



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS**



Dissertação de Mestrado

Sandro da Costa Silva

**Análise de Desempenho de Ferramentas de Corte nos
Processos de Desbaste e Acabamento por Fresamento de
Aço Liga MnSi**

**Belo Horizonte
2015**



Sandro da Costa Silva

**Análise de Desempenho Ferramentas de Corte nos
Processos de Desbaste e Acabamento por Fresamento de
Aço Liga MnSi**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais
Linha de Pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização
Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Belo Horizonte
2015

Silva, Sandro da Costa.
S587a Análise de desempenho de ferramentas de corte nos processos de desbaste e acabamento por fresamento de aço liga MnSi / Sandro da Costa Silva. - 2015.
102 f. : il.; tabs. ; graf. –
Orientador: Sandro Cardoso Santos.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015.

Bibliografia.

1. Usinagem de alta velocidade. 2. Fresagem (Trabalhos em metal). 3. Ferramentas para cortar metais. 4. Revestimento em metal I. Santos, Sandro Cardoso. II. Título.

CDD: 671.35



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**“ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE
CORTE NOS PROCESSOS DE DESBASTE E ACABAMENTO
POR FRESAMENTO DE AÇO LIGA MnSi”**

Autor: Sandro da Costa Silva

Orientador: Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Yukio Shigaki
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão
Departamento de Engenharia de Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais -
UFMG

Belo Horizonte, 13 de Novembro de 2015.

Ao meu Deus pelo privilégio de viver este tempo, aos meus pais (in memoriam) pelo esforço e amor em me preparar para uma vida de estudos, e à minha esposa Glorinha e filhos Mariana e Matheus, por toda paciência e amor nesta caminhada.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

Ao meu orientador, Sandro Cardoso Santos, todo o meu reconhecimento pela orientação, dedicação e competência, que me possibilitaram chegar até aqui.

A todos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, pelo ensino de excelência e preciosas colaborações no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal Minas Gerais - IFMG - Campus Governador Valadares - pela possibilidade de realizar o programa de mestrado em exercício.

A empresa SUPER Metal em Governador Valadares, pela concessão do centro de usinagem para realização dos experimentos nos processos de fresamento.

Ao Sr. Fernando Zefferino (Diretor e Engenheiro Mecânico da SUPER Metal), e ao Sr. Lucas Santos (Supervisor de Usinagem da SUPER Metal), pelo acompanhamento e contribuições no desenvolvimento da pesquisa.

A Escandia-SANDVIK, pelo apoio técnico e disponibilidade do microscópio SA-4600 para medições de desgaste de flanco.

A ToolTech-ISCAR, pelo apoio técnico e disponibilidade do jogo de insertos de desbaste para aplicação nos experimentos realizados.

Aos meus colegas do IFMG, por sempre apoiarem e acreditarem na nossa busca pela educação pública e de qualidade.

À toda minha família, pelo amor e paciência.

À Deus, pela imerecida graça, pela vida e pela força nesta caminhada.

"Um processo industrial em particular, evidencia-se no meio produtivo por ser praticamente a última etapa de transformação e conformação do aço, é a usinagem de metais, que é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo."
(TRENT)

RESUMO

A tecnologia aplicada a processos de usinagem permite o aumento de produtividade em processos de fabricação. A fabricação de componentes de máquinas para montagem e desmontagem de trilhos ferroviários é estudada neste trabalho, com ênfase nas avarias, desgaste e vida útil de ferramentas de corte no fresamento. A análise global das etapas de fabricação da máquina permite determinar os pontos críticos, que são os processos de desbaste e acabamento dos mancais do braço de articulação da máquina para movimentação de trilhos. A usinagem é realizada por fresamento periférico concordante de uma peça com revestimento de liga MnSi em substrato de aço ABNT 1020, obtido por meio de metais de adição do arame maciço ASME SFA-5.18, de diâmetro 1,0mm, depositado a partir do processo de soldagem MIG. O processo de fresamento foi investigado por meio do monitoramento do desgaste de flanco (VB_{max}), análise de avarias das ferramentas de corte, medições de dureza e rugosidade superficial nas operações de desbaste e acabamento. Os resultados obtidos na análise conjunta dos processos de desbaste e acabamento foram organizados em dois grupos: para o 1º grupo foi aplicado um jogo de insertos de desbaste de metal duro classe P30, revestidos com TiAlN PVD de dureza média de 3000HV, VB_{max} de 0,3mm em 294min de corte, e constatados lascamentos na superfície de folga. Em sequência ao corte por desbaste foi aplicado um conjunto de insertos de acabamento de metal duro classe P30, revestidos com TiN PVD de dureza média de 2500HV, VB_{max} de 0,15mm em 54min de corte, sem avarias aparentes. Para o 2º grupo foi aplicado um jogo de insertos de desbaste de metal duro classe P20, revestidos com TiAlN PVD, VB_{max} de 0,2mm em 210min de corte, e constatados lascamentos e trincas na superfície de saída. Em sequência ao corte por desbaste foram aplicados insertos de acabamento idênticos ao 1º grupo, VB_{max} de 0,2mm em 54min de corte, sem avarias aparentes. Com base nos resultados obtidos, os insertos do 1º grupo apresentaram condições mais favoráveis na análise conjunta dos processos, caracterizando que a classe P30 para desbaste com $\alpha=5^\circ$, apresentou desgaste de flanco maior antes de iniciar avarias por lascamento, com um tempo maior de corte em relação aos insertos do 2º grupo.

Palavras chave: Fresamento, ferramentas de corte, revestimento de MnSi.

ABSTRACT

The technology applied to machining processes allows increased productivity in manufacturing processes. Manufacturing of machinery components for assembly and disassembly of railroad tracks is studied in this work, with an emphasis on damage, wear and service life of cutting tools for milling. The global analysis of machine manufacturing steps allows to determine critical points that are roughing and finishing processes of machine pivot arm bearings for moving rails. The machining is performed by concordant peripheral milling of a workpiece with MnSi alloy coating on the steel substrate ABNT 1020, obtained by addition of the metal solid wire ASME SFA-5.18, diameter 1.0mm, deposited from the process MIG welding. The milling process has been investigated by means of flank wear monitoring (VB_{max}), failure analysis of cutting tools, the hardness and surface roughness measurements in roughing and finishing operations. The results on the analysis of roughing and finishing processes were organized into two groups: for the 1st group was applied a set of metal grinding hard inserts P30 grade, coated with TiAlN PVD medium hardness 3000HV, VB_{max} 0.3mm in cutting 294min, and observed on the surface chipping off. Sequentially cutting by thinning was applied a set of inserts carbide P30 class finish, coated with TiN PVD medium hardness 2500HV, VB_{max} of 0.15mm in cutting 54min without visible damages. For the 2nd group was applied a set of metal grinding hard inserts P20 grade, coated with TiAlN PVD, VB_{max} 0.2 mm in cutting 210min, and noted chipping and cracks in the emitting surface. Sequentially cutting by thinning were applied finishing inserts identical to the 1st group, VB_{max} 0.2 mm in cut 54min without visible damages. Based on the results obtained, the inserts of the 1st group had more favorable conditions on the analysis of processes, featuring the P30 class for roughing with $\alpha = 5^\circ$, showed higher flank wear before starting breakdowns by chipping with a long cutting inserts in relation to the 2nd group.

Keywords: Milling, cutting tools, MnSi coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais ângulos de uma ferramenta de corte	21
Figura 2: Fresamento periférico concordante	24
Figura 3: Microdureza dos revestimentos aplicados no metal duro	27
Figura 4: Evolução tecnológica do WC e outros materiais para ferramenta	28
Figura 5: Mecanismo de desgaste de uma ferramenta	29
Figura 6: Principais formas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	30
Figura 7: Desgaste de cratera na superfície de saída de cavaco	31
Figura 8: Desgaste de flanco na aresta de corte e raio de ponta	31
Figura 9: Desgaste de entalhe na aresta de corte.	32
Figura 10: Lascamento de uma ferramenta	33
Figura 11: Aresta postiça (<i>BUE-build up edge</i>)	33
Figura 12: Deformação plástica	34
Figura 13: Trincas térmicas.....	35
Figura 14: Ciclos de desgaste de uma ferramenta de corte	36
Figura 15: (a) Superfície usinada com marcas de <i>CHATTER</i> , (b) Superfície usinada sem marcas de <i>CHATTER</i>	38
Figura 16: Fluxograma de procedimentos	39
Figura 17: Revestimento de Mn e Si por soldagem MIG.....	42
Figura 18: Medidas do CP e acabamento final	43
Figura 19: Mancais com superfícies desbastada e em acabamento	44
Figura 20: Centro de usinagem ROMI D1500.....	45
Figura 21: (a) Vista panorâmica da peça, (b) Sistema de fixação da peça.....	46
Figura 22: (a) Inserto de desbaste ISO P30, (b) Inserto de desbaste ISO P20, (c) Geometria de corte e fresa aplicada.	47
Figura 23: (a) Microscopia do inserto de desbaste, (b) Aresta de corte nova do inserto de desbaste 1, (c) Aresta de corte nova do inserto de desbaste 2	49

Figura 24: MEVxEDS da composição do inserto de acabamento desgastado.	50
Figura 25: (a) Microscopia do inserto de acabamento, (b) Aresta nova do inserto de acabamento	51
Figura 26: Comparação entre os resultados dos ensaios de dureza realizados no material usinado e nos insertos, conforme norma ASTM E-18.....	55
Figura 27: Monitoramento do desgaste de flanco de 04 insertos de desbaste do 1º experimento, medidos por aresta.....	57
Figura 28: (a) Perfil da aresta de do inserto de desbaste 1, (b) Aresta de corte com 0,2mm de VB_{max} e lascamentos na aresta de corte.....	58
Figura 29: (a) Aresta de corte com 0,3mm de VB_{max} com lascamentos na superfície de folga, (b) Colapso da ferramenta após 0,3mm de VB_{max}	58
Figura 30: MEV+EDS da composição do inserto de desbaste desgastado.....	59
Figura 31: EDS da composição do inserto de desbaste desgastado, ponto 1	60
Figura 32: EDS da composição do inserto de desbaste desgastado, ponto 2	61
Figura 33: EDS da composição do inserto de desbaste desgastado, ponto 3	62
Figura 34: EDS da composição do inserto de desbaste desgastado, ponto 4.....	63
Figura 35: Medidas do desgaste de flanco dos insertos de acabamento 1	65
Figura 36: (a) Aresta de corte do inserto de acabamento 1 com desgaste de flanco de 0,10mm, (b) Marcas do mecanismo de adesão no desgaste de flanco	66
Figura 37: MEV+EDS da composição do inserto de acabamento desgastado	67
Figura 38: EDS da composição do inserto de acabamento no ponto 1	68
Figura 39: EDS da composição do inserto de acabamento no ponto 2.....	69
Figura 40: Comparação das medições do monitoramento de desgaste de flanco entre os insertos de desbaste 1, e os insertos de acabamento 1	71
Figura 41: Monitoramento do desgaste de flanco de 04 insertos de desbaste do 2º experimento medidos por aresta.....	74
Figura 42: (a) Perfil da aresta de corte nova do inserto de desbaste 2, (b) Aresta de corte com 0,2mm de desgaste de flanco e início de lascamento.....	75

Figura 43: (a) Perfil da aresta de corte com lascamento, (b) Superfície de saída com lascamentos e trincas.....	75
Figura 44: Microscopia ótica (10x)+MEV(20x)+EDS do inserto de desbaste 2.....	76
Figura 45: EDS da composição do revestimento do inserto de desbaste 2.....	77
Figura 46: EDS da composição do inserto de desbaste desgastado, ponto 2.....	78
Figura 47: EDS da composição do inserto de desbaste desgastado, ponto 3.....	79
Figura 48: Medidas do desgaste de flanco dos insertos de acabamento 2	81
Figura 49: (a) Aresta de corte do inserto de acabamento 2 com desgaste de flanco de 0,2mm, (b) Marcas do mecanismo de abrasão no inserto	82
Figura 50: EDS da composição do inserto de acabamento 2 desgastado.....	83
Figura 51: Comparação das medições do monitoramento de desgaste de flanco entre o inserto de desbaste 2 e insertos de acabamento	84
Figura 52: Comparação das medições do monitoramento de desgaste de flanco das médias dos processos de desbaste 1 e desbaste 2	86
Figura 53: (a) CP preparado para análise no MEV, (b) Imagem gerada pelo MEV ..	88
Figura 54: Ampliação da superfície do CP para análise EDS	89
Figura 55: (a) EDS no ponto 1 do CP, (b) EDS no ponto 2 do CP	89
Figura 56: Representação do desvio médio aritmético para a rugosidade superficial (R_a).....	90
Figura 57: Comparação das rugosidades do desbaste 1 e desbaste 2	91
Figura 58: Comparação das rugosidades do acabamento 1 e 2	91
Figura 59: Comparação das rugosidades de todos os processos	92
Figura 60: (a) Superfície do CP1 após desbaste 1 com inserto P30, (b) Superfície do CP2 após acabamento 1, (c) Superfície do CP3 após desbaste 2 com inserto P20, (d) Superfície do CP4 após acabamento 2	94
Figura 61: (a) Médias das rugosidades e desvio padrão da superfície desbastada, (b) Médias das rugosidades e desvio padrão da superfície com acabamento concluído.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de grupos de ferramentas segundo a ISO	26
Tabela 2: Parâmetros do processo MIG para revestimento.....	42
Tabela 3: Dimensões do conjunto fresa e insertos de desbaste P30 e P20.....	47
Tabela 4: Dimensões do conjunto fresa e inserto de acabamento	50
Tabela 5: Parâmetros de corte utilizados nos experimentos.....	52
Tabela 6: Composição química no ponto 1 (revestimento).....	60
Tabela 7: Composição química no ponto 2 (desgaste).....	61
Tabela 8: Composição química no ponto 3 (desgaste).....	62
Tabela 9: Composição química no ponto 4 (desgaste).....	63
Tabela 10: Composições químicas relativas em peso atômico dos pontos selecionados para análise no inserto de desbaste 1	64
Tabela 11: Composição química no ponto 1 (acabamento-revestimento).....	68
Tabela 12: Composição química no ponto 2 (acabamento-desgaste).....	69
Tabela 13: Composições químicas relativas em peso atômico dos pontos analisados no inserto de acabamento 1	70
Tabela 14: Desgastes de flanco nos ciclos observados do 1º experimento	72
Tabela 15: Durezas e tenacidades dos insertos de desbaste.....	73
Tabela 16: Composição química do revestimento do inserto de desbaste 2.....	77
Tabela 17: Composição química do inserto de desbaste 2 no ponto 2	78
Tabela 18: Composição química do inserto de desbaste no ponto 3	79
Tabela 19: Composições químicas relativas em peso atômico dos pontos analisados no inserto de desbaste 2.....	80
Tabela 20: Composição química da região desgastada	83
Tabela 21: Desgastes de flanco nos ciclos observados do 2º experimento	85
Tabela 22: Composição química do revestimento de MnSi	90

LISTA DE SIGLAS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASME = *American Society of Mechanical Engineers*

ASTM = *Association Society for Testing of Materials*

BUE= *Build Up Edge*

CN= comando numérico

CNC= comando numérico computadorizado

CVD= *Chemical Vapor Deposition*

CP= corpo de prova

DBCP= distância do bico de contato (tocha solda MIG) para a peça

EDS= *Energy Dispersive Spectroscopy*

HRC = *Hard Rocwell C*

HV= *Hard Vickers*

ISO = *International Standardization Organization*

MEV= microscopia eletrônica de varredura

MIG= *Metal Inert Gas*

MQF= mínima quantidade de fluído de corte

PVD= *Physical Vapor Deposition*

RPM= rotações por minuto

LISTA DE SIMBOLOS

a_e = penetração de trabalho

a_p = profundidade de corte

Al_2O_3 = Óxido de alumínio

C= carbono

Co= cobalto

D= diâmetro da fresa

mm= milímetros

min= minutos

Mn= manganês

nm=nanômetro

R_a = desvio médio aritmético para a rugosidade superficial

Si= silício

TiC= Carboneto de titânio

TiN= nitreto de titânio

TiAlN= nitreto de titânio + alumínio

VB_{max} = desgaste de flanco máximo

v_c = velocidade de corte

WC= Carboneto de Tungstênio

Z= número de arestas de corte aplicadas

ΔT = variação de temperatura

α = ângulo de folga da ferramenta

β = ângulo da cunha da ferramenta

γ = ângulo de saída de cavaco

ε = ângulo da ponta da ferramenta

λ = ângulo de inclinação da ferramenta

χ = ângulo de rendimento

σ = desvio padrão

$\pi = 3,1416$

\emptyset = D= diâmetro

$^\circ$ = grau

μm = micrometro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Aspectos gerais da usinagem	20
3.2 Processo de fresamento	22
3.3 Materiais para ferramentas de corte	25
3.4 Desgaste em ferramentas de corte.....	29
3.5 Evolução do desgaste e vida das ferramentas de corte	35
3.6 Vida das ferramentas de corte.....	37
4 METODOLOGIA	39
4.1 Visitas técnicas	40
4.2 Materiais	41
4.2.1 Parâmetros de preparação do CP	41
4.2.2 Mancais usinados	44
4.3 Máquina-ferramenta e ferramental.....	45
4.3.1 Ferramentas de corte	46
4.3.2 Parâmetros de usinagem.....	52
4.4 Métodos	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 Ensaios de dureza	55
5.2 Monitoramento do desgaste do inserto de desbaste P30 do 1º grupo	56
5.2.1 Monitoramento do desgaste do inserto de acabamento do 1º grupo	64
5.2.2 Desbaste 1 x acabamento 1	70

5.3 Monitoramento do desgaste do inserto de desbaste P20 do 2º grupo	73
5.3.1 Monitoramento do desgaste do inserto de acabamento do 2º grupo	80
5.3.2 Desbaste 1 x acabamento 1	83
5.4 Desbaste 1 x Desbaste 2	85
5.5 Análise das superfícies usinadas	88
5.5.1 Composição química da superfície usinada	88
5.5.2 Rugosidade e topografia das superfícies usinadas	90
6 CONCLUSÕES	97
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ANEXO A - Projeto do CP (corpo de prova).

ANEXO B- Geometria de corte do inserto de desbaste 1.

ANEXO C - Geometria do corte do inserto de desbaste 2.

ANEXO D - Geometria do corte do inserto de acabamento.

ANEXO E - Planilha de dados do desbaste 1 e acabamento.

ANEXO F - Planilha de dados do desbaste 2.

ANEXO G - Conjunto de lixas de preparação do CP.

1. INTRODUÇÃO

O tema proposto para este trabalho de pesquisa é sobre avarias, desgaste e vida de ferramentas de corte. O desenvolvimento do trabalho foi executado com base em um processo específico da usinagem de metais: o fresamento.

O fresamento é um processo de desbaste e acabamento de materiais com vista à obtenção de peças e dispositivos com geometrias diversas e complexas. Para tanto, além de ser um processo com opção de subprocessos adjacentes ao fresamento, a fresagem em si, o desbaste e o acabamento podem ser executados com diferentes ferramentas de corte. O fresamento periférico concordante é o processo que foi analisado no desenvolvimento dos experimentos planejados, para análise de avarias, desgaste e vida dos insertos de desbaste de alto rendimento e de acabamento, utilizados na usinagem da superfície de liga MnSi em substrato de aço ABNT 1020.

Neste estudo foi abordada a análise conjunta de desgastes e avarias de ferramentas de corte, aplicadas na usinagem de superfícies revestidas para serviço sujeitas a severas condições de atrito e desgaste, exigindo elevada qualidade nas propriedades mecânicas de dureza e tenacidade dos insertos de corte para desbaste e acabamento, com objetivo de atingir desvios médios aritméticos para rugosidade abaixo de $0,8\mu\text{m}$, na classe de rugosidade $R_a N6$, conforme padrões de acabamento superficial por processo (AGOSTINHO, 1981).

O processo de fresamento destaca-se dos demais processos de usinagem convencional pela sua versatilidade e capacidade de execução de multitarefas em centros de usinagem cada vez mais avançados. A análise detalhada dos desgastes e avarias das ferramentas aplicadas no desbaste e acabamento por fresamento constituem um importante campo de pesquisa da engenharia, que busca continuamente a evolução da tecnologia dos processos e dos materiais utilizados na usinagem.

Em relação à geometria de corte, percebe-se que variações nos ângulos podem proporcionar à ferramenta maior ou menor tempo de vida, já que uma definição adequada desta geometria resulta em melhor distribuição das forças e temperatura de corte, na interface ferramenta e superfície usinada.

Os resultados obtidos na pesquisa desenvolvida neste trabalho, poderão gerar conhecimentos para contribuir com o desenvolvimento dos procedimentos

adotados, nos parâmetros de corte, e dos materiais aplicados no fresamento de peças revestidas com a liga MnSi. Os ensaios foram realizados em uma indústria, em condições normais de fabricação.

O presente trabalho foi planejado para ser executado de forma sistêmica em uma planta fabril, onde foram desenvolvidos os experimentos de usinagem. Nos laboratórios de metrologia do IFMG, de metalografia e de caracterização do CEFETMG, foram realizados os ensaios e medições dos insertos e corpos de prova (CP). A estrutura desta dissertação constitui-se dos seguintes capítulos descritos a seguir:

- Capítulo 1: Introdução.
- Capítulo 2: Objetivos geral e específicos, com suas respectivas descrições.
- Capítulo 3: Revisão bibliográfica, com referencial teórico que fundamenta este trabalho.
- Capítulo 4: Metodologia, com a descrição dos métodos e materiais adotados para desenvolvimento da pesquisa
- Capítulo 5: Resultados e discussões, abordando sistematicamente a análise conjunta entre processos de desbaste e acabamento
- Capítulo 6: Conclusões, ponderando as principais considerações sobre resultados obtidos.
- Capítulo 7: Sugestões para trabalhos futuros, possibilidades de desenvolvimentos de novos experimentos e ensaios a partir da manipulação de variáveis dos processos.

2. OBJETIVOS

2.2 Objetivo geral

Verificar e analisar as influências que o processo de desbaste por fresamento do material pode causar no processo de acabamento, com ênfase no desgaste, avaria e vida de ferramentas de corte.

2.3 Objetivos específicos

- Coletar dados do processo de usinagem, referentes ao monitoramento do desgaste da aresta de corte do inserto, a ser executado nas visitas técnicas periódicas programadas.
- Organizar e analisar dados coletados nas visitas técnicas periódicas e compará-los com dados do referencial teórico.
- Calcular os principais parâmetros de corte em usinagem (tempo de corte, avanço, velocidade de corte, geometria de corte), para subsidiar as análises a serem realizadas.
- Realizar experimentos para análise da condição da superfície usinada (através de medição de rugosidade e dureza superficial), e para análise de desgaste e avarias em ferramentas de corte (por meio de microscopia ótica e metalográfica, microscopia eletrônica de varredura -MEV-, e *Energy Dispersive Spectroscopy* -EDS-).
- Comparar resultados obtidos nos ensaios e medições das diferentes ferramentas de corte aplicadas no processo de usinagem observado no ambiente fabril com a finalidade de discutir e concluir sobre as análises comparativas efetuadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essenciais na fabricação das peças, as ferramentas de corte sofrem desgastes e eventualmente avarias em decorrência do uso, por maior que seja a resistência e a dureza da ferramenta e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho. Entender o processo pelo qual as ferramentas se desgastam, possibilita direcionar ações coerentes e efetivas para reduzir a troca de ferramentas durante o mesmo, prolongando assim a vida da aresta de corte. O conhecimento produzido sobre o tema também é válido para o desenvolvimento de novas técnicas e materiais para as ferramentas, aumentando a capacidade de corte dos insertos, em relação aos efeitos negativos decorrentes do processo de usinagem.

3.1 Aspectos gerais da usinagem

Nos processos industriais, existe uma grande diversidade de tecnologias e métodos aplicados para obtenção de novos produtos ou subprodutos, estes controlados rigorosamente para entrada em uma nova etapa produtiva ou destinados ao consumo final.

Um processo industrial em particular, evidencia-se no meio produtivo por ser praticamente a última etapa da transformação e conformação do aço, é a usinagem de metais, que é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos (resíduos metálicos), algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas. (TRENT apud MACHADO, 2009, p.1).

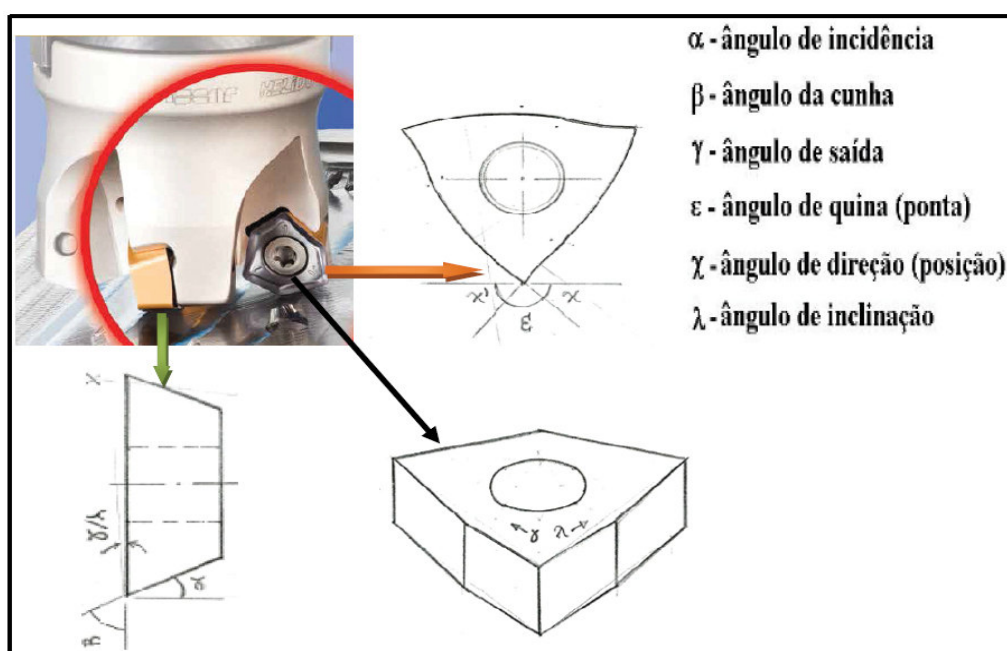
A usinagem está presente no processo de fabricação de peças com registros do início do século XVIII; peças que antes eram feitas em madeira por ferramentas em aço-carbono, e que a partir da Revolução Industrial e principalmente período pós 2ª Guerra Mundial, houve o desenvolvimento significativo de novos e mais resistentes materiais que impulsionaram a utilização do aço-liga para ferramentas de corte (MACHADO et al, 2009).

Os padrões e as normas técnicas são importantes tecnologias que se desenvolvem em conjunto ao aperfeiçoamento dos mais diversos processos. Na usinagem a aplicação dessas tecnologias desempenha importante função para garantir a confiabilidade e qualidade do trabalho executado.

Seguindo este importante princípio da tecnologia da padronização dos processos por meio da normalização técnica, obtêm-se o desenvolvimento de métodos eficazes para o aprimoramento dos processos industriais. Torna-se, então, fundamental a observação da normalização, como por exemplo na orientação do operador de um torno mecânico e fresadora para melhor executar sua tarefa, obtendo os melhores resultados durante a rotina de trabalho.

Na Figura 1 observa-se a geometria de corte de uma fresa montada com insertos de desbaste de alto rendimento.

Figura1. Principais ângulos de uma ferramenta de corte



Fonte: autoria própria (2015)

Neste trabalho de pesquisa o ângulo de incidência ou folga (α), tem atenção especial quanto à sua influência nas condições de usinagem, em função de ser a principal variável geométrica alterada, nos conjuntos de insertos de desbaste aplicados nos experimentos realizados.

O ângulo de incidência tem a função de facilitar o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta de corte (que neste trabalho ora será denominada tecnicamente pelo termo "inserto").

3.2 Processo de fresamento

A primeira fresadora universal foi desenvolvida por J.R. Brown, no ano de 1862, e foi utilizada inicialmente para a produção de canais em brocas helicoidais. Outro desenvolvimento importante no processo de fresamento ocorreu em 1896, quando F.W. Fellows desenvolveu uma máquina capaz de produzir praticamente qualquer tipo de engrenagem (MACHADO et al, 2009). No século XX surgiram produtos feitos de materiais com maior resistência mecânica que não eram usinados facilmente pelas ferramentas até então desenvolvidas. A partir deste período surgiram novos materiais e novas ligas metálicas, que deram origem às primeiras ferramentas de aço rápido e de carbonetos de tungstênio, permitindo a usinagem de materiais de elevada dureza e resistência (FERRARESI, 1977).

No período pós 2ª guerra mundial, os processos de usinagem automatizados, inicialmente chamados de CN (comando numérico), passaram a ganhar importância pela capacidade de produzir peças de geometrias complexas em materiais de difícil usinabilidade, garantindo acabamento de elevada qualidade e tolerâncias estreitas. Após 1955, estas máquinas operadas por CN, evoluíram com a integração de computadores na manufatura, originando um novo sistema de comando na fabricação de peças, tecnologia esta identificada por CNC (comando numérico computadorizado), que atualmente é a principal forma de manufatura em centros de usinagem de produção de peças seriadas e com rigoroso controle de qualidade.

Existem muitos fatores que influenciam o desgaste das ferramentas de usinagem, e, com o aumento desses, ocorre o fim da vida das ferramentas, podendo levar a avarias mais graves, as quais serão mencionadas neste estudo. Além dos mecanismos de desgastes principais (adesão, abrasão, difusão), podemos apontar também secundariamente: condições de usinagem e geometria da ferramenta como causadores de desgaste.

No que diz respeito às condições de usinagem, o desgaste das ferramentas de corte é influenciada pela velocidade de corte, avanço e também pela profundidade de usinagem. Assim pode-se considerar que as condições de usinagem são variáveis importantes e que “a diminuição da vida da ferramenta causada por um acréscimo de 10% na velocidade de corte é muito maior do que aquele que ocorre se o avanço fosse alterado na mesma proporção.” (DINIZ, 2008, p.14).

Atualmente o fresamento é considerado um dos principais processos de fabricação de peças de geometrias complexas e diversificadas quanto à forma e dimensão, obtidas através de um conjunto de operações. Neste grupo de operações, a ferramenta gira enquanto a peça, presa à mesa, é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal. Em situações especiais, a peça pode ficar estática enquanto a ferramenta executa todos os movimentos (MACHADO et al, 2009). Os processos de fresamento mais conhecidos e aplicados na industria, são:

- Fresamento tangencial (concordante ou discordante).
- Fresamento tangencial de canais ou de perfis.
- Fresamento de topo.
- Fresamento frontal.
- Fresamento com fresa de topo esférica.
- Fresamento de cavidades.

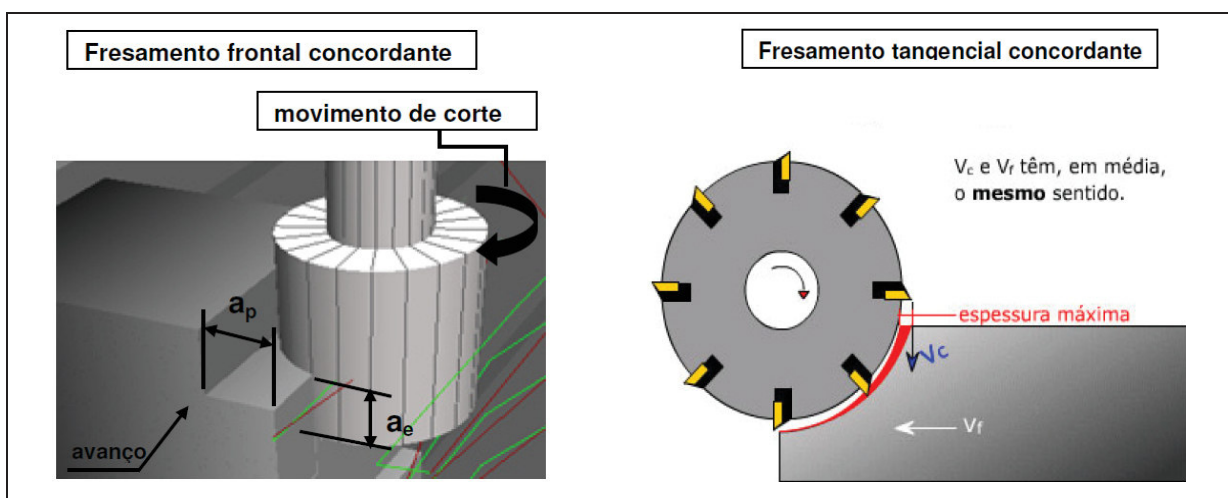
O fresamento, segundo FERRARESI (1977, p.242), é conceituado como: "Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer".

Segundo MACHADO et al (2009, p.7), a operação de fresamento é reconhecida pela versatilidade na produção de geometrias diversas, além de garantir elevadas taxas de remoção de material, visto que a ferramenta possui múltiplas arestas de corte, que se multiplicam proporcionalmente à quantidade de insertos fixados na fresa.

Fica constatada a importância desse processo na fabricação de peças, isto devido à sua versatilidade e possibilidade de confecção de modelos não obtidos em outros tipos de máquinas (plainas, mandrilhadoras, tornos, etc). A análise de desgaste dos insertos de alto rendimento e de acabamento estão sendo estudados tanto pelas universidades e institutos de pesquisa, como também pelas empresas que fornecem equipamentos e ferramentas, e pela indústria de produção de peças, buscando sempre otimizar os processos, reduzindo custos com o aumento da eficiência dos insertos, e um acabamento superficial de elevado grau de qualidade.

Neste trabalho o tipo de processo desenvolvido nos experimentos é o fresamento periférico, resultante da combinação do fresamento frontal e tangencial concordante, em função do ataque simultâneo das arestas de corte principal e secundária, respectivamente nos sentidos laterais e ascendentes da ferramenta para a peça. Na Figura 2 observa-se o modelo de posição do corte de desbaste executado nos experimentos.

Figura 2. Fresamento periférico concordante.



Fonte: Modelamento de sistemas, adaptado (2015)

Para o fresamento frontal, a fim de se obter um contato favorável entre aresta de corte e a superfície do material a ser usinado, o centro da fresa deve estar situado dentro da largura total da superfície da peça. Dados empíricos sugerem que o diâmetro da fresa (D) seja de 20 a 50% maior que a largura da superfície usinada.

