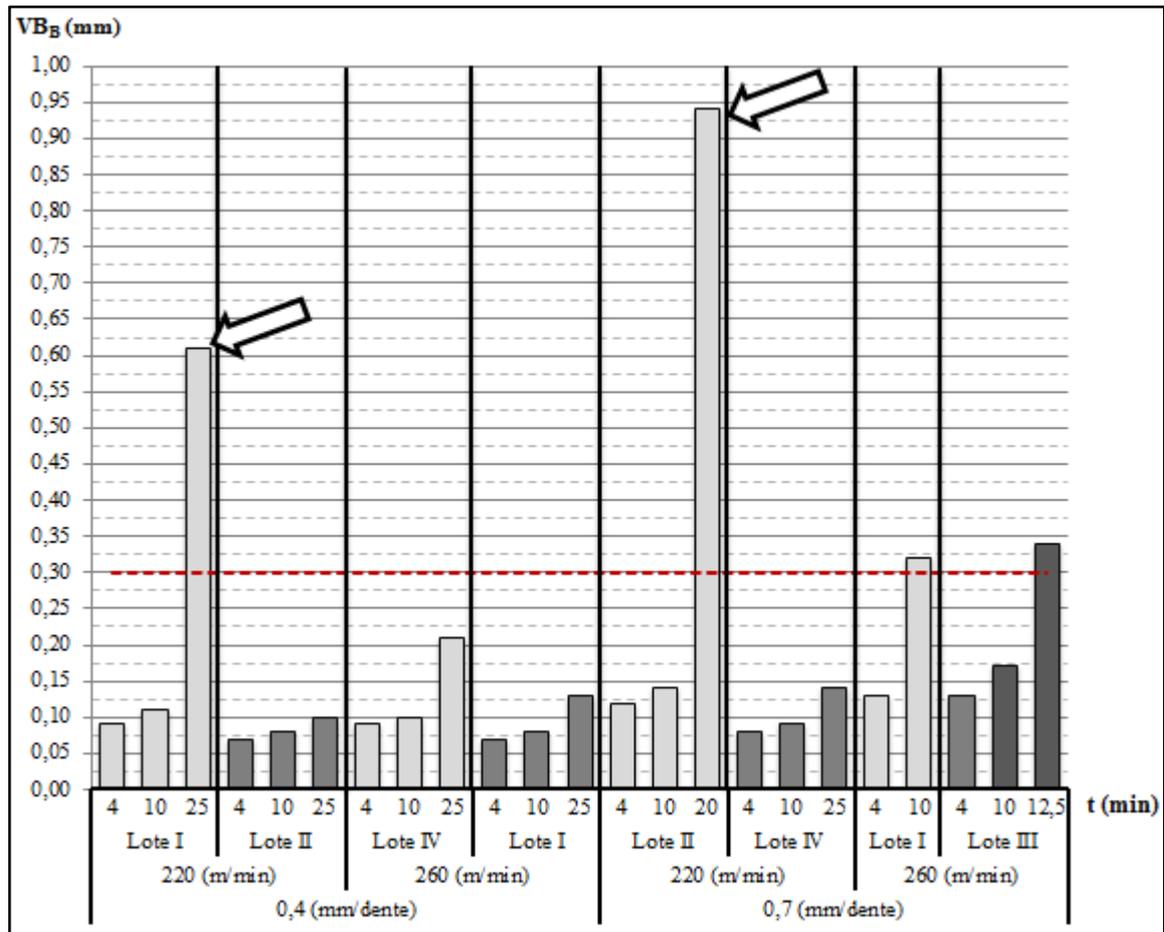
Fonte: O autor.

Para tanto, analisando o resultado do modelo estatístico, observa-se que todas as comparações apresentaram valores de P menor que 0,05. Sendo assim, considera-se que a diferença entre as médias dos ensaios repetidos estatisticamente divergiram de zero, ou seja, houve diferença significativa entre os ensaios repetidos ao nível de confiabilidade de 95%. Que pode ser explicado pela variação dos lotes de fundição dos ensaios repetidos, ou seja, a diferença da composição química, dureza e arranjo micro estrutural dos corpos de prova podem ter interferido nos resultados de desgaste.

Para os ensaios que apresentaram maior diferença (valor de $P=0,0002$), também foram constatados aumentos acentuados do desgaste que provocaram o término dos ensaios, como pode ser visto na Figura 33 que mostra graficamente os valores de desgaste VB_B coletados nos tempos 4,10 e 25 min de cada ensaio. Cabe ressaltar que alguns ensaios não atingiram 25 min. Por este motivo serão apresentados os valores de desgaste de flanco médio VB_B no

tempo em que se atingiu ou superou o critério de fim de vida adotado como $VB_B \geq 0,3$ mm.

Figura 33- Valores de desgaste de flanco médio VB_B , coletados em cada ensaio em três diferentes tempos.

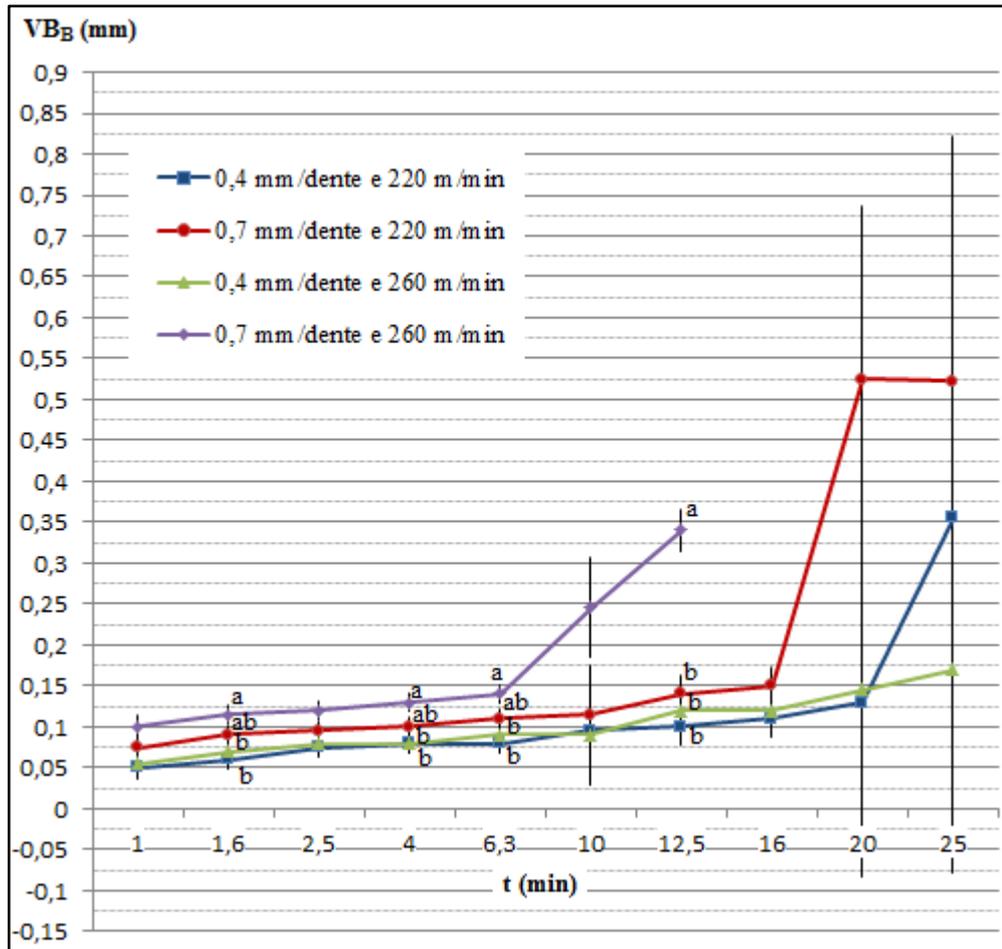


Fonte: O autor.

Por meio da análise estatística ANOVA, constatou-se que houve tendência ($P= 0,0757$) de efeito dos parâmetros velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z) no desgaste VB_B da ferramenta de corte. Também, foi possível avaliar em qual momento houve efeito e se existe diferença significativa entre os parâmetros avaliados.

A Figura 34 indica os valores médios de desgaste VB_B e do erro padrão obtidos no modelo estatístico ao longo do tempo.

Figura 34- Valores médios de desgaste VB_B e erro padrão, obtidos no modelo estatístico em cada intervalo de tempo para todas as condições ensaiadas. Para letras diferentes, consideram-se valores de $P \leq 0,05$.



Fonte: O autor.

