

FABIO DE FREITAS LIMA

**ESTUDO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE METAL DURO E
CERÂMICAS NO TORNEAMENTO DO INCONEL[®] 751 E INCONEL[®] 718**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2012

FABIO DE FREITAS LIMA

**ESTUDO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE METAL DURO E
CERÂMICAS NO TORNEAMENTO DO INCONEL[®] 751 E INCONEL[®] 718**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA EM MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Tit. Álisson Rocha Machado, PhD



UBERLÂNDIA MG

2012

FABIO DE FREITAS LIMA

**ESTUDO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE METAL DURO E
CERÂMICAS NO TORNEAMENTO DO INCONEL[®] 751 E INCONEL[®] 718**

Tese **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Materiais e
Processos de Fabricação

Banca Examinadora

Prof. Álisson Rocha Machado, PhD – FEMEC/UFU

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva – FEMEC/UFU

Prof. Dr. Whashington Martins da Silva Junior – FEMEC/UFU

Prof. Dr. Anderson Clayton Alves de Melo – DEM/UFRN

Prof. Dr. Adilson José de Oliveira – DEM/UFRN

Uberlândia, 26 de novembro de 2012

O Senhor é meu pastor

Salmo de Davi

23 O senhor é o meu pastor;

nada me faltará.

² Ele me faz repousar

em pastos verdejantes.

Leva-me para junto das águas

de descanso;

³ refrigera-me a alma.

Guia-me pelas veredas da justiça

por amor do seu nome.

⁴ Ainda que eu ande

pelo vale da sombra da morte,

não temerei mal nenhum,

porque tu estás comigo;

o teu bordão e o teu cajado

me consolam.

⁵ Preparas-me uma mesa

na presença dos meus adversários,

unges-me a cabeça com óleo;

o meu cálice transborda.

⁶ Bondade e misericórdia

certamente me seguirão

todos os dias da minha vida;

e habitarei na Casa do Senhor

para todo o sempre.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e oportunidade de me educar.

À minha esposa, Ana Cristina e meus filhos – Virgílio e Murilo - pela compreensão e carinho que possibilitaram a realização deste trabalho. À vovó Celeste que tanto ajudou a todos nós.

Aos meus pais – Antônio e Santa Eoniz (in Memoriam) - pelo empenho, auxílio e apoio durante a jornada de minha existência.

Ao professor e amigo Álisson Rocha Machado, sem a ajuda do qual não seria possível hoje a escrita desta e que acreditando nas pessoas aceitou o desafio da orientação, mostrando a grandeza de sua alma.

Aos professores e amigos que durante os trabalhos, pude compartilhar minhas experiências, em especial aos professores Márcio Bacci da Silva, Rosemar Batista da Silva, Éder Silva Costa, Marcos Antônio de Souza Barrozo, Rosenda Arencibia, Américo Scotti, Valtair Ferraresi, Louriel Vilarinho e Alberto Raslan.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, com os quais tive o privilégio de conviver na Universidade Federal de Uberlândia.

Aos colegas e amigos com os quais sempre pude contar Almir Kazuo, Deborah Oliveira, Flávia Silva, Frederico Aguiar, Igor Pereira, Ildeu Siqueira, Jalon Vieira, Janaína Pereira, Marcelo Bertolete, Mauro Medeiros, Mauro Paipa, Patrícia Barbosa, Rodrigo da Silva, Sebastião Lima e Vitor Guimarães.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Mecânica Ângela Andrade, Carlão, Lazinho, Passarinho e Reginaldo. Em especial às secretárias do Programa de Pós-graduação Srtas. Kelly Costa e Lucimara de Oliveira.

À Sra. Francis Ribeiro da Silva do Instituto Fábrica do Milênio – IFM.

Ao colega Anderson Melo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN segue sinceros agradecimentos.

À Universidade Federal de Uberlândia, por oportunizar meu crescimento humano.

Às Empresas parceiras na pesquisa Villares Metals, nas pessoas dos Srs. Celso Barbosa e Alexandre Sokolowski; Kennametal, nas pessoas dos Srs. João Carosella e Marcos Caldeira.

Ao amigo Tiago Almeida pela assistência na fase de usinagem.