Segundo DINIZ et al (2008, p.228) usualmente utiliza-se a relação aproximada de 13/10, entre " D " e " a_e " representada na Equação (1), para a escolha do diâmetro da fresa. Isso se deve ao fato de que o choque fresa-peça não deve ocorrer quando a fresa tem diâmetro igual ou pouco maior que a largura da peça, e os cavacos formados no início do corte serão muito finos com grande valor de pressão específica de corte.

$$D = 1,3 * a_e \quad (1)$$

Onde: D = diâmetro da fresa
 a_e = largura da superfície usinada

A combinação do fresamento tangencial com o fresamento frontal para o desenvolvimento dos experimentos realizados, impossibilitou a aplicação da relação recomendada entre diâmetro da fresa (D) e largura da superfície usinada (a_e), que na figura 2 assume a condição de a_p , em função da combinação dos dois tipos de fresamento associados.

3.3 Materiais para ferramenta de corte













Considera-se uma série de fatores na seleção do material da ferramenta de corte a ser utilizado, dentre eles a microestrutura do material a ser usinado, dureza e tipo de cavaco, processo de usinagem, condições da máquina operatriz, forma e dimensões da própria ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e características do material da ferramenta (alta dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade, estabilidade química).

As ferramentas de aço carbono e baixa liga, são de custo mais baixo, maior disponibilidade, melhor usinabilidade, facilidade de têmpera, etc. O principal inconveniente dessas ferramentas é a redução da dureza, e, portanto, sua habilidade de operarem como ferramenta de corte, em temperaturas relativamente baixas, em torno de 250°C. Os aços rápidos são aços liga cujos elementos de liga principais são W, Mo, Cr, V, Co e Nb com boa tenacidade, elevada resistência ao desgaste e dureza a quente. Em algumas ferramentas de corte, como brocas, machos, alargadores e alguns tipos de fresas, a aplicação de materiais mais resistentes ao desgaste como metal duro ou cerâmico, é muito restrito devido a sua forma e dimensão. Assim, tem-se algumas ferramentas de aço rápido onde se buscam algumas melhorias, através da aplicação de uma camada de revestimento de um material mais resistente ao desgaste, como o TiN, TiC, aplicados pelos processos CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e PVD (*Physical Vapor Deposition*).

A ferramenta de metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (níquel, ou cobalto). As partículas duras são WC em combinação com outros TiC, TaC e NbC. Este material de ferramenta combina dureza a alta temperatura e tenacidade, devido à sua variação de composição (DINIZ, A.E. et. al, 2000).

Na tabela 1 são apresentados os grupos de ferramentas, designados pelas letras P, M, K, N, S, H e pelas respectivas cores padronizadas.

Tabela 1. Classificação de grupos de ferramentas segundo a ISO.

Material	ISO	Dureza e resistência ao desgaste	Tenacidade
P Aço	P10		
	P20		
	P30		
	P40		
M Aço Inoxidável	M10		
	M20		
	M30		
	M40		
K Ferro Fundido	K01		
	K10		
	K20		
	K30		
N Ligas de Alumínio	N10		
	N20		
	N30		
S Ligas Resistentes ao Calor Ligas de Ti	S01		
	S10		
	S20		
	S30		
H Materiais Endurecidos	H01		
	H10		
	H20		
	H30		

Fonte: ISO 513/2004.

A Classe P utiliza-se na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos longos e dúcteis. São constituídos de metais duros de elevado teor de TiC+TaC que lhes confere uma elevada dureza a quente e resistência ao desgaste.

A Classe M é empregada na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam tanto cavacos longos como curtos. É um grupo de propriedades intermediárias, destinada a ferramentas de aplicações múltiplas.

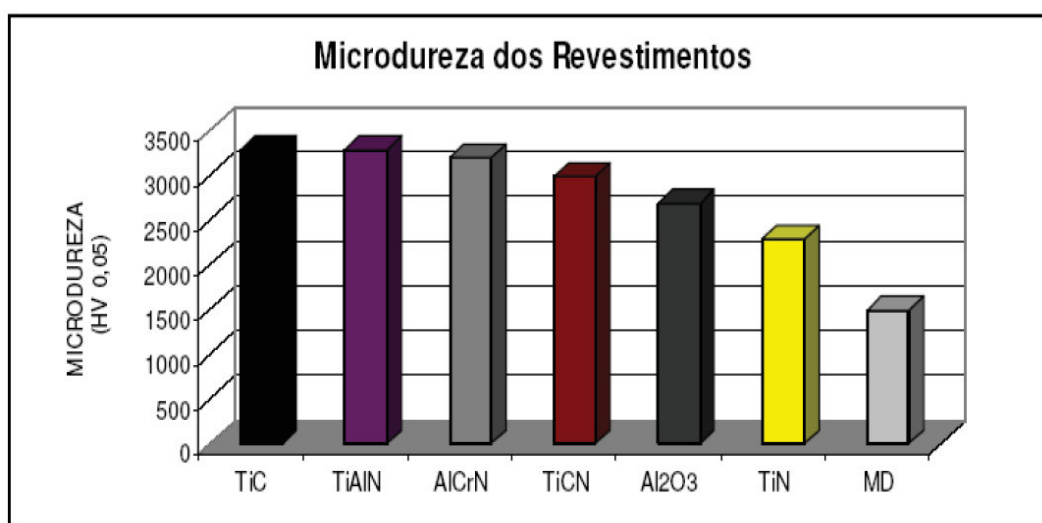
A Classe K se destina à usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos e materiais não-metálicos. A classe K foi o primeiro tipo de metal duro a ser desenvolvido, sendo composto de carbonetos de tungstênio com cobalto.

A classe N utiliza-se na usinagem dos metais e ligas não ferrosas (ligas de alumínio e cobre), a classe S para as superligas ou ligas resistentes ao calor (Fe, Ti, Ni, Co), e a classe H para os aços endurecidos (aços fundidos e ferros fundidos temperados).

Segundo SANTOS & SALES (2007, p.138), os revestimentos adicionados nos insertos de metal duro, com dureza elevada, e que a mantêm a altas temperaturas, contribuem para o aumento da resistência ao desgaste, reduzindo a tendência de surgimento do desgaste abrasivo e também da propensão do desgaste de cratera.

Na Figura 3 observam-se resultados de ensaio de microdureza para os principais tipos de revestimentos aplicados ao metal duro, com evidência para as microdurezas do TiAlN e TiN, revestimentos que compõem a camada principal dos insertos analisados neste estudo.

Figura 3. Microdureza dos revestimentos aplicados no metal duro



Fonte: ALMEIDA (2010) apud ALBELE et al (2002)

Os revestimentos comerciais usados usualmente em indústria de ferramenta para usinagem são carboneto de titânio (TiC) e óxido de alumínio (Al₂O₃) (processo CVD), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) (processos combinados PVD e CVD); nitreto de titânio alumínio (TiAlN) (processo PVD); nitreto de cromo alumínio (AlCrN). O Metal Duro (MD) apresenta em média dureza de 1800HV, sendo o principal substrato na aplicação de revestimentos para melhorar o desempenho das ferramentas de corte.

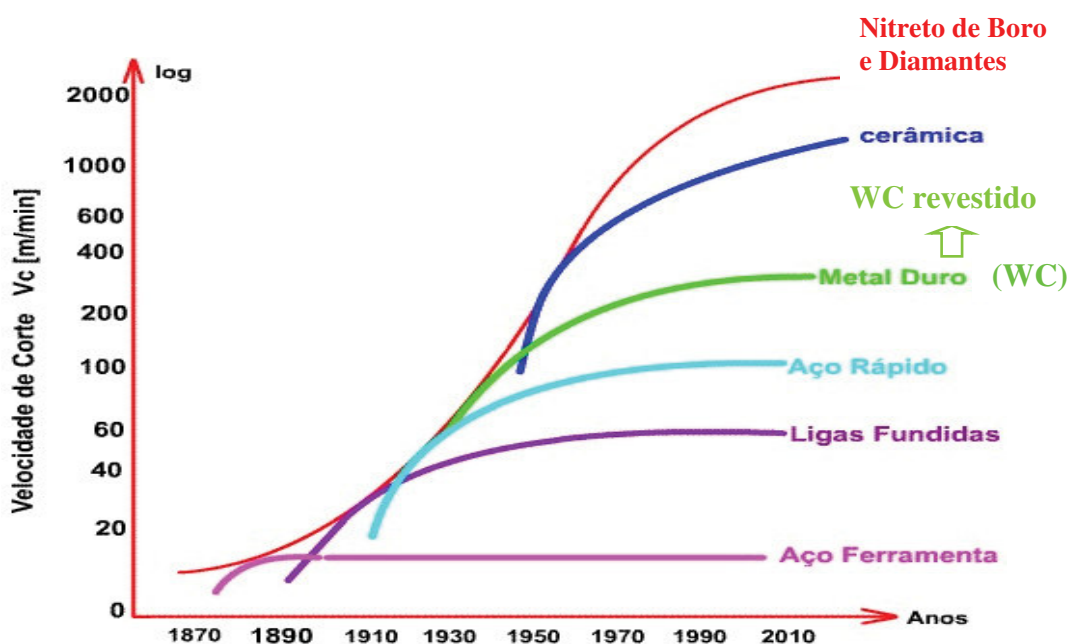
O sucesso dos revestimentos em ferramenta de corte resulta das propriedades mecânicas (dureza a quente, resistência ao desgaste e tensões compressivas) e físicas (estabilidade química, boa adesão, resistência à corrosão), tanto à temperatura ambiente quanto à temperaturas mais elevadas .

A dureza dos revestimentos de TiAlN e TiN é de 3000HV e 2500HV respectivamente, com espessura de camada entre 380nm a 4 μ m, coeficiente de atrito a seco com aço de 0,4, e tensão interna de 2,5GPa. A temperatura máxima de trabalho é de 600°C e a coloração amarela. Estes revestimentos caracterizam a evolução tecnológica na aplicação do metal duro (WC) ao longo das ultimas décadas, principalmente em função dos processos de revestimentos PVD (deposição física de vapor) e CVD (deposição química de vapor).

As falhas da ferramenta de corte (desgaste e fratura) representam aproximadamente 20% da vida de uma ferramenta na máquina. O desgaste da ferramenta atua diretamente na qualidade da superfície da peça, na sua precisão dimensional e, finalmente, no custo do produto final.

Na figura 4, observa-se a curva tecnológica de aumento de v_c em função do tempo para diferentes tipos de materiais para ferramentas de corte.

Figura 4. Evolução tecnológica do WC e outros materiais para ferramenta.



Fonte: VADHER (2013), adaptado (2015).

Os insertos de metal duro revestido apresenta-se atualmente em 80-90% de todas as pastilhas para ferramenta de corte. Sua aplicação ampla como um material da ferramenta deve-se à sua exclusiva combinação de resistência ao desgaste e tenacidade (SANDVIK, 2014).

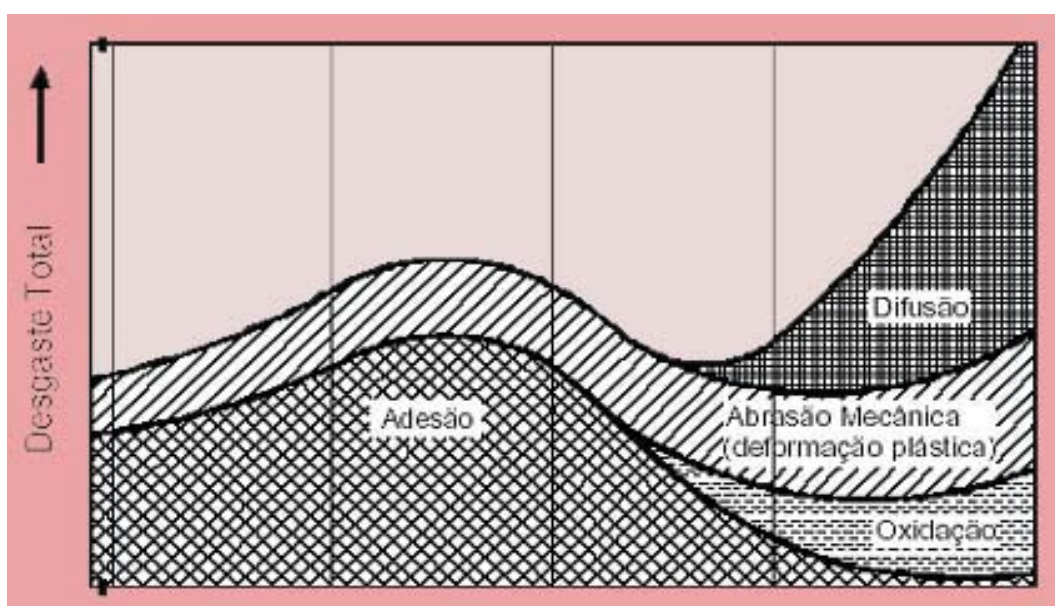
Porém somente o revestimento não é suficiente para propiciar a ferramenta o alto desempenho esperado. A evolução da produção do metal duro, com o processamento de finos grãos de WC, conseguiram aumentar a resistência ao desgaste e elevar a dureza, sem diminuir significativamente a tenacidade do carboneto. Isto foi possível a partir do momento que o processamento do pó obteve microgrãos (grãos finos com \varnothing na ordem de μm), e posteriormente nanogrãos (grãos submicron com \varnothing na ordem de nm).

3.4 Desgaste em ferramentas de corte

As ferramentas de corte estão sujeitas a ações mecânicas e térmicas durante o processo de usinagem. Por isso sofrem desgaste ao longo de sua utilização, sendo necessária a sua substituição com o passar do tempo. O desgaste é a perda de material pela ferramenta de corte, alterando sua geometria original.

Na figura 5 observam-se os mecanismos de desgaste de uma ferramenta.

Figura 5. Mecanismos de desgaste de uma ferramenta

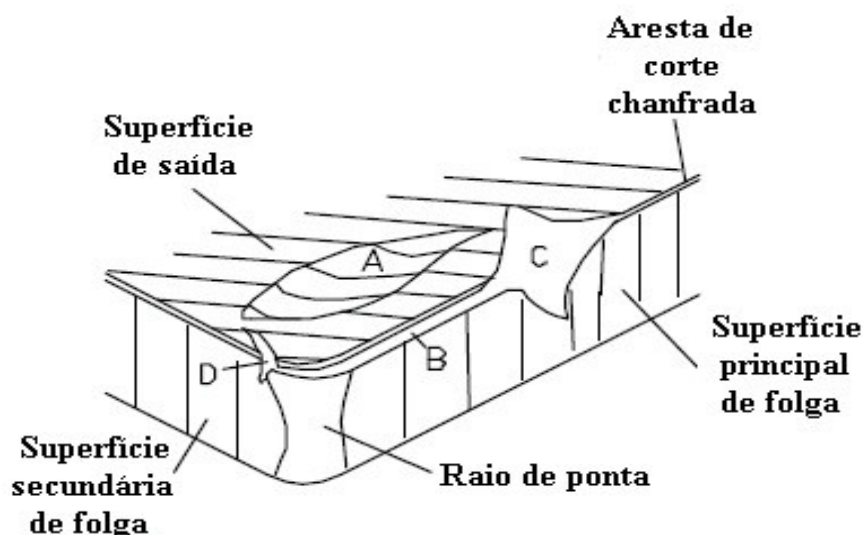


Fonte: VIEREGGE apud FERRARESI (1970).

Os mecanismos de desgaste de difusão, abrasão ou adesão (*attrition*), atuam tanto isoladamente quanto em conjunto, promovendo desgastes através de deformação plástica por cisalhamento, altas tensões de compressão ou entalhe. O desgaste abrasivo envolve a perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento, causado por partículas de elevada dureza relativa. O desgaste por aderência (*attrition*) ocorre quando o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta torna-se irregular, sob estas condições, fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta são arrancados e arrastados junto com o fluxo de material. O desgaste difusivo envolve a transferência de átomos de um material para outro e é dependente da temperatura e solubilidade dos elementos da zona de fluxo.

Segundo MACHADO et al (2009, p.233) "o desgaste e a deformação acontecem tanto nas superfícies de folga como na superfície de saída das ferramentas, em cortes contínuos ou interrompidos". Na Figura 6, observam-se três principais formas de desgaste: o desgaste de cratera representado na região A, o desgaste de flanco na região B e o desgaste de entalhe nas regiões C e D.

Figura 6 - Principais formas de desgaste de uma ferramenta de corte.



Fonte: TRENT (1982) apud Machado et al(2009), p. 247.

O desgaste por craterização é muito comum quando se fresa o aço. Porém, quando existir um equilíbrio entre o desgaste frontal (no raio de ponta) e a craterização (na superfície de saída), não será necessária a troca da aresta. Mas se a craterização se torna excessiva, existe o risco de fratura do fio de corte. Os revestimentos das ferramentas de corte por meio dos processos PVD e CVD

aumentam a resistência ao desgaste na superfície de folga, minimizando a ocorrência de crateras na ferramenta.

Na Figura 7, observa-se o início de um processo de craterização entre a ponta da ferramenta e a superfície de saída de cavaco. Para evitar a craterização é recomendado reduzir a velocidade de corte, selecionar uma classe de ferramenta com maior resistência ao desgaste e também empregar uma classe revestida (SANDVIK, 2014).

Figura 7 - Desgaste de cratera na superfície de saída de cavaco.



Fonte: SANDVIK (2012).

O desgaste de flanco é o desgaste natural da ferramenta e pode provocar o lascamento de aresta e abreviar a vida do fio de corte. Na Figura 8, observa-se a propagação do desgaste de flanco a partir do raio na ponta da ferramenta se estendendo ao longo da aresta de corte. Um rápido desgaste frontal pode ser evitado com a redução da velocidade de corte sem modificar o avanço da mesa. O uso de uma ferramenta de classe de metal duro mais resistente ao desgaste e revestida é recomendada neste caso (SANDVIK, 2014).

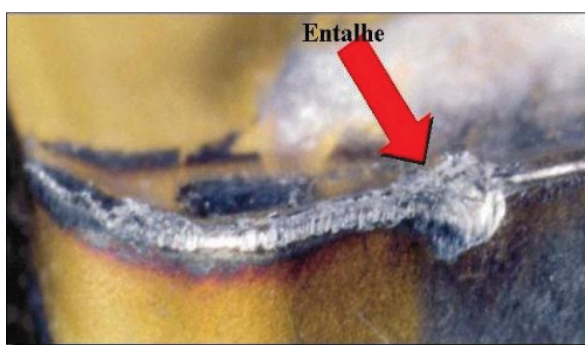
Figura 8 - Desgaste de flanco na aresta de corte e raio de ponta.



Fonte: SANDVIK, (2012).

O desgaste de entalhe é o desgaste da pastilha caracterizado por dano excessivo localizado na face de saída e no flanco da pastilha na linha da profundidade de corte, na Figura 9, pode ser observado um entalhe na aresta de corte causado pela adesão (solda por pressão de cavacos) e uma deformação na superfície endurecida. Um correto posicionamento da fresa em relação a peça fresada contribui para evitar fissuras e trincas que geram o entalhe, além de reduzir velocidade de corte e aumentar o avanço por dente (SANDVIK, 2014).

Figura 9 - Desgaste de entalhe na aresta de corte.



Fonte: SANDVIK (2012).

Existem outros mecanismos de desgaste que também podem comprometer a vida da ferramenta, na geração de avarias e quebras da pastilha.

As avarias nas ferramentas de corte também serão consideradas e estudadas nesta proposta. Entende-se por avarias como o “fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte.” (MACHADO, 2009). A quebra pode ser causada por trincas mais profundas e ocorre com mais frequência em materiais com baixa tenacidade. Já o lascamento, pode ser provocado por trincas mais superficiais e ocorre também em ferramentas de aço rápido. As trincas, ao contrário da quebra e do lascamento, não retiram material da ferramenta de corte, de imediato, mas causam danos.

Na Figura 10 observa-se o lascamento de uma ferramenta de corte, formado pelo desprendimento de pequenas partículas de metal duro do fio de corte. É admissível desde que não afete a vida da ferramenta, que fica comprometida com o aumento da quantidade de lascamentos e sua propagação para as superfícies de folga e de saída e/ou escoamento de cavacos, dependendo da medida de ângulo de folga e saída adotados na geometria de corte da ferramenta.

Figura 10 - Lascamento de uma ferramenta.



Fonte: SANDVIK, (2012).

As avarias denominadas APC (aresta postiça de corte), traduzida do original BUE (*build up edge*), surge em função da deposição do cavaco fundido sobre a superfície de saída e ponta da ferramenta de corte. Esta avaria ocorre normalmente em baixas velocidades de corte, combinada com materiais de baixa dureza relativa a dureza do inserto aplicado ao corte, causando assim, a fusão do material e a sua deposição sobre a ferramenta de corte. A APC altera a geometria de corte da ferramenta, comprometendo as forças atuantes no corte efetivo do material.

Na Figura 11 observa-se uma aresta postiça sobre a superfície de saída de cavaco de uma ferramenta de corte.

Figura 11. Aresta postiça de corte (BUE- *build up edge*)



Fonte: SANDVIK (2014).

Este tipo de desgaste é causado por solda por pressão do cavaco na pastilha, que ocorre em função das baixas velocidades de corte na usinagem de materiais compostos por mais de uma fase, fundindo o material usinado a partir do cavaco que é soldado por meio das forças de pressão que atuam na interface ferramenta e

cavaco. É mais comum na usinagem de materiais ductéis que recebem esta denominação em função de sua baixa dureza e elevada plasticidade, como aços com baixo teor de carbono, aços inoxidáveis e alumínio. Baixa velocidade de corte aumenta a formação de aresta postiça.

Na Figura 12 observa-se a deformação plástica na ponta da ferramenta se estendendo para as arestas principal e secundária de corte.

Figura 12. Deformação plástica



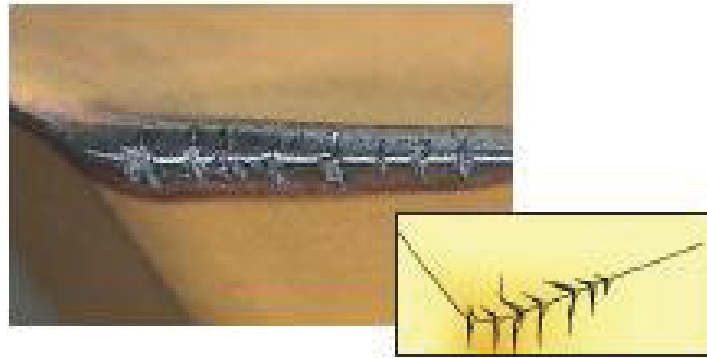
Fonte: SANDVIK (2014).

A deformação plástica ocorre quando o material da ferramenta é aquecido e submetido a tensão de compressão. Isto acontece quando a temperatura de corte está muito alta para uma determinada classe de dureza e tenacidade para ferramentas. Em geral, as classes mais duras e as coberturas mais espessas melhoram a resistência ao desgaste por deformação plástica.

Na Figura 13, observa-se a formação de trincas térmicas causadas pela variação de temperatura produzidas nas operações de fresamento, quando surgem fissuras e trincas perpendiculares ao fio de corte.

As trincas de origem térmica são causadas pela variação de temperatura (ΔT) na ferramenta de corte, que ocorre devido ao aquecimento da ferramenta na parte ativa do processo e ao seu resfriamento durante a parte inativa. Essa variação, conseqüentemente, provoca flutuações na tensão da ferramenta, que originam trincas por fadiga. Essas trincas aparecem nas superfícies de folga e de saída de ferramentas de metal duro, perpendicularmente à aresta de corte (SANDVIK, 2014).

Figura 13. Trincas térmicas



Fonte: SANDVIK (2014).

Quando a temperatura na aresta de corte muda rapidamente de quente para frio, várias trincas podem surgir perpendiculares à aresta de corte. Trincas térmicas são relativas a cortes interrompidos, comuns em operações de fresamento e agravadas pelo uso de fluído refrigerante. As trincas de origem mecânica podem, também, causar trincas que aparecem nas superfícies de folga e de saída da ferramenta, porém, paralelamente à aresta de corte. Esse tipo de desgaste ocorre devido aos choques mecânicos (impactos) sofridos durante a entrada ou saída da aresta de corte na peça, e também podem provocar lascamentos.

3.5 Evolução do desgaste e vida das ferramentas de corte

O fim da vida de uma ferramenta de corte está relacionado com a perda da geometria da aresta de corte, que previamente definido no planejamento da usinagem, possibilita a troca programada da ferramenta antes do possível colapso consequente da evolução do grau do desgaste. A vida da ferramenta (T), em função da velocidade de corte (v_c), pode ser expressa pela Equação (2) simplificada de Taylor.

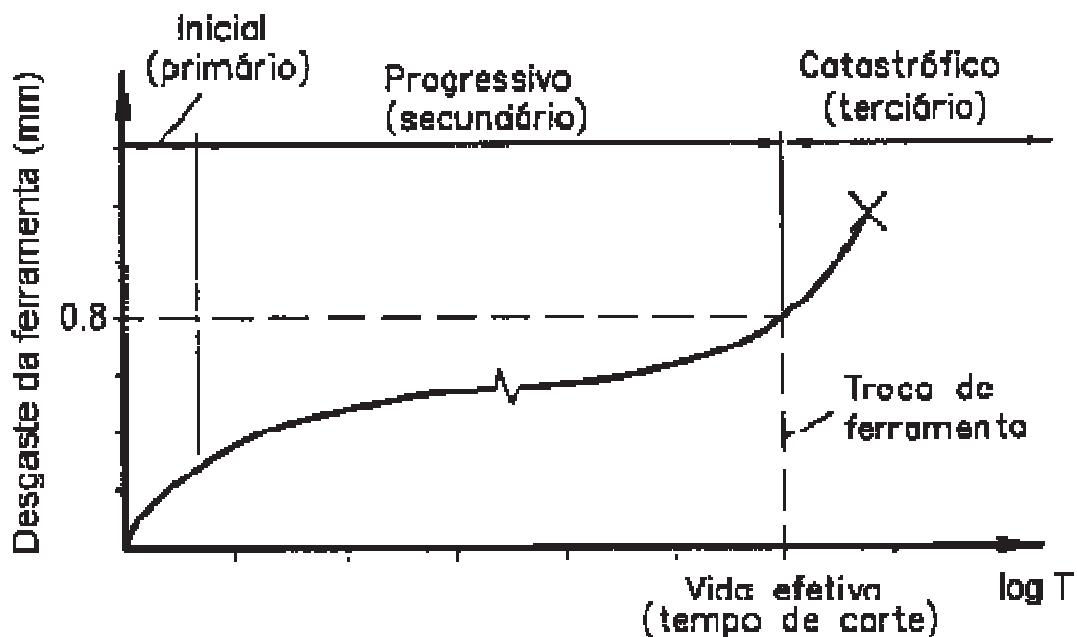
$$T = K v_c^{-x} \quad (2)$$

onde: T = vida da ferramenta
 K e x = coeficientes relacionados ao par ferramenta/peça
 v_c = velocidade de corte

Segundo FERRARESI (1977), vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido.

Na Figura 14 observa-se a curva de engenharia para os ciclos de desgaste de flanco para uma ferramenta de corte.

Figura 14. Ciclos de desgaste de uma ferramenta de corte.



Fonte: SMITH, 1989; apud SANTOS & SALES, 2007.

É possível expressar a vida de uma ferramenta de corte, conforme descrito na norma ISO 3685, que associada a estudos preliminares experimentais, possibilitam a quantificação da longevidade da ferramenta, que pode ser expressa em número de peças produzidas e no percurso efetivo de corte, sendo estas expressões as mais utilizadas para esta definição.

SALES & SANTOS (2007, p.160), listam os principais fatores que influenciam o de desgaste de uma ferramenta:

- Iminência de quebra da cunha cortante.
- Elevadas temperaturas na interface cavaco-ferramenta.
- Tolerâncias dimensionais.
- Acabamento superficial.
- Aumento das dimensões das rebarbas.
- Elevação das forças de usinagem.

- Nível de ruído maior.
- Crescente nível de vibrações.

3.6 Sistemas estático e dinâmico de fixação de peças para usinagem

O acabamento superficial é verificado por meio de ensaios de rugosidade, que informam as condições da textura superficial ou da topografia de superfície. Quando na análise de superfície é observado impressões geométricas caracterizadas por mosaicos e formas que se repetem em intervalos de seções regulares, refere-se às marcas de "*CHATTER*", que surgem na superfície usinada em consequência de vibrações auto excitadas durante o processo de usinagem entre a interface ferramenta-peça.

As marcas de *CHATTER* estão relacionadas as forças e condições de mudança que tendem a criar vibrações ou desvios intermitentes aos elementos do sistema de usinagem. Essas vibrações auto excitadas ocorrem em faixas de frequência natural. Quando as forças de usinagem estão atuando na interface ferramenta-peça, atingem níveis de vibrações na ponta ou aresta de uma ferramenta de corte e deixa uma "ondulação", na superfície usinada. A ondulação representa uma série de altos e baixos pontos correspondentes às forças alternadas altas e baixas criadas pela aresta de corte vibrante. O espaçamento das ondas reflete a frequência da vibração (ALBERT, 2007).

Quando as partes de alta e baixa ondulação coincidem com as forças elevadas e baixas produzidas pela ferramenta de corte em passagens subsequentes, os desvios são mais periódicos. Este efeito é como um ciclo vicioso. Ele fica cada vez pior, acaba chegando a um ponto em que essas condições de usinagem podem afetar adversamente os resultados de usinagem.

Esse tipo de vibração é comumente chamado de *chatter* por causa do som distintivo que é produzido durante a usinagem nessas condições, o termo "*chatter*" empregado na área de usinagem também pode ser traduzido no sentido de um fenômeno de trepidação em uma determinada superfície. A evidência visível nas impressões registradas pela ferramenta na superfície usinada é um padrão notável de marcas de *CHATTER*, indesejadas sobre a peça.

Na Figura 15 observam-se superfícies com marcas de *CHATTER* (a), e sem as referidas marcas (b).

Figura 15. (a) Superfície usinada com marcas de *CHATTER*, (b) Superfície usinada sem marcas de *CHATTER*.



(a)

(b)

Fonte: Modern Machine Shop (ALBERT, 2007).

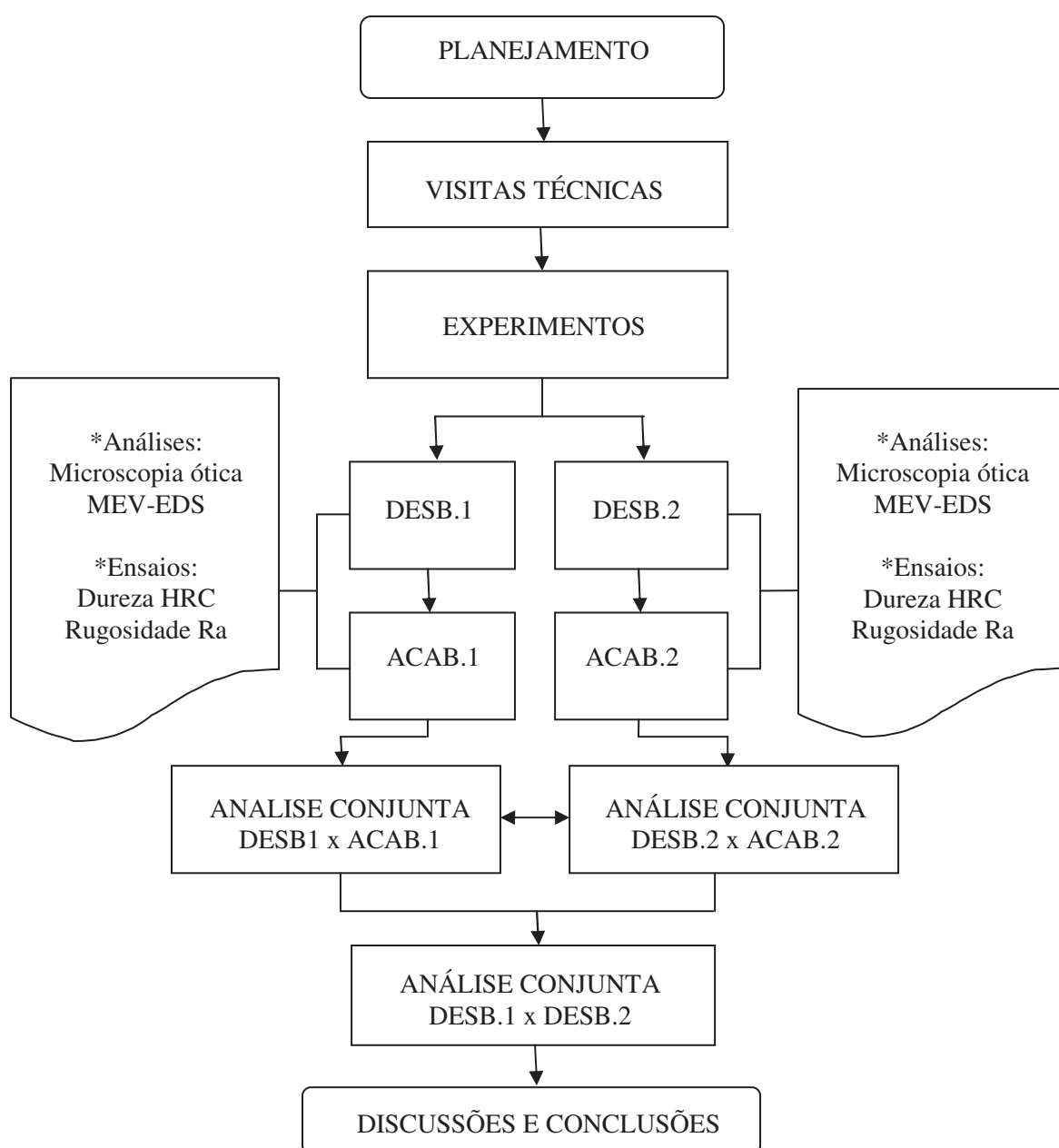
As principais causas de vibração na usinagem são de origem estática e dinâmica. As vibrações de origem estática ocorrem devido ineficiência dos dispositivos de fixação da base-barramento da máquina, e dos limitadores de movimento das peças a serem usinadas. As vibrações de origem dinâmica ocorrem em função das deflexões e torções dos eixos árvores primários e secundários de máquina, e nos cabeçotes rígidos e angulares de fixação de fresas e porta-ferramentas (ALBERT, 2007).