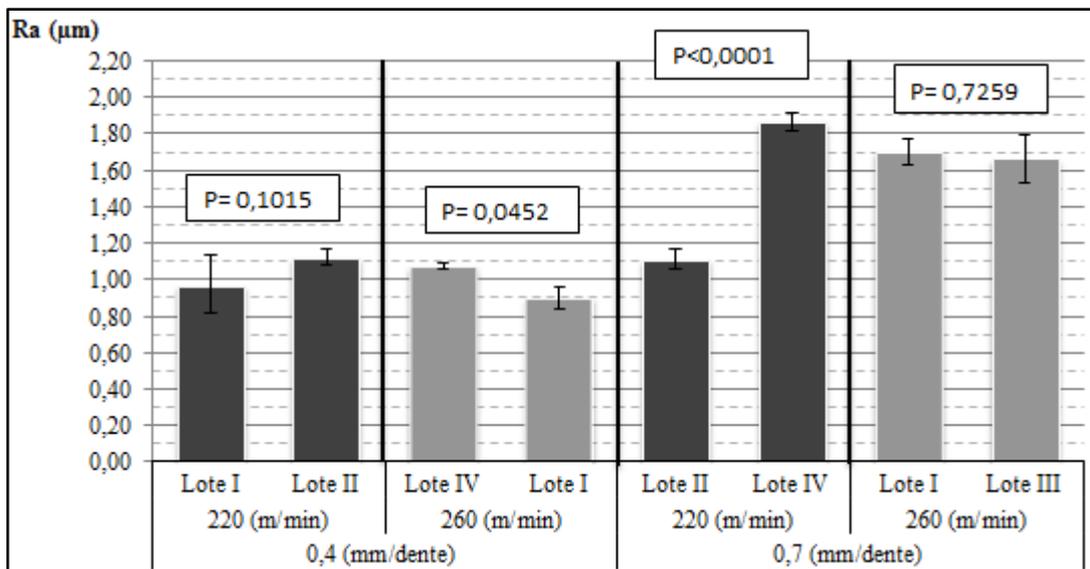
Estatisticamente tem-se que nos tempos 1,6; 4 e 6,3 min houve tendência (P entre 0,051 e 0,1), e que no tempo 12,5 min os valores de média de desgaste VB_B foram significativamente diferentes ($P \leq 0,05$). Nestes momentos, a condição $f_z = 0,7$ mm/dente e $v_c = 260$ m/min apresentou médias de desgaste VB_B maiores em relação às demais condições. Já para $f_z = 0,7$ mm/dente e $v_c = 220$ m/min os resultados de desgaste VB_B foram intermediários. Nas condições com $f_z = 0,4$ mm/dente, os valores foram menores e similares, independentemente do valor da v_c .

Nos tempos 16; 20 e 25 min, não foram realizadas as comparações, pois os ensaios da condição $f_z = 0,7$ mm/dente e $v_c = 260$ m/min foram interrompidos antes.

4.3 Efeito dos parâmetros de corte sobre a superfície usinada

A Figura 35 mostra graficamente a média aritmética e o erro padrão da média da rugosidade R_a de todas as medições colhidas em cada ensaio. Também expõem os valores de P obtidos nas comparações realizadas por meio de um teste T com nível de confiabilidade de 95%. Neste modelo optou-se por testar a hipótese de a diferença entre as repetições dos ensaios divergirem de zero. Assim, para valores de P menor ou igual a 0,05, considera-se diferença significativa; para valores de P entre 0,051 e 0,1, conceitua-se como tendência; já valores acima de 0,1, adota-se como diferença não significativa.

Figura 35- Média e erro padrão da rugosidade R_a de cada ensaio e valores de P obtidos no teste T. Valores de $P \leq 0,05$ considera-se diferença significativa e $P \geq 0,1$, adota-se como diferença não significativa.



Fonte: O autor.

Observam-se na Tabela 11 os resultados das hipóteses testadas entre as repetições.

Tabela 11- Resultado das comparações entre as repetições dos ensaios, considerando os dados de rugosidade.

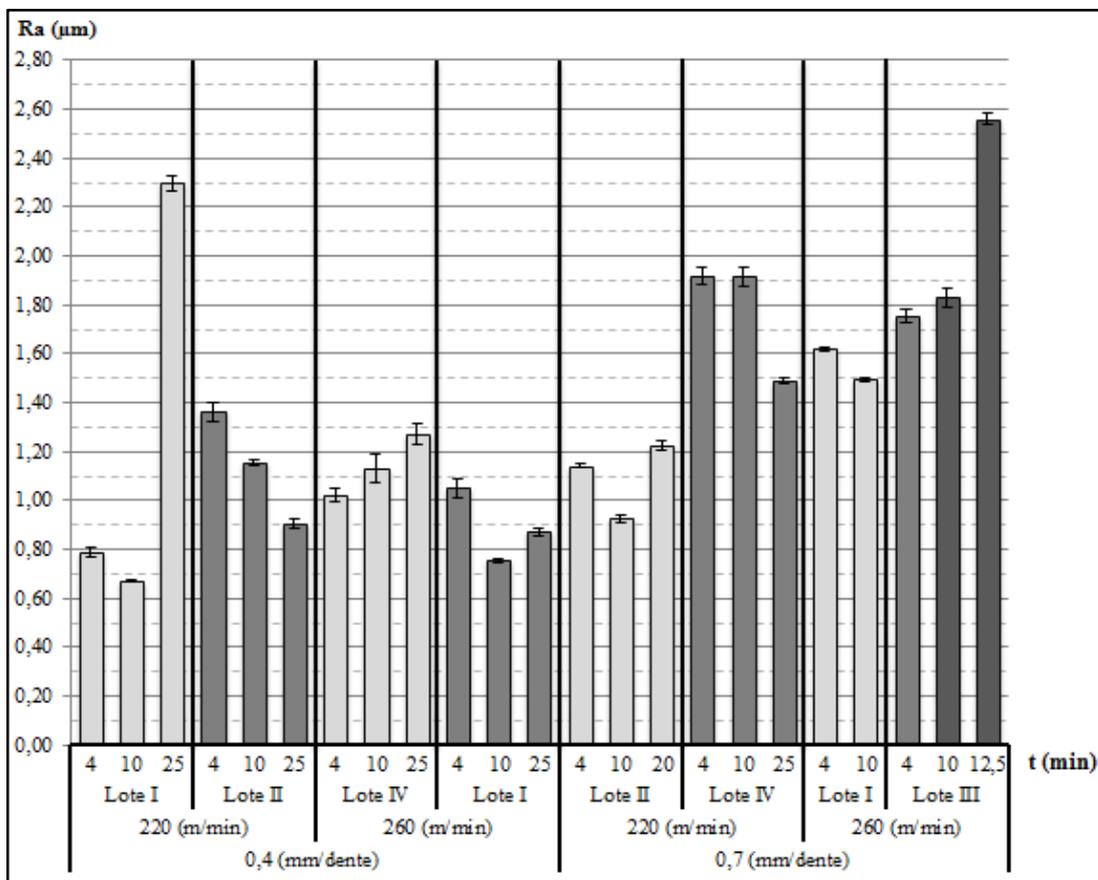
f_z (mm/dente)	v_c (m/min)	Lote	Valor de P	Resultado das comparações
0,4	220	I	0,1015	Não houve diferença significativa
		II		
	260	IV	0,0452	Houve diferença significativa
		I		
0,7	220	II	<0,0001	Houve diferença significativa
		IV		
	260	I	0,7259	Não houve diferença significativa
		III		

Fonte: O autor.

Analisando os dados, pode-se afirmar que a variação da composição química, dureza e arranjo micro estrutural dos corpos de prova para os ensaios repetidos possuem menos influência direta nos resultados de rugosidade R_a do que se obteve nos resultados de desgaste VB_B . Porém, além da influência dos parâmetros de corte, adiciona-se a interferência do desgaste da ferramenta de corte, e seu mecanismo causador, nos dados coletados de rugosidade média R_a .

Isso quer dizer que, o comportamento da rugosidade não é semelhante em alguns ensaios repetidos porque o desgaste da ferramenta também não seguiu um comportamento similar, e que o mecanismo causador de desgaste pode provocar alterações na geometria de corte da ferramenta, comprometendo a regularidade dos dados, como pode ser observado na Figura 36 que ilustra a média aritmética e o erro padrão da média dos três valores de rugosidade R_a coletados nos tempos 4,10 e 25 min de cada ensaio. Vale ressaltar que alguns ensaios não atingiram 25 min. Assim serão apresentados os valores de rugosidade no tempo em que se atingiu o critério de fim de vida de desgaste.

Figura 36- Média aritmética e o erro padrão da média dos valores de rugosidade R_a coletados em três diferentes tempos de cada ensaio.

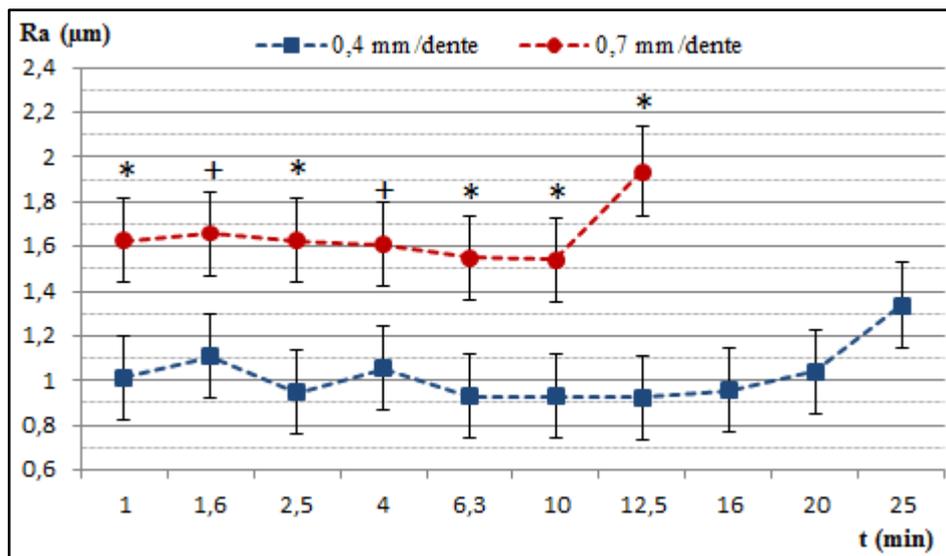


Fonte: O autor.

Por meio da análise estatística ANOVA observa-se o efeito dos parâmetros no resultados de rugosidade R_a . Sendo assim, constatou-se que a velocidade de corte e seus níveis ($v_c = 220$ mm/min e 260 mm/min) não apresentaram efeito significativo para os resultados obtidos de rugosidade R_a . Entretanto, houve efeito significativo para o avanço por dente ($P = 0,05$).