As senhoras Teresa Maciel e Fátima, sem esquecer também Márcio Maciel, pelo apoio na cidade de Uberlândia MG.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM / UFU e Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem – LAPROSOLDA / UFU, sem o apoio dos quais não teria sido possível a execução deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco por ter concedido o meu afastamento para o doutoramento na Universidade Federal de Uberlândia.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Tipos de Desgaste em Ferramentas de Corte	4
2.1.1 Desgaste de Flanco	6
2.1.2 Desgaste de Cratera	7
2.1.3 Desgaste de Entalhe	7
2.2 Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Corte	9
2.2.1 Aderência e Arrastamento	10
2.2.2 Abrasão	10
2.2.3 Difusão	11
2.2.4 Cisalhamento a Altas Temperaturas	11
2.2.5 Deformação Plástica causada pela Carga Compressiva	14
2.2.6 Entalhe	15
2.3 Outros Comentários sobre Desgaste de Entalhe	17
2.3.1 Materiais que tendem a Desenvolver Desgaste de Entalhe	21
2.3.1.1 Superligas	21
2.3.1.2 Superligas de Níquel	22
2.4 Fatores que afetam o Desenvolvimento do Desgaste em Ferramentas de Corte	26
2.5 Ferramentas de Corte	29
2.5.1 Ferramentas para Usinagem de Superligas	31
2.5.1.1 Metal Duro	32
2.5.1.2 Cerâmicas	34
2.5.1.3 Ultraduras	35
2.5.2 Revestimentos em Ferramentas para Usinagem de Superligas	37
2.6 Planejamento de Experimentos	38
2.6.1 Introdução ao Planejamento de Experimentos	38
2.6.2 Planejamento Fatorial Completo	38
2.6.3 Planejamento Fatorial 2^k	39
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	40
3.1 Materiais	40

3.1.1 Equipamentos Utilizados	40
3.1.2 Insertos	46
3.1.3 Suportes	48
3.1.4 Informações de Corte Complementares	50
3.1.5 Atmosferas Envolventes	50
3.1.6 Caracterização dos Materiais Ensaados	53
3.2 Métodos	56
3.2.1 Critérios de Fim de Vida	57
3.2.2 Esquemas dos Ensaos	58
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 Análise das Ligas Inconel [®] 751 e Inconel [®] 718	61
4.2 Evolução dos Desgastes em Insertos de Cerâmica	71
4.2.1 Evolução do Desgaste de Entalhe em Insertos de Cerâmica	83
4.2.2 Evolução do Desgaste de Flanco Médio em Insertos de Cerâmica	85
4.2.3 Evolução do Desgaste de Ponta em Insertos de Cerâmica	86
4.2.4 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$)	87
4.2.5 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Cerâmica Preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)	91
4.2.6 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$)	96
4.2.7 Influência das Variáveis de Entrada sobre os Tempos de Vida em Insertos de Cerâmica	100
4.2.8 Rugosidade Superficial na Usinagem com Insertos de Cerâmica	113
4.2.9 Forças de Corte na Usinagem com Insertos de Cerâmica	119
4.3 Evolução dos Desgastes em Insertos de Metal Duro	123
4.3.1 Evolução do Desgaste de Flanco Médio em Insertos de Metal Duro	139
4.3.2 Evolução do Desgaste de Ponta em Insertos de Metal Duro	142
4.3.3 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Metal Duro (WC/Co) sem Revestimento	143

4.3.4 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Metal Duro (WC/Co 6%) com Revestimento (PVD TiAlN)	147
4.3.5 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Metal Duro (WC/Co 10%) com Revestimento (PVD TiAlN)	150
4.3.6 Influência das Variáveis de Entrada sobre os Tempos de Vida em Insertos de Metal Duro	153
4.3.7 Rugosidade Superficial na Usinagem com Insertos de Metal Duro.....	167
4.3.8 Forças de Corte na Usinagem com Insertos de Metal Duro	174
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	181
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	183
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	184
ANEXO I	198
ANEXO II	207

LIMA, F. F. **Estudo do Desgaste de Ferramentas de Metal Duro e Cerâmicas no Torneamento do Inconel® 751 e Inconel® 718**. 2012. 229 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Ligas de níquel apresentam elevada resistência mecânica a elevadas temperaturas, alta resistência à fluência e à fadiga, além de ótima resistência à oxidação, sendo por isso utilizadas na fabricação de componentes mecânicos para a indústria aeroespacial. Este trabalho consistiu na investigação dos tipos de desgastes e suas evoluções nas ferramentas de corte durante a usinagem das superligas à base de níquel: Inconel® 751 e Inconel® 718. Também foram objeto de estudo os mecanismos de desgaste das ferramentas associados, assim como as avarias nestas decorrentes do processo de corte. Utilizando-se a metodologia de planejamento de experimentos foram construídas matrizes para os testes com três tipos de ferramentas cerâmicas: SiAlON, Preta, Whisker e três tipos ou classes de metais duros: WC/Co, WC/Co 6% com revestimento TiAlN e WC/Co 10% com revestimento TiAlN para os insertos, tendo sido variadas a velocidade de corte, geometria da ferramenta de corte e atmosfera envolvente. Durante estes testes, medidas de rugosidade da peça e das componentes da força de usinagem foram realizadas. A análise dos resultados mostrou que todas as variáveis estudadas apresentaram influência sobre os tipos de desgaste. O desgaste de entalhe foi observado, principalmente a baixa velocidade de corte no material Inconel® 751, seguido pelo desgaste de flanco médio e pelo desgaste de ponta, não tendo sido influenciados pelas atmosferas, assim como os tempos de vida também não foram afetados pela variação das atmosferas envolventes. Os mecanismos predominantes foram attrition (aderência e arrastamento), abrasão e difusão. Observou-se uma relação direta entre a rugosidade da superfície da peça e das componentes da força de usinagem com a evolução do desgaste.