Estas duas condições foram constatadas nos processos de desbaste observados neste trabalho de pesquisa, gerando a suspeita de provável causa de irregularidades na superfície usinada, oriundas do conjunto das vibrações de origem estática e dinâmica.

4. METODOLOGIA

O trabalho experimental foi desenvolvido por meio da coleta e análise de dados de processos de usinagem de metais, realizado através de visitas técnicas programadas em um centro de usinagem previamente selecionado para execução do processo de fresamento. Na Figura 16 observa-se o fluxograma dos procedimentos adotados para desenvolvimento das atividades propostas.

Figura 16. Fluxograma de procedimentos



Fonte: elaboração própria (2015).

Após a execução dos experimentos previamente planejados, as ferramentas de corte foram observadas em microscópios ótico e eletrônico de varredura para a visualização e registro do desgaste e avarias. Para auxiliar a análise de acabamento superficial usinado, também foi realizado ensaio de dureza Rockwell com durômetro de bancada, para obter dados referentes a condição mecânica de resistência a penetração e desgaste da superfície usinada e dos insertos.

4.1 Visitas técnicas

O projeto teve como proposta de desenvolver as atividades experimentais em um ambiente fabril, com coleta e análise de dados de processos de usinagem de metais, realizado por meio de visitas técnicas programadas em centros de usinagem previamente selecionados.

No planejamento deste trabalho, organizaram-se 03 etapas de execuções de visitas técnicas, descritas respectivamente como:

- 1ª Etapa: triagem e seleção do centro de usinagem para desenvolvimento do projeto.
- 2ª Etapa: apresentação do projeto a empresa selecionada e solicitação de autorização para desenvolvimento do projeto dentro do cronograma previsto.
- 3ª Etapa: planejamento e execução dos experimentos necessários para desenvolvimento do projeto.

Durante a execução dos experimentos previamente planejados, foi utilizado o método de crono-análise para tomada do tempo de corte (t_c), a utilização de microscópio ótico e eletrônico de varredura (MEV) foram aplicados para análise de desgaste e avarias das ferramentas de corte, e também para auxiliar a análise de acabamento superficial usinado, e, por fim, complementando a análise superficial, foram utilizados rugosímetro e durômetro para obter dados referentes à condição mecânica da superfície usinada.

4.2 Materiais

As peças usinadas foram mancais que compõem equipamento para manutenção de malha ferroviária, onde a superfície do mancal é revestida com liga de Mn e Si, constituintes de arame maciço cobreado, depositados por meio de um processo automatizado de soldagem MIG - *Metal Inert Gas*-, em um substrato de aço ABNT 1020, conferindo-lhe dureza média de 46,5HRC.

Para realizar o ensaio de rugosidade, o ensaio de dureza, e análises microscópicas, foram confeccionados quatro corpos de prova (CP), com os mesmos parâmetros de material, revestimento e fresamento dos mancais. Para cada processo analisado neste estudo, foi confeccionado um CP, com o objetivo de caracterizar o material usinado em função do processo de usinagem executado durante os experimentos.

Esta produção de CP foi necessária devido à impossibilidade de retirar a peça do local de usinagem para um laboratório, considerando que a peça possui geometria complexa, dimensões e peso elevados para executar a remoção, e também por força de contrato, que não permite este tipo de deslocamento do material do local de manutenção e estoque da peça.

A remoção de uma amostra da própria peça para análise também não foi permitida, por força de patente sobre o produto, de detenção da mineradora contratante do centro de usinagem onde foram realizados os experimentos, e também pelo fato de ser uma peça que tem estoque mínimo, sendo desmontada para manutenção em um sistema parecido com o *just in time*, modelo de produção enxuta japonesa.

4.2.1 Parâmetros de preparação do CP

O substrato do CP é de material metálico com características e propriedades similares do material empregado no braço articulável, que é o aço ABNT 1020.

Elaborado o projeto para confecção do CP, foi planejado e executado o revestimento de Mn e Si por meio do processo automatizado de soldagem MIG, seguindo rigorosamente os parâmetros originais do processo de revestimento dos mancais do braço articulável, observa-se na Figura 17 e na tabela 2, o revestimento executado e os parâmetros de soldagem.

Figura 17. Revestimento de Mn e Si por soldagem MIG.



Fonte: elaboração própria, (2015).

Tabela 2. Parâmetros do processo MIG para revestimento

Parâmetros	Grandezas/unidades
Tensão (fonte)	380V
Tensão (saída)	26,3V
Corrente	32A
DBCP (distância bico-peça)	8-12mm
Velocidade do arame	8m/min
Vazão do gás	28 l/min
Gás	Ar + 20% CO ₂
Arame	ASME SFA-5.18-Ø 1mm

Após executado o revestimento da superfície do CP, foram executados os processos de desbaste e acabamento, seguindo os mesmos parâmetros de usinagem aplicados durante a realização dos experimentos nas peças fresadas.

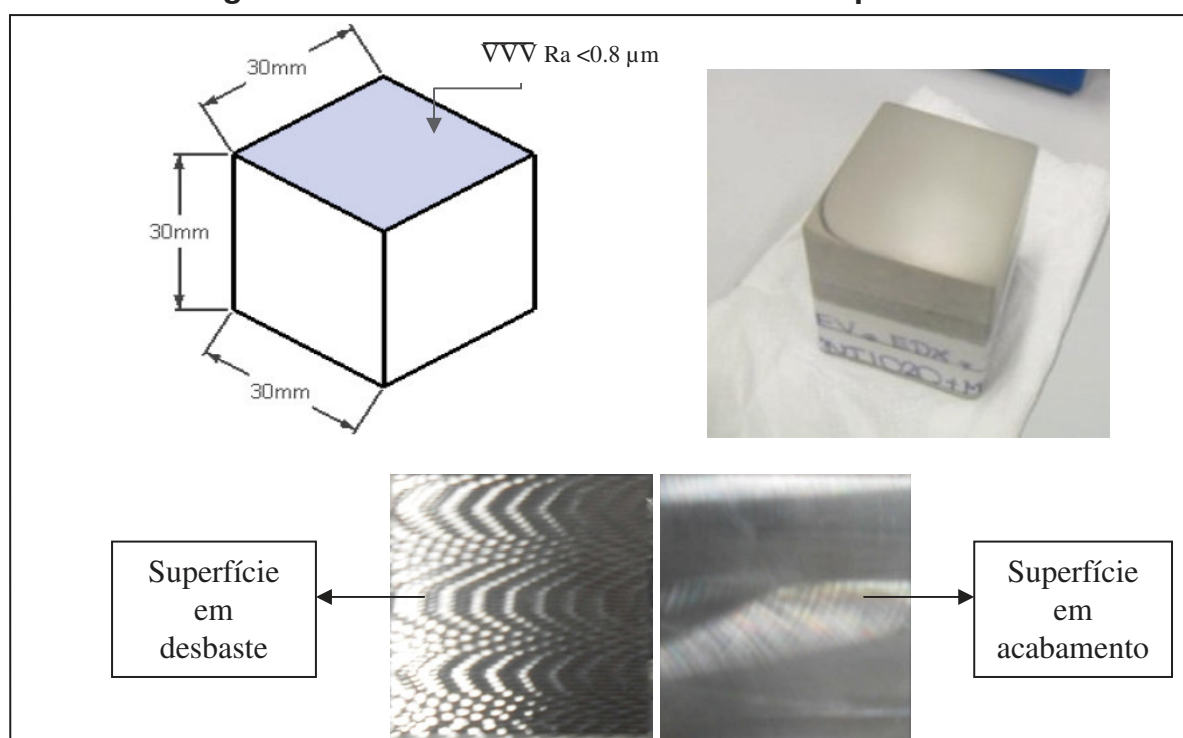
O 1º CP foi fresado utilizando um jogo de insertos novos de desbaste do 1º grupo de ferramentas. O 2º CP foi fresado utilizando o jogo de insertos de desbaste que usinou o 1º CP e após o desbaste foi utilizado um jogo de insertos novos de acabamento.

O 3º CP foi fresado utilizando o jogo de insertos novos de desbaste do 2º grupo de ferramentas. O 4º CP foi fresado utilizando o jogo de insertos de desbaste que usinaram o 3º CP e após o desbaste foi utilizado um jogo de insertos novos de acabamento.

Após a realização dos ensaios de microscopia ótica, medição da rugosidade das superfícies em desbaste (CP1 e CP3) e em acabamento (CP2 e CP3), foram preparadas as superfícies de acabamento para a realização de análise no MEV para avaliar a microestrutura e composição química.

A confecção dos CP está descrita conforme dimensões na Figura 18, seguindo todos os parâmetros de usinagem do processo de desbaste 1 e 2, e acabamento 1 e 2 por fresamento observado, que estão detalhados na seção 4.3 da metodologia. O projeto técnico do CP pode ser verificado no ANEXO C.

Figura 18. Medidas do CP e acabamento superficial final.



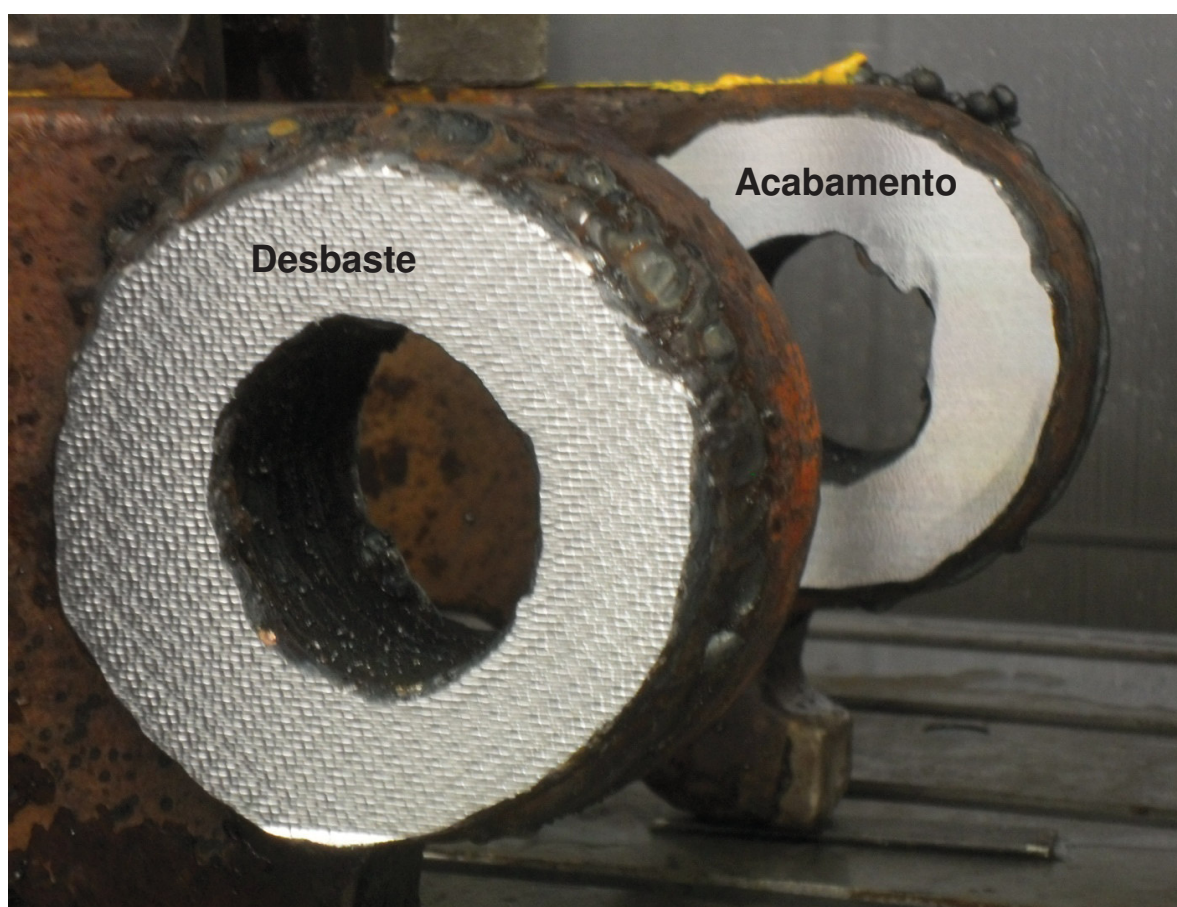
Fonte: elaboração própria, (2015).

O bloco prismático em aço ABNT 1020 possui as dimensões de 30mmx30mmx30mm, em função da reprodutibilidade necessária das condições de fixação do material a ser usinado, com o objetivo de que a superfície fresada tenha as mesmas características topográficas dos mancais usinados.

4.2.2 Mancais usinados

O conjunto usinado (mancais do braço de articulação para movimentação de trilhos) da máquina de montagem e desmontagem de trilhos ferroviários a ser analisado neste processo é demonstrado na Figura 19, com a sequência respectiva das superfícies desbastada e em acabamento final, usinadas pelos insertos de desbaste e pelos insertos de acabamento. A caracterização das superfícies usinadas de cada parte dos processos de desbaste e acabamento foi realizada utilizando microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV). No caso da superfície analisada foi necessária a confecção de quatro corpos de prova produzidos seguindo os mesmos parâmetros de usinagem dos mancais e mantendo a mesma composição química do revestimento de Mn+Si, depositado pelo processo de soldagem MIG com arame classe ASME SFA-5.18, no substrato em aço ABNT 1020.

Figura 19. Mancais com superfícies desbastada e em acabamento.



Fonte: autoria própria, (2014)

A espessura aproximada da liga de Mn e Si depositada no substrato fica entre 25 e 30mm. A exigência de um acabamento superficial de baixa rugosidade e de alta resistência à abrasão, requer um material com propriedades mecânicas específicas, para serviço em condições de severo atrito e desgaste superficial, principalmente no que se refere à dureza obtida e à rugosidade superficial.

A análise da microestrutura para esta superfície tem por objetivo verificar se o resultado do processo de revestimento foi alcançado dentro do projeto de reparo, e se a composição química está dentro dos parâmetros esperados para a liga de Mn e Si depositadas no substrato de aço ABNT 1020.

4.3 Máquina-ferramenta e ferramental

A máquina-ferramenta utilizada foi um centro de usinagem multitarefa, rotação máxima 12.000RPM e potência nominal de 30cv, controlada por software de comando numérico computadorizado: SIEMENS 828D.

Na Figura 20 observa-se a perspectiva do centro de usinagem utilizado na realização dos experimentos.

Figura 20. Centro de usinagem ROMI D1500.

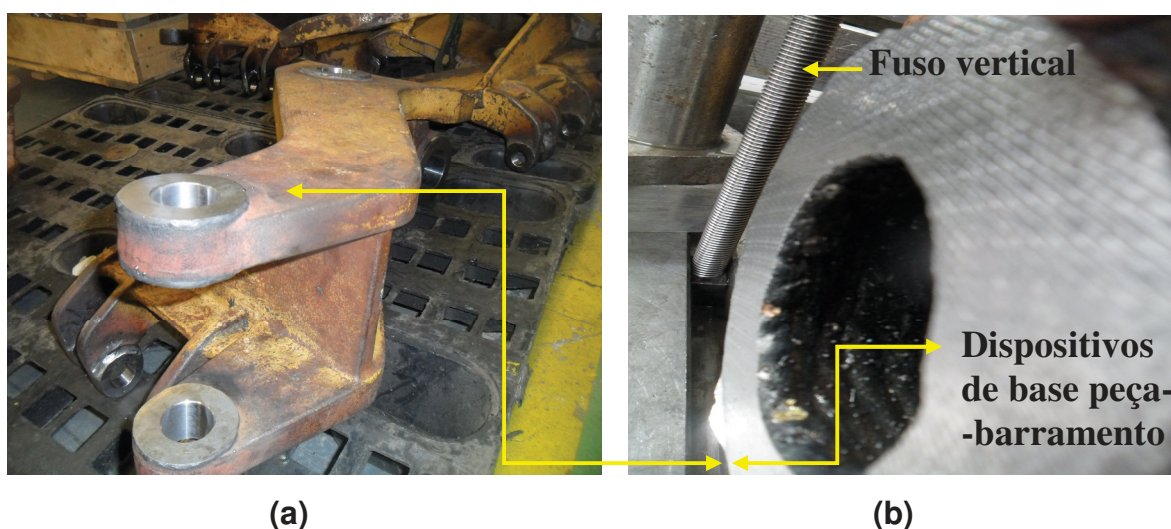


Fonte: ROMI, (2011)

O sistema de fixação tanto dos CP, quanto da peça (braço articulável) é considerado rígido, pela aplicação de dispositivos laterais, longitudinais e transversais.

Na Figura 21(a) observa-se visão panorâmica da peça (braço articulável), e na Figura 21(b) observa-se uma parte do sistema de fixação adotado na mesa-barramento do centro de usinagem utilizado para fresamento dos mancais.

Figura 21. (a) Vista panorâmica da peça, (b) Sistema de fixação da peça.



Fonte: autoria própria, (2014)

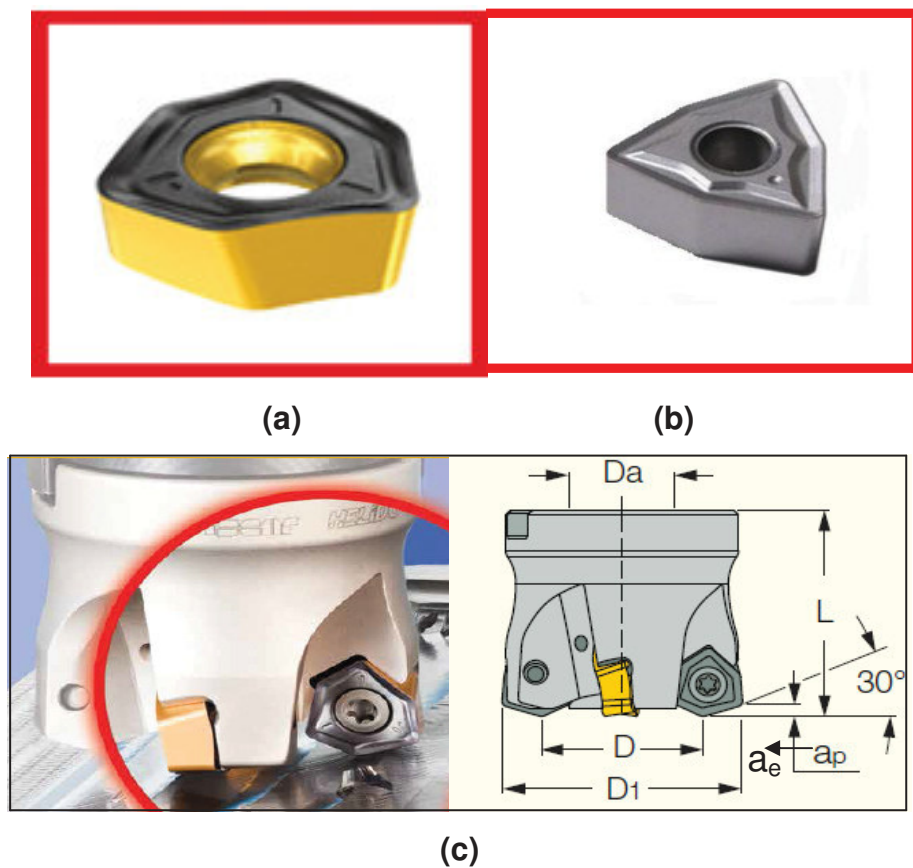
4.3.1 Ferramentas de corte

Os processos de desbaste foram organizados em dois grupos distintos de ferramentas, que apesar de possuírem diferenças em variáveis como geometria de corte e profundidade da camada de revestimento, são ferramentas recomendadas e especificadas pelos fabricantes para as condições de usinagem dos mancais.

Para o 1º processo de desbaste foram utilizados 04 insertos intercambiáveis em metal duro (WC) com revestimento TiAlN PVD, classe ISO P30, triangular, $\alpha = +5^\circ$, negativa ($\lambda = -5^\circ$), montados em fresa de $\varnothing 50\text{mm}$, como ilustrado na Figura 22(a), e dimensionado na Tabela 3.

Para o 2º processo de desbaste foram utilizados 04 insertos intercambiáveis em metal duro (WC) com revestimento TiAlN PVD, classe ISO P20, triangular, com $\alpha = +15^\circ$, negativa ($\lambda = -5^\circ$), montados em fresa de $\varnothing 50\text{mm}$, como ilustrado na Figura 22(b) e Tabela 3.

Figura 22. (a) Inserto de desbaste ISO P30 (desb.1) ; (b) Inserto de desbaste ISO P20 (desb.2), (c) Geometria de corte e fresa aplicada.



Fonte: ISCAR (2012).

Tabela 3. Dimensões do conjunto fresa e insertos de desbaste P30 e P20

Insertos	D	D1	L	Z	a_p/a_e	tenacidade	ϵ	α
Desbaste1 Classe P30	34,7	50,0	45,0	4	3,5/7,5	170kg/mm ²	80°	5°
Desbaste2 Classe P20	34,7	50,0	45,0	4	3,5/7,5	150kg/mm ²	80°	15°

Os insertos de metal duro com revestimento aplicados na usinagem têm um desgaste inicial lento devido à alta resistência das camadas do revestimento. Conforme DINIZ et al(2010) este desgaste pode chegar entre 0,3 mm e 0,4mm.

A partir de então o corte do material passa a ser feito pelo substrato, o desgaste da ferramenta cresce rapidamente, favorecendo o início de avarias na aresta de corte, e nas superfícies de saída e de folga, estas avarias podem causar inclusive a

quebra da ferramenta, caso não seja observada a sua rápida progressão, ou que não seja efetuada a troca do inserto no tempo programado pela vida útil calculada da ferramenta em questão.

Neste processo a profundidade de corte (a_p) e a penetração de trabalho (a_e) possuem direção e sentidos diferentes: a_e de 3,5mm com direção vertical e sentido ascendente, e a_p de 7,5mm com direção horizontal e sentido à direita. O cavaco gerado tem forma de arco solto, é cisalhado e partido.

Estas direções e sentidos combinados fazem do processo de desbaste de material definido inicialmente como fresamento frontal (em função do a_p vertical e descendente), e também considerado fresamento tangencial (em função do a_e horizontal e direito). Devido esta combinação de movimentos de profundidade de corte e de penetração de trabalho, as arestas de corte principal e secundária são aplicadas simultaneamente ao corte.

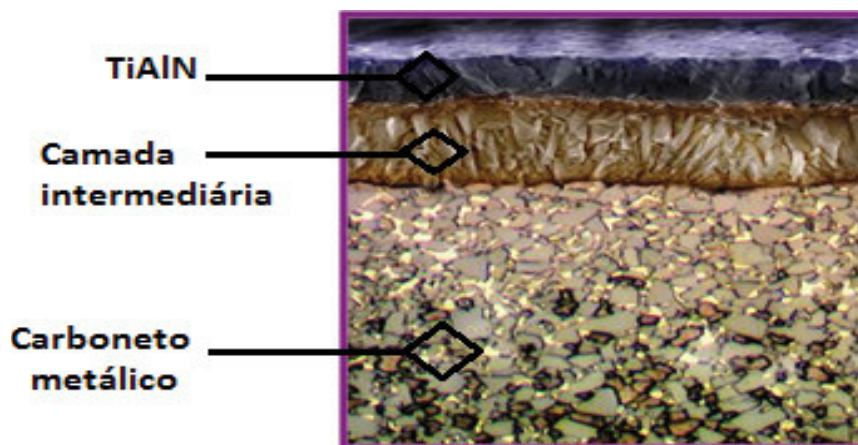
A força de corte de maior intensidade é exercida sobre a aresta principal de corte (com $a_e = 7,5\text{mm}$), e os menores esforços sobre a aresta de corte secundária (com $a_p = 3,5\text{mm}$). Então pode-se definir o processo de desbaste para ambos os insertos aplicados com fresamento frontal-tangencial (periférico) concordante.

Na Figura 23(a) observa-se uma micrografia de catálogo com corte transversal de um inserto para desbaste com revestimento de TiAlN, que é a 1ª camada do revestimento com espessura estimada entre 1 a 4 μm , e suas respectivas camadas, sendo a 2ª camada uma composição intermediária entre o revestimento e o núcleo, com função de proteção do núcleo (térmicas e de amortecimento de impactos), e função de adesão efetiva entre revestimento e núcleo.

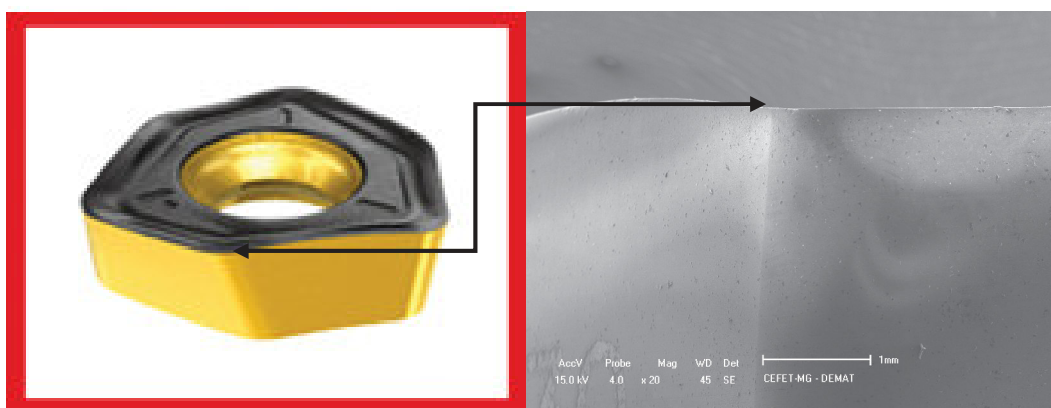
O núcleo é o substrato do inserto em metal duro, composto basicamente de WC (carboneto de tungstênio) e Co (aglomerante dos constituintes do carboneto), podendo ainda ser constituído de outros elementos em função das características e propriedades desejadas no metal duro..

Nas figuras 23(b e c) observam-se os perfis dos insertos de desbaste do 1º grupo (classe P30) e do 2º grupo (classe P20) respectivamente, que possuem em sua geometria de corte ângulo de folga $\alpha = 5^\circ$ (para inserto do desbaste 1), e $\alpha = 15^\circ$ (para inserto do desbaste 2), sendo esta a variável de maior diferença significativa na composição da geometria de corte dos respectivos insertos.

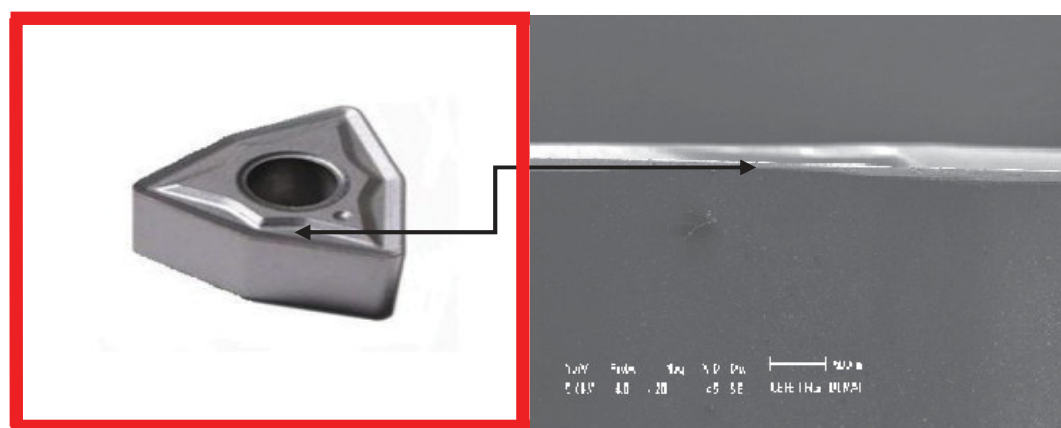
Figura 23 (a). Microscopia do inserto de desbaste ;
 (b) Aresta de corte nova do inserto de desbaste 1, (c) Aresta de corte nova do
 inserto de desbaste 2



(a)



(b)



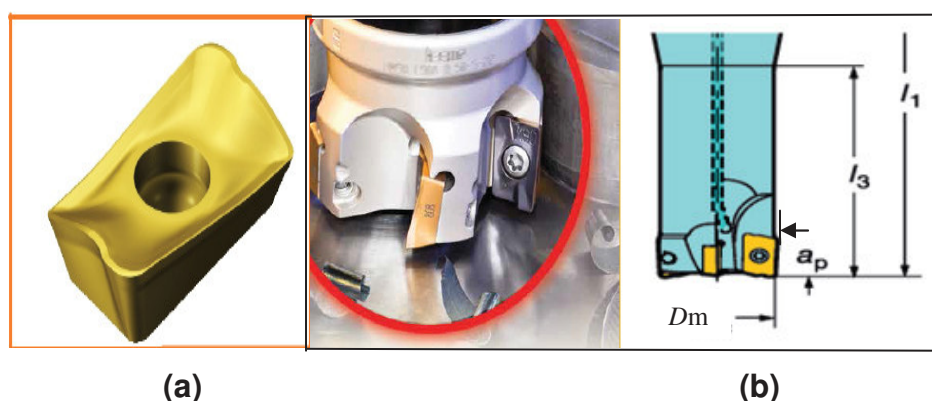
(c)

Fonte: (a) (SANDVIK, 2014); (b e c) MEV aumento 20x, elaboração própria, (2014)

Nos anexos E e F observa-se a geometria completa para os insertos de desbaste classe P30 e P20 respectivamente.

As ferramentas utilizadas para o processo de acabamento (aplicado em sequência aos processos de desbaste citados anteriormente), foram 04 insertos intercambiáveis retangulares em metal duro com revestimento TiN PVD, classe P30, com 90° de ponta de ferramenta, positiva com $\lambda = +4^\circ$, montados em uma fresa de $\varnothing 44$ mm, como ilustrado na Figura 24, e dimensionado na Tabela 4. No Anexo G pode-se verificar a geometria de corte completa do inserto de acabamento.

Figura 24. (a) Inserto de acabamento ISO P30, (b) Geometria de corte e fresa.



Fonte: SANDVIK (2014).

Tabela 4. Dimensões do conjunto fresa e inserto de acabamento.

Insetos	Dm	Z	L1	L3	a_p max.	tenacidade	ϵ	α
Acabamento 1 e 2 Classe P30	44	4	164,4	89,5	0,5	170kg/mm ²	90°	5°

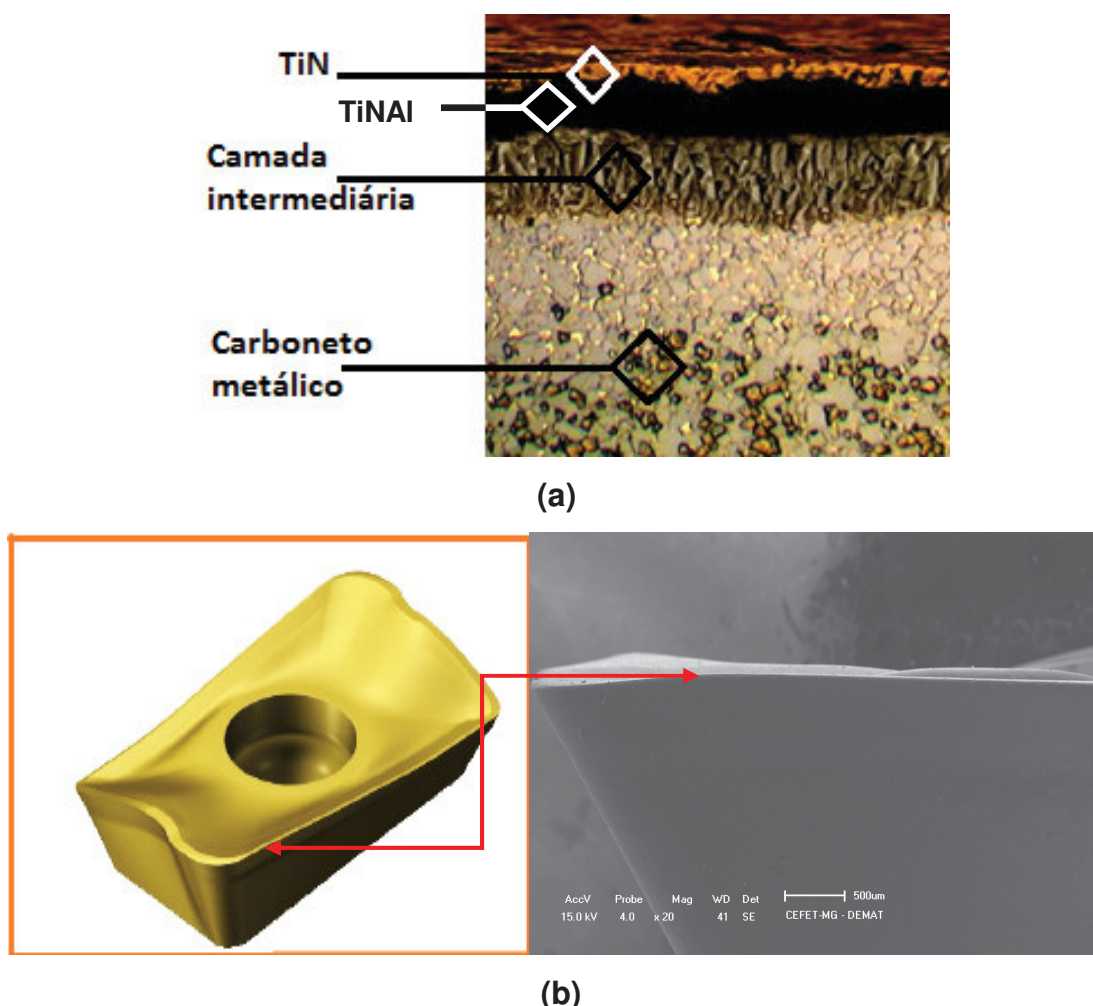
Os insertos de acabamento aplicados na usinagem dos mancais são trocados obrigatoriamente peça por peça. Portanto para estes insertos, durante o monitoramento do desgaste do flanco, não foi possível obter uma curva para a propagação deste tipo de desgaste, pois as medições realizadas tem características discretas e não contínuas, como é o caso do monitoramento dos insertos de desbaste. Neste processo a profundidade de corte (a_p) é limitado a 0,5mm, gerando um cavaco em forma de agulha, de dimensões reduzidas de seção, mas de longo comprimento em proporção a espessura quase microscópica.