Ainda sobre o parâmetro avanço por dente, compararam-se os níveis $f_z = 0,4$ mm/dente e $0,7$ mm/dente, tendo como objetivo avaliar se há ou não diferença significativa entre os níveis em cada intervalo de tempo que foram coletados os dados. A Figura 37 representa, por meio do gráfico em função do tempo, os valores médios e o erro padrão da rugosidade R_a obtidos no modelo estatístico. Adotou-se o símbolo * para os intervalos de tempo em que houve diferença significativa entre os níveis e + para quando houve tendência.

Figura 37- Valores de rugosidade R_a em cada intervalo de tempo para $f_z = 0,4$ mm/dente e $0,7$ mm/dente. Adotou-se * para valores de $P \leq 0,05$ e + para valores de P entre $0,05$ e $0,1$.



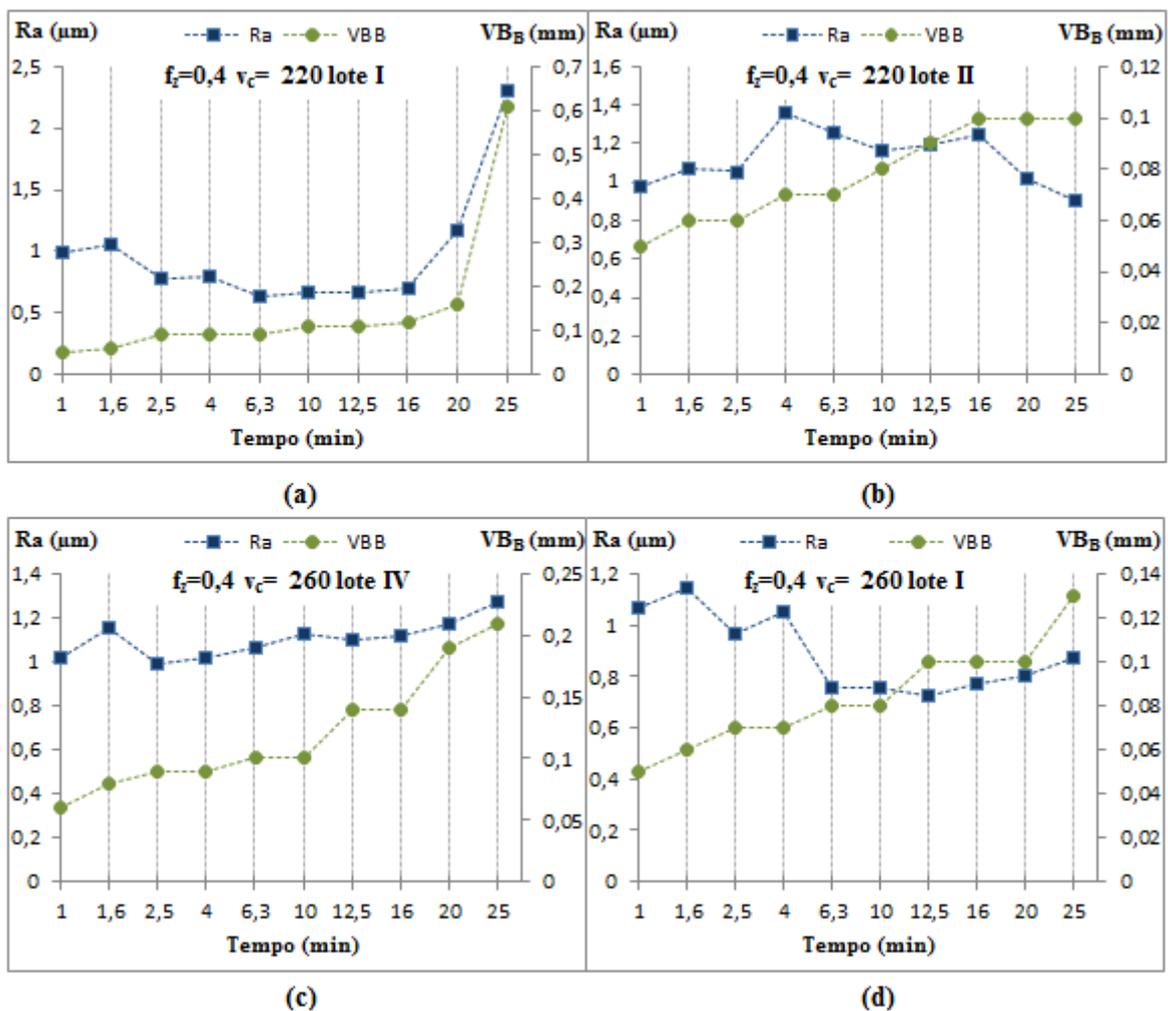
Fonte: O autor.

Em resumo, para os tempos 1; 2,5; 6,3; 10 e 12 min, as diferenças entre os níveis foram significativas, e para os tempos 1,6 e 4 min, considera-se tendência. Nestes intervalos de tempo as médias da rugosidade R_a foram estatisticamente maiores para o tratamento $f_z = 0,7$ mm/dente. É importante esclarecer que alguns ensaios de $f_z = 0,7$ mm/dente atingiram o critério de fim de vida de desgaste antes de completar 25 min, e por este motivo não foi possível comparar os níveis de f_z nos tempos 16, 20 e 25 min.

4.4 Interação das falhas da ferramenta com a rugosidade

Nesta seção serão apresentados os gráficos que interagem o desvio médio aritmético (R_a) com o desgaste de flanco médio (VB_B) em função do tempo. A Figura 38 ilustra o comportamento para as condições $f_z=0,4$ mm/dente. A Figura 38 (a) e Figura 38 (b) representam a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I e II respectivamente. Enquanto que, a Figura 38 (c) e Figura 38 (d) representam a $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV e I respectivamente.

Figura 38- Interação entre R_a e VB_B , em função do tempo, na condição $f_z=0,4$ mm/dente, para $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I (a) e II (b) e para $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV (c) e I (d)

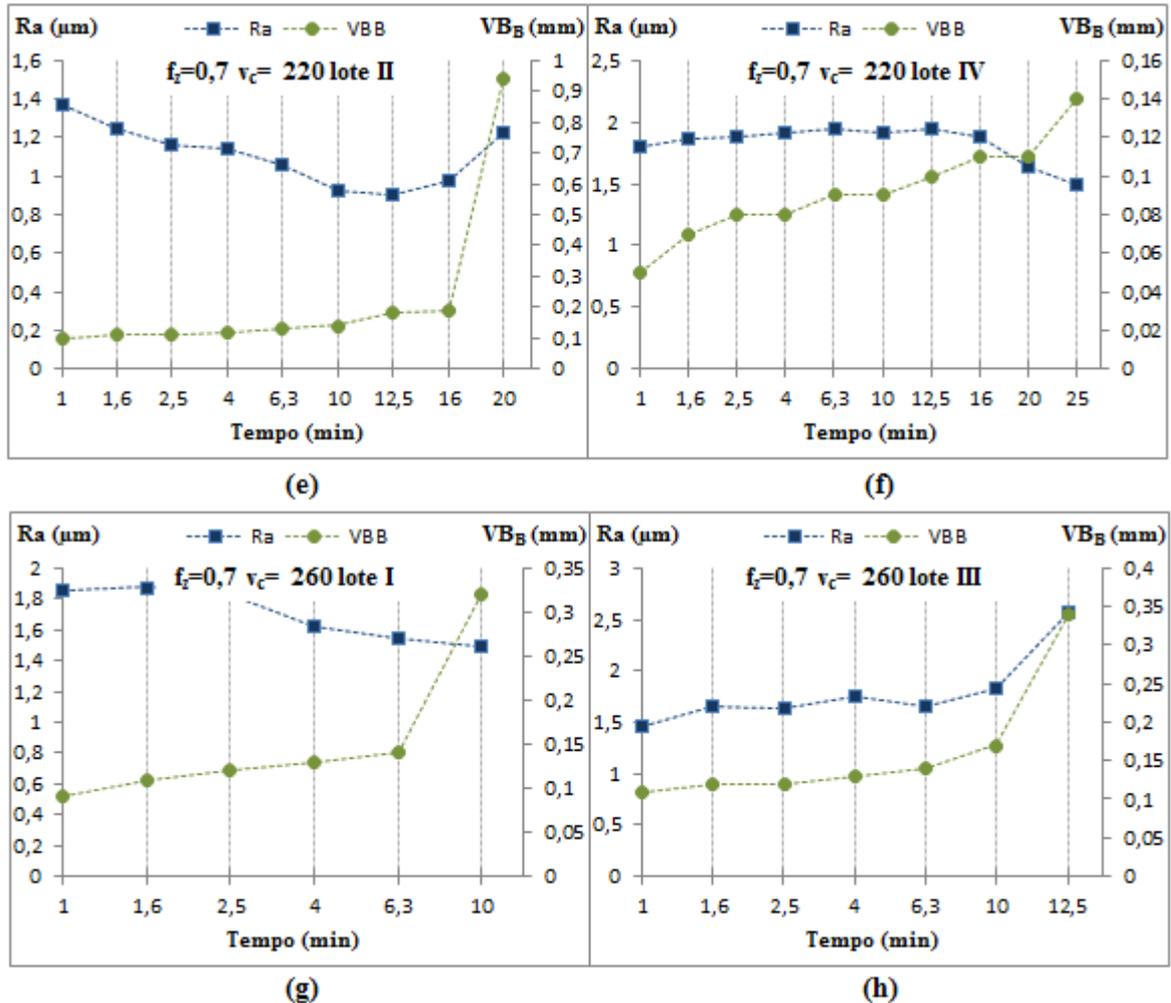


Fonte: O autor.

A Figura 39 mostra o comportamento para as condições $f_z=0,7$ mm/dente. A Figura 39 (e) e Figura 39 (f) representam a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II e IV respectivamente.