Palavras-chave: Ferramentas cerâmicas, ferramentas de metal duro, Inconel® 751, Inconel® 718, desgaste de ferramentas de corte, torneamento.

LIMA, F. F. **Study of the Wear of Cemented Carbide and Ceramic Tools in Turning of Inconel® 751 and Inconel® 718**. 2012. 229 p. Doctoral Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Nickel alloys present high mechanical resistance at elevated temperatures, high creep and fatigue resistances besides of excellent corrosion resistance that makes them interesting for applications in the aerospace industry. The present work investigates the wear types and their evolution during machining of Inconel® 751 and Inconel® 718 alloys. The related wear mechanisms were also studied, as well as the tool damages generated during the cutting process. Matrixes were built with three types of ceramic tools: SiAlON, Mixed and Whisker and three types of cemented carbide tools: WC/Co, WC/Co 6% coated with TiAlN and WC/Co 10% coated with TiAlN using Design of Experiments Techniques – DOE considering the following input variables: cutting speed, tool geometry and the lubri-cooling atmosphere. During these tests the workpiece surface roughness and the cutting force components were measured. The analysis of the results showed that all the studied variables have influenced the wear types. Notch wear was observed mainly at low cutting speeds for the Inconel® 751, followed by the average flank wear and nose wear which were not influenced by the lubri-cooling atmosphere as weren't the tool lives. The wear mechanisms involved were attrition (adhesion), abrasion and diffusion. The surface roughness and the cutting force components showed direct relationship with the tool wear.

Keywords: *Ceramic tools, cemented carbides tools, Inconel® 751, Inconel® 718, cutting tool wear, turning.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema tribológico envolvido no processo de usinagem (WEINERT & MEISTER, 1998)	4
Figura 2.2 – Áreas de desgaste em ferramentas de corte (adaptado de DEARNLEY & TRENT, 1982 & EZUGWU, 2005)	5
Figura 2.3 – Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte (adaptado de ISO 3685, 1977 e CHILDS et al., 2001)	6
Figura 2.4 – Avarias e desgastes em diversos tipos de ferramentas de corte (adaptado de ASM METALS HANDBOOK V.16, 2004)	8
Figura 2.5 – Distribuição dos mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, em função da temperatura (VIEREGGE, 1970, citado por KÖNIG & KLOCKE, 1997)	10
Figura 2.6 – Perfil da superfície de saída de uma ferramenta de metal duro sem revestimento, após torneamento de aço ABNT 4340 (ÁVILA, 2003)	12
Figura 2.7 – Perfil da superfície de saída de uma ferramenta de metal duro revestida com TiAlN, após torneamento de aço ABNT 4340 (ÁVILA, 2003)	13
Figura 2.8 – Resistência à compressão em função da temperatura, para uma ferramenta de metal duro composta por 19% TiC–16% TaC–5,5% WC e 9,5% Co (TRENT, 1991)	15
Figura 2.9 – Desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte em uma ferramenta cerâmica ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$) após operação de torneamento da liga Inconel® 718 (CHILDS et al., 2001)	17
Figura 2.10 – Desgaste de entalhe observado em uma ferramenta de metal duro K20 após usinagem de Inconel® 901 (MACHADO, 1990)	18
Figura 2.11 – Desgaste de entalhe em ferramenta de metal duro após usinagem de superliga à base de níquel (ASM METALS HANDBOOK V.5, 2004)	19
Figura 2.12 – Corte transversal no centro do entalhe de uma ferramenta após torneamento de Inconel® 901 (MACHADO, 1990)	19

Figura 2.13 – Borda da superfície de folga de uma ferramenta após torneamento de Inconel [®] 901 (MACHADO, 1990)	20
Figura 2.14 – Classificação das superligas (adaptado de CHOUDHURY & EL-BARADIE, 1998)	21
Figura 2.15 – Cavitação (a) e ruptura intergranular (b), nos contornos de grão (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)	24
Figura 2.16 – Fratura intergranular por fluência numa liga Inconel [®] 625 (a) e Incoloy 800 (b) (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)	24
Figura 2.17 – Distribuição de carbonetos $M_{23}C_6$ e MC na matriz da superliga Waspaloy (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)	25
Figura 2.18 – Variação do desgaste de entalhe em função do aumento da temperatura, para torneamento da liga Inconel [®] 718 com ferramenta Al_2O_3/TiC (CHILDS et al., 2001)	27
Figura 2.19 – Indicações para aplicação de materiais em ferramentas de corte (adaptado de ASM METALS HANDBOOK V.5, 2004) .	29
Figura 2.20 – Estimativa global de uso de materiais em ferramentas de corte no ano de 2005 (GRZESIK, 2008)	33
Figura 2.21 – Fases presentes em carbonetos sinterizados (GRZESIK, 2008)	33
Figura 2.22 – Influência dos teores de WC e Co sobre as propriedades dos carbonetos sinterizados (GRZESIK, 2008)	33
Figura 2.23 – Comparação entre as propriedades de materiais cerâmicos utilizados em ferramentas de corte (GRZESIK, 2008)	35
Figura 2.24 – Formatos de insertos ultraduros em PCD (GRZESIK, 2008)	36
Figura 2.25 – Comparação entre as durezas de revestimentos utilizados em ferramentas de corte (GRZESIK, 2008)	37
Figura 3.1 – Fluxograma dos testes experimentais de vida e análise de desgaste	41
Figura 3.2 – Torno CNC utilizado nos experimentos	42
Figura 3.3 – Estereomicroscópio utilizado para medição dos desgastes das ferramentas	42
Figura 3.4 – Medição da rugosidade superficial na peça montada	43