O projeto de reparo e manutenção da superfície do mancal do braço articulável exige uma rugosidade máxima de 0,8 μ m após o processo de acabamento, devido a este critério crítico de controle de qualidade nas peças produzidas e/ou reparadas, a

troca do inserto de acabamento é executada obrigatoriamente a cada peça usinada, padrão de trabalho este adotado pela empresa com o objetivo de reduzir os desvios e erros associados ao desgaste da ferramenta de corte.

Na Figura 25(a) observa-se uma micrografia de catálogo com corte transversal de um inserto de acabamento com revestimento de TiN , que é a 1ª camada do revestimento com espessura estimada entre 380nm a 1,5µm e suas respectivas camadas. Na figura 25(b) observa-se o perfil do inserto de acabamento (classe P30), que foi aplicado após ambos os processos de desbastes observados .

Figura 25. (a) Microscopia do inserto de acabamento ; (b) Aresta nova do inserto de acabamento.



Fonte: (a) SANDVIK (2014); (b) MEV aumento 20x, elaboração própria, (2014)

Todo o material coletado *in loco* (resíduos metálicos-cavacos, e ferramentas com desgaste), foram recolhidos para realizar as análises e os ensaios propostos.

4.3.2 Parâmetros de usinagem

Para todos os experimentos realizados neste trabalho, os parâmetros de corte do desbaste e do acabamento seguiram as recomendações técnicas ideais disponíveis nos catálogos e confirmadas pela assistência técnica dos fabricantes de ferramentas, considerando o material a ser usinado e o tipo de ferramenta aplicada (quanto a sua geometria e revestimento). Estes parâmetros estão descritos na Tabela 5.

Analisando os dados dos processos de desbaste, observa-se variação do avanço da mesa (v_f), do avanço por aresta (f_z), da profundidade de corte (a_p) e no tempo de corte.

Tabela 5. Parâmetros de corte utilizados nos experimentos.

Processo	v_c (m/min)	v_f (mm/min)	f_z (mm/dente)	a_e/a_p (mm)	D (mm)	RPM	Tempo de corte (t_c)
1º Desbaste	219,8	10000	1,786	3,5/7,5	50	1400	42 min/peça
2º Desbaste	219,8	6000	1,07	3,5/7,5	50	1400	70 min/peça
1º2ºAcabamento	455,9	1400	0,106	0,5	44	3300	54 min/peça

Os parâmetros de corte para v_f , a_p , D, RPM, t_c , foram coletados na memória de programação CNC da máquina operatriz e no conjunto montado fresa e insertos, considerando estes valores invariáveis para cada processo, e variáveis entre os processos, conforme a Tabelas 2 e 3.

Os parâmetros de corte para v_c e f_z foram calculados a partir de equações (3) e (4), descritas a seguir.

Para cálculo da v_c (velocidade de corte), foi aplicada a Equação (3).

$$v_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (\text{unidade} = \text{m/min}) \quad (3)$$

Onde: v_c = velocidade de corte
 π = 3,1416
 D = diâmetro da fresa
 N = rotações por minuto (RPM)

Para cálculo do f_z (avanço por dente ou aresta), foi aplicada a Equação (4).

$$f_z = \frac{v_f}{Z \times N} \text{ (unidade= mm/dente)} \quad (4)$$

Onde: f_z = avanço por aresta cortante
 v_f = avanço da mesa
 Z = número de dentes ou arestas
 N = rotações por minuto (RPM)

Os parâmetros de corte parametrizados pelo sistema CNC, que foram diretamente coletados na programação da usinagem, podem ser verificados pelas seguintes equações:

*Tempo de corte (t_c), pela Equação (5).

$$t_c = \frac{l_f}{v_f} \text{ (unidade= min)} \quad (5)$$

onde: t_c = tempo de corte
 l_f = comprimento de avanço
 v_f = avanço da mesa

*Avanço da mesa (v_f), pela Equação (6)

$$v_f = f_z \times Z \times N \text{ (unidade= mm/min)} \quad (6)$$

onde: v_f = avanço da mesa
 f_z = avanço por aresta cortante
 Z = número de dentes ou arestas
 N = rotações por minuto (RPM)

4.4 Métodos

Os processos de desbaste e acabamento foram acompanhados simultaneamente, com o registro das medições de desgaste de flanco $VB_{max.}$, até a condição de troca do inserto por perda da aresta de corte (no caso do inserto de acabamento), e por avarias nas superfícies de folga, de saída, e na aresta de corte (no caso do inserto de desbaste). O fluido de corte aplicado é de base sintética, os parâmetros de pressão e vazão para fluido lubri-refrigerante foram mantidos os mesmos durante todas as etapas de fresamento.

Para o registro das medições de desgaste de flanco, foi utilizado microscópio ótico SA 4600 (lupa), fornecido pela SANDVIK, com aumento de 10x. A microscopia eletrônica de varredura - MEV -, foi utilizada para a análise dos mecanismos de desgaste e caracterização das avarias nos insertos, e também associado a imagem gerada no MEV foram verificadas as medições de desgaste de flanco dos insertos, para validar os registros obtidos através da leitura do microscópio ótico, mais sujeito a erros de paralaxe e histerese.

Integrado ao registro de imagens pelo MEV, foi realizado ensaio de Espectrometria Eletrônica Dispersiva de Raio X - EDS -, para analisar a composição química dos revestimentos dos insertos e da superfície do material usinado, e verificar a ocorrência de adesão nas regiões de desgaste dos insertos.

A medição da textura superficial do material usinado foi realizada com um rugosímetro portátil digital, com resolução de $0,001\mu\text{m}$, com amplitude de $\pm 20\mu\text{m}$. Ensaio de rugosidade foram realizados simultaneamente nos processos de desbaste 1 (inserto classe P30), acabamento1, desbaste 2 (inserto classe P20) e acabamento 2. As medições de rugosidade foram registradas em μm na metodologia R_a (pelo desvio médio aritmético das medições realizadas). Complementando a análise de rugosidade do material usinado foram utilizados os microscópios metalográficos METRIMPEX (com aumento de 10x), e FORTEL com sistema de aquisição de imagens KONTROL (com aumento de 40x), para analisar a topografia superficial obtida nos distintos processos de fresamento observados.

A medição de dureza foi realizada com um durômetro de bancada para ensaio Rockwell na escala HRC, sob norma ASTM E-18, selecionada por tratar de aço liga na superfície usinada, e pastilhas de metal duro revestidas que também podem ser medidas nesta escala de dureza.

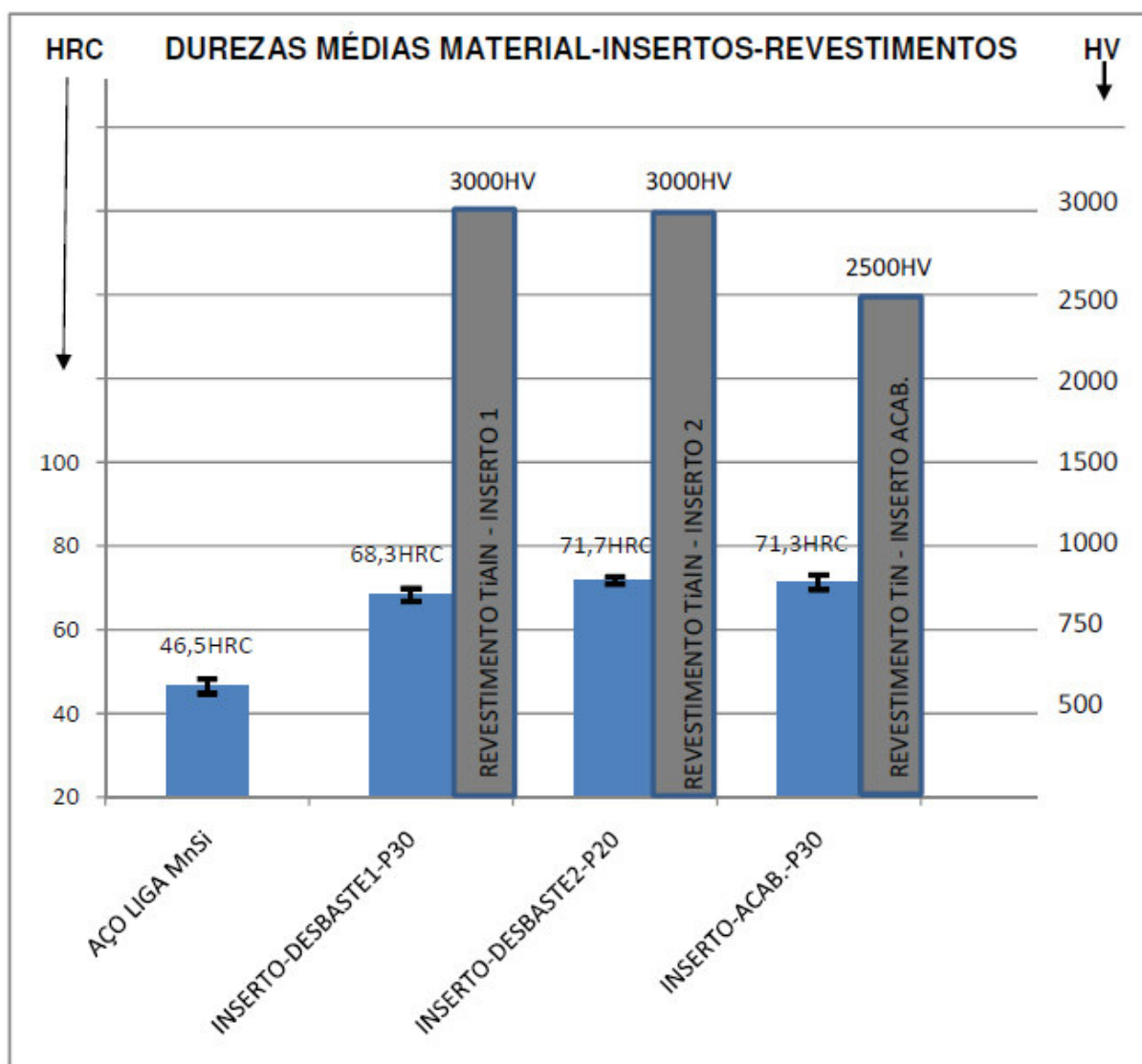
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos durante os ensaios e medições realizados durante e depois dos experimentos de usinagem planejados, constituem o conjunto de dados que possibilitaram realizar a análise conjunta dos processos de desbaste e acabamento.

5.1 Ensaios de dureza

O primeiro experimento proposto foi realizar o ensaio de dureza dos insertos de desbaste e acabamento, e compará-los com a dureza do material revestido com Mn e Si no aço ABNT 1020. Na Fig. 26 pode-se observar os resultados dos ensaios.

Figura 26. Comparação entre os resultados dos ensaios de dureza .



Fonte: autoria própria, (2015)

Comparativamente observa-se uma condição favorável ao corte, promovendo o mecanismo de formação de cavaco sem agravos, tanto no desbaste, quanto no acabamento, pela elevada dureza dos revestimentos dos insertos em relação à dureza medida na superfície a ser usinada. O inserto de desbaste 1 (classe P30), possui dureza média menor, com diferença de 3,4HRC em relação ao inserto de desbaste 2 (classe P20), apesar desta diferença entre estes insertos, a dureza superficial do material está abaixo da menor dureza medida para estes insertos, mesmo considerando sua variação.

Para todos os insertos aplicados nos experimentos desenvolvidos (desbaste 1 e 2, e acabamento 1 e 2), é importante salientar que o comportamento dos revestimentos de TiN e TiAlN não apresentam grandes alterações (que sejam significativas) de dureza a quente (SANTOS & SALES, 2007).

5.2 Monitoramento do desgaste do inserto de desbaste P30 do 1º grupo

Um jogo de 04 insertos de desbaste montados em uma fresa de Ø50mm, foram monitorados para acompanhamento da progressão do desgaste de flanco.

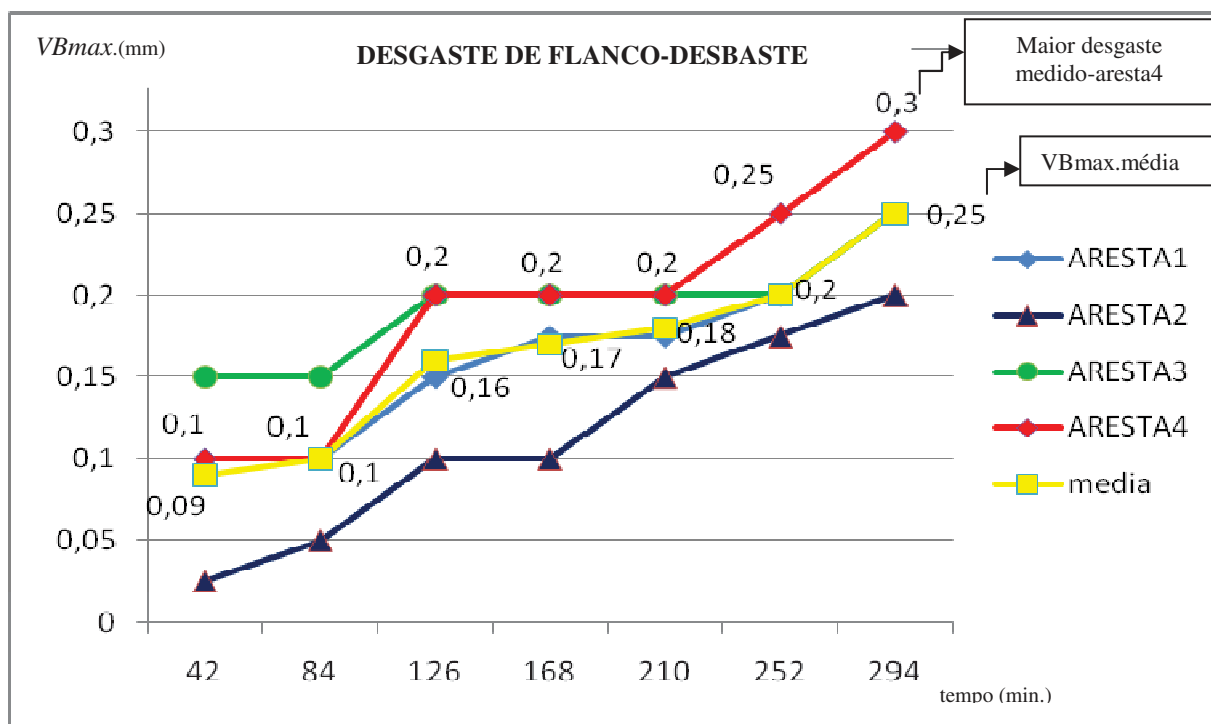
O processo de desbaste analisado gera um resíduo (cavaco) de perfil geométrico em forma de arco solto, bem particular de uma ferramenta negativa, de alto rendimento, com v_c de 219,8m/min, com 1400RPM, avanços de mesa (10000 mm/min) e por dente (1,786mm/min), avanços elevados em relação ao processo de acabamento.

Os desgastes de flanco monitorados atingiram o fim da vida dos insertos de desbaste P30, onde foram substituídos devido a lascamentos na aresta de corte e na superfície de folga, que causam a esta superfície um processo de degradação acentuada e colapso total da ferramenta, caso não seja efetuada a imediata substituição da mesma.

Na Figura 27, observa-se o registro do monitoramento do desgaste de flanco destes insertos de desbaste aplicados no 1º experimento, as medições do desgaste foram realizadas com microscópio ótico SA4600-SANDVIK, e o experimento foi realizado com os parâmetros de corte programados e calculados na descrição da tabela 5.

Os processos predecessores a este também foram realizados conforme parâmetros informados e descritos anteriormente.

Figura 27. Monitoramento do desgaste de flanco de 04 insertos de desbaste do 1º experimento, medidos por aresta.



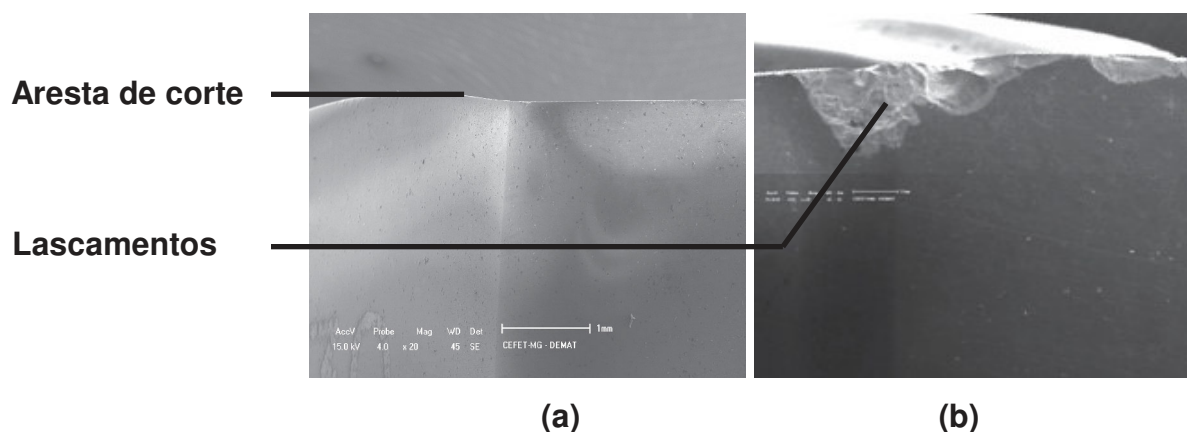
O 4º inserto do conjunto montado apresentou o maior desgaste medido de 0,3mm, e a média calculada para o desgaste dos quatro insertos aplicados no conjunto foi de 0,25mm.

As etapas de evolução do desgaste de flanco (VB_{max}) citados por DINIZ et al (2010), podem ser observados no gráfico da Figura 27, considerando como referência o 4º inserto aplicado: para o 1º ciclo (entre 0min e 126min) o desgaste inicial de flanco é ascendente com 0,2mm de VB_{max} , para o 2º ciclo (entre 126min e 210min) o desgaste de flanco se estabiliza com poucas variações com 0,2mm de VB_{max} , e para o 3º ciclo (entre 210min e 294min), o desgaste de flanco é ascendente e acentuado com VB_{max} de 0,3mm, fazendo com que a ferramenta entre em colapso por avarias catastróficas.

Na Figura 28 observa-se o desgaste inicial de flanco (VB_{max}) na aresta de corte, propagando até 0,2mm, iniciando a avaria de lascamento na aresta de corte.

Para análise do tipo de desgaste da ferramenta, foi realizado a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) juntamente com a análise química proporcionada pela Espectrometria Eletrônica Dispersiva de Raio-X (EDS).

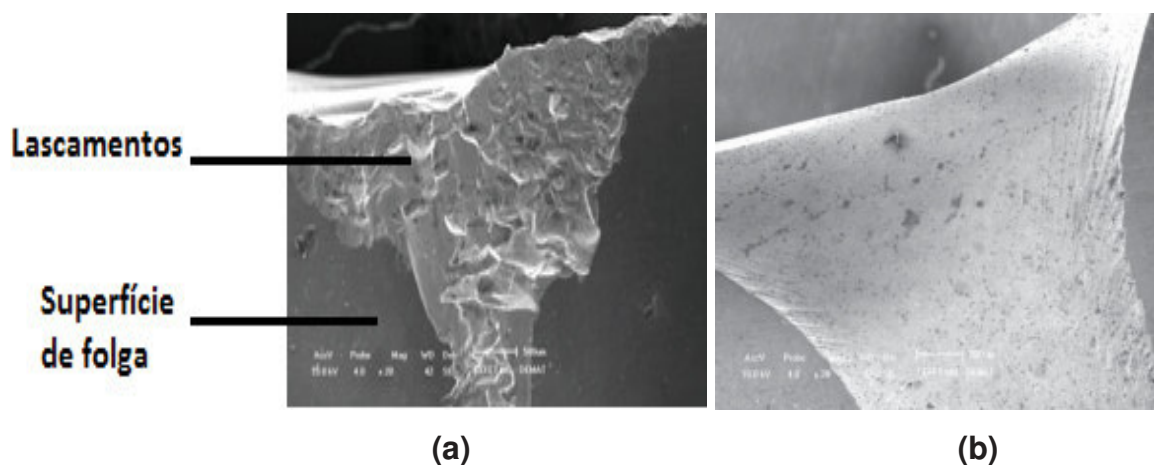
Figura 28. (a) Perfil da aresta de corte do inserto de desbaste 1, (b) Aresta de corte com 0,2mm de VB_{max} e lascamentos na aresta de corte.



Fonte: MEV-CEFETMG (aumento 20x, autoria própria, 2014)

Na Figura 29(a) pode-se observar a degradação da aresta de corte, propagando a partir de 0,2mm, gerando assim o agravamento da avaria de lascamento no sentido da aresta de corte para a superfície de folga, sentido este justificado pela característica de ferramenta de desbaste negativa, com $\alpha=5^\circ$, e com a_e de 3,5mm, e a_p de 7,5mm.

Figura 29. (a) Aresta de corte com 0,3mm de VB_{max} com lascamentos na superfície de folga, (b) Colapso da ferramenta após 0,3mm de VB_{max} .

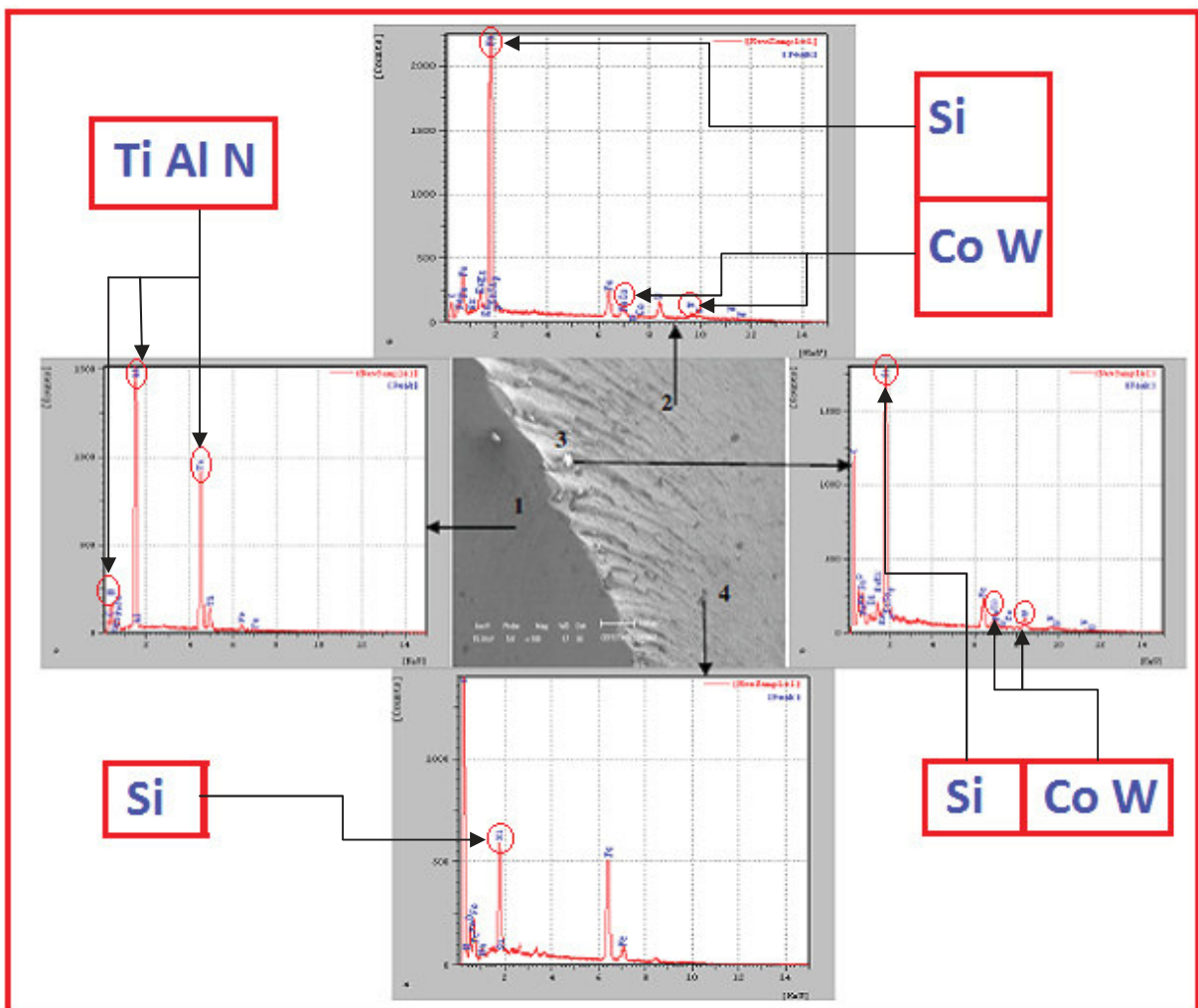


Fonte: MEV-CEFETMG (aumento 20x, autoria própria, 2014)

Analisando a Figura 29 observa-se que a superfície de folga da ferramenta apresenta desgaste acentuado, a forma do desgaste é catastrófica e não apresenta marcas de abrasão, quando o desgaste de flanco atinge valores próximos de 0,2mm, micro lascamentos são detectados por meio de microscópio ótico SA 4600 (lupa), de aumento de 10x. Esses lascamentos aumentam tanto em quantidade, quanto em proporção também, comprometendo a superfície de folga, que passa a ter maior contato com a superfície usinada devido a redução do ângulo de folga da ferramenta, causado pelo desgaste da ferramenta e a_p/a_e alta aplicada no corte de desbaste.

Na Figura 30, observa-se a ampliação da região de fronteira entre a superfície de folga intacta (lado esquerdo da imagem) e a superfície degradada de forma catastrófica por lascamentos e difusão (lado direito da imagem).

Figura 30. MEV+EDS da composição do inserto de desbaste desgastado.

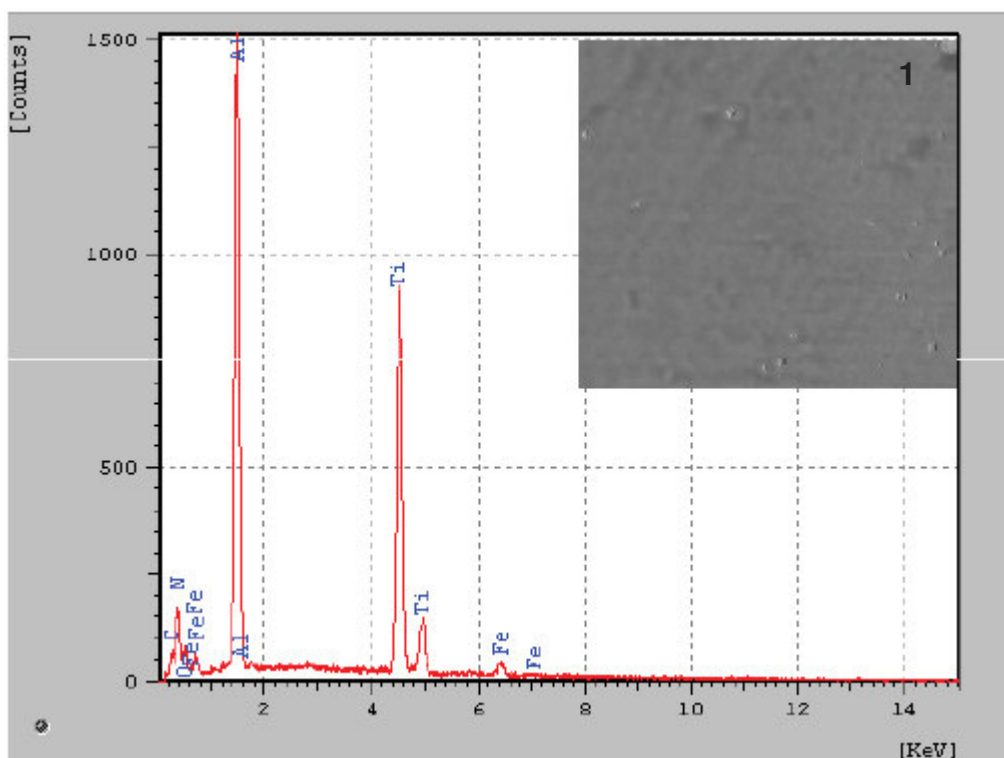


Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

Quando ocorre adesão de material da peça na ferramenta, posteriormente essa parcela aderida é removida levando consigo porções do revestimento, depois o substrato exposto reage mais facilmente com o material da peça, ocorrendo nova adesão. De acordo com DINIZ et al (2010), apesar desse fenômeno ser característico de baixas velocidades de corte, ele pode ocorrer em velocidades maiores desde que o fluxo irregular de cavaco ocorra. Este mecanismo causador de desgaste é conhecido como aderência e arrancamento (*attrition*).

Na Figura 31 e tabela 6 observa-se a composição química do ponto 1 do inserto de desgaste do 1º experimento.

Figura 31. EDS da composição do inserto de desgaste desgastado, ponto 1.



Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

Tabela 6. Composição química no ponto 1 (revestimento).

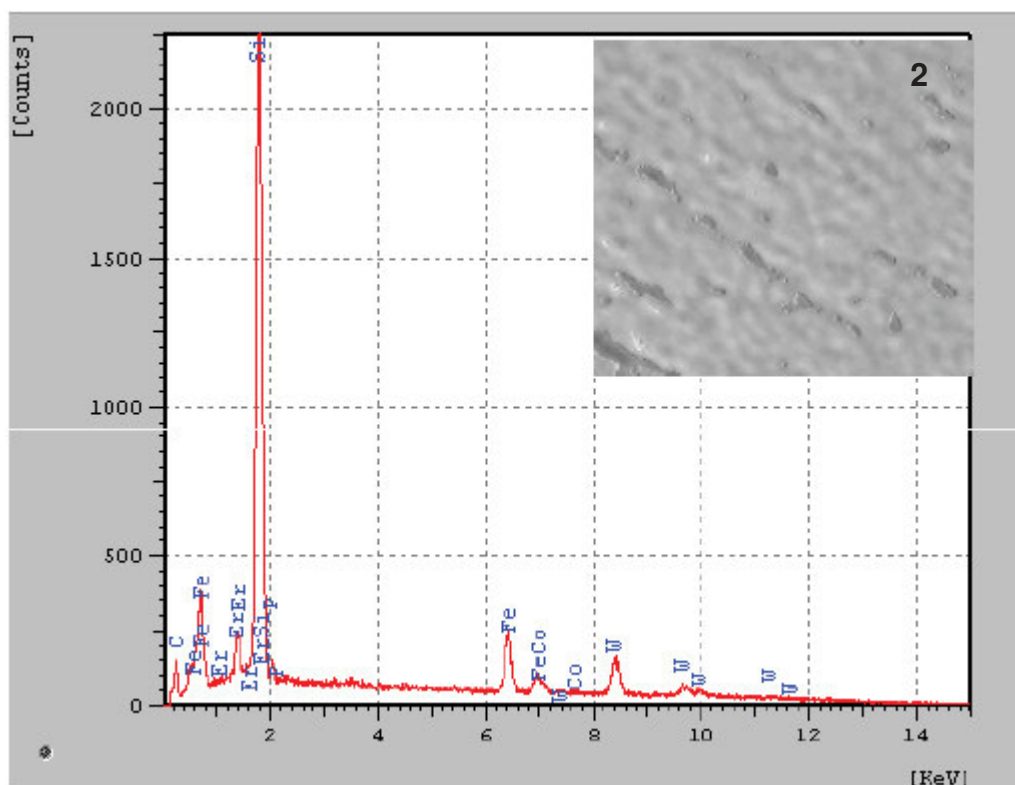
Elemento	N	Al	Ti	O	C	Fe
%	24,63	26,30	28,34	8,60	10,03	2,10

No ponto 1 o revestimento está intacto, com N (24,62%), Al (26,28%) e Ti (28,34%), com uma camada de espessura aproximada de 1 a 4 μm , depositada por

meio do processo PVD (deposição física de vapor), composição esta que confere ao inserto deste 1º experimento, a classificação ISO P30.

Na Figura 32 e tabela 7 observa-se a composição química do ponto 2 do inserto de desgaste do 1º experimento.

Figura 32. EDS da composição do inserto de desgaste desgastado, ponto 2.



Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

Tabela 7. Composição química no ponto 2 (desgaste).

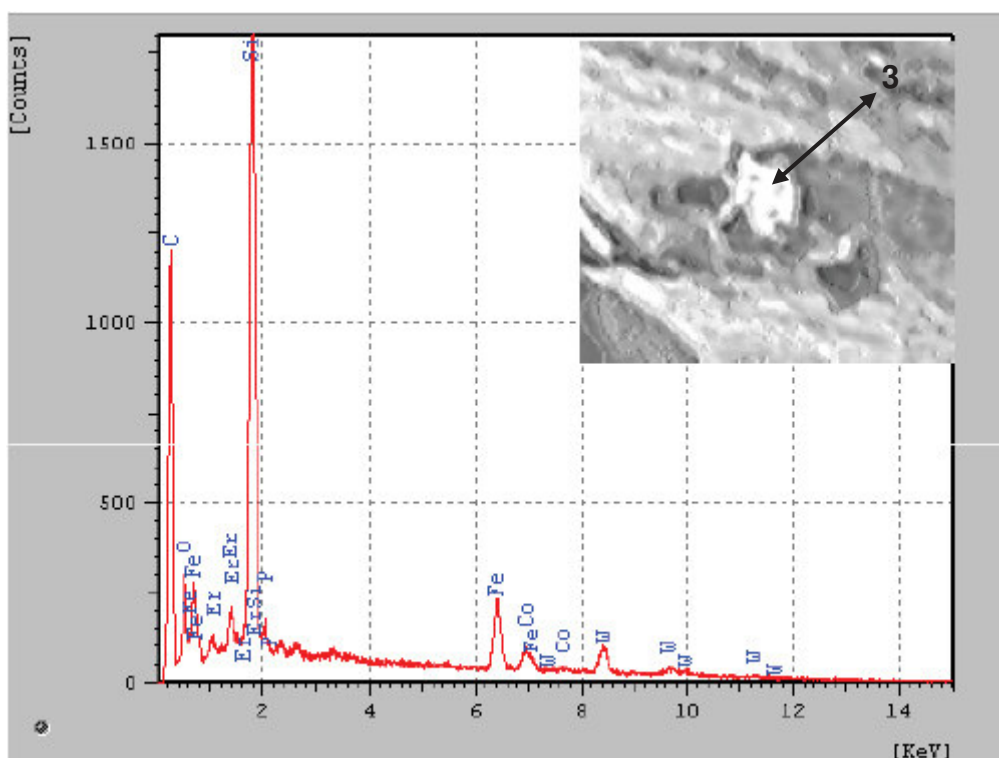
Elemento	Si	Co	W	C	Fe	Er	P
%	37,20	2,45	15,80	29,90	9,65	3,35	1,65

No ponto 2 é caracterizado adesão de Si (37,19%) e exposição do substrato Co (2,5%) e W (15,81%). Neste ponto foi encontrado a maior fração de adesão de Si na região desgastada.