Enquanto que, a Figura 39 (g) e Figura 39 (h) representam a $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I e III respectivamente.

Figura 39- Interação entre R_a e VB_B , em função do tempo, na condição $f_z=0,7$ mm/dente, para $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II (e) e IV (f) e para $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I (g) e III (h)



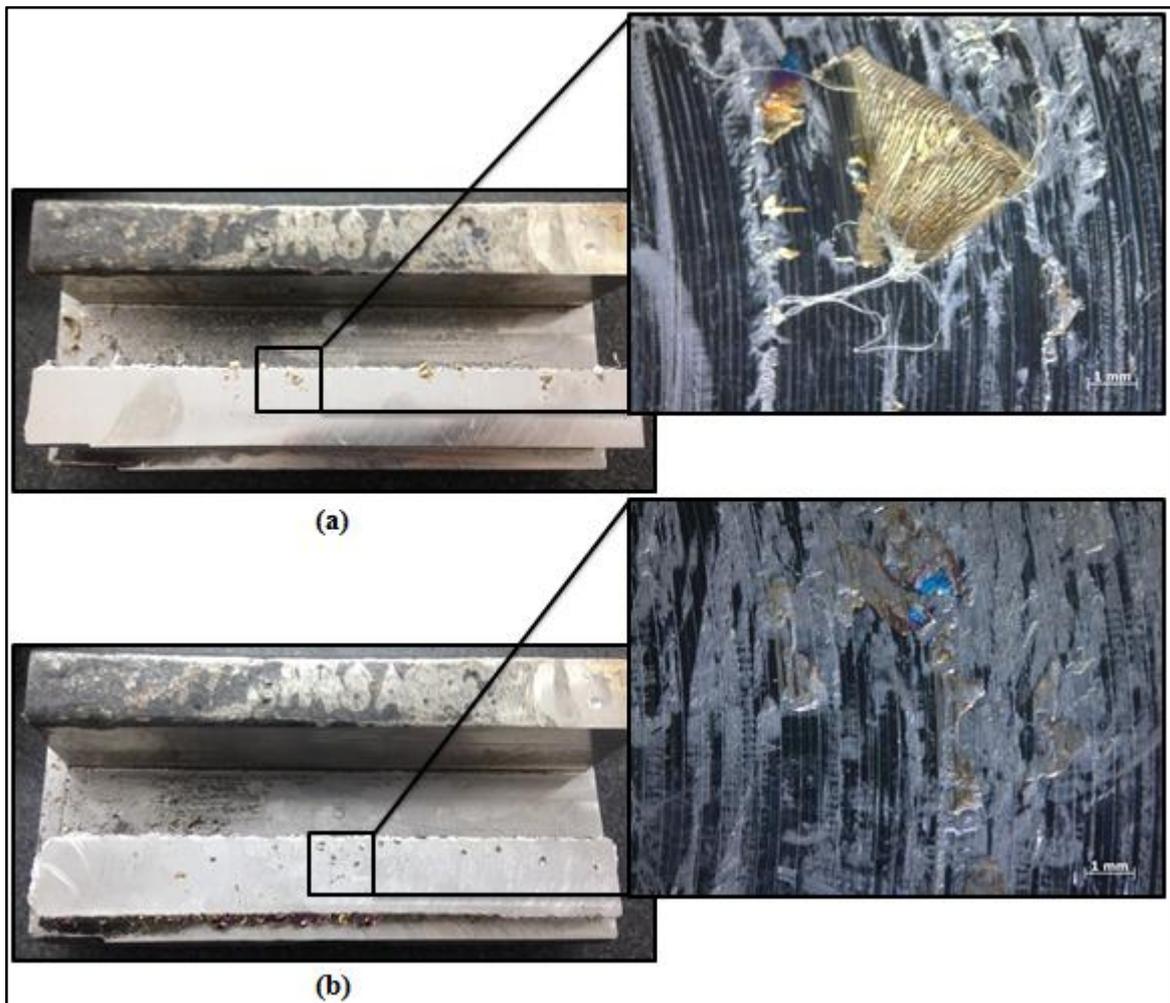
Fonte: O autor.

A respeito do comportamento da rugosidade em função do tempo, percebe-se que na Figura 38 (a) (d) e Figura 39 (e) (f) (g) os valores de rugosidade R_a decrescem à medida que o tempo de usinagem se eleva. Este fato ocorreu provavelmente em função da alteração do formato da aresta de corte em decorrência do mecanismo causador de desgaste, inerente do processo de usinagem. Na Figura 38 (a) e Figura 39 (e) (g) (h), fica evidente o aumento acentuado de desgaste de flanco no último intervalo de medição, superando o critério de fim de vida adotado para o VB_B (igual ou maior que 0,3 mm).

Durante a realização dos ensaios foi possível observar adesão de material da peça na sua própria superfície usinada, como mostra a Figura 40, e a provável causa seja o mecanismo de

aderência e arrastamento (*attrition*). O inserto desgastado, a vibração do fuso, o baixo teor de carbono do aço ASTM 743 CA6NM, a tenacidade da martensita e a baixa condutividade térmica podem ter contribuído para fluxo irregular de material, motivando sua adesão, o que prejudicou o acabamento da peça. Os resultados são semelhantes aos encontrados por Liu, et al. (2015) em sua pesquisa.

Figura 40- Material da peça comprimido na sua própria superfície. Condição $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição IV. Tempo de usinagem 6,3 min (a) e 25 min (b).



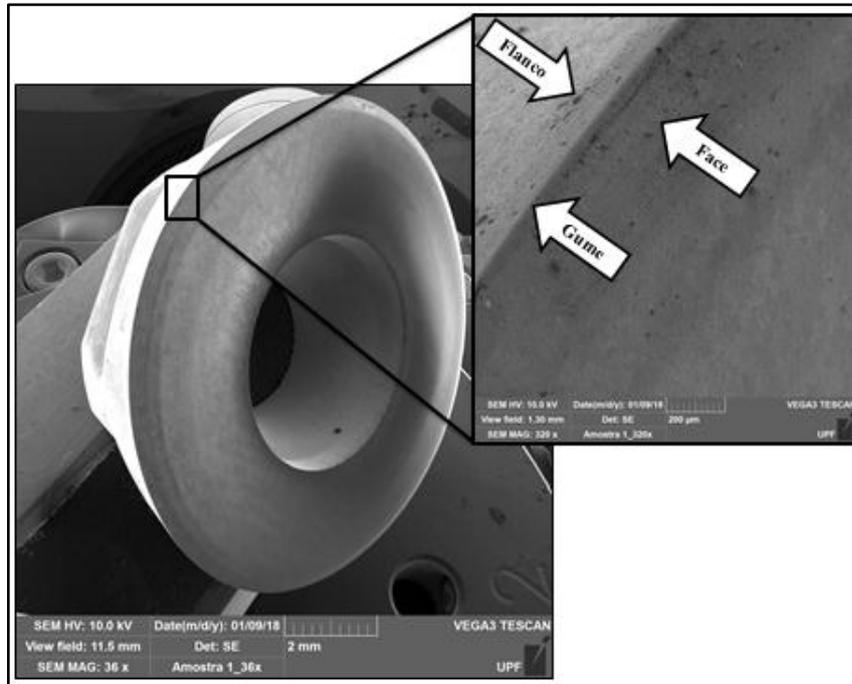
Fonte: O autor.

4.5 Investigação das falhas e mecanismos de desgaste ocorridos na ferramenta

Com objetivo de investigar as falhas e mecanismos de desgaste ocorridos na ferramenta de corte, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Também, utilizou-se a sonda EDS, com intuito de identificar a presença ou não de materiais e seus respectivos elementos químicos que possam aderir na aresta de corte, contribuindo para as

falhas das ferramentas. A Figura 41 representa o inserto antes do ensaio, bem como identifica as regiões analisadas no MEV.

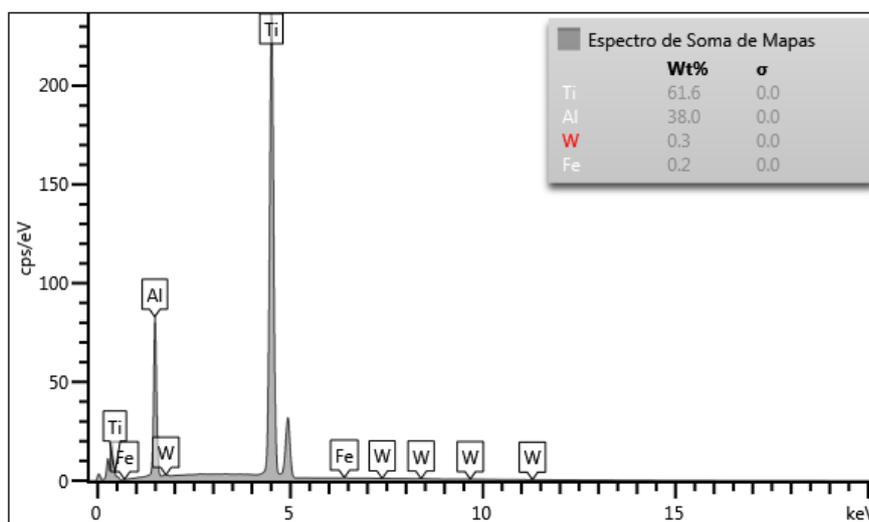
Figura 41- Detalhe do inserto, antes do ensaio.



Fonte: O autor.

Já a Figura 42 mostra o espectro (EDS) da composição química sobre a face da ferramenta antes do ensaio. Identifica-se a presença dos elementos químicos: Ti, Al.