Figura 3.5 – Esquema simplificado do esquema de aquisição de forças com dinamômetro (adaptado de KISTLER, 1991)	44
Figura 3.6 – Insertos utilizados: (a) Cerâmica SiAlON, (b) cerâmica preta, (c) cerâmica whisker, (d) metal duro sem revestimento, (e) metal duro com 6% Co com revestimento PVD TiAlN e (f) metal duro com 10% Co com revestimento PVD TiAlN	47
Figura 3.7 – Suporte para a primeira geometria de corte (GC1)	48
Figura 3.8 – Suporte para a segunda geometria de corte (GC2)	49
Figura 3.9 – O ₂ para criação de atmosfera oxidante	50
Figura 3.10 – Argônio utilizado para criação de atmosfera inerte	51
Figura 3.11 – Montagem do sistema de injeção dos gases durante os experimentos	52
Figura 3.12 – Montagem do bico injetor dos gases na aresta de corte principal dos insertos	52
Figura 3.13 – Fixação das barras entre placa e ponta para os ensaios de torneamento longitudinal	53
Figura 3.14 – Seção transversal para retirada dos corpos de prova nas análises de dureza, microdureza e análise microestrutural das ligas	56
Figura 3.15 – Esquema dos ensaios para insertos cerâmicos e a liga Inconel [®] 751	58
Figura 3.16 – Esquema dos ensaios para insertos de metal duro e a liga Inconel [®] 751	59
Figura 3.17 – Esquema dos ensaios para insertos de metal duro e a liga Inconel [®] 718	59
Figura 4.1 – Micrografia ótica da seção longitudinal do Inconel [®] 751 - reagente Gliceregya	64
Figura 4.2 – Micrografia ótica da seção transversal do Inconel [®] 751 - reagente Gliceregya	64
Figura 4.3 – Micrografia ótica da seção longitudinal do Inconel [®] 751- reagente Kroll	65
Figura 4.4 – Micrografia ótica da seção transversal do Inconel [®] 751 - reagente Kroll	65

Figura 4.5 – Superfície da amostra transversal da superliga Inconel® 751	66
Figura 4.6 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 751 no ponto 1	66
Figura 4.7 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 751 no ponto 2	67
Figura 4.8 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 751 no ponto 3	67
Figura 4.9 – Micrografia óptica da seção longitudinal do Inconel® 718 – reagente Gliceregya	68
Figura 4.10 – Micrografia óptica da seção transversal do Inconel® 718 – reagente Gliceregya	68
Figura 4.11 – Superfície da amostra transversal da superliga Inconel® 718	69
Figura 4.12 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 718 no ponto 1	69
Figura 4.13 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 718 no ponto 2	70
Figura 4.14 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 718 no ponto 3	70
Figura 4.15 – Desgaste de flanco médio (VB_B) no inserto de cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) e microlascamentos, após 60s (N6) .	73
Figura 4.16 – Desgaste de entalhe (VB_N) no inserto de cerâmica Mista ($Al_2O_3 + TiC$), após 60s (N13)	74
Figura 4.17 – Desgaste de entalhe (VB_N) no inserto de cerâmica Whisker ($Al_2O_3 + SiC$), após 14s (N27)	74
Figura 4.18 – Superfície de saída de um inserto de cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) com microlascamentos, após 390s na usinagem da liga Inconel® 751	75
Figura 4.19 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 1 da Figura 4.18	76

Figura 4.20 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 2 da Figura 4.18	76
Figura 4.21 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3 da Figura 4.18	77
Figura 4.22 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 4 da Figura 4.18	77
Figura 4.23 – Superfície de saída de um inserto de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), após 247s na usinagem da liga Inconel® 751	78
Figura 4.24 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 1 da Figura 4.23	78
Figura 4.25 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 2 da Figura 4.23	79
Figura 4.26 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3 da Figura 4.23	79
Figura 4.27 – Superfície de saída de um inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), após 131s na usinagem da liga Inconel® 751	80
Figura 4.28 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 1 da Figura 4.27	80
Figura 4.29 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 2 da Figura 4.27	81
Figura 4.30 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3 da Figura 4.27	81