Elementos como Er (Érbio) e P (Fósforo) são provavelmente contaminantes externos ao processo, proveniente de resíduos de outros materiais e ferramentas utilizadas na máquina-ferramenta.

Na Figura 33 e tabela 8 observa-se a composição química do ponto 3 do inserto de desgaste do 1º experimento.

Figura 33. EDS da composição do inserto de desgaste desgastado, ponto 3.



Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

Tabela 8. Composição química no ponto 3 (desgaste).

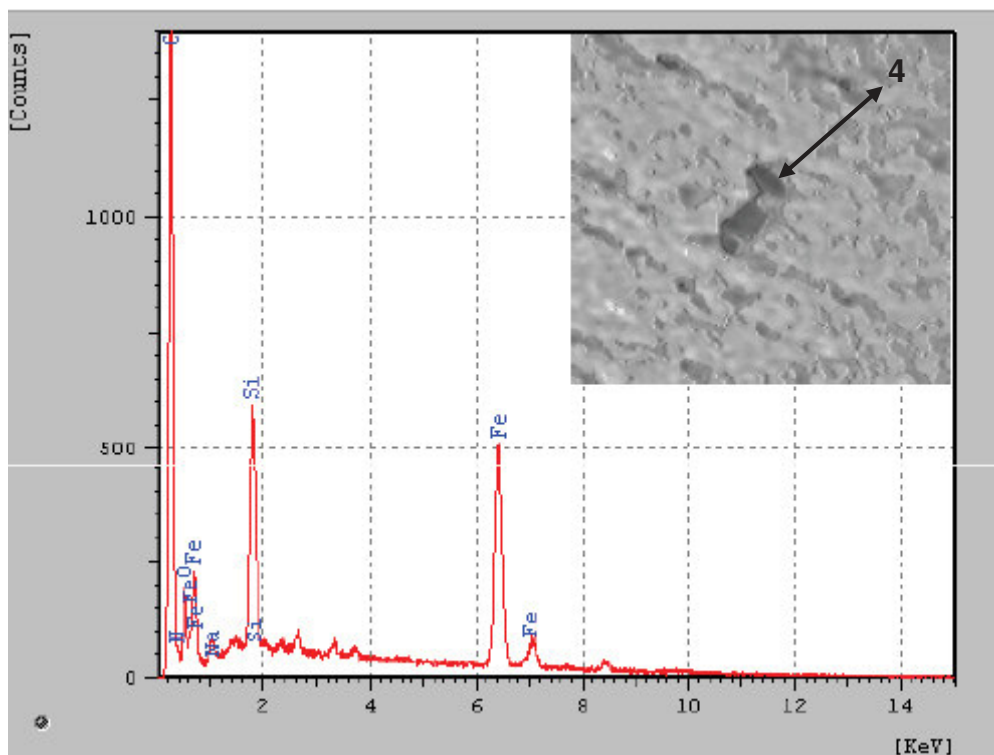
Elemento	Si	Co	W	O	C	Fe	Er	P
%	11,31	1,70	3,94	7,82	69,50	3,98	1,05	0,70

No ponto 3 é caracterizado adesão de Si (11,31%) e exposição do substrato Co (1,7%) e W (3,94%). Este ponto na região desgastada foi escolhido pela característica atípica da seção analisada (prateada e metálica), como uma inclusão de outro elemento, esperava-se na análise química encontrar Mn, que não foi confirmada após análise realizada. O Si (11,31%) aderido na região desgastada é três vezes menor que a fração encontrada de Si no ponto 2.

Os outros elementos na região analisada no ponto 3 (Er e P) são provavelmente contaminantes externos ao processo.

Na Figura 34 e tabela 9 observa-se a composição química do ponto 4 do inserto de desgaste do 1º experimento.

Figura 34. EDS da composição do inserto de desgaste desgastado, ponto 4.



Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

Tabela 9. Composição química no ponto 4 (desgaste).

Elemento	Si	C	Fe	O	Na	N
%	3,92	68,20	12,46	6,72	0,70	8,00

No ponto 4 é caracterizado adesão de Si (3,92%) e alta taxa de C (68,20%). Este ponto foi escolhido para análise em função do formato característico de um grão incrustados na superfície desgastada, porém, não foi encontrado nenhum elemento atípico que indicasse incrustação de elemento distinto ao processo.

No ponto (1) o revestimento está praticamente intacto, e nos pontos (2, 3 e 4) o substrato está exposto onde há elementos químicos da ferramenta e da peça (W e Co elementos do substrato da ferramenta, e Si elemento oriundo da peça), devido a presença do Si encontrado nos pontos 2, 3 e 4, pode-se afirmar que ocorreu adesão (nos lascamentos) de material da peça na ferramenta e posterior difusão.

Na tabela 10 observa-se as principais composições químicas dos pontos selecionados para análise do inserto de desbaste P30 do 1º grupo.

Tabela 10. Composições químicas relativas em peso atômico dos pontos analisados no inserto de desbaste 1.

Elemento (%)	N	Al	Ti	Si	Co	W
Ponto1	24,62	26,28	28,34	—	—	—
Ponto2	—	—	—	37,19	2,48	15,81
Ponto3	—	—	—	11,31	1,70	3,94
Ponto4	8,00	—	—	3,92	—	—

Em síntese pode-se analisar a presença do revestimento informado pelo fabricante (TiAlN), a adesão de material da peça na ferramenta (Si), e exposição do substrato (núcleo) do inserto de desbaste (WCoC).

5.2.1 Monitoramento do desgaste do inserto de acabamento do 1º grupo.

Os insertos de acabamento foram monitorados em sequência ao controle de desgaste de flanco dos insertos de desbaste, logo após a execução do processo de desbaste o acabamento é executado, com 04 insertos prismáticos.

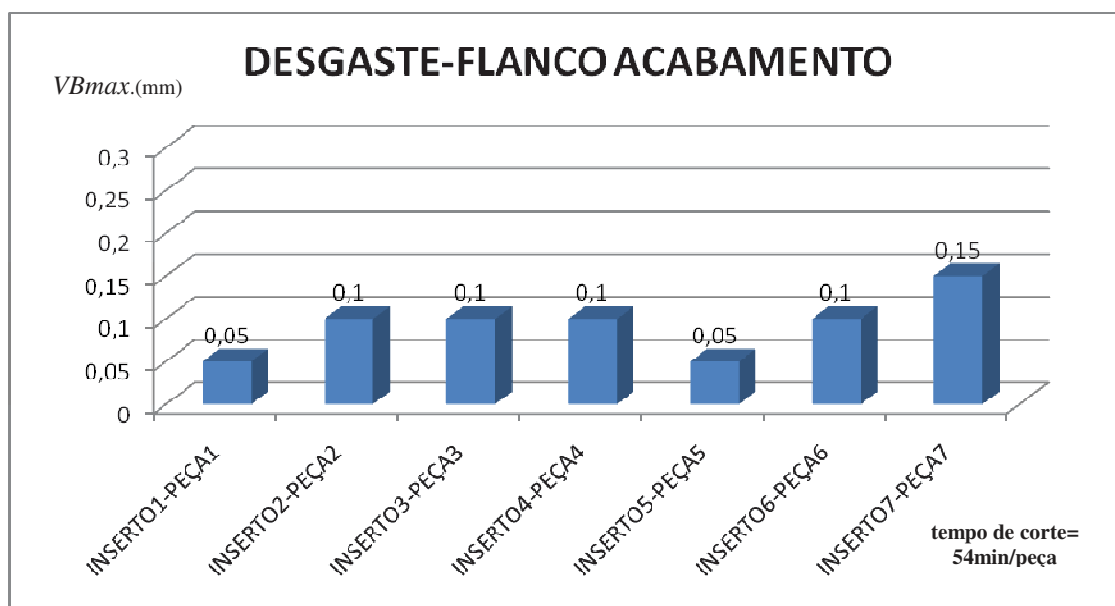
Neste processo em particular é efetuado a troca do inserto a cada peça usinada, mesmo que esteja apresentando apenas o desgaste de flanco normal por tempo de uso, isto devido à necessidade de obter um acabamento com rigor dimensional e superficial exigido pelo cliente.

A textura superficial esperada com rugosidades abaixo de $0,8\mu\text{m}$, não foi possível de ser obtida mantendo a mesma aresta de corte em mais de uma peça, que devido o desgaste de flanco sofrido e microentalhes na aresta de corte após processo de acabamento de uma peça, impossibilitam de manter a rugosidade e acabamento superficial dentro das tolerâncias exigidas.

O processo de acabamento analisado gera um resíduo (cavaco) de perfil geométrico em forma de agulha, bem particular de uma ferramenta positiva, revestida de alto rendimento, com v_c elevada (455m/min), 3300RPM, com avanços de mesa (1400m/min) e por dente (0,106mm/min).

Na figura 35 observa-se o desgaste de flanco medido nos insertos de acabamento com a relação de 01 aresta de corte para uma peça, ou seja, é uma medição de característica discreta, onde a aresta de corte utilizada na peça 1, não será utilizada na peça 2, e assim por diante, não sendo possível obter uma curva válida para o desgaste de flanco do processo de acabamento em função do tempo.

Figura 35. Medidas do desgaste de flanco dos insertos de acabamento 1.



Fonte: elaboração própria, (2014)

Apesar da impossibilidade de geração de uma curva contínua para o desgaste de flanco destes insertos, é possível fazer uma análise de progressão de aumento de desgaste de um inserto para o outro, após a mudança da peça a ser usinada.

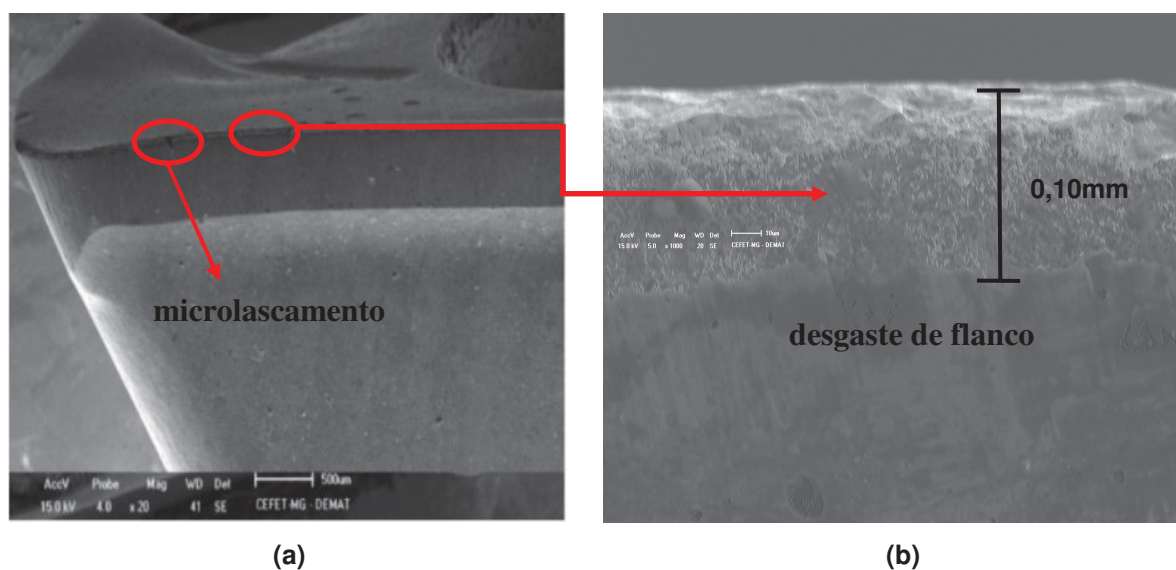
A medida do desgaste de flanco para o inserto aplicado na 4ª peça usinada foi de 0,1mm, e o desgaste de flanco medido para o inserto aplicado na 5ª peça foi de 0,05mm, neste caso não pode ser considerado que a aresta de corte recuperou sua geometria, recompondo material desgastado, pois tanto para a 4ª peça, quanto para a 5ª peça foram aplicados insertos de acabamento com aresta nova, conforme procedimento padrão adotado pela empresa onde foram realizados os experimentos de fresamento.

Esta análise propicia uma observação válida para a constatação do aumento do desgaste entre as peças 01 e 04, com aumento do desgaste na ordem de 0,1mm, e posteriormente outro ciclo de aumento entre as peças 05 e 07, com aumento de

desgaste de 0,1mm, caracterizando assim a existência de uma progressão de desgaste ascendente em dois ciclos distintos no processo analisado.

Na Figura 36, observa-se o desgaste de flanco na aresta de corte do inserto de acabamento.

Figura 36: (a) Aresta de corte do inserto de acabamento 1 com desgaste de flanco de 0,10mm, (b) Marcas do mecanismo de adesão no desgaste de flanco.



(a) (b)
Fonte: MEV (a) aumento de 20x, (b) aumento de 1000x, (2015)

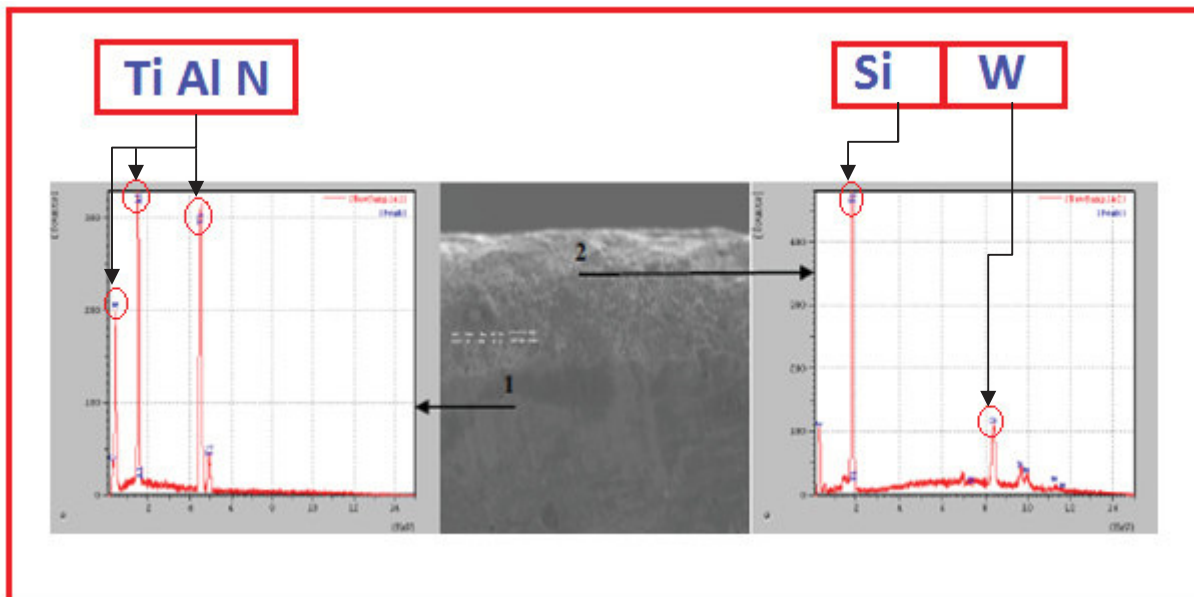
O desgaste de flanco no 4º inserto de acabamento aplicado após o 1º processo de desbaste é caracterizado por um desgaste normal por uso, causado pela adesão de Si na aresta de corte e superfície de folga da ferramenta que consequentemente desenvolveu um mecanismo abrasivo de desgaste.

Próximo a ponta da ferramenta, observa-se na Figura 36(a), a formação de uma avaria de microlascamento com 0,1mm (100µm), dimensão esta que não é suficiente para comprometer o uso do inserto, ou causar danos a superfície do material usinado.

Para análise do tipo de desgaste sofrido pelo inserto de acabamento, também foram realizadas análises em MEV e EDS. Na Figura 37 observa-se que a aresta de corte, sofreu desgaste de flanco. Além disso, nota-se que no ponto (1) o revestimento está praticamente intacto, e no ponto (2) o substrato está exposto onde há elementos químicos da ferramenta e da peça (W elemento do substrato da ferramenta, e Si elemento oriundo da peça), devido a presença do Si encontrado

no ponto 2, assim como foi analisado o inserto de desbaste, pode-se afirmar que ocorreu adesão.

Figura 37. MEV+EDS da composição do inserto de acabamento desgastado.



Fonte: MEV+EDS, aumento de 1000x, elaboração própria (2015).

Na Figura 37, observa-se o mecanismo de adesão (*attrition*) como principal causa do desgaste de flanco. O desgaste por adesão (*attrition*) ocorreu quando o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta tornou-se irregular, sob estas condições, fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta são arrancados e arrastados junto com o fluxo de material, apesar da ocorrência deste fenômeno de *attrition* não foi constatado avarias graves nesta ferramenta.

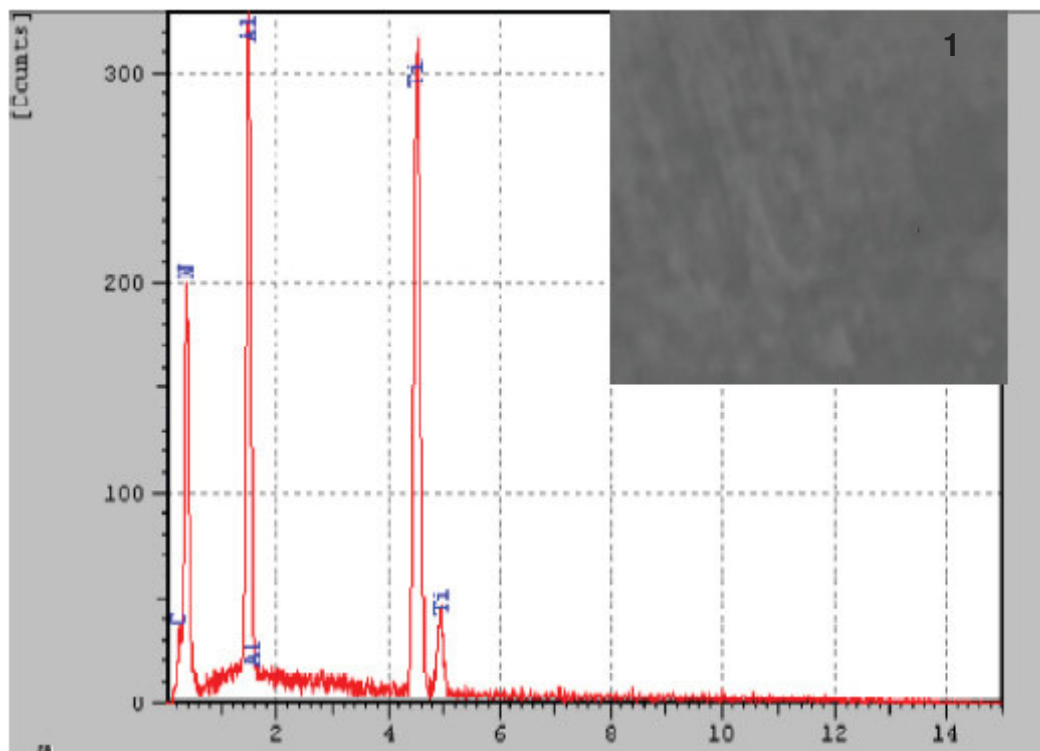
Pela experiência desenvolvida dentro da empresa que executa este procedimento de usinagem, foi padronizada a troca do inserto de acabamento sempre peça por peça.

Verificando as condições da aresta de corte do inserto de acabamento utilizado após o corte do inserto de desbaste 1, pode-se afirmar que não foi diagnosticado nenhum tipo de avaria grave (lascamentos, trincas, ou quebras), que comprometam a continuidade do uso da aresta de corte do inserto de acabamento aplicado nestas condições.

O microlascamento encontrado próximo a ponta da ferramenta foi medido por meio do microscópio ótico SA4600-SANDVIK, e confirmado após análise realizada no MEV, e o resultado obtido foi de 0,1mm= 100µm.

Na Figura 38 e tabela 11 observa-se a composição química do ponto 1 do inserto de acabamento do 1º experimento.

Figura 38. EDS da composição do inserto de acabamento no ponto 1.



Fonte: EDS do revestimento (2015).

Tabela 11. Composição química no ponto 1 (acabamento-revestimento).

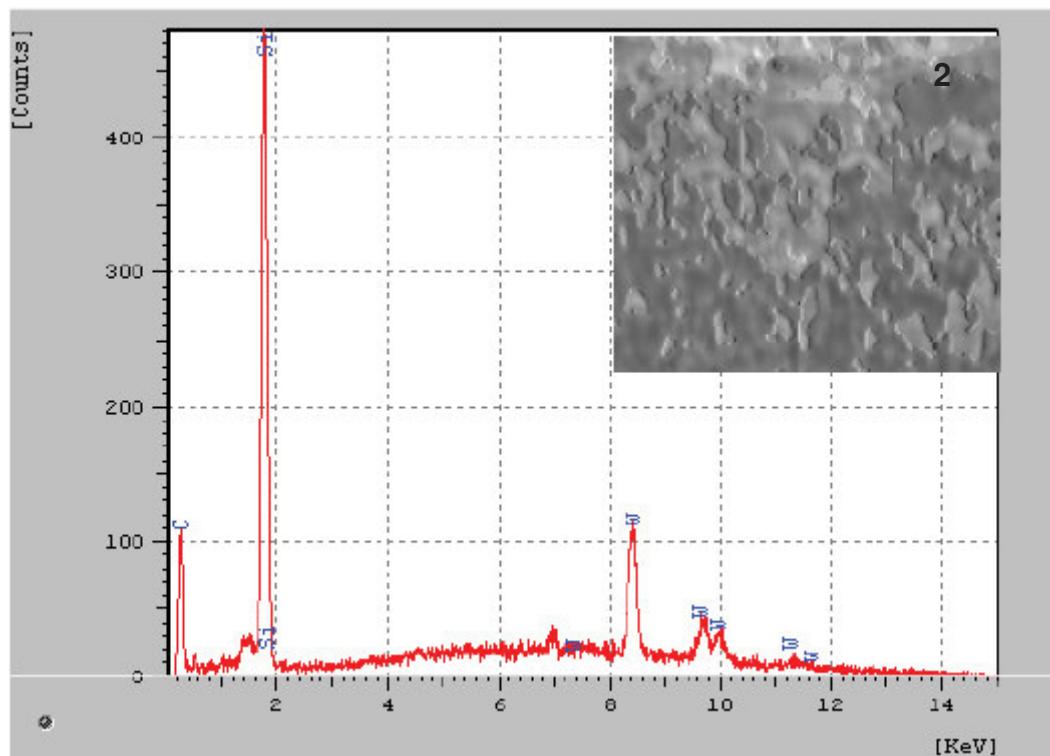
Elemento	N	Al	Ti	C
%	56,65	12,83	20,62	9,90

No ponto 1 o revestimento está intacto, com N (56,65%), Al (12,83%) e Ti (20,62%), com uma camada aproximada de 380nm a 1,5µm, depositada por meio do processo PVD (deposição física de vapor), composição esta que confere ao inserto de acabamento a classificação ISO P30.

O Al (12,83%) presente na análise de EDS, é proveniente dos traços deste metal presente na 2ª camada (TiAlN), que é identificado em função da medida nanométrica da 1ª camada de TiN.

Na Figura 39 e tabela 12 observa-se a composição química do ponto 2, região de desgaste compreendido a partir da aresta de corte para o flanco, e início da superfície de folga do inserto de acabamento do 1º experimento.

Figura 39. EDS da composição do inserto de acabamento no ponto 2.



Fonte: EDS do inserto de acabamento (2015).

Tabela 12. Composição química no ponto 2 (acabamento-desgaste).

Elemento	Si	W	C
%	18,33	31,30	50,37

No ponto 2 é caracterizado adesão de Si (18,33%) e exposição do substrato W (31,30%). O substrato está exposto onde há elementos químicos da ferramenta (W) e da peça (Si), devido a presença do Si encontrado no ponto 2, pode-se afirmar que ocorreu adesão do elemento Si (do material usinado), na região de desgaste do inserto de acabamento.

Na tabela 13 observam-se as composições químicas dos pontos selecionados para análise do inserto de acabamento P30 do 1º grupo.

Tabela 13. Composições químicas relativas em peso atômico dos pontos analisados no inserto de acabamento 1.

Elemento (%)	N	Al	Ti	Si	W	C
Ponto1	56,65	12,83	20,62	–	–	–
Ponto2	–	–	–	18,33	31,30	50,37

Em síntese pode-se analisar a presença do revestimento informado pelo fabricante (TiN), a adesão de material da peça na ferramenta (Si), e exposição do substrato (núcleo) do inserto de desbaste (WC).

5.2.2 Desbaste 1 x acabamento 1

Os insertos de desbaste e acabamento do 1º experimento realizado para usinagem dos mancais do braço articulável do equipamento de manutenção ferroviária, foram selecionados e preparados para monitoramento do desgaste a partir do 1º passe.

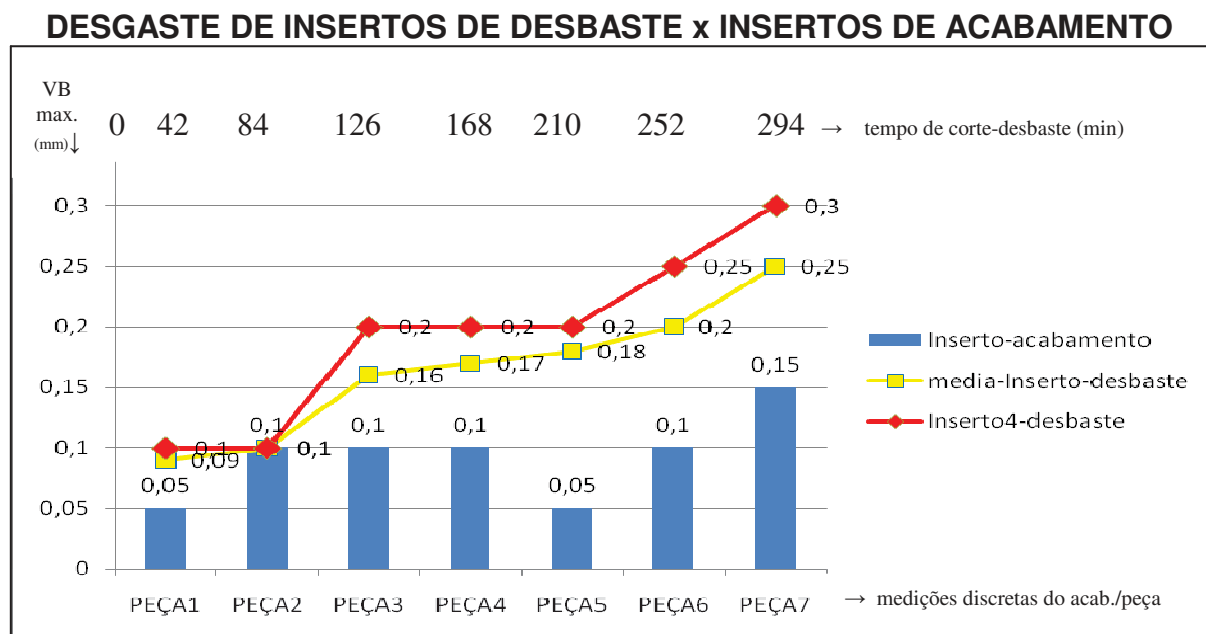
Esta análise conjunta dos desgastes dos insertos de desbaste e acabamento, tem por objetivo verificar e analisar as relações de influência entre o processo de desbaste, e o processo de acabamento por fresamento.

Para realização desta análise foram consideradas as propriedades mecânicas de dureza e tenacidade dos insertos aplicados nos experimentos realizados, e os resultados superficiais (topografia e textura) obtidos no material usinado, após cada processo executado.

Na figura 40, observa-se o gráfico de desgaste de flanco médio (VB_{max}) dos insertos de desbaste, correlacionados com o desgaste de flanco dos insertos de acabamento.

A partir de então foi necessário adotar um procedimento analítico observando as associações entre as medições de características contínuas (desbaste), e discretas (acabamento).

Figura 40: Comparação das medições do monitoramento de desgaste de flanco entre os insertos de desbaste 1, e os insertos de acabamento 1.



Fonte: elaboração própria, (2015).

O inserto de desbaste foi substituído após usinagem da 7ª peça, totalizando 14 faces (mancais) usinadas por peça, em um tempo de corte de 294min. A troca do inserto, ou inversão da aresta de corte, ocorreu com desgaste de flanco de 0,3mm da aresta de corte do 4º inserto do jogo, o desgaste médio foi de 0,25mm. Quando se inicia um processo de lascamento na aresta de corte e na superfície de folga, que se desconsiderados levarão a ferramenta ao colapso total com características difusivas, comprometendo a superfície usinada.

A rápida degradação da aresta de corte do inserto de acabamento durante a usinagem de 01 (uma) peça com tempo médio de usinagem de 54min compromete a utilização desta ferramenta em outra peça a ser usinada, sendo necessária a sua troca sempre, peça por peça. O estudo e monitoramento do desgaste do flanco dos insertos de desbaste, tem por objetivo identificar possíveis causas que comprometem a vida útil do inserto de acabamento.

Esta hipótese da possível relação do desgaste dos diferentes insertos pode ser comprovada analisando e comparando os resultados de medições entre os desgastes de flanco de desbaste e acabamento no gráfico da Figura 40, são

considerados nesta análise os três ciclos de desgaste citados por SIMTH (1989) e DINIZ et al(2010).

Para o 1º ciclo a aresta de corte desgasta-se em função dos mecanismos de recalque, cisalhamento e ruptura na formação dos primeiros volumes de cavacos gerados (ciclo inicial-primário), para o 2º ciclo a aresta de corte apresenta uma taxa de desgaste menor em função da acomodação da geometria de corte ao sistema de forças resultantes do processo de usinagem (ciclo progressivo-secundário), e para o 3º ciclo a aresta de corte desgasta-se acentuadamente e conseqüentemente faz com que o inserto entre em colapso devido a avarias na geometria de corte (ciclo catastrófico-terciário).

Pode ser observado neste gráfico a progressão ascendente e cíclica do desgaste de flanco do inserto de desbaste entre 0,0 e 0,2mm (1º ciclo), e entre 0,2 e 0,3mm (3º ciclo), o que não por coincidência, ciclicamente ocorre com o desgaste de flanco dos insertos de acabamento (analisados individualmente por peça), que apresentam um desgaste também ascendente nas faixas do ciclo de usinagem de desbaste.

O aumento do desgaste para os insertos de acabamento ocorre entre 0,0mm e 0,1mm (correlato ao 1º ciclo de desbaste), e entre 0,05 e 0,15mm (correlato ao 3º ciclo de desbaste).

Para o 2º ciclo de desgaste dos processos não foram observados aumentos de desgaste significativos nos insertos analisados.

Na Tabela 14 observa-se as medições e diferenças entre medições (ΔL) para os intervalos cíclicos de desgaste para ambos os insertos aplicados.

Tabela 14. Desgastes de flanco nos ciclos observados do 1º experimento.

Ciclos \ Insertos	1º ciclo			2º ciclo			3º ciclo		
	Inicial	Final	ΔL	Inicial	Final	ΔL	Inicial	Final	ΔL
Desbaste	0,0	0,2	+0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,3	+0,1
Acabamento	0,0	0,1	+0,1	0,1	0,1	0,0	0,05	0,15	+0,1

O 4º inserto de desbaste do jogo aplicado, foi escolhido para esta avaliação em função de ter o maior desgaste de flanco medido dos quatro insertos aplicados no corte. No caso do inserto de acabamento foi escolhido o inserto com o maior desgaste medido na final da usinagem de um conjunto de mancais de uma peça.

5.3 Monitoramento do desgaste do inserto de desbaste P20 do 2º grupo.

Um jogo de 04 insertos de desbaste classe P20 montados em uma fresa de Ø50mm, foram monitorados para acompanhamento de desgaste. O processo de desbaste do 2º experimento analisado gera um resíduo (cavaco), de perfil geométrico em forma de lâmina fragmentada, bem particular de uma ferramenta negativa com dureza maior que tenacidade em relação ao inserto aplicado no 1º experimento, e com ângulo de folga α maior que 10° (no caso deste inserto este ângulo é aproximadamente 15°), de alto rendimento, com v_c de 219,8m/min, com 1400RPM, com avanços de mesa (6000mm/min) e por dente (1,07mm/min) avanços elevados em relação ao processo de acabamento.

As principais variáveis a considerar para comparação dos processos de desbaste são as classes ISO das ferramentas (desbaste 1 = ISO P30; desbaste 2 = ISO P20), e a geometria de corte (desbaste 1 com $\alpha=5^\circ$; desbaste 2 com $\alpha=15^\circ$).

O objetivo da seleção deste jogo de ferramentas para o 2º processo de desbaste é minimizar o processo de adesão e difusão sobre a superfície, com a aplicação de uma ferramenta de classe menos tenaz e dureza maior em relação as ferramentas do 1º processo de desbaste. Na Tabela 15 observa-se a comparação entre durezas e tenacidades dos insertos de desbaste.