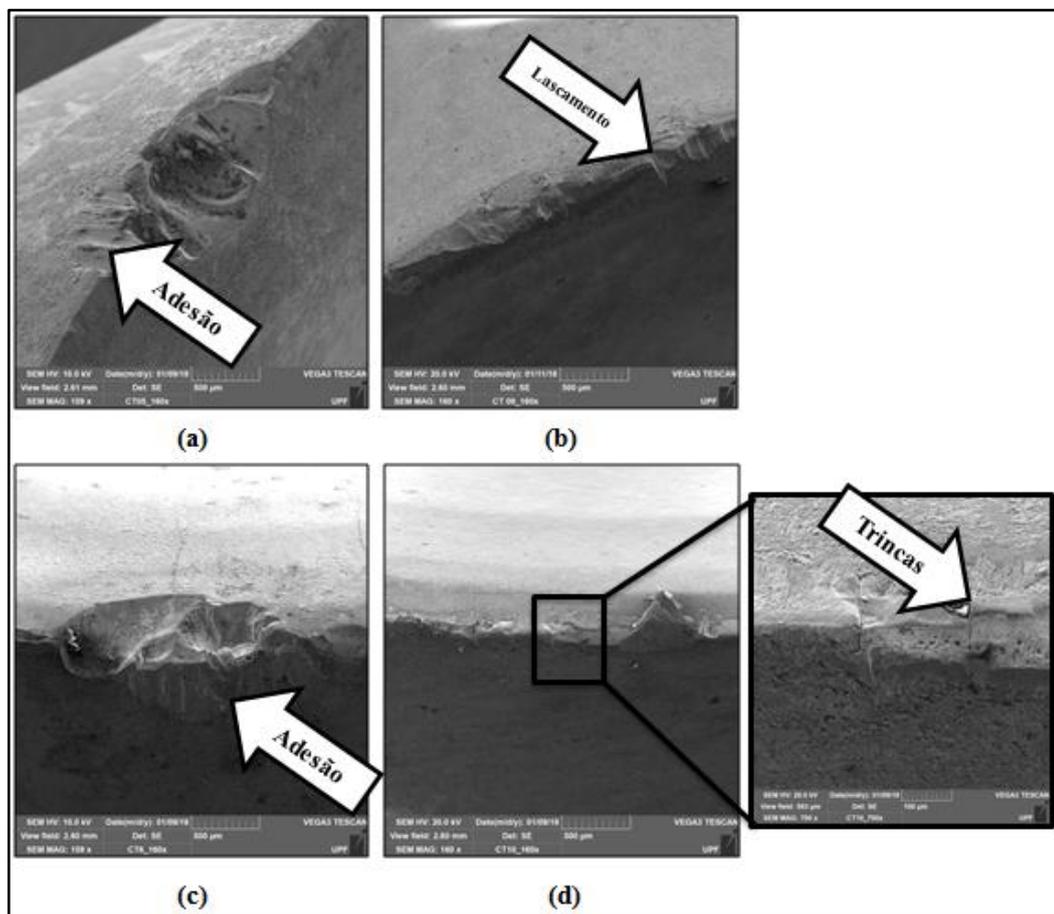
Figura 42- Espectro (EDS) da composição química na face da ferramenta antes dos ensaios



Fonte: O autor.

As análises (MEV e EDS) foram realizadas após o término de todos os ensaios, ou seja, quando se atingiu um dos critérios de fim de vida da ferramenta de corte para cada condição avaliada. A Figura 43 destaca a ferramenta de corte ao final dos ensaios realizados com $f_z=0,4$ mm/dente. No caso, a Figura 43 (a) e Figura 43 (b) representam a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I e II respectivamente, enquanto que a Figura 43 (c) e Figura 43 (d) representam a $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV e I respectivamente.

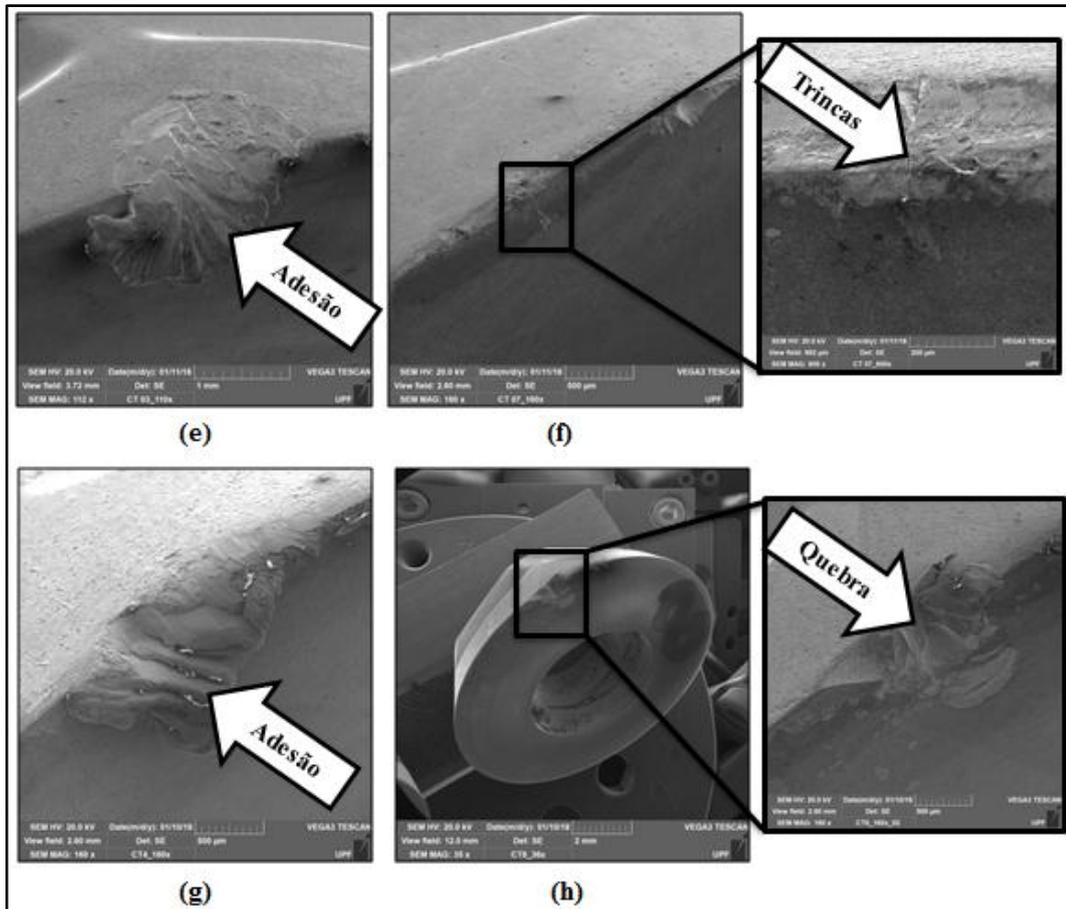
Figura 43- Detalhe da ferramenta de corte ao final dos ensaios realizados com $f_z=0,4$ mm/dente, sendo (a) e (b) a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição I e II respectivamente, enquanto (c) e (d) representam a $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição IV e I respectivamente.



Fonte: O autor.

Já a Figura 44 evidencia a ferramenta de corte ao final dos ensaios realizados com $f_z=0,7$ mm/dente. A Figura 44 (e) e Figura 44 (f) representam a $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II e IV respectivamente, enquanto que a Figura 44 (g) e Figura 44 (h) representam o $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I e III respectivamente.

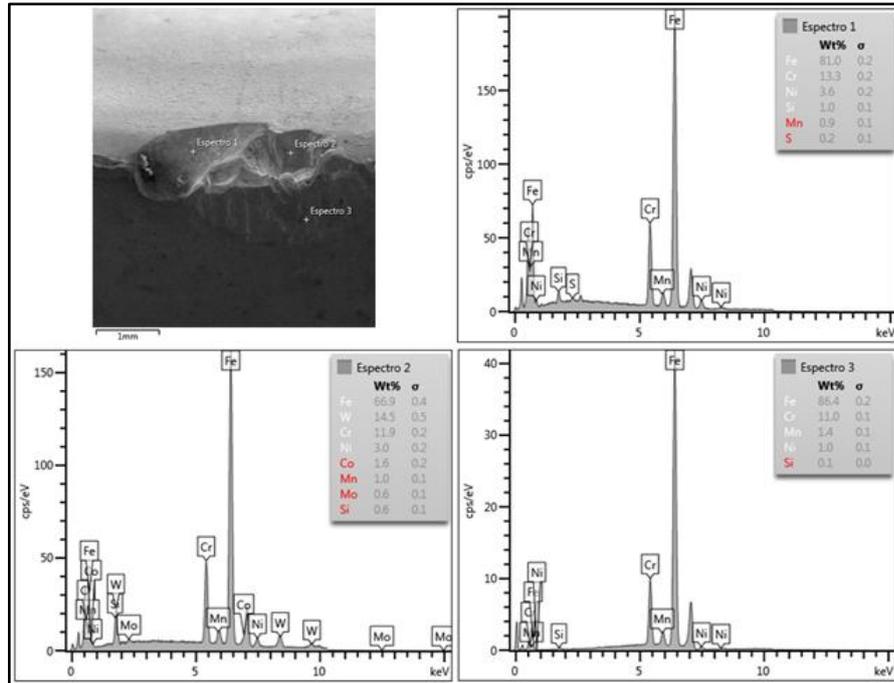
Figura 44- Detalhe da ferramenta de corte ao final dos ensaios realizados com $f_z=0,7$ mm/dente, sendo as figuras (e) e (f) $v_c = 220$ m/min e lotes de fundição II e IV respectivamente, enquanto (g) e (h) representam o $v_c = 260$ m/min e lotes de fundição I e III respectivamente.



Fonte: O autor.