Figura 4.31 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 4 da Figura 4.27	82
Figura 4.32 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 5 da Figura 4.27	82
Figura 4.33 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto cerâmico SiALON	88
Figura 4.34 – Desgaste de ponta (VB_C), em inserto cerâmico SiALON	89
Figura 4.35 – Desgaste de entalhe (VB_N), em inserto cerâmico SiALON ...	90
Figura 4.36 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de entalhe (VB_N) em inserto de cerâmica preta	92
Figura 4.37 – Desgaste de entalhe (VB_N), desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de cerâmica preta	93
Figura 4.38 – Desgaste de ponta (VB_C) em inserto de cerâmica preta	94
Figura 4.39 – Desgaste de entalhe (VB_N) e desgaste de flanco médio (VB_B) em inserto de cerâmica whisker	96
Figura 4.40 – Desgaste de ponta (VB_C) em inserto de cerâmica whisker ..	98
Figura 4.41 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de entalhe (VB_N) em inserto de cerâmica whisker	101
Figura 4.42 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com ferramentas de cerâmica SiALON	115
Figura 4.43 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com ferramentas de cerâmica preta	116
Figura 4.44 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com ferramentas de cerâmica whisker	116
Figura 4.45 – Gráfico das forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica SiALON	121

Figura 4.46 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica Mista	121
Figura 4.47 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica Whisker	122
Figura 4.48 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB _B) e de ponta (VB _C) no inserto de metal duro WC/Co sem revestimento, após 750s (N37)	125
Figura 4.49 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB _B) e de ponta (VB _C) no inserto de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN, após 780s (N55)	125
Figura 4.50 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB _B) e de ponta (VB _C) no inserto de metal duro WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN, após 365s (N67)	126
Figura 4.51 – Superfície de folga principal de um inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, após 750s na usinagem da liga Inconel® 751	126
Figura 4.52 – Análise química da superfície de folga principal do inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 1	127
Figura 4.53 – Análise química da superfície de folga principal do inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 2	127
Figura 4.54 – Análise química da superfície de folga principal do inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3	128
Figura 4.55 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, após 780s na usinagem da liga Inconel® 751	128
Figura 4.56 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 1	129

Figura 4.57 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 2	129
Figura 4.58 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3	130
Figura 4.59 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, após 365s na usinagem da liga Inconel® 751	130
Figura 4.60 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 1	131
Figura 4.61 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 2	131
Figura 4.62 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3	132
Figura 4.63 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB_B) e de entalhe (VB_N) no inserto de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN, após 645s na usinagem do Inconel® 718	133
Figura 4.64 – Desgastes de cratera, de ponta (VB_C) e de flanco médio (VB_B) no inserto de metal duro WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN, após 214s na usinagem do Inconel® 718	134
Figura 4.65 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, após 645s na usinagem da liga Inconel® 718	135
Figura 4.66 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 718 no ponto 2	135

Figura 4.67 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 718 no ponto 3	136
Figura 4.68 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, após 214s na usinagem da liga Inconel® 718	136
Figura 4.69 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 718 no ponto 1	137
Figura 4.70 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 718 no ponto 2	137
Figura 4.71 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 718 no ponto 3	138
Figura 4.72 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 718 no ponto 4	138
Figura 4.73 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro sem revestimento	144
Figura 4.74 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro sem revestimento	145
Figura 4.75 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) com revestimento TiAlN	147
Figura 4.76 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) com revestimento TiAlN	148
Figura 4.77 – Desgaste de ponta (VB_C) e desgaste de flanco médio (VB_B) em inserto de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) com revestimento TiAlN	150

Figura 4.78 – Desgaste de ponta (VB_C) e desgaste de flanco médio (VB_B) em inserto de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) com revestimento TiAlN	151
Figura 4.79 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento	170
Figura 4.80 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	170
Figura 4.81 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN ...	171
Figura 4.82 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	172
Figura 4.83 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 718 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN ...	172
Figura 4.84 – Gráfico das forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento	177
Figura 4.85 – Gráfico das forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	177
Figura 4.86 – Gráfico das forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN	178
Figura 4.87 – Gráfico das forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	179
Figura 4.88 – Gráfico das forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 718 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química da liga Inconel [®] 751, % em peso (SPECIAL METALS, 2004; BRANDES & BROOK, 1992)	22
Tabela 2.2 – Composição química da liga Inconel [®] 718, % em peso (VILLARES METALS, 2008; BRANDES & BROOK, 1992) ...	23
Tabela 2.3 – Influência dos elementos químicos nas propriedades das superligas (adaptado de ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)	25
Tabela 2.4 – Interação química e adesiva entre sistemas ferramenta- peça (CHILDS et al., 2001)	32
Tabela 3.1 – Principais acessórios para medição das forças de corte com o dinamômetro KISTLER	45
Tabela 3.2 – Geometrias de corte resultantes	49
Tabela 3.3 – Composição química da liga Inconel [®] 751 (VILLARES METALS, 2008)	54
Tabela 3.4 – Composição química da liga Inconel [®] 718 (VILLARES METALS, 2008)	55
Tabela 3.5 – Velocidades de corte selecionadas	57
Tabela 3.6 – Critérios de fim de vida das ferramentas para evolução máxima tolerada dos desgastes identificados durante os pré-testes	58
Tabela 4.1 – Resultados das medidas de dureza (HRC) nas seções transversal e longitudinal da liga Inconel [®] 751	61
Tabela 4.2 – Resultados das medidas de microdureza (μ HV0,025) matriz x carbonetos da liga Inconel [®] 751	62
Tabela 4.3 – Resultados das medidas de dureza (HRC) nas seções transversal e longitudinal da liga Inconel [®] 718	62
Tabela 4.4 – Resultados das medidas de microdureza (μ HV0,025) matriz x carbonetos da liga Inconel [®] 718	63
Tabela 4.5 – Condições de corte e vidas em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel [®] 751	72