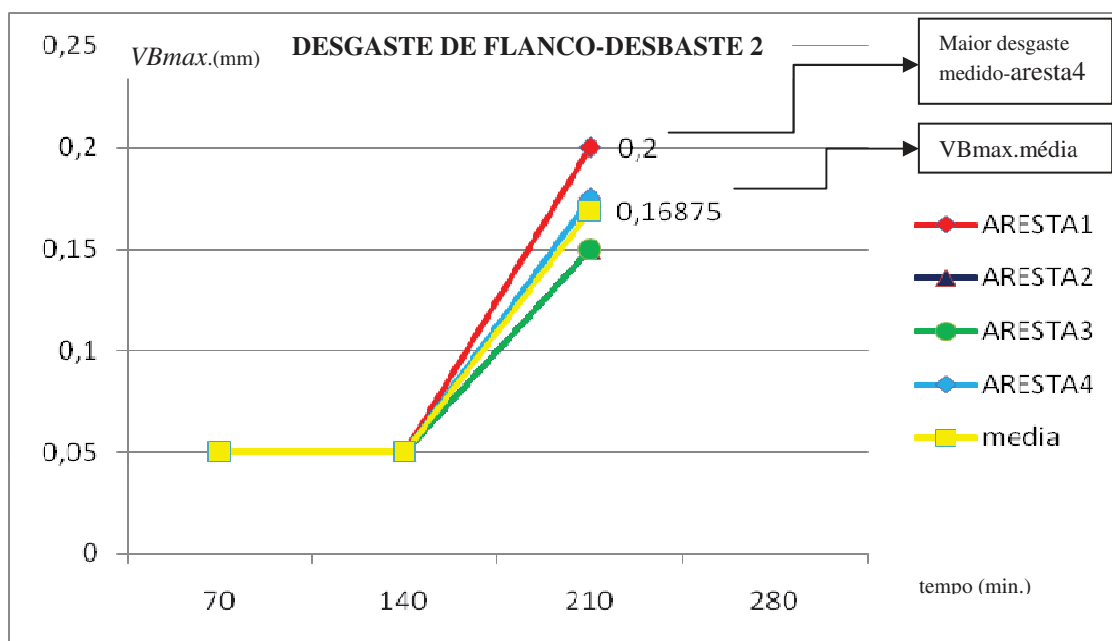
Tabela 15. Durezas e tenacidades dos insertos de desbaste.

Insertos	Dureza \uparrow	Tenacidade \downarrow
Desbaste P30	68,3HRC	170kg/mm ²
Desbaste P20	71,7HRC	150kg/mm ²
Δ	+ 3,4HRC	- 20kg/mm ²

A dureza do inserto P20 do 2º grupo de ferramentas selecionados (2º experimento) é maior em 3,4HRC, e com tenacidade inferior em 20kg/mm², em relação as propriedades mecânicas do inserto P30 do 1º grupo de ferramentas selecionados (1º experimento), o que comparativamente deduz-se que o inserto do 2º grupo possui maior resistência ao desgaste (maior dureza), e menor capacidade de absorver energia até a ruptura das forças de coesão atômica (menor tenacidade).

Na Figura 41, observa-se o registro do monitoramento do desgaste destes insertos.

Figura 41. Monitoramento do desgaste de flanco de 04 insertos triangulares de 80° de ponta de ferramenta (ϵ), medidos por aresta.



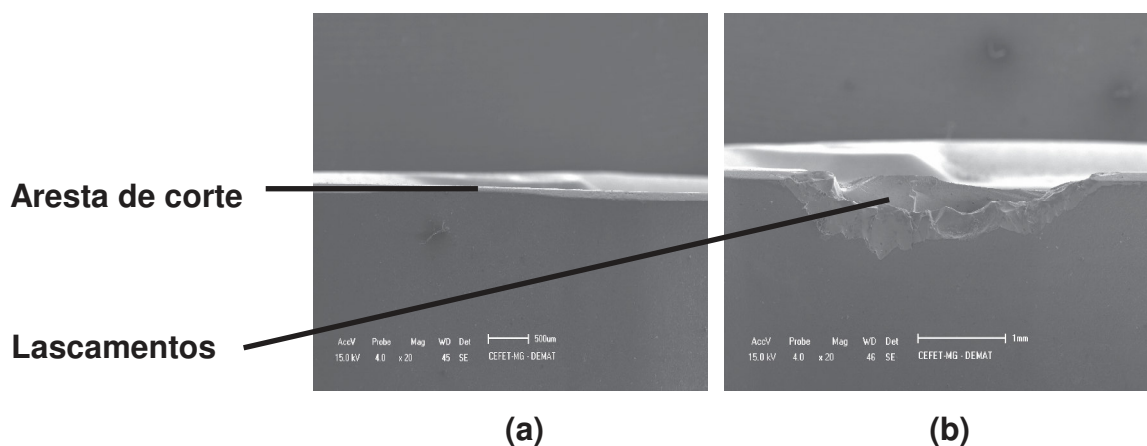
Fonte: autoria própria, (2015).

Os desgastes de flanco até o fim da vida útil são apresentados no gráfico da Figura 41, onde foram substituídos devido a lascamentos na aresta de corte e na superfície de saída de cavaco, que causam a esta superfície um processo de degradação acentuada e trinca da ferramenta, caso não seja efetuada a imediata substituição da mesma. O 1º inserto do conjunto montado deste 2º experimento apresentou o maior desgaste medido, em 0,2mm, e a média calculada para o desgaste dos quatro insertos aplicados no conjunto foi de 0,16875mm.

Os insertos de desbaste 2 (classe P20) aplicados na usinagem tem um desgaste inicial lento devido a alta resistência das camadas do revestimento, assim como ocorre no processo de desbaste 1 (classe P30), porém pelo fato dos insertos deste processo possuir dureza maior relativa a dureza dos insertos do processo 1, e ângulo de saída maior em 10°, conseqüentemente espera-se um desgaste menor e minimização dos lascamentos ocorridos na superfície de folga dos insertos do 1º experimento. O inserto de desbaste 2 foi substituído após a usinagem da 3ª peça, totalizando 14 faces usinadas por peça, em um tempo de corte de 210 min.

Na Figura 42 observa-se o início das avarias por lascamento a partir de 0,2mm de desgaste de flanco.

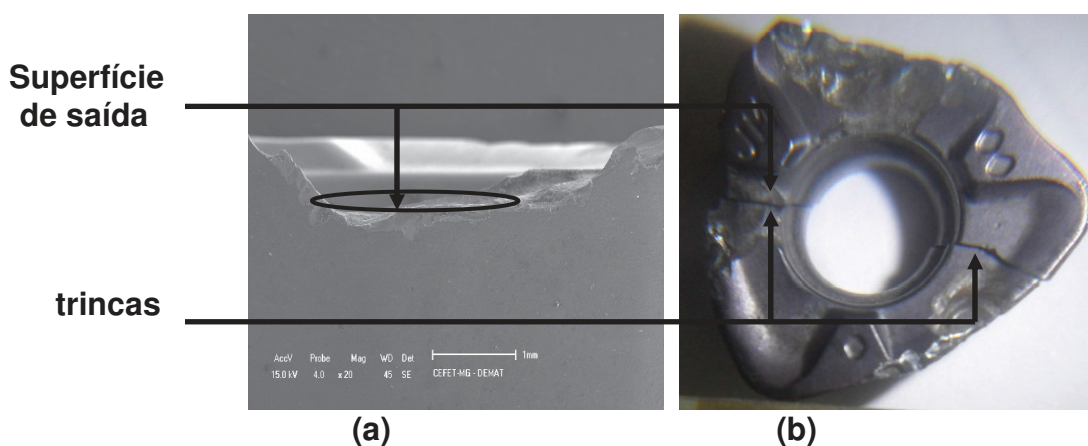
Figura 42. (a) Perfil da aresta de corte nova do inserto de desbaste 2, (b) Aresta de corte com 0,2mm de desgaste de flanco e início do lascamento.



Fonte: MEV aumento 20x, (2014)

Na Figura 43(a) pode-se observar o desgaste da aresta de corte, propagando a partir de 0,2mm, gerando assim o lascamento na direção da aresta de corte para a superfície de saída, sentido este justificado pela característica de ferramenta de desbaste negativa, com $\alpha=15^\circ$, e com a_e/a_p de 3,5mm/7,5mm.

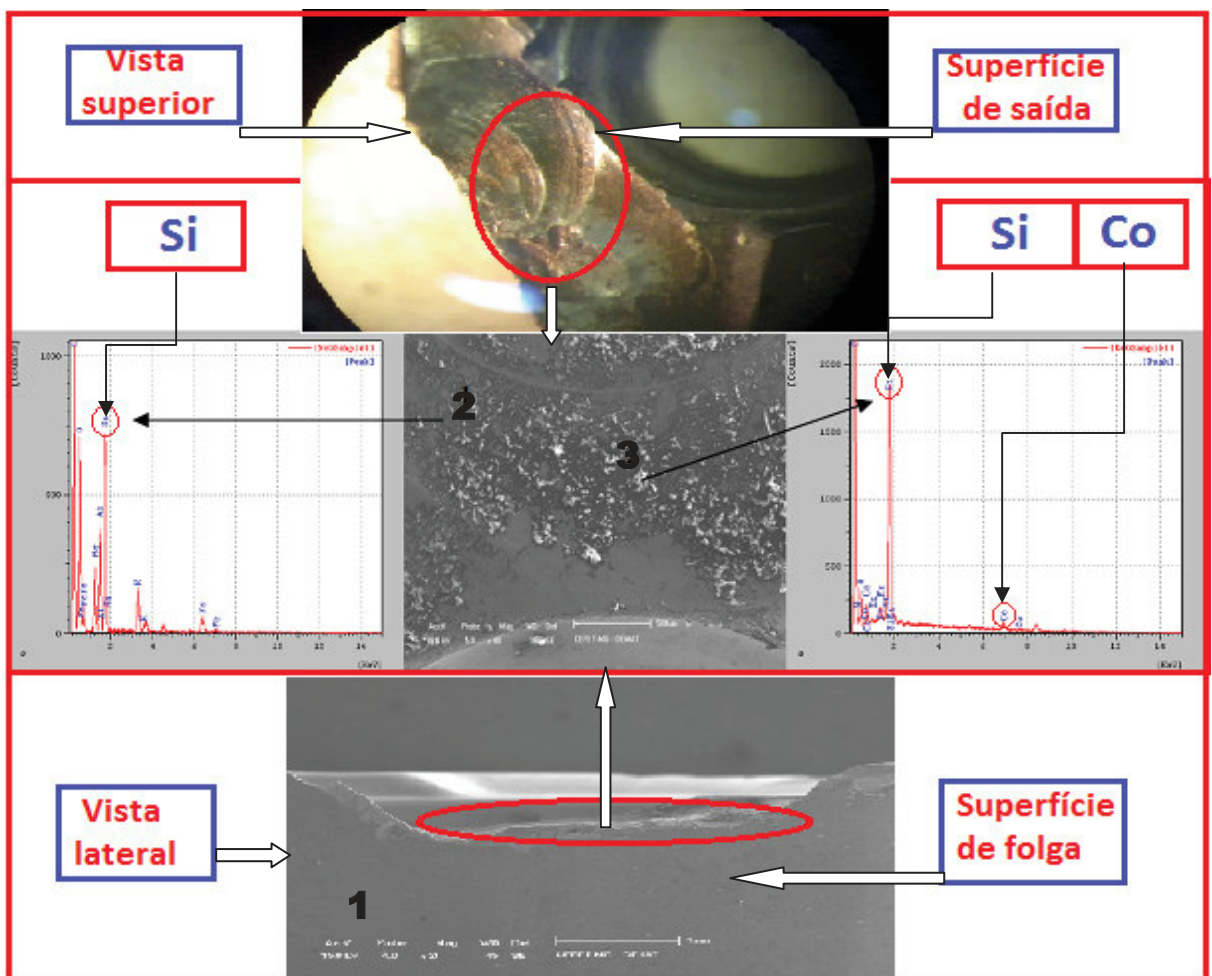
Figura 43. (a) Perfil da aresta de corte com lascamento, (b) Superfície de saída com lascamentos e trincas.



Fonte: (a) MEV aumento 20x, (2014); (b) Microscópio SA4600, aumento 8x (2015)

Na Figura 44 observa-se que a superfície de saída da ferramenta apresenta desgaste acentuado, a forma do desgaste é o lascamento chegando ao colapso por avaria de trincas e quebras na superfície de saída. Os desgastes e avarias não apresentam marcas de abrasão, uma vez que a superfície de saída está lisa mesmo após desgaste, sugerindo assim provável forma de desgaste por craterização, que consequentemente favoreceu lascamentos geometricamente regulares na superfície.

Figura 44. Microscopia ótica (10x)+MEV(20x)+EDS do inserto de desgaste 2.

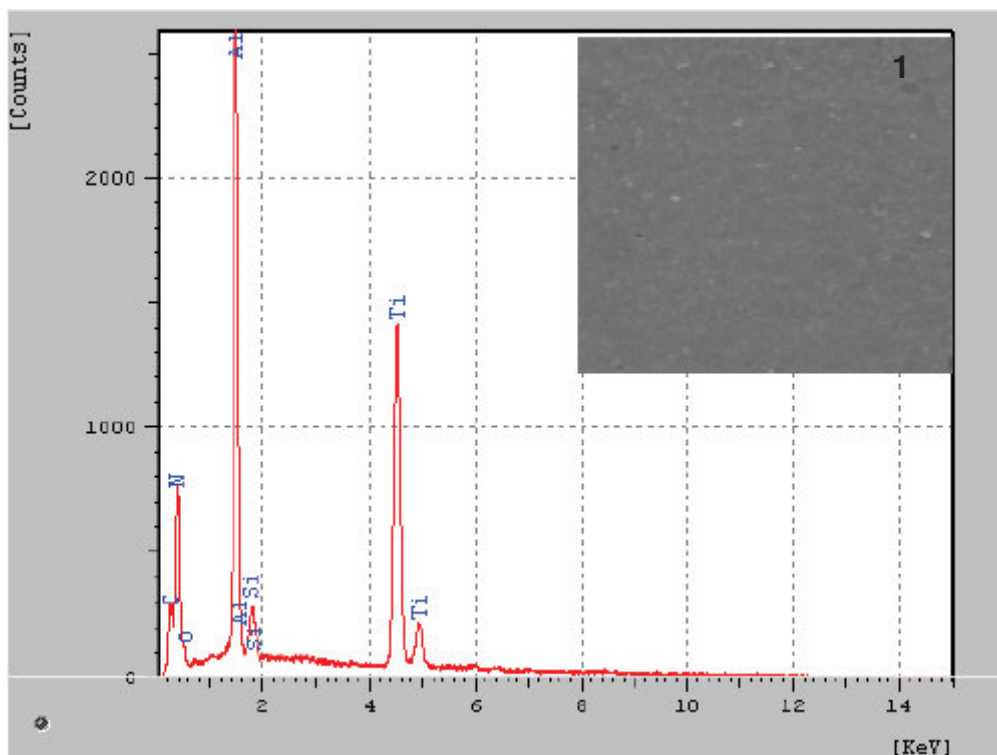


Fonte: MEV+EDS (MEV aumento de 40x, elaboração própria, 2015).

Este inserto de desgaste 2, por possuir dureza maior que o inserto de desgaste 1, não apresenta as mesmas características de avarias. Os lascamentos aumentam e caso o inserto não seja substituído, o mesmo entra em colapso por trincas e quebra na superfície de saída, e não por difusão e escoamento da superfície lascada, como é o caso do inserto de desgaste 1, que possui menor dureza relativa.

Na Figura 45 e tabela 16 observa-se a composição química do revestimento do inserto de desgaste do 2º experimento (ponto 1- destacado na Figura 44).

Figura 45. EDS da composição do revestimento do inserto de desgaste 2.



Fonte: EDS do revestimento TiAlN (2015).

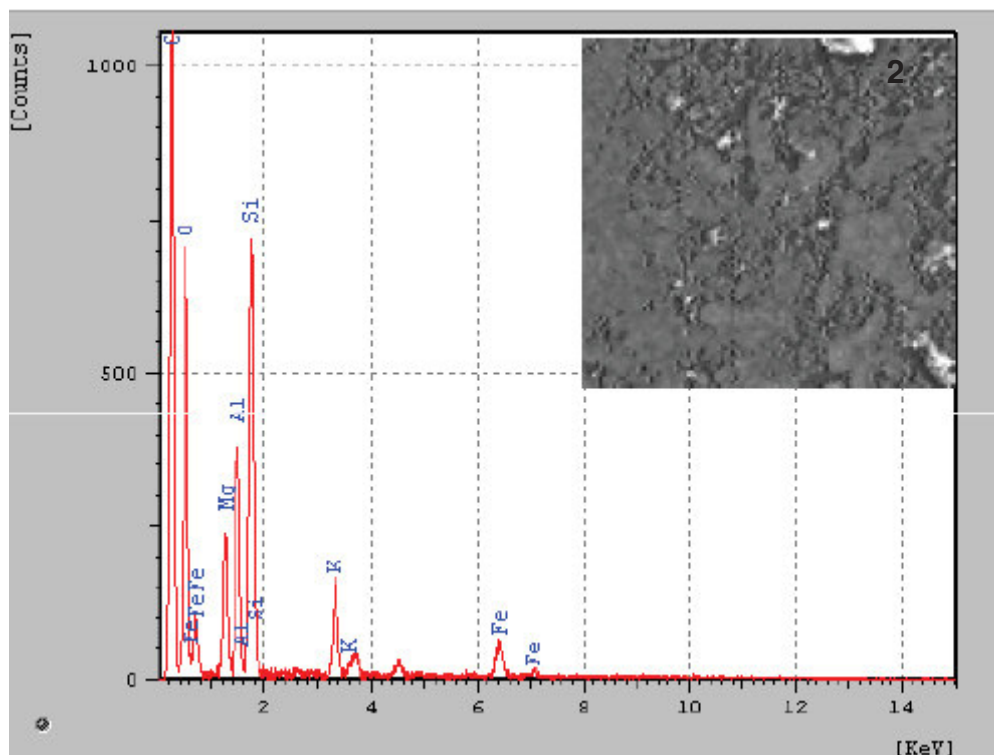
Tabela 16. Composição química do revestimento do inserto de desgaste 2.

Elemento	N	Al	Ti	C
%	52,31	18,52	17,26	11,91

No ponto 1 o revestimento está intacto, com N (52,31%), Al (18,52%) e Ti (17,26%), em uma camada com espessura aproximada de 1 a 4 μm , depositada por meio do processo PVD (deposição física de vapor). A dureza maior do inserto 2 em relação ao inserto 1, apesar da presença dos mesmos constituintes no revestimento (TiAlN-PVD), se justifica pelo maior percentual de N e menor percentual de Al na composição química.

Na Figura 46 e tabela 17 observa-se a composição química do ponto 2 do inserto de desgaste do 2º experimento.

Figura 46. EDS da composição do inserto de desgaste desgastado, ponto 2.



Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

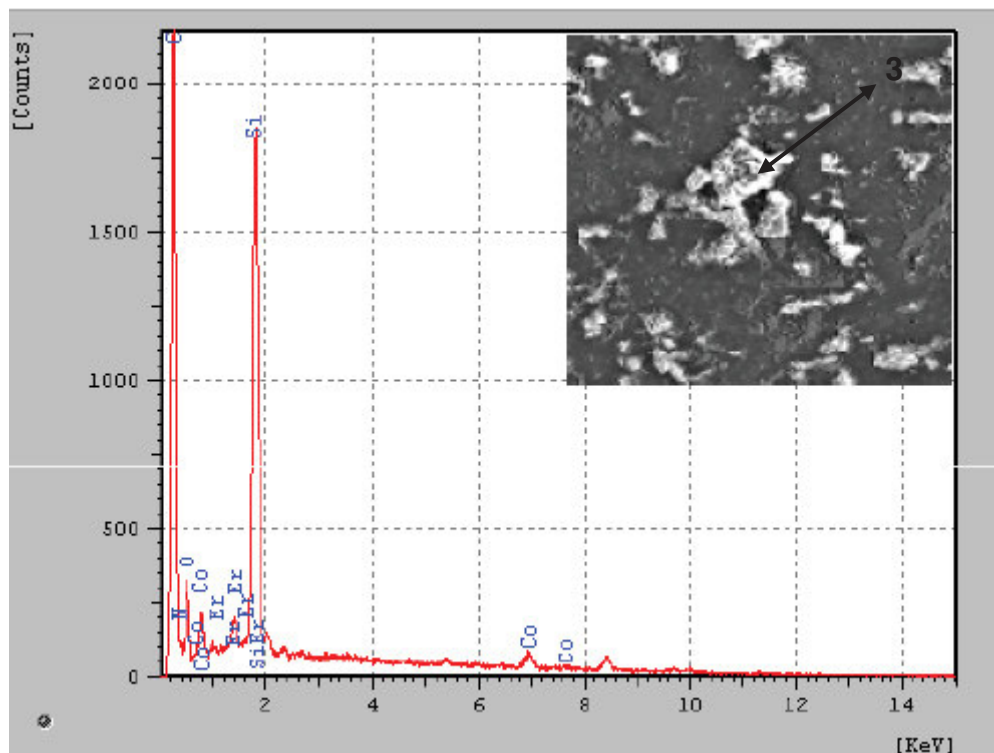
Tabela 17. Composição química do inserto de desgaste 2 no ponto 2.

Elemento	Si	O	C	Al	Fe	Mg	K
%	4,89	29,23	58,23	2,68	1,53	1,93	1,51

No ponto 1 é caracterizado adesão de Si (4,89%) e não ocorreu exposição do substrato de WC. Este inserto de desgaste classe P20, possui dureza maior em 3,4HRC em relação ao inserto do 1º experimento (classe P30), esta propriedade confere a este inserto maior resistência ao desgaste em serviço, porém a não exposição do substrato se justifica também pelo fato deste inserto do desgaste 2 entrar em colapso prematuramente, com apenas 0,2mm de desgaste de flanco.

Na Figura 47 e tabela 18 observa-se a composição química do ponto 3 do inserto de desgaste do 2º experimento.

Figura 47. EDS da composição do inserto de desgaste desgastado, ponto 3.



Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

Tabela 18. Composição química no ponto 3.

Elemento	Si	Co	C	N	O	Er
%	7,24	1,06	70,68	10,56	9,95	0,51

No ponto 2 é caracterizado adesão de Si (7,24%) e exposição do aglutinante do substrato WC, o Co (1,06%).

Nos pontos (1 e 2) o substrato ainda não está totalmente exposto como no caso do inserto de desgaste 1, na superfície de saída analisada foi constatado a presença de elemento ligante do substrato (Co) e elemento da peça (Si), devido a presença do Si encontrado nos pontos 1 e 2, pode-se afirmar que ocorreu adesão de material da peça na ferramenta, e pelas características de desgaste esta adesão aconteceu também por abrasão do Si na superfície, apesar da não constatação deste mecanismo o mesmo ocorre, uma vez que a difusão não é confirmada devido as baixas temperaturas de trabalho em função de fluido de corte abundante sobre a

interface ferramenta-cavaco-peça, e por não apresentar superfície alisada em lascamentos ou crateras.

Na tabela 19 observa-se as composições químicas dos pontos selecionados para análise do inserto de desbaste P20 do 2º grupo.

Tabela 19. Composições químicas relativas em peso atômico dos pontos analisados no inserto de desbaste 2.

Elemento	N	Al	Ti	Si	Co	C	O
Ponto1	52,31	18,52	17,26	–	–	–	–
Ponto2	–	–	–	4,89	–	58,23	29,23
Ponto3	–	–	–	7,24	1,06	70,68	–

Em síntese pode-se analisar a presença do revestimento informado pelo fabricante (TiAlN), a adesão de material da peça na ferramenta (Si), e exposição do elemento ligante (aglutinante) do substrato (núcleo) do inserto de desbaste (CoC).

5.3.1 Monitoramento do desgaste do inserto de acabamento do 2º grupo.

Todas as considerações para os parâmetros do processo de acabamento após desbaste 1, são válidos e aplicados no processo de acabamento após desbaste 2.

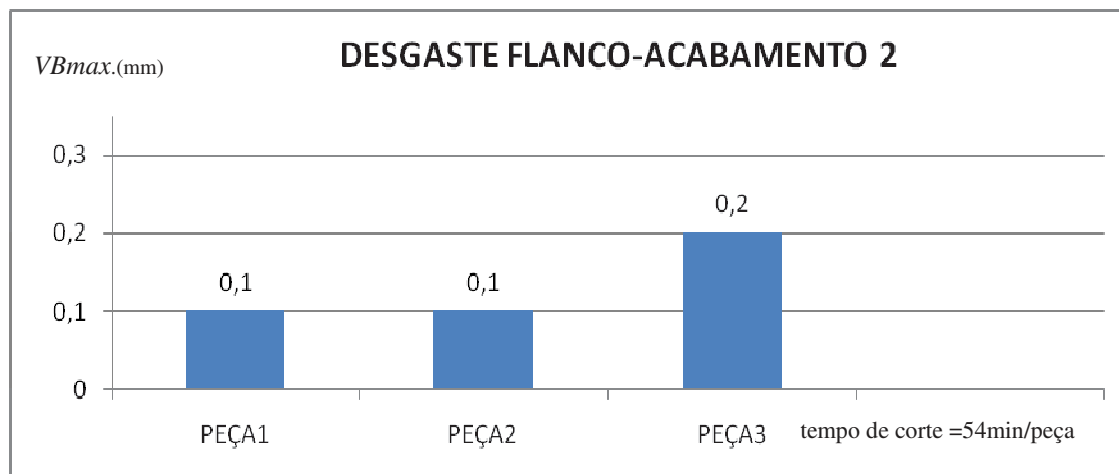
O processo de acabamento analisado gera um resíduo (cavaco) de perfil geométrico em forma de agulha, bem particular de uma ferramenta positiva, revestida de alto rendimento, com v_c elevada (455m/min), 3300RPM, com avanços de mesa (1400m/min) e por dente (0,106mm/min).

Para este processo de acabamento 2 também é seguido o mesmo padrão do 1º corte de acabamento, os insertos são obrigatoriamente substituídos a cada peça usinada, devido aos requisitos já citados anteriormente relacionados a acabamento superficial e controle dimensional da produção. Portanto não existem variações de parâmetros e procedimentos entre os processos de acabamento 1 e 2.

Na Figura 48 observa-se o desgaste de flanco medido nos insertos de acabamento com a relação de 01 aresta de corte para uma peça, ou seja, é uma medição de característica discreta, onde a aresta de corte utilizada na peça 1, não

será utilizada na peça 2, e assim por diante, não sendo possível obter uma curva válida para o desgaste de flanco do processo de acabamento em função do tempo.

Figura 48. Medidas do desgaste de flanco dos insertos de acabamento 2.



Fonte: elaboração própria, (2014)

Apesar da impossibilidade de geração de uma curva contínua para o desgaste de flanco dos insertos de acabamento, é possível assim como foi feito para o 1º processo de acabamento, fazer uma análise de progressão de aumento de desgaste de um inserto para o outro, após a mudança da peça a ser usinada. Essa análise propicia uma observação válida para a constatação da rápida degradação da aresta de corte na 1ª peça, chegando a 0,2mm de desgaste de flanco, e posteriormente o aumento do desgaste entre a 2ª peça e 3ª peça, de 0,2mm para 0,35mm de desgaste de flanco, desgaste este mais acentuado que no processo de acabamento pós-desbaste 1.

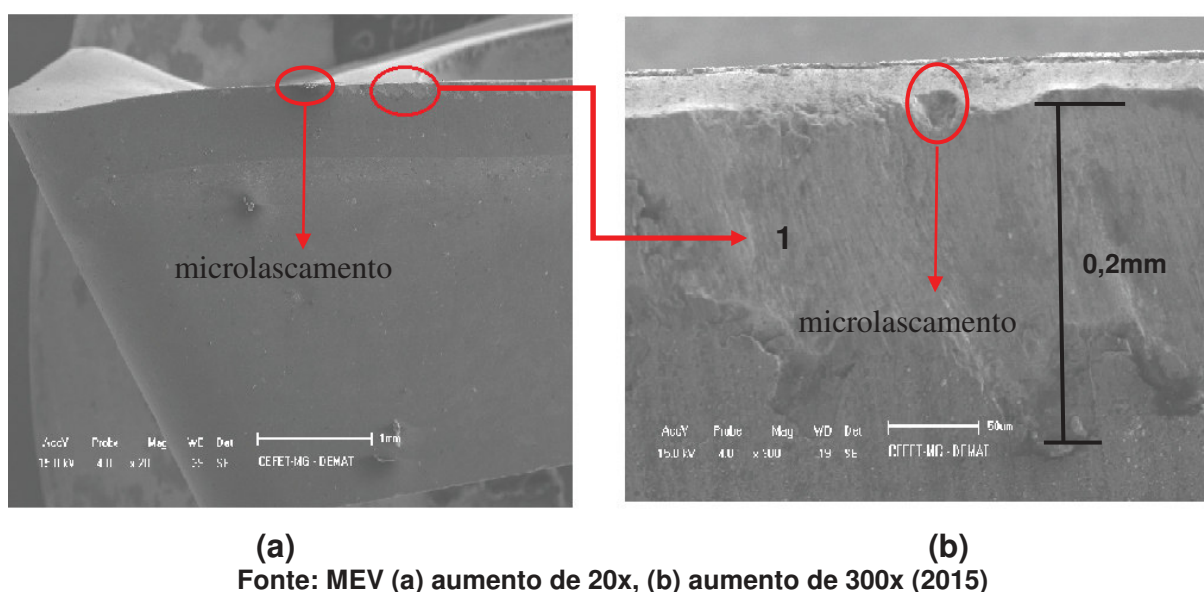
Os insertos de acabamento apresentaram desgastes de flanco máximos na ordem de 0,15mm e 0,2mm, respectivamente para o 1º grupo e para o 2º grupo de ferramentas monitoradas, a diferença relativa é de 25%, é uma diferença que permite o aproveitamento do inserto do 1º processo para executar mais um ciclo de corte de acabamento, em função da posição de desgaste de flanco estar no estágio primário de desgaste e abaixo de 0,3mm de VB_{max} citado por DINIZ et al(2010) como limite de referência para fim de vida útil de um inserto de metal duro.

O aproveitamento do inserto do 2º experimento não é recomendado, apesar do VB_{max} estar abaixo de 0,3mm, o mesmo está próximo deste limite e apresenta avarias que o inserto de acabamento 1 não apresentou, a rugosidade exigida em

projeto fica comprometida a medida que o inserto diminui a capacidade de corte em função da perda da geometria de corte.

Na Figura 49, observa-se o desgaste de flanco na aresta de corte do inserto de acabamento.

Figura 49. (a) Aresta de corte do inserto de acabamento 2 com desgaste de flanco de 0,2mm, (b) Marcas do mecanismo de abrasão no inserto.

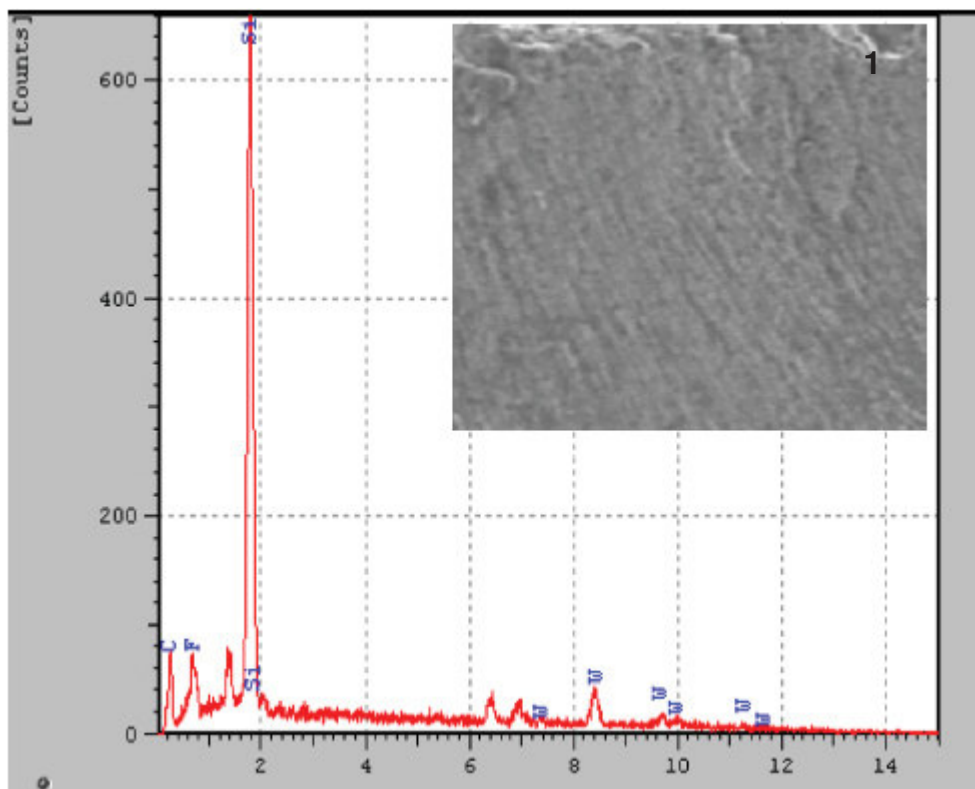


O VB_{max} (desgaste de flanco) no inserto de acabamento aplicado após o 2º processo de desbaste, é caracterizado por marcas abrasivas mais acentuadas em relação ao desgaste dos insertos de acabamento do 1º grupo. O VB_{max} dos insertos de acabamento do 2º grupo foram causadas inicialmente pela adesão de Si na aresta de corte e superfície de folga da ferramenta, e posteriormente pelo mecanismo de abrasão. O desgaste abrasivo envolve a perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento, causado por partículas de elevada dureza relativa.

Outro fator que se torna imprescindível para ser analisado é a rápida degradação da aresta de corte do inserto de acabamento deste 2º grupo analisado, em relação ao desgaste analisado para o inserto de acabamento do 1º grupo. No inserto de acabamento do 1º grupo foi encontrado um microentalhe de 0,1mm, neste inserto de acabamento do 2º grupo foi encontrado um microentalhe de 0,03mm e microlascamentos sendo formados na aresta de corte.

Na Figura 50 e tabela 20 observa-se a composição química da região desgastada do inserto de acabamento 2, com presença do Si proveniente do material da peça.

Figura 50. EDS da composição do inserto de acabamento 2 desgastado.