Ao que tange a análise EDS, nesta seção serão abordados dois tratamentos, uma vez que descreve com lucidez as composições químicas detectadas em todos os ensaios realizados. As figuras obtidas no MEV e EDS nos demais tratamentos serão anexadas ao apêndice deste trabalho. A Figura 45 ilustra os pontos analisado via EDS, bem como a composição química observada em cada espectro para o parâmetro de corte $f_z=0,4$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição IV.

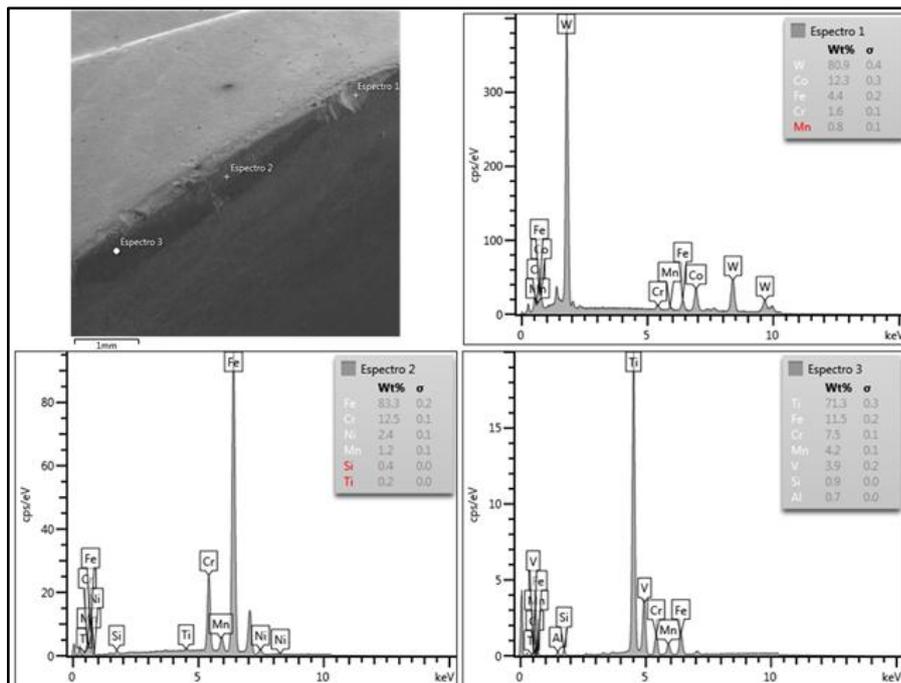
Figura 45- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z=0,4$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição IV.



Fonte: O autor.

A Figura 46 apresenta os dados obtidos para o parâmetro de corte $f_z=0,7$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min, e lote de fundição IV.

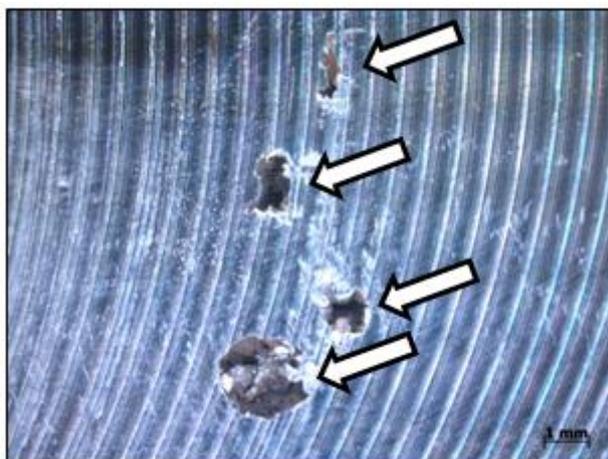
Figura 46- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z=0,7$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição IV.



Fonte: O autor.

Durante a realização dos ensaios, detectou-se a presença de inclusões, porosidade e trincas no material fundido. É um fator metalúrgico muito presente no âmbito industrial, que pode ter influência nas avarias detectadas. Além disso, as partículas muito duras e abrasivas podem ter contribuído para o desgaste da ferramenta de corte. A Figura 47 ilustra as imperfeições encontradas no material.

Figura 47- Falhas de fundição, detectada no ensaio $f_z=0,7$ mm/dente e $v_c=260$ m/min, lote de fundição III.



Fonte: O autor.

As análises do MEV demonstraram que o atrito do aço inoxidável ASTM 743 CA6NM com a ferramenta gera o mecanismo de abrasão mecânica, promovendo o desgaste de flanco. Possivelmente, partículas da própria ferramenta são arrastadas pelo movimento de corte e contribuem para o desgaste abrasivo.

Na Figura 43 (b), (d) e Figura 44 (f) fica evidente a presença de sulcos perpendiculares à aresta de corte e paralelos a si, que caracterizam as trincas de origem térmica. Provavelmente causadas pela diferença de dilatação da superfície e do núcleo do inserto devido à oscilação térmica entre o período ativo e inativo da ferramenta. Além disso, constatou-se a presença de lascamento nas ferramentas, onde partículas maiores foram removidas da aresta de corte, possivelmente em decorrência da propagação das trincas térmicas aliadas as solicitações mecânicas intermitentes, característica da operação de fresamento frontal.

Nas Figura 43 (a), (c) e Figura 44 (e), (g), (h) observa-se que uma porção de material da peça ficou aderido à aresta de corte, por meio do mecanismo de *attrition*. Cargas excessivas e corte interrompido contribuíram para a quebra da aresta. Além disso, em todos os ensaios analisados via espectrometria (EDS), indicou-se a presença dos elementos químicos

do material usinado (Fe, Cr, Ni, Si, Mo). A adesão do aço ASTM 743 CA6NM na aresta de corte, pode ter contribuído para que partículas da ferramenta fossem arrancadas, aderindo-se à peça, gerando desgaste excessivo e prejudicando o acabamento da superfície.

Em resumo, constatou-se a presença de desgaste de flanco, motivado pela abrasão mecânica. Também, detectaram-se avarias de quebra, trincas térmicas e lascamento, provocadas pelas solicitações mecânicas e térmicas. Além da influência predominante de aderência e arrastamento (*attrition*).

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises experimentais apresentadas na seção anterior, buscando atender os objetivos específicos deste trabalho, pode-se concluir que:

1. Sobre o efeito dos parâmetros de corte no desgaste do inserto, constata-se que, estatisticamente, os parâmetros f_z e v_c possuem tendência de efeito significativo nos resultados encontrados. Sendo que, há uma intensificação de desgaste VB_B na ferramenta de corte na condição $f_z = 0,7$ mm/dente e $v_c = 260$ m/min. Os resultados de desgaste VB_B foram intermediários para $f_z = 0,7$ mm/dente e $v_c = 220$ m/min. Enquanto que, as condições $f_z = 0,4$ mm/dente, apresentaram valores de desgaste menores e similares, independentemente do valor de v_c ;
2. Ao investigar a influência dos parâmetros de corte na rugosidade da superfície usinada, conclui-se que, a velocidade de corte não possui efeito significativo e que existe estatisticamente um acréscimo no valor de rugosidade R_a com o aumento do f_z . Portanto, maiores valores de rugosidade foram obtidos nas condições $f_z = 0,7$ mm/dente, independentemente da velocidade de corte adotada;
3. Sobre a interação do desgaste do inserto com a rugosidade da peça, observa-se que, em função da alteração do formato da aresta de corte em decorrência do desgaste inerente do processo de usinagem, em alguns ensaios os valores de rugosidade R_a decrescem à medida que o tempo de usinagem se eleva. Também, que o inserto desgastado, a vibração do fuso, o baixo teor de carbono do aço ASTM 743 CA6NM, a tenacidade da martensita e a baixa condutividade térmica podem ter contribuído para fluxo irregular do material removido, motivando a sua adesão na própria superfície usinada, o que prejudicou o acabamento da peça;
4. Ao examinar os mecanismos de falhas ocorridos na ferramenta de corte, conclui-se que, vários fenômenos atuam simultaneamente. Sendo que, a abrasão mecânica foi responsável pelo desgaste de flanco. Também que solicitações mecânicas e térmicas provocaram quebra, trincas térmicas e lascamento na ferramenta. Além da influência predominante do mecanismo de falha de aderência e arrastamento (*attrition*).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Baseado nas experiências obtidas nesta pesquisa sugere-se os seguintes trabalhos, que possam aprimorar os conceitos teóricos a respeito do tema desta pesquisa:

- Experimentar as condições de usinagem abordadas nesta pesquisa, aplicando diferentes fluidos de corte;
- Avaliar o efeito dos lotes de fundição do aço ASTM 743 CA6NM e seus fatores metalúrgicos no desgaste da ferramenta de corte.

REFERÊNCIAS

AMERICAN STANDARD FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A743/ ASTM A7473M**: Castings, Iron- Chromium, Iron- Chromium- Nickel, Corrosion. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: método do perfil- Termos, definições e parâmetros de rugosidade. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: método do perfil- Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. 2008.

BAGCI, E.; AYKUT, S. The Effects of Tool Position, Coating and Cutting Parameters on Forces, Power, MRR and Wear in Face Milling of Stellite 6. **Arabian Journal for Science and Engineering**. Arábia Saudita. 2014.

BARBOSA, R. S., **Avaliação dos Esforços de Corte no Fresamento Frontal da Liga de Alumínio-Silício (A356) Quando Mantido Constante a Produção de Peças**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del-Rei, MG. 2014.

CASAS, W. J. P.; HENKE, S. L.; NOVICKI, N. Fracture toughness of CA6NM alloy, quenched and tempered, and of its welded joint without PWHT. **Welding International**, v. 23, n. 3, 2009.

DAVIM, J. P. **Machining- Fundamentals and Recent Advances**. Londres: Springer, 2008. ISBN 978-1-848000-212-8

DE PAULA, L. C. A. **Propriedades mecânicas de tração e impacto dos aços inoxidáveis CA15 e CA6NM**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos- São Carlos, SP. 2007.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7ª. Ed. São Paulo: Artiber, 2010.