Tabela 4.6 – Condições de corte e evolução do desgaste de entalhe em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751	84
Tabela 4.7 – Condições de corte e evolução do desgaste de flanco médio em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751	85
Tabela 4.8 – Condições de corte e evolução do desgaste de ponta em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751	86
Tabela 4.9 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2	100
Tabela 4.10 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte	100
Tabela 4.11 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O_2	101
Tabela 4.12– Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2	101
Tabela 4.13 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte	101
Tabela 4.14 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O_2	101

Tabela 4.15 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel [®] 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2	102
Tabela 4.16 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel [®] 751 em atmosfera Normal x Inerte	102
Tabela 4.17 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel [®] 751 em atmosfera Inerte x Rica em O_2	102
Tabela 4.18 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de cerâmica SiALON durante a usinagem da liga Inconel [®] 751	104
Tabela 4.19 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de cerâmica preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) durante a usinagem da liga Inconel [®] 751	105
Tabela 4.20 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de cerâmica whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) durante a usinagem da liga Inconel [®] 751	106
Tabela 4.21 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 751 com ferramentas de cerâmica SiALON	114
Tabela 4.22 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 751 com ferramentas de cerâmica preta	114
Tabela 4.23 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel [®] 751 com ferramentas de cerâmica whisker	115
Tabela 4.24 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de cerâmica SiALON	119
Tabela 4.25 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de cerâmica Mista	120

Tabela 4.26 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 751 com insertos de cerâmica Whisker	120
Tabela 4.27 – Condições de corte e vidas em insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel [®] 751	124
Tabela 4.28 – Condições de corte e vidas em insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel [®] 718	133
Tabela 4.29 – Condições de corte e evolução do desgaste de flanco médio em insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel [®] 751	140
Tabela 4.30 – Condições de corte e evolução do desgaste de flanco médio em insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel [®] 718	141
Tabela 4.31 – Condições de corte e evolução do desgaste de ponta em insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel [®] 751	143
Tabela 4.32 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel [®] 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2	153
Tabela 4.33 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel [®] 751 em atmosfera Normal x Inerte	153
Tabela 4.34 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel [®] 751 em atmosfera Inerte x Rica em O_2	154
Tabela 4.35 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel [®] 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2	154

Tabela 4.36 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte	154
Tabela 4.37 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O ₂	154
Tabela 4.38 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O ₂	155
Tabela 4.39 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte	155
Tabela 4.40 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O ₂	155
Tabela 4.41 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 718	157
Tabela 4.42 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento durante a usinagem da liga Inconel® 751	158
Tabela 4.43 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel® 751	159

Tabela 4.44 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel® 751	160
Tabela 4.45 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel® 718	161
Tabela 4.46 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel® 718	161
Tabela 4.47 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento	167
Tabela 4.48 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	168
Tabela 4.49 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN ...	168
Tabela 4.50 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	169
Tabela 4.51 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 718 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN ...	169
Tabela 4.52 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento	175
Tabela 4.53 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	175
Tabela 4.54 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN	176

Tabela 4.55 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	176
Tabela 4.56 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel [®] 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN	176

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α_0	– Ângulo de folga principal [°]
β_0	– Ângulo de cunha [°]
γ_0	– Ângulo de saída [°]
χ_r	– Ângulo de posição principal [°]
χ'_r	– Ângulo de posição secundário [°]
ε_r	– Ângulo de ponta [°]
λ_s	– Ângulo de inclinação [°]
μHV	– Microdureza Vickers
a_p	– Profundidade de corte [mm]
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	– Atmosfera envolvente [% O ₂]
APC	– Aresta postiça de corte
Be	– Resistência à flexão
CBN	– Nitreto cúbico de boro sintético monocristalino
CFC	– Cúbica de Face Centrada
CNC	– Comando Numérico Computadorizado
Cs	– Resistência à compressão
CS _{Fe}	– Estabilidade química ao ferro
CS _{Ni}	– Estabilidade química ao níquel
CVD	– Deposição de vapor químico (Chemical Vapor Deposition)
E	– Módulo de Young
EDS	– Espectroscopia de Energia Dispersiva
f	– avanço [mm/rev]
FEMEC	– Faculdade de Engenharia Mecânica
F _x	– força de corte no eixo x [N]
F _y	– força de corte no eixo y [N]
F _z	– força de corte no eixo z [N]
GC	– Geometria de corte
HRC	– Dureza Rockwell C
HSS	– Aço super-rápido (High Speed Steel)