Fonte: MEV, aumento de 100x, e EDS (elaboração própria, 2015).

Tabela 20. Composição química da região desgastada.

Elemento	Si	W	C	F
%	29,85	14,57	47,59	7,99

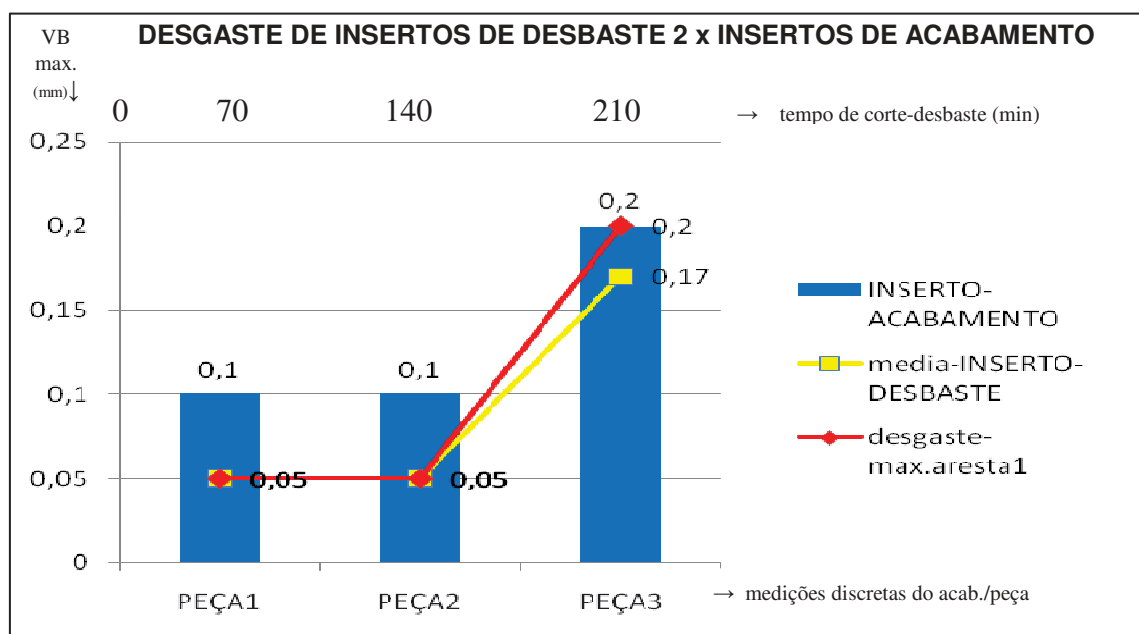
Na região de desgaste do inserto de acabamento 2 é caracterizado adesão de Si (29,83%) e exposição do substrato W (14,57%).

5.3.2 Desbaste 2 x acabamento 2

Os insertos de desbaste 2 e acabamento 2 para usinagem dos mancais do braço articulável de equipamento de manutenção ferroviária, foram selecionados e preparados para monitoramento do desgaste a partir do 1º passe.

Na figura 51, observa-se o gráfico de desgaste de flanco médio dos insertos de desbaste correlacionados com o desgaste de flanco dos insertos de acabamento. A partir de então é necessário uma análise cuidadosa por associar medições de características contínuas (desbaste), com medições de características discretas (acabamento).

Figura 51: Comparação das medições do monitoramento de desgaste de flanco entre o inserto de desbaste 2 e insertos de acabamento.



Fonte: autoria própria, (2015).

Os insertos de desbaste do 2º experimento foram substituídos após usinagem da 3ª peça, totalizando 14 faces usinadas por peça, em um tempo de corte de 210min. A troca do inserto, ou da aresta de corte, ocorreu com desgaste de flanco de 0,2mm da aresta de corte do inserto, o desgaste médio foi de 0,16875mm, quando se inicia um processo de degradação na aresta de corte e lascamentos e trincas na superfície de saída, que se desconsiderados levarão a ferramenta ao colapso total por trinca e quebra durante o processo.

A rápida degradação da aresta de corte do inserto de acabamento durante a usinagem de 01 (uma) peça com tempo médio de usinagem de 54min, compromete a utilização desta ferramenta em outra peça a ser usinada, sendo necessária a sua troca sempre peça por peça; o estudo e monitoramento do desgaste do flanco dos

insertos de desbaste, tem por objetivo identificar possíveis causas que comprometem a vida do inserto de acabamento.

Esta hipótese da possível relação do desgaste dos diferentes insertos pode ser comprovada analisando os resultados de medições entre os desgastes de flanco de desbaste e acabamento no gráfico da Figura 51, pode ser observado neste gráfico a progressão ascendente do desgaste de flanco do inserto de desbaste entre 0,05 e 0,2mm, o que não por coincidência, ocorre com o desgaste de flanco dos insertos de acabamento (analisados individualmente por peça), que apresentam um desgaste também ascendente nas faixas do ciclo de usinagem de desbaste, entre 0,1mm e 0,2mm.

Na Tabela 21 observam-se as medições e diferenças entre medições para os intervalos cíclicos de desgaste para ambos os insertos aplicados.

Tabela 21. Desgastes de flanco nos ciclos observados do 2º experimento.

Ciclos Insertos	1º ciclo			2º ciclo			3º ciclo		
	Inicial	Final	ΔL	Inicial	Final	ΔL	Inicial	Final	ΔL
Desbaste	0,0	0,05	+0,05	0,05	0,05	0,0	0,05	0,2	+0,15
Acabamento	0,0	0,1	+0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	+0,1

O 1º inserto de desbaste do jogo aplicado no 2º grupo de ferramentas selecionadas, foi escolhido para esta avaliação em função de ter o maior desgaste de flanco medido dos quatro insertos aplicados no corte. No caso do inserto de acabamento foi escolhido o inserto com o maior desgaste medido na final da usinagem de um conjunto de mancais de uma peça. Este critério de escolha pelo maior VB_{max} medido é adotado, em função de considerar a aresta de corte mais degradada como referência do limite a ser padronizado para fins de substituição do inserto a partir da definição da vida útil do inserto em função de suas características mecânicas, sua geometria de corte, os parâmetros de usinagem aplicados, e o material a ser usinado.

5.4 Desbaste 1 x Desbaste 2

A análise entre os processos de desbaste 1 (inserto ISO P30, $\alpha=5^\circ$) e desbaste 2 (ISO P20, $\alpha=15^\circ$), demonstra características bem particulares entre os processos,

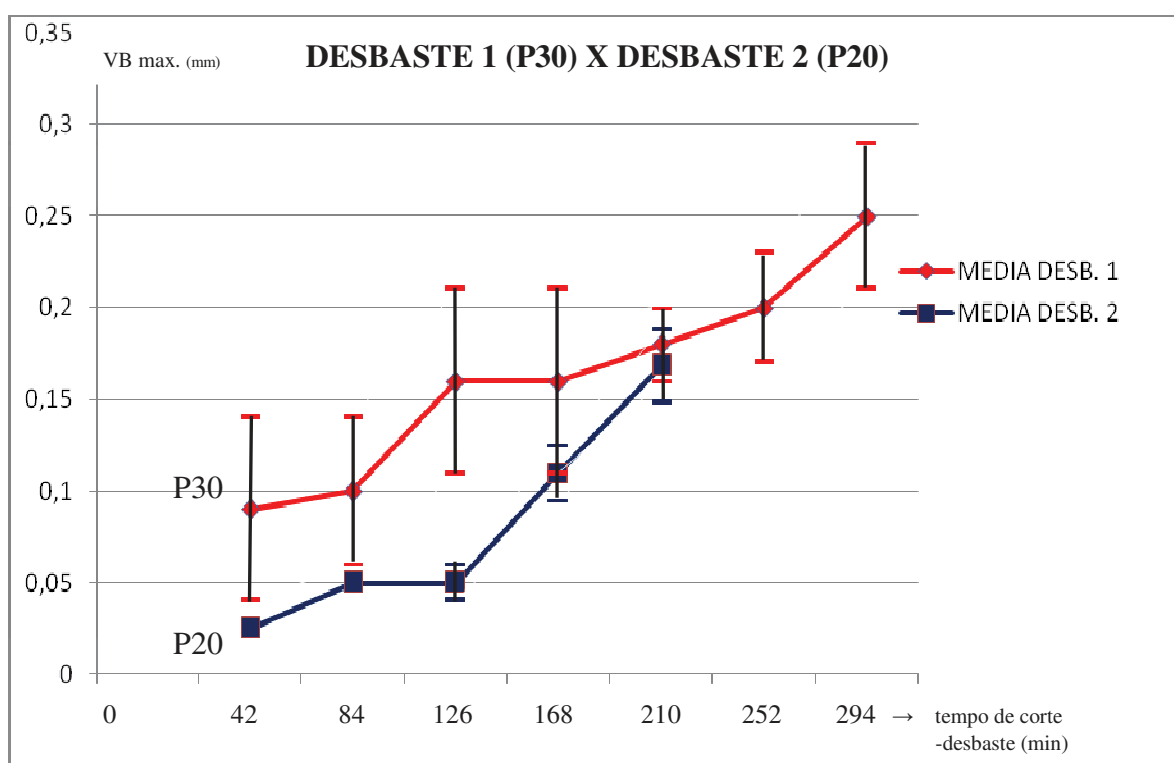
que podem ser verificadas através do gráfico comparativo do monitoramento dos desgastes de flanco medidos durante os referidos processos.

Os dados coletados para o monitoramento do inserto de desgaste do 2º experimento foram executados, com parametrização ao tempo de corte do processo de desgaste do 1º experimento, possibilitando assim comparar os desgastes em função do tempo de corte.

Os parâmetros de usinagem para ambos os processos foram especificados a partir das recomendações técnicas dos fornecedores de ferramentas, que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, sendo que o avanço da mesa (v_f), foi diferente para os processos de desgaste, em função das características de cada inserto ($v_{f1}= 10000\text{m/min}$; $v_{f2}= 6000\text{m/min}$), e conseqüentemente o avanço por dente (f_z), também foi diferente para os processos ($f_{z1}= 1,786\text{mm/dente}$; $f_{z2}= 1,07\text{mm/dente}$).

Na Figura 52, observa-se a curva média dos desgastes de flanco para os conjuntos de insertos montados para os processos de desgaste executados, associados aos respectivos desvios padrões.

Figura 52. Comparação das medições do monitoramento de desgaste de flanco das médias dos processos de desgaste 1 e desgaste 2.



Fonte: elaboração própria (2015)

A classe de ferramentas P30 (desbaste 1 - 1º grupo de insertos), com dureza menor, apresentam desgaste inicial maior com crescimento gradual a partir do 2º ciclo na evolução do desgaste. A classe de ferramentas P20 (desbaste 2 - 2º grupo de insertos), com maior dureza, apresentam desgaste inicial menor, seguido de crescimento acentuado a partir do 2º ciclo na evolução de desgaste.

Os insertos de desbaste observados neste estudo possuem geometria de corte semelhante, com exceção do ângulo de folga, que tem uma variação de 10°. As variáveis principais para estudo foram a classe de dureza x tenacidade dos insertos e o ângulo de folga (α). O inserto aplicado no 1º processo de desbaste foi de classe P30, com características mecânicas de maior tenacidade (170kg/mm²), dureza menor (de 68,3HRC) em relação ao inserto 2, e com ângulo de folga de 5°. O inserto aplicado no 2º processo de desbaste foi de classe P20, com características mecânicas de dureza maior (de 71,7HRC) e tenacidade menor (de 150kg/mm²) em relação ao inserto 1, e com ângulo de folga de 15°. Essas características influenciam diretamente o desgaste de flanco dos insertos, em função do material a ser usinado (revestido de Mn e Si em aço ABNT 1020).

Na Figura 52, observa-se como uma tenacidade maior em relação a dureza (desbaste 1), prolongou a vida útil da ferramenta, apesar de um desgaste de flanco inicial maior do que o inserto de maior dureza (desbaste 2), este apesar de um desgaste inicial bem menor em relação ao inserto 1, desgasta-se acentuadamente a partir de 0,05mm (126min), terminando a vida útil em 210min de corte com 0,16875mm de desgaste de flanco médio.

As variações de desgaste dos insertos do 1º grupo de experimentos (desbaste 1 - P30), possuem valores de desvio padrão médio na ordem de $\pm 0,05$ mm. As variações de desgaste dos insertos do 2º grupo de experimentos (desbaste 2 - P20), possuem valores de desvio padrão médio na ordem de $\pm 0,015$ mm. Os insertos do 1º grupo apresentaram variação média maior de 70% (0,045mm) em relação a variação dos insertos do 2º grupo. Apesar desta diferença nas variações dos desvios médios das medidas de desgaste de flanco, os insertos do 1º grupo (com maior variação) apresentaram desgaste inicial maior e evolução de desgaste com crescimento gradual ao longo do tempo, em um período maior em relação aos insertos do 2º grupo, enquanto que os insertos do 2º grupo (com menor variação) apresentaram desgaste inicial menor seguido de crescimento acentuado ao longo do tempo, em um período menor em relação aos insertos do 1º grupo.

5.5 Análise das superfícies usinadas

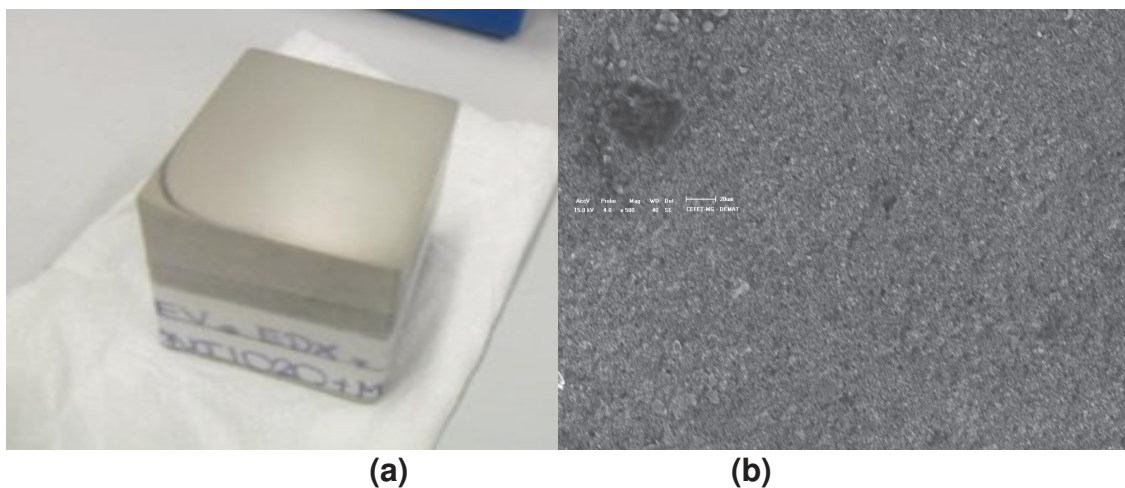
As superfícies obtidas por meio dos processos de fresamento por desbaste e acabamento, foram analisadas e caracterizadas a partir das imagens de MEV, de microscopia ótica e ensaios de rugosidade (realizados nos corpos de prova), que em análise conjunta permitem descrever as condições superficiais dos mancais usinados durante os processos.

5.5.1 Composição química da superfície usinada.

Para realizar esta análise foi preparado um corpo de prova exclusivamente para ser submetido ao registro de imagens do MEV.

Na Figura 53, observa-se que a microestrutura da liga de deposição de Mn+Si no substrato em aço 1020 é composta de poros em pequenas proporções (áreas pretas), óxidos formados no processo de deposição (áreas cinza claro) e a fase metálica com maior proporção na fração da imagem (área cinza escuro).

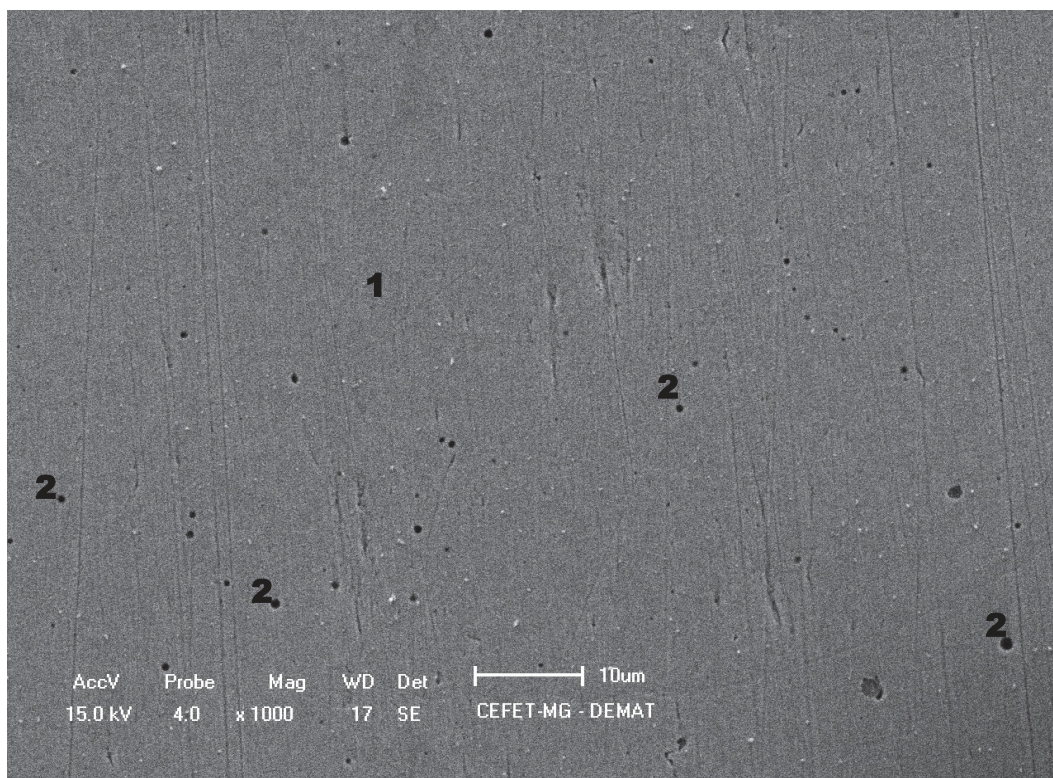
Figura 53. (a) CP preparado para análise no MEV (c) Imagem gerada pelo MEV.



Fonte: CP, MEV aumento 500x (2014)

Na Figura 54, observa-se na ampliação da superfície da liga de deposição de Mn+Si, que a visualização dos poros com geometria definida é característica de inclusões e reduções de óxidos com carbonetação no poro, que ocorre em função dos gases Ar+CO₂ da soldagem (ponto 2), e a fase metálica da liga MnSi (ponto 1).

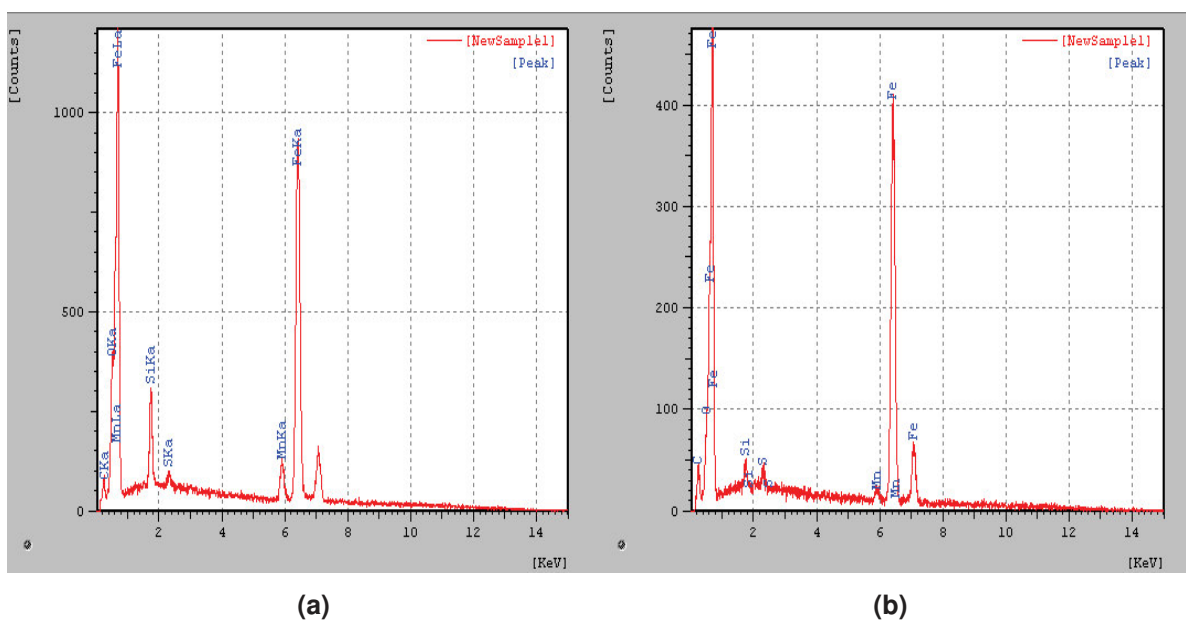
Figura 54. Ampliação da superfície do CP para análise EDS.



Fonte: MEV+EDS, aumento de 1000x (2015)

Na Figura 55 observa-se os resultados da análise de EDS para o ponto 1 Fig.55(a), e ponto 2 Fig.55(b), da superfície revestida com Mn e Si.

Figura 55. (a) EDS no ponto 1 do CP, (b) EDS no ponto 2 do CP.



Fonte: EDS de superfície (2015)

Na tabela 22, é apresentada a composição química do revestimento obtido após processo de soldagem MIG, para o ponto 1 (área cinza) e pontos 2 (poros).

Tabela 22. Composição química do revestimento de MnSi.

Elemento (%)	Mn	Si	Fe	C	S	O
Ponto 1	1,15	1,61	97,24	--	--	--
Ponto 2	1,06	1,85	65,20	19,49	1,43	10,97

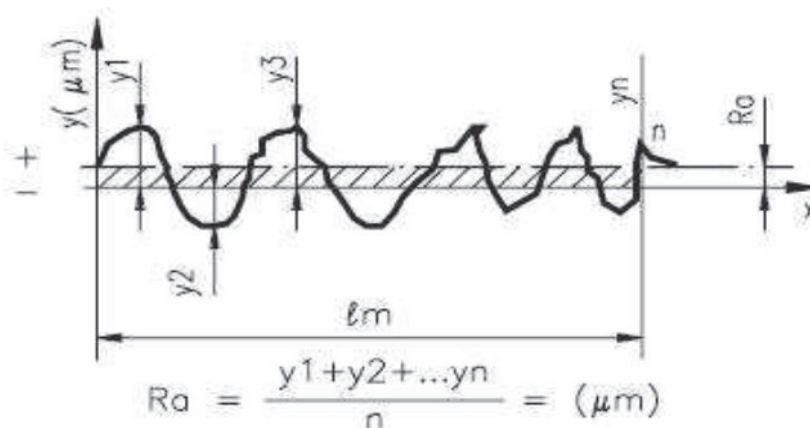
Para o ponto 1 (fase metálica de maior fração na imagem), a composição química caracteriza a obtenção da liga de catálogo do arame maciço ASME SFA-5.18, com Mn (1,15%) e Si (1,61%).

Para o ponto 2 (poros-pretos), em menor fração, tem composição química que caracteriza formação de óxidos, e contaminação de S (1,43%), resíduos comuns nas escórias e impurezas dos cordões de solda.

5.5.2 Rugosidade e topografia das superfícies usinadas

A textura superficial foi medida com rugosímetro digital, em cada um dos corpos de prova usinados para cada processo observado neste trabalho, a metodologia selecionada para as medições foi Ra (desvio médio aritmético para a rugosidade superficial) em μm . Na Figura 56, observa-se as características da rugosidade (Ra).

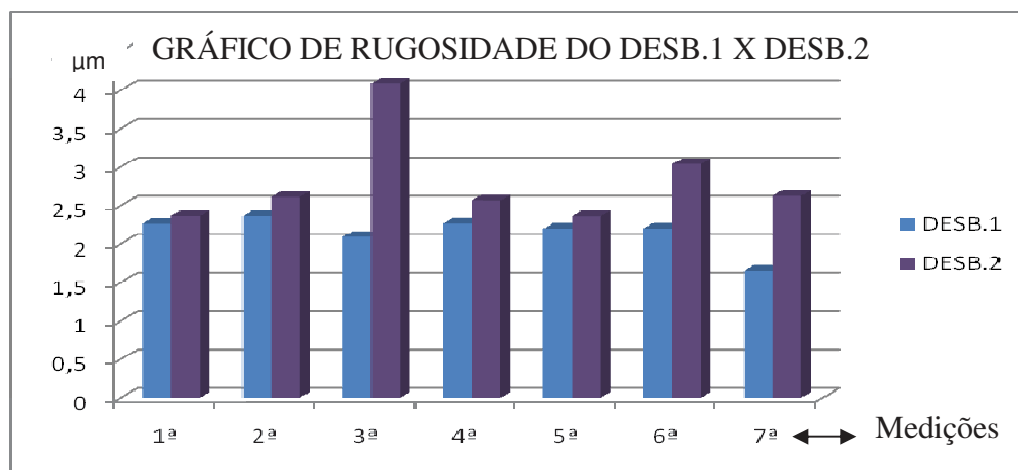
Figura 56: Representação do desvio médio aritmético para a rugosidade superficial (R_a).



Fonte: Rugosidade média Ra (Xavier, 2003)

Na Figura 57, no gráfico de monitoramento das rugosidades do desbaste, observa-se comparativamente os resultados de cada processo.

Figura 57: Comparação das rugosidades do desbaste 1 x desbaste 2.

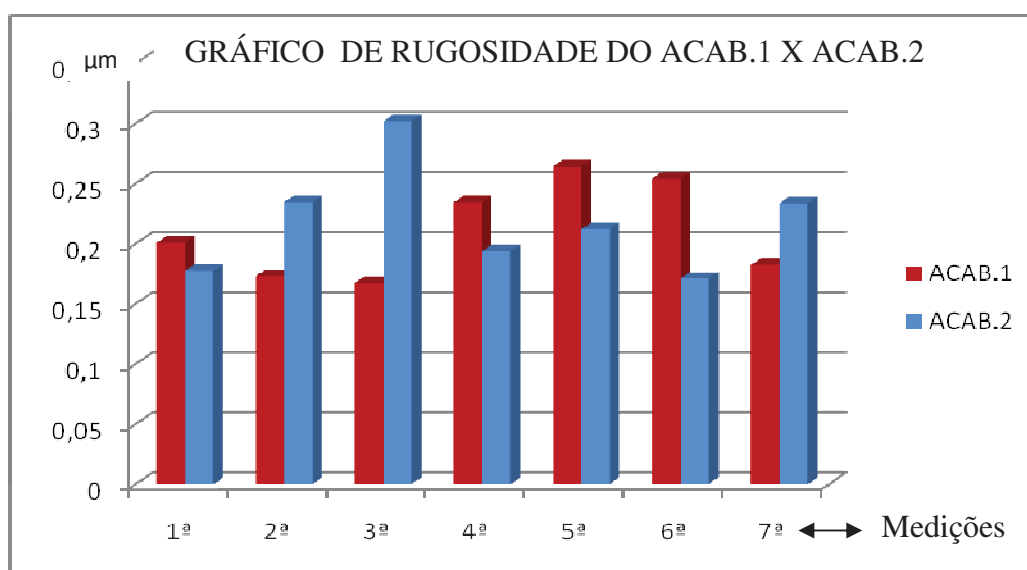


Fonte: elaboração própria (2015)

Para os processos de desbaste, observa-se acabamento superficial com menor rugosidade para o 1º desbaste, caracterizando melhor acabamento superficial para o 1º desbaste em relação ao 2º desbaste.

Na Figura 58, no gráfico de monitoramento das rugosidades do acabamento, observa-se comparativamente os resultados de cada processo executado no 1º e 2º experimento planejado .

Figura 58: Comparação das rugosidades do acabamento 1 e 2.



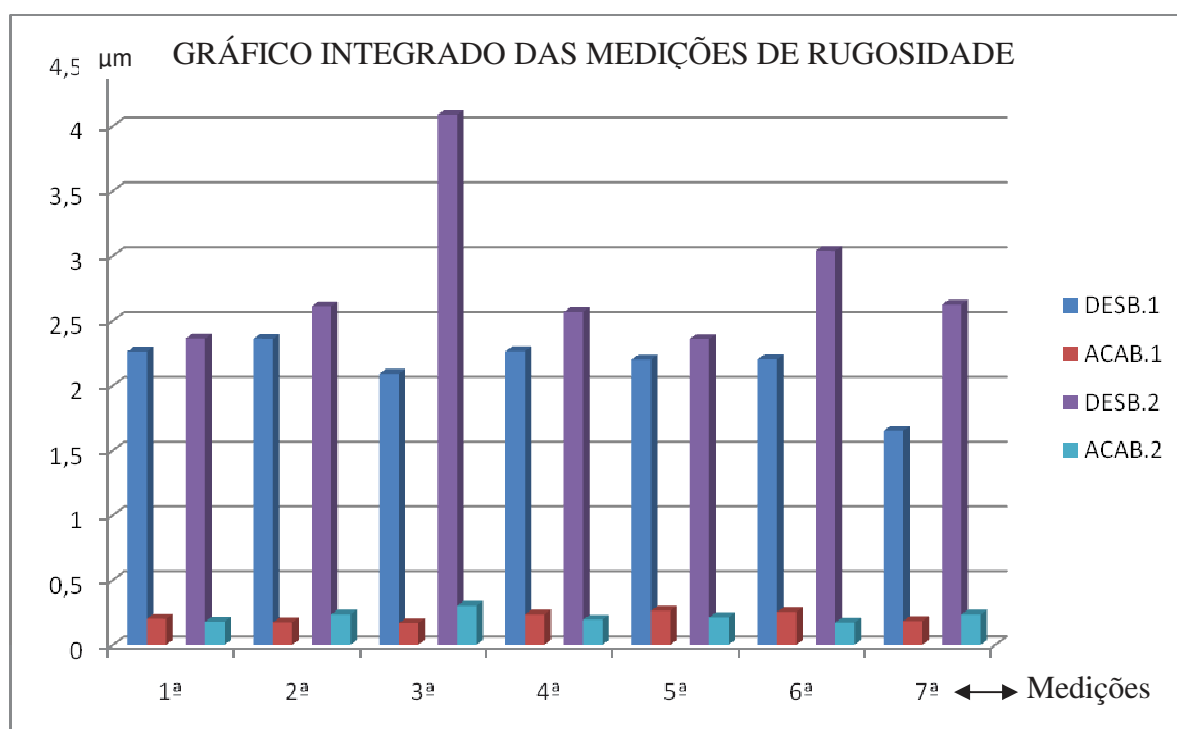
Fonte: autoria própria (2015)

Para os processos de acabamento, observa-se acabamento superficial com menor rugosidade para o 1º acabamento, considerando principalmente as três primeiras medidas, caracterizando melhor acabamento superficial para o 1º acabamento em relação ao 2º acabamento, considerando a partir da 4ª medida observa-se melhor acabamento superficial para o 2º processo com menor rugosidade medida

Com exceção da 4ª medida (em sete medidas realizadas) com diferença aproximada de $0,15\mu\text{m}$ (diferença relativa de 50%), em termos globais não foram observadas diferenças significativas entre as rugosidades dos dois processos de acabamento analisados, considerando também que a tolerância de rugosidade exigida em projeto é de $0,8\mu\text{m}$, estando portanto os dois processos de acabamento com medidas de rugosidade bem abaixo da rugosidade máxima permitida para aprovação do processo.

Na Figura 59, observa-se o gráfico integrado de todas as medidas registradas de rugosidade superficial Ra, tanto para desbaste, quanto para o acabamento.

Figura 59: Comparação das rugosidades de todos os processos



Fonte: autoria própria (2015)

Analisando os processos conjuntos de desbaste e acabamento, pode-se afirmar que a maior rugosidade do 2º processo não influenciou a rugosidade do processo de acabamento, porém no monitoramento de desgaste de flanco, é caracterizada influência da rugosidade maior considerando o desgaste maior do 2º inserto do processo de acabamento em relação ao 1º inserto do processo de acabamento.

A rugosidade do 2º processo de desbaste é superior em 25% em relação à rugosidade do 1º processo de desbaste, com isto, a rugosidade do 2º processo aumenta os ataques à aresta de corte dos insertos, uma vez que possuindo uma amplitude maior (diferença entre vales e picos na superfície), ocorre maior número nas entradas e saídas das ferramentas de corte em serviço nas superfícies com rugosidade relativa maior.

Outro fator importante a considerar, quando a análise superficial refere-se à rugosidade, são as marcas de "*CHATTER*", que surgem na superfície usinada em consequência de vibrações auto-excitadas durante o processo de usinagem entre a interface ferramenta-peça.

As principais causas de vibração na usinagem são de origem estática, que ocorrem devido à ineficiência dos dispositivos de fixação da base-barramento da máquina, e dos limitadores de movimento das peças a serem usinadas; e as de origem dinâmica, que ocorrem em função das deflexões e torções dos eixos árvores primários e secundários de máquina, e nos cabeçotes rígidos e angulares de fixação de fresas e porta-ferramentas.