_____; CALDEIRANI, J. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. **Wear**. Campinas, SP, Brasil, 1999.

_____; CALDEIRANI, J. Influence of cutting conditions on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

ERDEL, B. P. **High-Speed Machining**. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineering, 2003. ISBN 0-87263-649-6

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. 14ª. Ed. São Paulo: Blucher, 1970.

FILHO, A. F. et al. Avaliação do desempenho de ferramentas de metal duro texturizadas e revestidas no fresamento frontal de ferro fundido vermicular. **XII Seminário de iniciação científica, Universidade Federal de Uberlândia**. Uberlândia, MG, Brasil, 2008.

GONÇALVES, G. P. F, **Estudo da Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável Martensítico ASTM 743 CA-6NM**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 2014.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 4ª. Ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 8688-1: Tool life testing in milling- Part 1: face milling**. 1989.

LACERDA, S. R, **Uma Contribuição à Melhoria do Processo de Fresamento em 5 Eixos de Pás de Turbinas Hidráulicas**. Dissertação de Mestrado- Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2014.

LIU, G. et al. Tool damage and its effect on the machined surface roughness in high-speed face milling the 17-4PH stainless steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Shandong, China, 2015.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3ª. Ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MARCELINO, A. R. et al. Medição e Simulação dos Esforços de Usinagem no Fresamento de Topo Reto de Ligas de Alumínio Tratável Termicamente 6061. **XI Congresso Estudantil de Engenharia Mecânica- CREEM**. Nova Friburgo, RJ, Brasil, 2004.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

NORDIN, M. et al. Wear and failure mechanisms of multilayered PVD TiN/TaN coated tools when milling austenitic stainless steel. **Surface and Coatings Technology**. Upsália, Suécia, 2000.

PRENGEL, H.G. et al. A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools. **Surface and Coatings Technology**. Furth, Alemanha, 2001.

PROTÁZIO, G. A.; **Avaliação dos Esforços de Corte no Microfresamento de Cavidades: Estratégias de Entrada em Rampa e Interpolação Helicoidal**. Dissertação de Mestrado- Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2016.

RAWANGWONGA, S. et al. Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear. **11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering**. Songkhla, Tailândia, 2014.

REBEYKA, C. J. **Princípio dos Processos de Fabricação por Usinagem**. 1ª. Ed. Curitiba: InterSaber, 2016.

ROHLOFF, R. C., **Efeito dos Parâmetros de Corte no Fresamento do Aço Inoxidável AISI 420 para Moldes e Matrizes**. Dissertação de Mestrado- SOCIESC. Joinville, SC. 2012.

SANDVIK COROMANT. **Training Handbook: Metal Cutting Tecnology**. Sandvik academy. 2011.

_____, **Espessura máxima de cavacos**. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/max_chip_thickness#4>. Acesso em 02 dez. de 2017.

_____, **Detalhe dos produtos**. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/Pages/productdetails.aspx?c=R300-063Q22-16M>. Acesso em: 28 jan. de 2018.

_____, **Detalhe dos produtos**. Disponível em: <[www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/Pages/productdetails.aspx?c=R300-1648M-PM%20%20%20%20%20%20%201030](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/Pages/productdetails.aspx?c=R300-1648M-PM%20%20%20%20%20%20%20%201030)>. Acesso em 28 jan. de 2018.

_____, **Detalhe dos produtos, coromill 300**. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coromill_300/Pages/Product-details.aspx>. Acesso em: 10 jan. de 2018.

_____, **Desgastes da ferramenta**. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear>. Acesso em: 20 jan. de 2018.

_____, **Material das ferramentas de corte**. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx#7>. Acesso em: 20 dez. de 2017.

_____, **Material das ferramentas de corte, metal duro**. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx#5> Acesso em 20 dez. de 2017.

_____, **Material da peça**. Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx>. Acesso em 18 jan. de 2018.

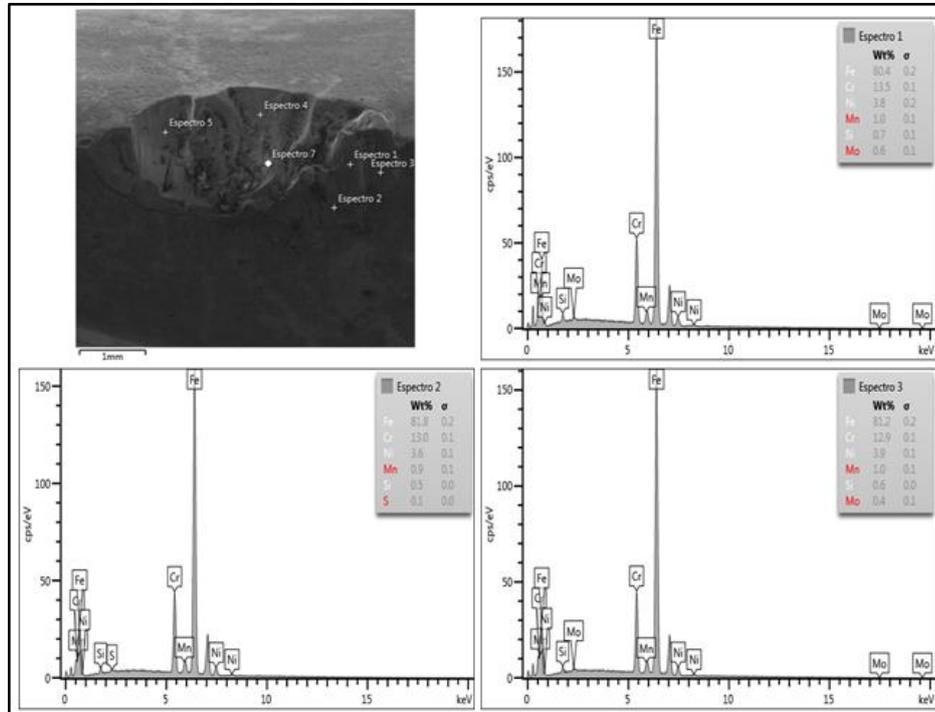
SOUZA, A. J. D. **Processos de Fabricação por Usinagem**. [Apostila]- Universidade Federal do Rio Grande do Sul- Departamento de Engenharia Mecânica- Laboratório de Automação e Usinagem. Porto Alegre, RS. 2016.

STEEL FOUNDERS' SOCIETY OF AMERICA. **Steel Castings Handbook: Supplement 8-High Alloy Data Sheets Corrosion Series**, 2004. Disponível em: <www.sfsa.org/publications/hbk/s8.pdf>. Acessado em 28 jan. 2018

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th. Ed. Butterworths-Heinemann. 2000. ISBN 0-7506-7069-X

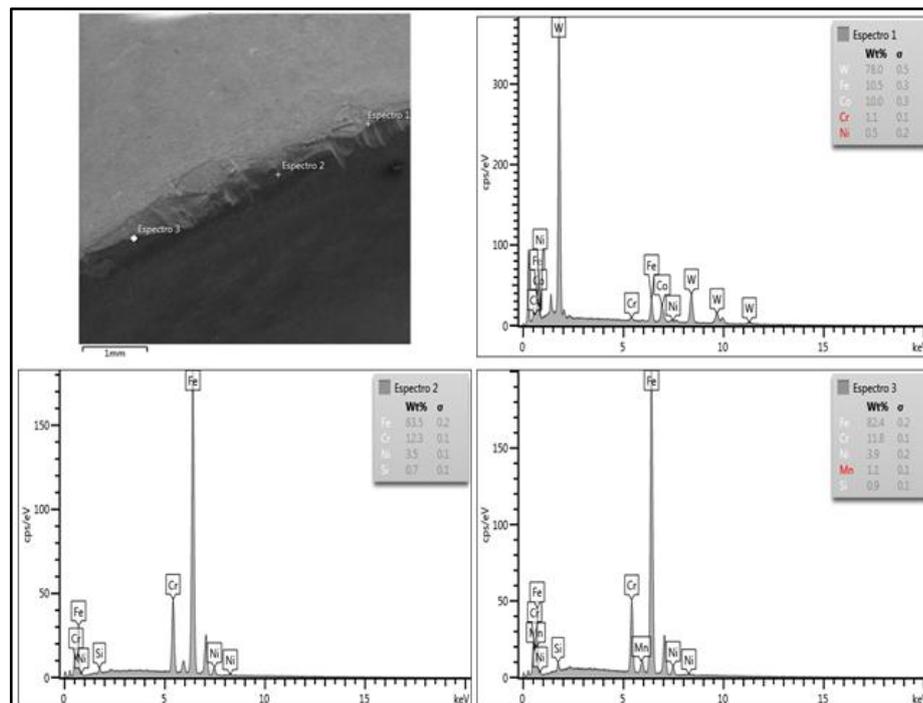
APÊNDICE

Figura 48- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição I.