HV – Dureza Vickers

Imp – Resistência ao choque

ISO – Organização Internacional para Padronização

K313 – Metal duro (WC/Co) sem revestimento

KC5510 – Metal duro (WC/Co 6%) com revestimento PVD TiAlN

KC5525 – Metal duro (WC/Co 10%) com revestimento PVD TiAlN

K_T ou K_T – Profundidade da cratera

KY1540 – Cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$)

KY1615 – Cerâmica preta ($Al_2O_3 + TiC$)

KY4300 – Cerâmica whisker ($Al_2O_3 + SiC$)

LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem

LTM – Laboratório de Tribologia e Materiais

MD – Metal duro

MD_SR – Metal duro (WC/Co) sem revestimento

MD(6%)_CR – Metal duro (WC/Co 6%) com revestimento PVD TiAlN

MD(10%)_CR – Metal duro (WC/Co 10%) com revestimento PVD TiAlN

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MI – Material do inserto

MU – Material usinado

M_z – torque no eixo z [Nm]

O_2 – Oxigênio

PCBN – Nitreto cúbico de boro sintético policristalino

PCD – Diamante sintético policristalino

PVD – Deposição de vapor físico (Physical Vapor Deposition)

R_a – Rugosidade média aritmética [μm]

R_q – Rugosidade média quadrática ou desvio médio quadrático [μm]

R_t – Rugosidade total [μm]

t – tempo [s]

T – Tenacidade

Trs – Resistência à ruptura transversal

TSR – Resistência ao choque térmico

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

VB_B ou VB – Desgaste de flanco médio [mm]

VB_B/t – Índice de desgaste de flanco médio [mm/s]
 $VB_{B_{\max}}$ ou $VB_{\max}$ = desgaste de flanco máximo [mm]
 VB_C ou VC – Desgaste de ponta [mm]
 VB_C/t – Índice de desgaste de ponta [mm/s]
 VB_N ou VN – Desgaste de entalhe [mm]
 VB_N/t – Índice de desgaste de entalhe [mm/s]
 vc – Velocidade de corte [m/min]

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As ligas de níquel, também chamadas superligas, são utilizadas na fabricação de componentes mecânicos nas áreas aeroespacial e automobilística, por apresentarem alta resistência mecânica a elevadas temperaturas, alta resistência à fluência e à fadiga, além de ótima resistência à corrosão em relação aos outros tipos de materiais (MACHADO *et al.*, 2009). Seu campo de aplicação inclui componentes que trabalham em temperaturas acima de 500 °C, tais como pás e discos de turbinas e elementos do sistema de exaustão de motores (MACHADO *et al.*, 2009; ASM METALS HANDBOOK V.2, 2004). Atualmente a liga de níquel 751 encontra grande uso na fabricação de válvulas de exaustão de motores diesel, enquanto a liga de níquel 718 na produção de componentes de turbinas a jato (ASM METALS HANDBOOK V.2, 2004).

Por possuírem excelentes propriedades mecânicas, as superligas se apresentam como materiais de baixo índice de usinabilidade devido à alta dureza, grande resistência mecânica a altas temperaturas e afinidade para reagir com os materiais das ferramentas, além de apresentarem baixa condutividade térmica (CHILDS *et al.*, 2001).

Diversas ferramentas foram usadas ao longo do tempo para usinar as superligas à base de níquel, tais como os metais duros, cerâmicas com e sem revestimento – puras ou mistas, além das ferramentas ultraduras (MACHADO *et al.*, 2009).

Embora atualmente as ferramentas de corte incorporem tecnologias avançadas na sua concepção, os problemas historicamente encontrados na usinagem das superligas persistem. Fenômenos de avaria tais como quebra, lascamento e trincamento podem ser observados mais comumente no corte interrompido, como por exemplo no fresamento. Já o desgaste sempre haverá em superfícies em contato e movimento relativo, ocorre tanto nos processos de corte contínuos, como é o caso do torneamento, quanto nos interrompidos.

As principais formas de desgaste em uma ferramenta de corte são: desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe, conforme Childs e outros (2001).

Trent e Wright (2000) tratam o desgaste de entalhe como um mecanismo, pois falta ainda consenso na literatura sobre como ocorre com exatidão esta forma de desgaste.

O objetivo geral deste trabalho foi estudar os fenômenos de desgaste envolvidos durante a usinagem das superligas a base de níquel. No processo de torneamento desses materiais foram observadas as principais formas de desgastes das ferramentas de metal duro, cerâmicas e estudados os mecanismos de desgaste envolvidos, analisando o desenvolvimento dos mesmos.