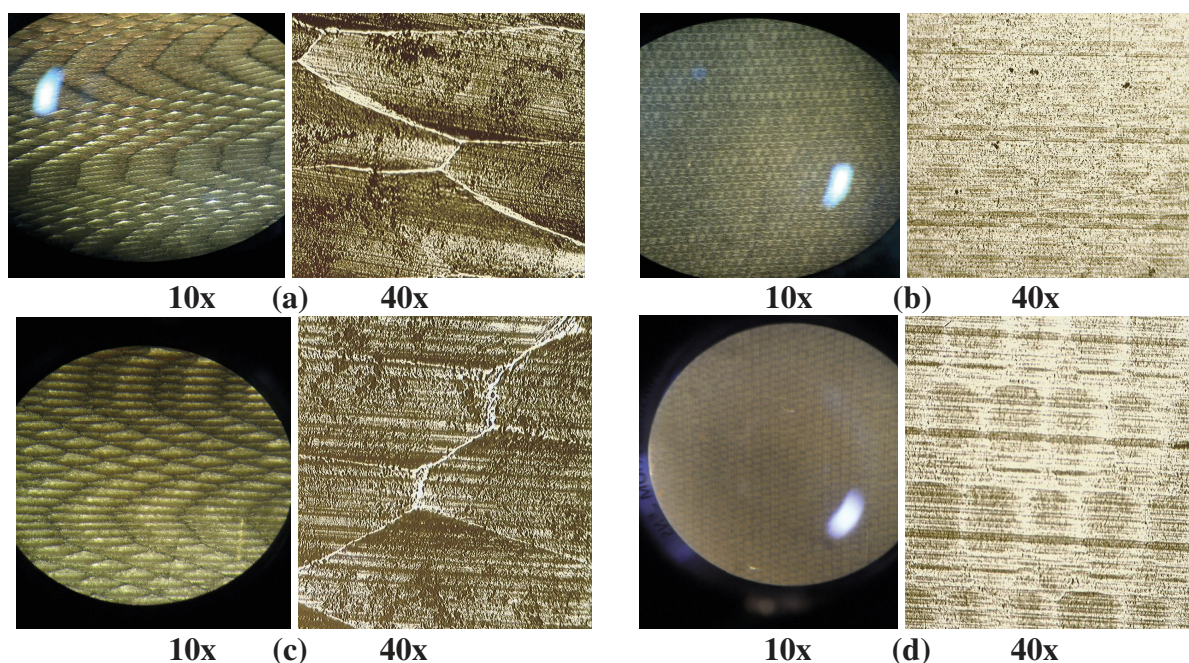
Estas duas condições ocorrem nos processos observados, tanto no sistema estático, em função dos mancais estarem dispostos aos pares, dificultando a restrição de movimentos com a devida eficiência dos vários dispositivos de fixação instalados ao redor da peça, e também no sistema dinâmico, considerando que a fresa precisa de um suporte longo para executar o corte em toda seção do mancal, e principalmente na operação de desbaste, o a_e programado para corte é na ordem de 5,0 a 7,5mm, causando deflexão no conjunto montado da fresa.

As marcas de *CHATTER* foram constatadas principalmente nas superfícies desbastadas. O fresamento periférico desenvolvido nos experimentos não atende à recomendação de um fresamento frontal, de que o diâmetro da fresa seja 20 a 50% maior que a largura da superfície usinada (a_e), com o objetivo de evitar vibrações e trepidações no fresamento. A fresa utilizada no processo de desbaste tem \emptyset de

50mm, $a_e=3,5\text{mm}$, e $a_p=7,5\text{mm}$, a fresa é maior em 85%, isto conseqüentemente faz com que as vibrações sejam agravadas devido essa condição de usinagem.

Na Figura 60, observam-se imagens das superfícies usinadas, realizadas nos CP (corpos de prova), por meio de microscópio ótico *METRIMPEX*, com aumento de 10x, e microscópio metalográfico *FORTEL* com sistema de aquisição de imagens *KONTROL* com aumento de 40x.

Figura 60: (a) Superfície do CP1 após desbaste 1 com inserto P30; (b) Superfície do CP2 após acabamento 1; (c) Superfície do CP3 após desbaste 2 com inserto P20; (d) Superfície do CP4 após acabamento 2.



Fonte: elaboração própria, (2015)

As imagens de microscopia ótica obtidas em ensaio realizado no laboratório de metalografia no CEFET-MG, possibilita uma análise complementar ao ensaio de rugosidade.

Na Figura 60(a), observa-se que a superfície usinada apresenta uma condição superficial favorável ao corte de acabamento, devido a disposição das lâminas no sentido longitudinal ao percurso a ser feito pela ferramenta de acabamento, gerando menos contato direto sobre a aresta de corte, favorecendo arrancamento de material com menor força de corte.

Na Figura 60(b), observa-se que a superfície usinada em acabamento após o corte de desbaste do 1º grupo de ferramentas, apresenta uma condição superficial com características próximas a homogeneidade da topografia, indicando além de rugosidade de baixa amplitude, poucas alterações perceptíveis na superfície com o aumento adotado para análise.

Na Figura 60(c), observa-se o resultado do 2º processo de desbaste, que caracteriza uma superfície menos favorável ao corte de acabamento, devido à disposição das lâminas no sentido transversal ao percurso a ser feito pela ferramenta de acabamento, gerando mais contato direto sobre a aresta de corte, dificultando o arrancamento de material, sendo necessária maior força de corte para a formação do cavaco, avariando tanto a ferramenta de desbaste, quanto à superfície usinada, que também apresenta um aspecto visual de encruamento mais acentuado em relação a superfície do 1º processo.

Na Figura 60(d) observa-se as marcas impressas na superfície de acabamento do 2º processo, caracterizam uma superfície que herdou resultado de severos esforços de arrancamento de material do processo anterior (desbaste 2), fato este que se comprova ao comparar as superfícies do desbaste 1 com o desbaste 2, começando a análise pelo 1º processo de desbaste.

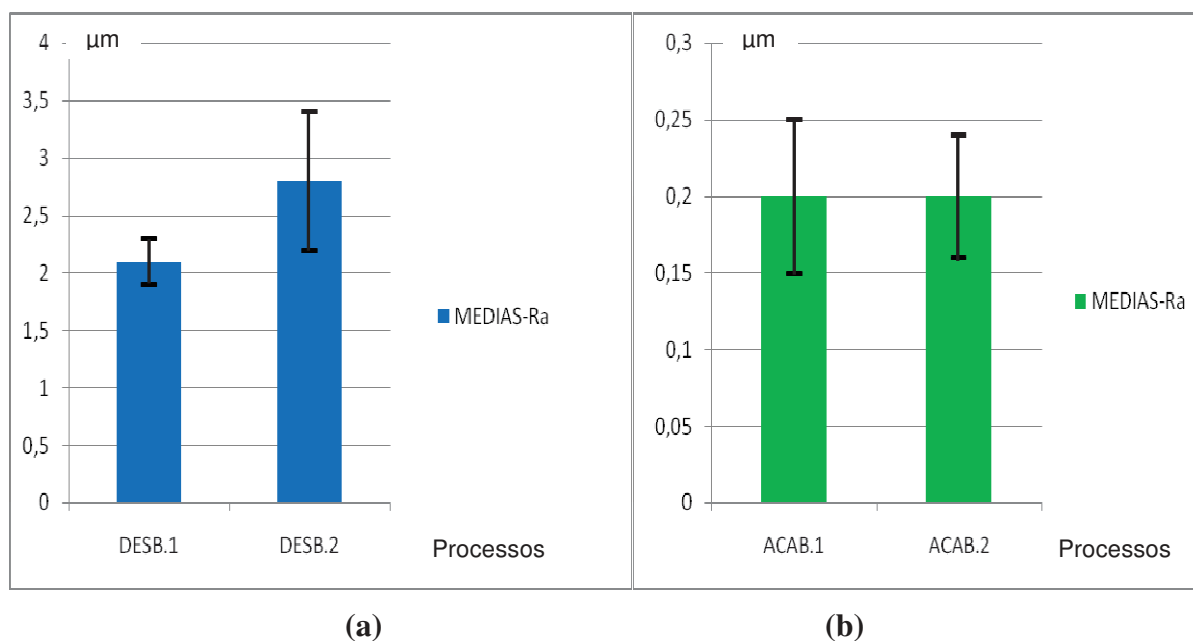
Acrescentando ainda o fato da rugosidade do 2º processo de desbaste ter desvio padrão maior em relação a variação da rugosidade medida do 1º processo de desbaste, que também somado a geometria da superfície usinada, contribui significativamente para o ataque mais agressivo as arestas de corte.

Antes do processo de acabamento ser executado são realizados dois passes de desbaste, portanto, a ferramenta de desbaste sofre as avarias iniciais a partir do 1º passe, em função das entradas da aresta de corte sobre a topografia irregular, resultante da finalização do revestimento do material, com soldagem MIG.

A partir do 2º passe de corte de desbaste, as avarias se agravam, em função das condições de marcas de *CHATTER* deixadas no 1º passe de desbaste realizado, conseqüentemente a aresta de corte do inserto utilizada no 2º processo de acabamento após a 2º passe da operação de desbaste, será mais solicitada e avariada em relação a aresta do inserto de acabamento do 1º processo, em função das mesmas condições de marcas de *CHATTER*, que continuarão existindo na superfície usinada pelo inserto classe ISO P20 do 2º grupo de ferramentas observado.

Na Figura 61, observa-se os gráficos das médias das medições de rugosidade com seus respectivos desvios-padrões.

Figura 61: (a) Médias das rugosidades e desvio padrão da superfície desbastada; (b) Médias das rugosidades e desvio padrão da superfície com acabamento concluído.



Fonte: elaboração própria, (2015)

Para a análise conjunta entre os processos de desbaste aplicados (desbaste 1 e desbaste 2), observa-se na Figura 61(a) que a rugosidade superficial do desb.2, possui desvio padrão maior, portanto maior variação da rugosidade medida em relação a rugosidade do desbaste 1. Na Figura 61(b), observa-se que as rugosidades superficiais dos processos de acabamento 1 e acabamento 2 são iguais, e mesmo analisando os desvios-padrões não são constatadas diferenças significativas entre os processos, portanto pode-se afirmar que os processos de desbaste não influenciaram significativamente as rugosidades superficiais dos processos de acabamento.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Para a 1ª e 2ª análise comparativa (entre desbastes e acabamentos), ocorreu a relação na progressão ascendente e cíclica de desgaste entre os processos.
- Para a 3ª análise comparativa (entre desbaste 1 e desbaste 2), constata-se no desbaste 1: insertos P30 com desgaste inicial maior e evolução deste desgaste com crescimento gradual até 294min; no desbaste 2: insertos P20 com desgaste inicial menor seguido de evolução com crescimento acentuado até 210min.
- Os processos de desbaste não influenciam a rugosidade dos processos de acabamento, porém a rugosidade do desbaste 2, que possui maior variação nas medidas coletadas, contribui para um maior desgaste de flanco dos insertos de acabamento do 2º grupo, consequência do aumento do ataque a aresta de corte, em maior número nas entradas e saídas das ferramentas de corte.
- Os insertos do 1º grupo apresentaram condições mais favoráveis na análise conjunta dos processos, caracterizando que a classe P30 para desbaste com $\alpha=5^\circ$, revestimento de TiAlN PVD, contribuiu para um desgaste de flanco menor das ferramentas de acabamento aplicadas, comparativamente ao desempenho dos insertos de desbaste do 2º grupo observado.
- Os mecanismos de desgaste e avarias para as insertos do 1º e 2º grupos foram: No desbaste 1 ocorreu adesão de Si e abrasão, posterior colapso por lascamentos e difusão na superfície de folga. No acabamento 1 ocorreu adesão de Si e início de abrasão com VB_{max} normal sem avarias. No desbaste 2 ocorreu adesão de Si e abrasão, posterior colapso iniciado por cratera na superfície de saída, propagando em lascamentos e trincas. No acabamento 2 ocorreu adesão de Si e abrasão mais acentuada em relação aos insertos do 1º grupo, com VB_{max} normal e microlascamentos na aresta de corte.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos possibilitam a sugestão de trabalhos futuros, que propõem a continuidade da análise conjunta entre desbaste e acabamento; as sugestões são:

- Análise do desgaste dos insertos com aplicação de uma classe acima da ISO P30, com o objetivo de avaliar os resultados obtidos com um jogo de ferramentas de maior tenacidade em relação aos dois grupos experimentais observados.
- Análise do desgaste dos insertos com aplicação de um jogo de ferramentas com geometria de corte com $\alpha=10^\circ$, que é um ângulo de folga intermediário entre $\alpha=5^\circ$ (do jogo de insertos do 1º grupo) e $\alpha=15^\circ$ (do jogo de insertos do 2º grupo), que provavelmente distribuirá melhor os módulos de forças atuantes nas superfícies de folga e de saída.
- Análise do desgaste dos insertos de desbaste com usinagem a seco. Esta proposta se fundamenta pelas próprias características das ferramentas de desbaste aplicadas, que são negativas (com $-\lambda$), e trabalham sob regime de altos avanços e profundidades de corte maiores, sem o fluído de corte espera-se formação do cavaco com deformação plástica mais favorável devido elevação da faixa de temperatura no mecanismo de formação do cavaco.
- Medições das tensões residuais induzidas no material usinado. Neste caso espera-se verificar condições e características do material com vistas à prevenção de falhas antes da aplicação da peça em serviço, também espera-se verificar e analisar possíveis correlações entre as tensões residuais no material usinado com os mecanismos de desgaste e as avarias das ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGOSTINHO, L. O. Rodrigues, S. C. A, Lirani, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Blucher, 1981.
2. ALBERT, M. **Workholding that holds off Chatter**. Modern Machine Shop, Cincinnati, USA, 2007.
3. ALMEIDA, C. M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 laminado a quente e temperado/revenido**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.
4. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. ASTM E-18, Book of Standards Volume: 03.01.
5. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb** .Hardness.ASTM E-140, Book of Standards Volume: 03.01.
6. CARDOSO, F.G.; ARAUJO, A.C. **Análise de forças no fresamento de roscas API**. Revista Máquinas e Metais, edição nº 582 de junho de 2014, São Paulo: Editora Aranda, p.18-31.
7. CALLISTER, W. D. Jr.. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Editora LTC, tradução da 5ª edição em língua inglesa, 2002. 817p.
8. CHADID, T.; MARROQUES, P. P.; RODRIGUES, J. G.; SILVA, S.C.. **A padronização aumenta a eficiência da capacidade produtiva**. São Paulo: Banas Excelência Metodologia, Editora Epse, Edição de FEV./MAR 2008. p.4-5.
9. CST-Arcelor-Brasil. **Metrologia Básica**. SENAI ES, 2006.
10. DINIZ, A. E; et al. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7 ed. São Paulo: Editora Coppini, 2010. 268p.
11. FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5 ed. São Paulo: Editora Blucher, 1977. 800p.
12. FERREIRA, M. **Avaliação de desgaste da ferramenta de metal duro revestida com nitreto de titânio no fresamento do aço ABNT 4140 a seco e com fluido sintético 8% em água**. Belo Horizonte: PUC, 92 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2011.

13. FISHER, U. & outros autores. **Manual de tecnologia metal mecânica**. São Paulo: Editora Blucher, tradução da 43ª edição alemã, 2008. 412 p.
14. INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement** (Corrigida e Reimpressa, 1995) ISO Technical Advisory Group on Metrology (ISO/TAG4/WG3).
15. INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION . ISO 3685 / 1993. **Tool life test with single point tuningg tolls**. 1993.
16. INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION . ISO 513 / 2004. **Classification And Application Of Hard Cutting Materials For Metal Removal With Defined Cutting Edges - Designation Of The Main Groups And Groups Of Application**. . 2004.
17. ISCAR Catalog. Millings tools. Metric Version Catalog, 2012.
18. LOPES, C.B. et al. **Fluidos de corte**. *Rev. Esp. Cient. Livre* (ISSN 2236-9538), Brasil, n. 12, p. 64-69, fev.-mar., 2013.
19. MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B.. **Teoria da usinagem dos materiais**. Revisão técnica: Rosalvo Tiago Rufino. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371 p.
20. NAVES, V.T.G.; SILVA, M.B. da; SILVA, F.J. da. **Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel**. *Journal of Materials Processing Technology, Wear* 302 , 1201-1208, 2013.
21. RIBEIRO NETO, G. H. et al. **Determinação da tensão residual média induzida pela operação de fresamento frontal**. 6º Congresso de Engenharia de Fabricação. Caxias do Sul, RS-Brasil, 2011.
22. PEREIRA, A.R. et al. **A cerâmica como ferramenta de corte**. *Rev. Esp. Cient. Livre* (ISSN 2236-9538), Brasil, n. 11, p. 81-85, dez.-jan., 2012/2013.
23. PEROTI, B.L. et al. **Caracterização de filmes finos de TiN depositados por magnetron sputtering reativo em um equipamento industrial**. XXII Encontro de Jovens Pesquisadores, UCS. Caxias do Sul, RS, 2014.
24. RAMOS, F.V. et al. **Ferramentas de corte: materiais de construção (base aço rápido e carbonetos)**. *Rev. Esp. Cient. Livre* (ISSN 2236-9538), Brasil, n. 10, p. 69-74, out.-nov., 2012.
25. RIBEIRO, D.R.K. et al. **Ferramentas de corte: avarias, desgastes e vida das ferramentas**. *Rev. Esp. Cient. Livre* (ISSN 2236-9538), Brasil, n. 13, p. 67-73, abr.-maio, 2013.

26. ROMI. **Linha ROMI D Características técnicas**. Industrias ROMI. Santa Bárbara D'oeste, SP-Brasil, 2011.
27. RUFINO, S.; NOGUEIRA, T.. **Circuito de experiências: tecnologias, metodologias e avanços na extensão universitária para o desenvolvimento social**. Ouro Preto: UFOP, 2013. Volume 02, 278 p.
28. SANDVIK. **Ferramentas de corte**. Catálogo Sweden: Sandvick Coromant., in Portuguese.2012.
29. SANDVIK Coromant. **Dicas de uso: aplicação, manutenção e manuseio das ferramentas**. SANDVIK do Brasil Industria e Comércio, São Paulo, 2014.32p.
30. SANTOS, R. G. dos. **Transformações de fases em materiais metálicos**. 1 ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2006. 432 p.
31. SANTOS, S. C.; SALES, W. F. Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais. 1 ed. São Paulo: Editora Artliber, 2007. 246p.
32. SHACKELFORD, J. F.. **Introdução a ciência dos materiais para engenheiros**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, tradução da 6ª edição em língua inglesa, 2008. 546 p.
33. Sistema Internacional de Unidades - **SI** –Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012.
34. SILVA, F. G. da et al. **Adequação do processo de soldagem MIG/MAG com adição de arame frio na qualidade do revestimento com aço inoxidável austenítico sobre um aço ao carbono comercial**. 21º POSMEC- Simpósio do Programa de Pós-Graduação. Universidade Federal de Uberlândia, MG-Brasil, 2011.
35. SILVA, S.C.; CANGUSSU, V. M.; ELER, M. L.; MOREIRA, D. P. **Teoria do corte**. Projeto de Extensão do IFMG Campus Governador Valadares, 2012.
36. SILVA, S.C. **ISO 26000: Responsabilidade social em ênfase**. Revista Vértice, CREA-MG, edição 11, p.14 e 15, Belo Horizonte, MG, 2012.
37. SOUSA, L. F. de. **Desenvolvimento de ferramenta cerâmica de alumina-ítria para aplicação em ferro fundido nodular**. Volta Redonda: UniFOA, 110 p. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade da Fundação Oswaldo Aranha, 2013.
38. Standard Test Methods for Rocwell Hardness of Metallic Materials. **ASTM E-18**, Book of Standards Volume: 03.01.
39. TRENT, E.M., WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**, 4rd Edition, Butteworths-Heinemann Ltda. 2000.

40. VADHER, R.. **Alguns conceitos de fresagem.** <<http://rishivadher.blogspot.com.br/2013/11/alguns-conceitos-de-fresagem-parte1>> acesso em junho de 2015.
41. VENTURA, C. E. H.. **Estudo dos esforços de corte no processo HSM aplicado à abertura de cavidades** . Campinas, SP: Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2010.
42. VIM - **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**- INMETRO- 2012.
43. XAVIER, F. A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN.** Dissertação mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

ANEXOS

ANEXO A - Projeto do CP (corpo de prova).

ANEXO B- Geometria de corte do inserto de desbaste 1.

ANEXO C - Geometria do corte do inserto de desbaste 2.

ANEXO D - Geometria do corte do inserto de acabamento.

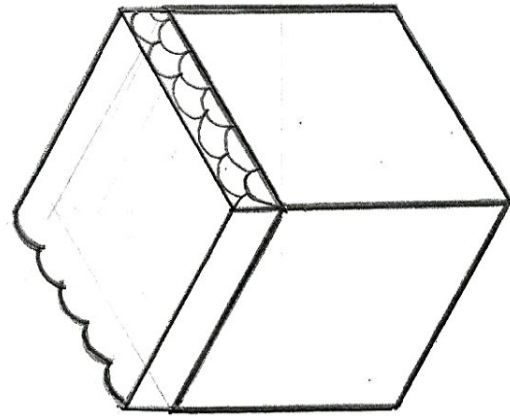
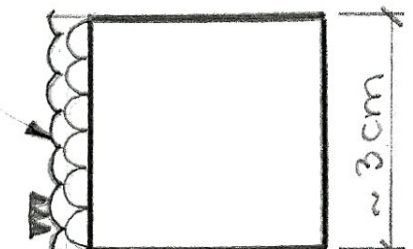
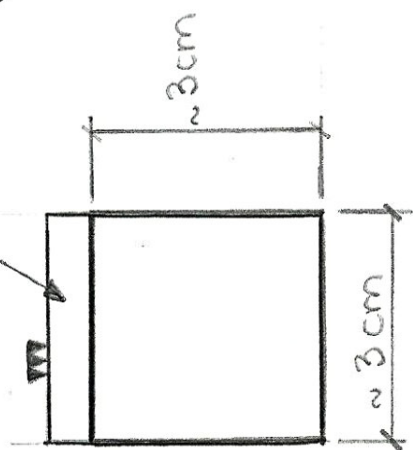
ANEXO E - Planilha de dados do desbaste 1 e acabamento.

ANEXO F - Planilha de dados do desbaste 2.

ANEXO G - Conjunto de lixas de preparação do CP.

REVESTIMENTO ARAME-MIG

30mm
0°
• ARAME MAGICO
• LIGA MINSI



ESCALA 1:1

TÍTULO: CORPO DE PROVA

NOME: AÇO 1020 + REV. MIG (MnSi)

PROF. SANDRO COSTA 1º DIEDRO

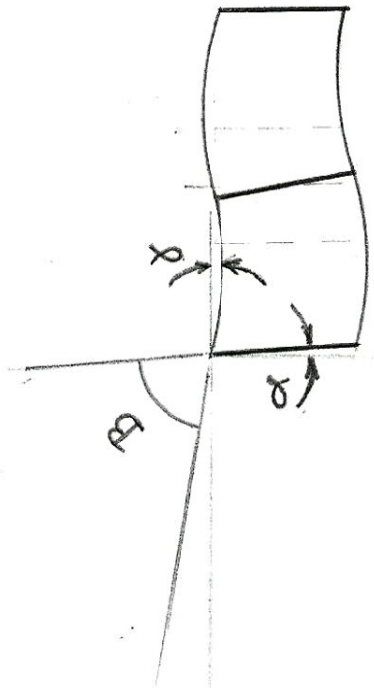
DATA: 23/10/14

TURMA:

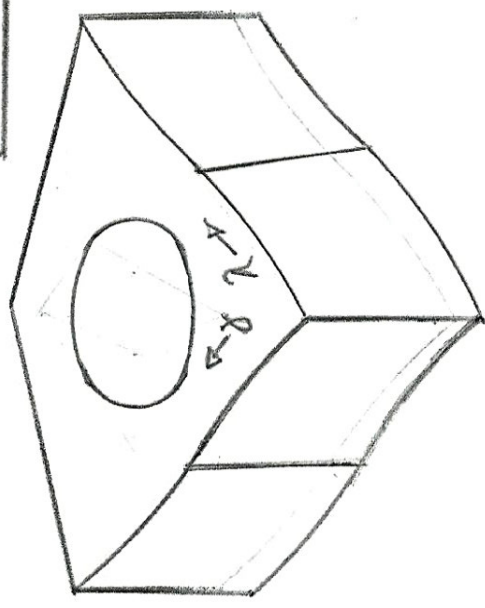
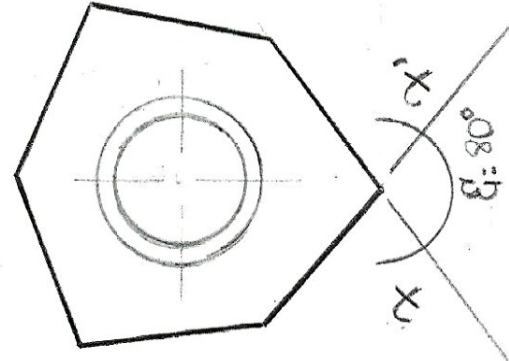
POSMAT

Sandro Costa Silva

ÂNGULO	MEDIDA
α	5°
β	80°
γ	5°
$\delta = \alpha + \beta$	85°
λ	-5°
μ	80°
ν	30°
α'	70°



ESC. A=3:1



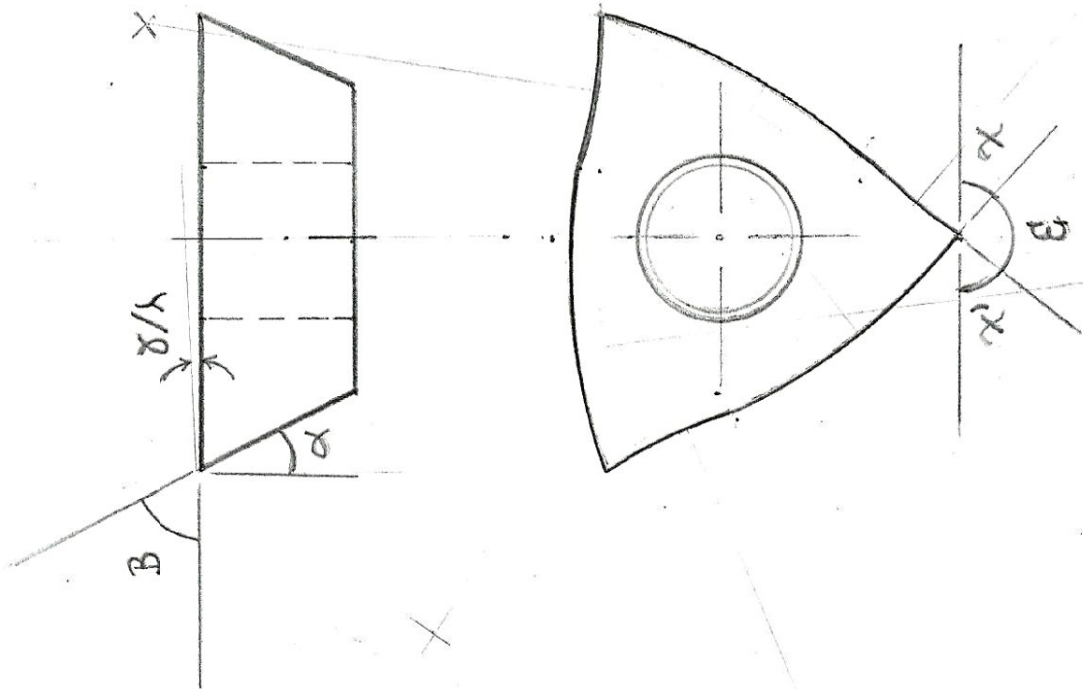
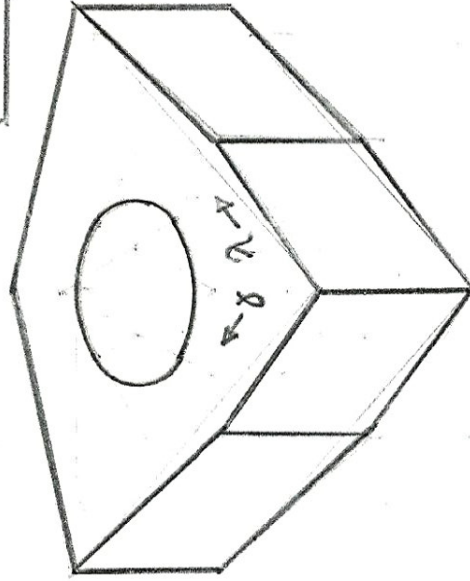
ESC. $\beta = 4:1$



TÍTULO: INSERTO DESBASTE 1		DATA: 5/2015
NOME: _____		TURMA: _____
ESCALA A-B	PROF. SANDRO COSTA	1º DIE DRO POSMAT

Sandro Costa Silva

ANGULO	MEDIDA
α	15°
β	75°
γ	0°
$\delta = \alpha + \beta$	90°
λ	-5°
ϵ	80°
χ	30°
χ'	70°



ESCALA 4:1

TÍTULO: INSERTO DESBASTIE 2

DATA: 5/2015

NOME:

TURMA:

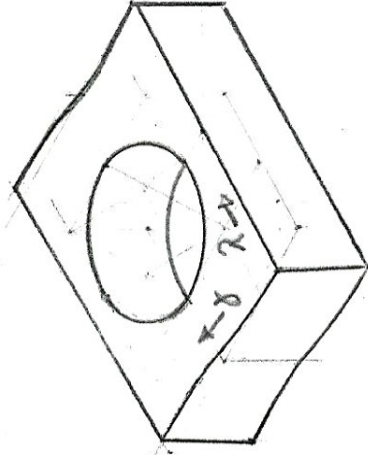
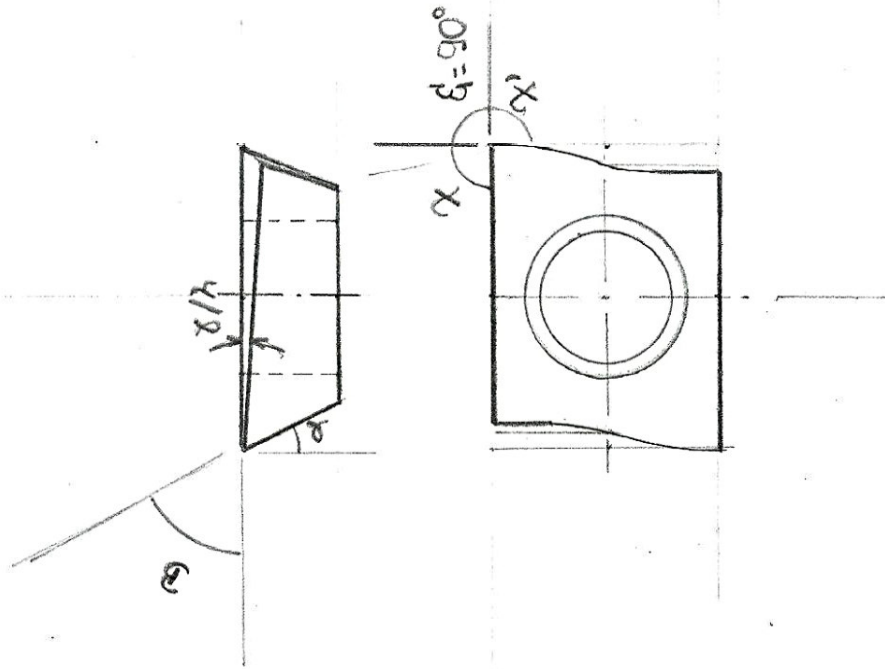
PROF. SANDRO COSTA

1º DIEDRO

POSMAT

Sandro Costa Silva

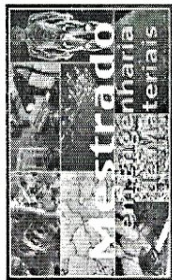
ÂNGULO	MEDIDA
α	5°
B	68°
δ	17°
λ	4°
$\delta = \alpha + B$	73°
ϵ	90°
γ	90°
γ'	0°



	TÍTULO: INSERTO ACABAMENTO	DATA: 5/2015
	NOME: SANDRO COSTA	TURMA:
	PROF. SANDRO COSTA	1º DIEDRO

ESCALA 4:1

Sandro da Costa Silva



PLANILHA DE COLETA DE DADOS- POSMAT-USINAGEM DE METAIS
PROJETO DE MESTRADO-PROCESSO FRESAMENTO
PROF. ORIENTADOR-SANDRO CARDOSO SANTOS
MESTRANDO-SANDRO DA COSTA SILVA



INSTITUTO FEDERAL
 DE MINAS GERAIS

PROJETO "USINAGEM DE METAIS" - COLETA DE DADOS PARA TRATAMENTO E ANÁLISE

PROCESSO - FACES

1. INJERTO DE BASE P30 - 2 = INSERTO ACABAMENTO P30

FERRAMENTA	MATERIAL PEÇA	MÁO.	Ø	COMP. PEÇA	Y6	V _f	V _c	RPM	VC	TC	FC	PC	DATA
<i>TESTE</i> ①	METAL DURO REVESTIDA TINAINAD	BM101500	E=120 i=55	120 (1FACE) 14FACES	OP	<i>fz</i> 14mm	219,8	1400	219,8	<i>3mm</i> (1PASS) 4FACES			12/09/14
<i>REPE</i> ②	METAL DURO REVESTIDA TIN PAID	BM101500			0,15	<i>fz</i> 1,80	279,9	3900	279,9	<i>5mm</i> (1PASS) 14FACES			12/09/14
										<i>14FACES</i>			
										<i>14FACES</i>			
										<i>* 14FACES = 1 PEÇA</i>			

*SANDRO
15/09/14*

Sandro da Costa Silva



PLANILHA DE COLETA DE DADOS- POSMAT-USINAGEM DE METAIS
PROJETO DE MESTRADO-PROCESSO FRESAMENTO
PROF. ORIENTADOR-SANDRO CARDOSO SANTOS
MESTRANDO- SANDRO DA COSTA SILVA



CEFET-MG

INSTITUTO FEDERAL
 DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
 DE MINAS GERAIS

PROJETO "USINAGEM DE METAIS" - COLETA DE DADOS PARA TRATAMENTO E ANÁLISE

INTERIO DESBASTE P20 → **DESO.2**

MITUBISHI

FERRAMENTA	MATERIAL PEÇA	MÁQ.	COMP. PEÇA	Vé op	PZ (mm/rev)	Vf (mm/min)	RPM	VC m/min	TC min	FC N	PC N/mm²	DATA
METAL DURO DESBASTE P15-P20	Aço 1020	60M 60M 60M D100	300 C/FACE 14 FACES	25mm op	10F	6000	1400	220	30min 1 FACE			
*TIALN PVD.												

14 FACES = 1 PEÇA

Sandro da Costa Silva



PLANILHA DE SEQUÊNCIA DE LIXAS UTILIZADAS PARA CORPO DE PROVA- POSMAT-USINAGEM DE METAIS
PROJETO DE MESTRADO-PROCESSO FRESAMENTO
PROF. ORIENTADOR-SANDRO CARDOSO SANTOS



CEFET-MG



INSTITUTO FEDERAL
DE MINAS GERAIS

PROJETO "USINAGEM DE METAIS" - JOGO DE LIXAS UTILIZADAS NO CORPO DE PROVA

1ª		2ª		3ª		4ª		5ª		6ª	
----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--

Sandro da Costa Silva