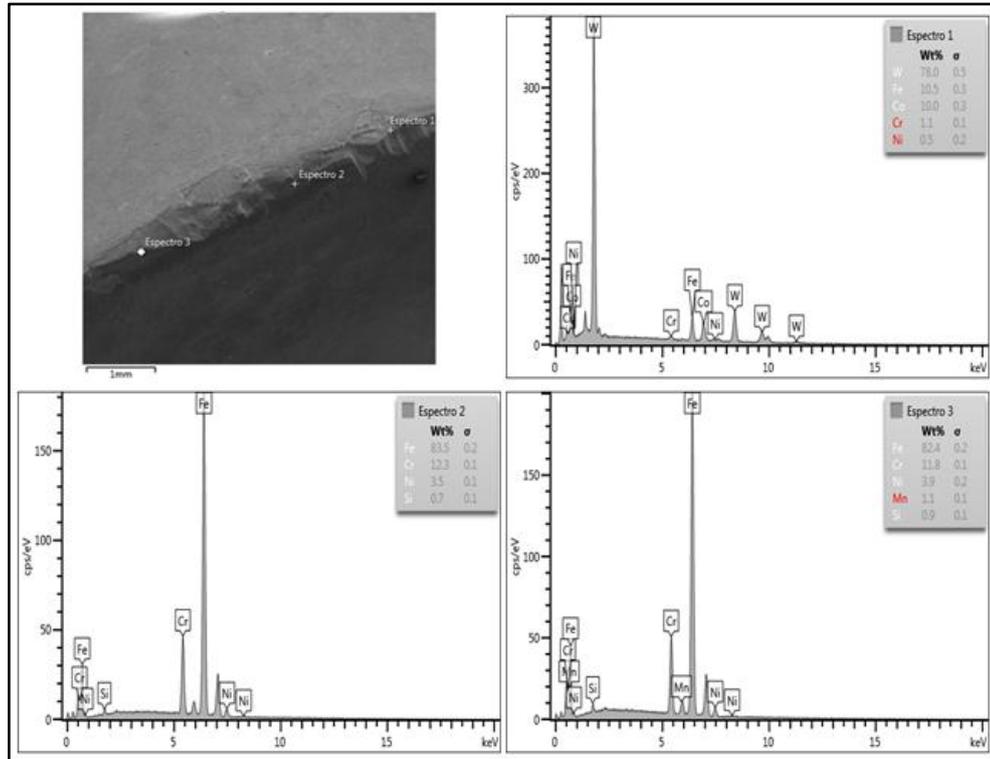
Fonte: O autor.

Figura 49- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição II.



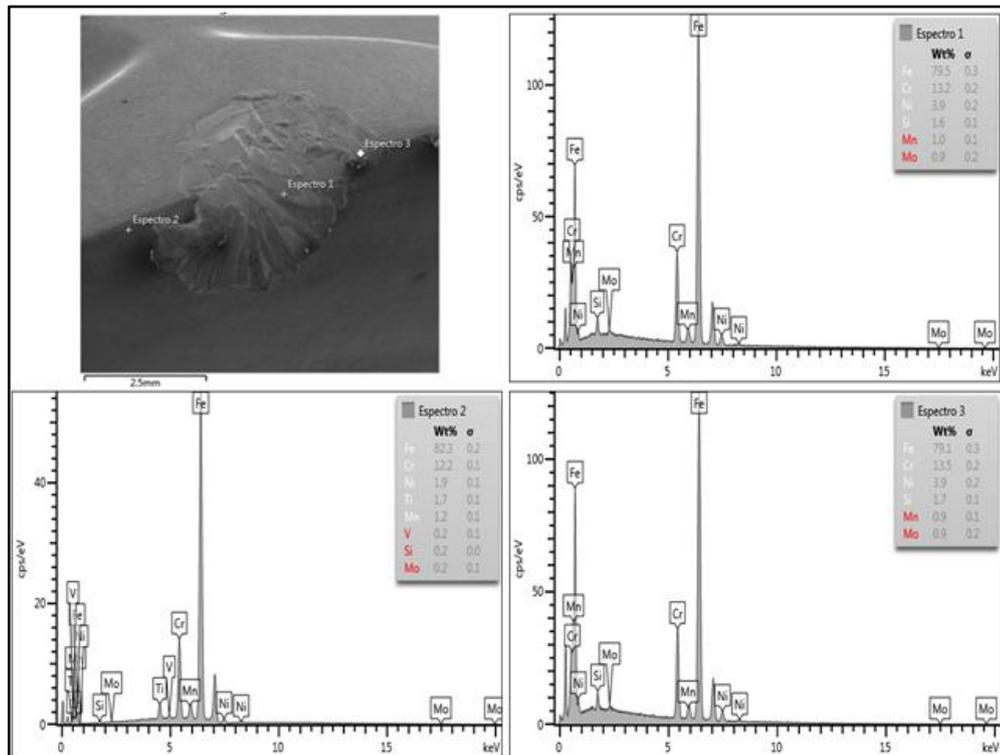
Fonte: O autor.

Figura 50- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,4$ mm/dente, $v_c = 260$ m/min e lote de fundição I.



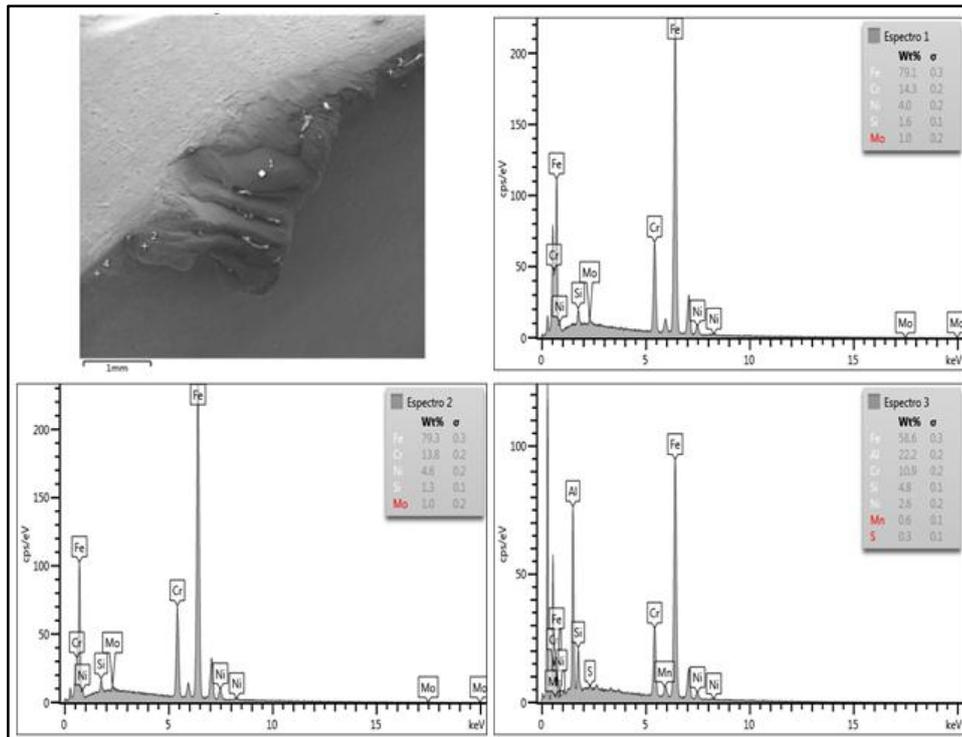
Fonte: O autor.

Figura 51- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,7$ mm/dente, $v_c = 220$ m/min e lote de fundição II.



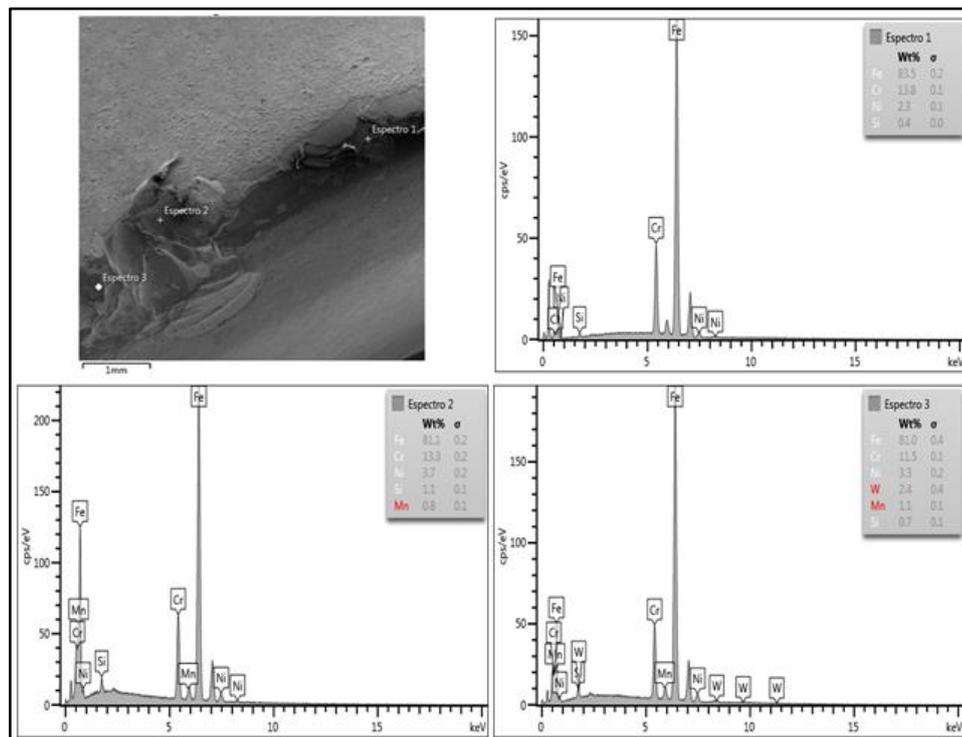
Fonte: O autor.

Figura 52- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,7\text{mm/dente}$, $v_c = 260\text{ m/min}$ e lote de fundição I.

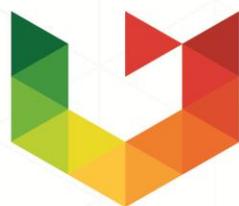


Fonte: O autor.

Figura 53- Espectros (EDS) da composição química, realizado em diferentes pontos da ferramenta de corte ao final do ensaio com parâmetros $f_z = 0,7\text{ mm/dente}$, $v_c = 260\text{ m/min}$ e lote de fundição III.



Fonte: O autor.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br