O objetivo específico da pesquisa foi avaliar a evolução dos desgastes, com ênfase no desgaste de entalhe usinando as superligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718. Através do processo de torneamento das ligas, fez-se um estudo da evolução dos desgastes, sob diferentes condições de corte das ferramentas de metal duro com e sem revestimento, cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), cerâmica reforçada com whiskers ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) e cerâmica preta ou mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$). Os parâmetros de corte variados foram a velocidade de corte, a geometria da ferramenta de corte e as atmosferas envolventes, estabelecendo-se um diagnóstico do processo de evolução das diversas formas de desgaste presentes. O melhor entendimento da usinagem das superligas de níquel irá facilitar o processo de corte desse tipo material.

O trabalho experimental de usinagem foi realizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU – da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC – da Universidade Federal de Uberlândia – UFU na cidade de Uberlândia/MG. As análises por microscopia ótica, rugosidade superficial e forças de corte também foram realizadas nas dependências do LEPU. As análises metalográficas e medições de macro/microdureza foram executadas no Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM – da FEMEC – UFU. As análises por microscopia eletrônica de varredura e EDS foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica – DEM – da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES na cidade de Vitória/ES.

O conteúdo deste documento é composto pelos seguintes itens. Inicialmente são apresentados no Capítulo 2, uma Revisão Bibliográfica onde são abordados os diversos tipos de desgaste encontrados nas ferramentas de corte e os mecanismos de desgaste associados aos mesmos. Na sequência são considerados os materiais e os fatores que afetam o desenvolvimento do desgaste em ferramentas de corte.

No Capítulo 3 segue-se à descrição dos procedimentos experimentais adotados, onde são descritos os materiais e equipamentos envolvidos no estudo.

Os resultados alcançados e as discussões sobre os mesmos são apresentados no Capítulo 4, onde se procurou abordar de forma detalhada a evolução dos desgastes observados e possíveis mecanismos envolvidos.

Na parte final do estudo são mostradas as Conclusões do trabalho e Sugestões para Pesquisas Futuras.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de Desgaste em Ferramentas de Corte

A cunha cortante da ferramenta durante o processo de usinagem fica sujeita ao desenvolvimento de diversos mecanismos de desgaste que acarretam no surgimento de diferentes tipos ou formas de desgaste. A Figura 2.1 apresenta o sistema tribológico envolvido no processo de usinagem.

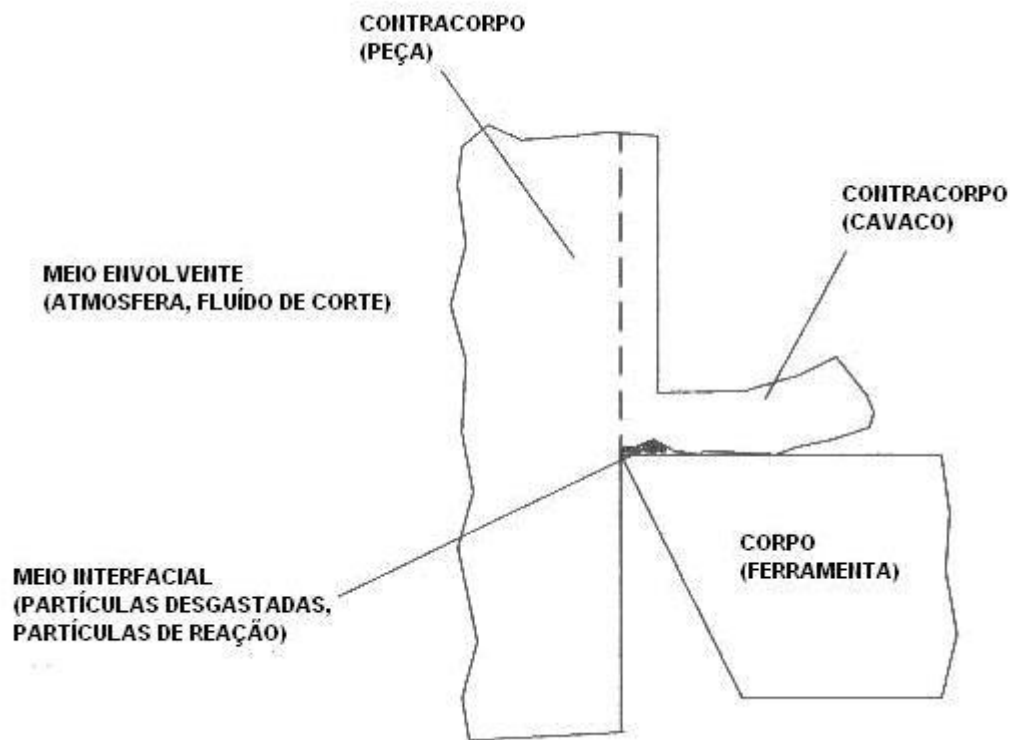


Figura 2.1 – Sistema tribológico envolvido no processo de usinagem (WEINERT e MEISTER, 1998)

A Figura 2.2 apresenta as principais áreas de desgaste em ferramentas de corte, conforme Dearnley e Trent (1982) e Ezugwu (2005).

Podem ser identificados três formas de desgaste nesta, que são o desgaste de cratera – região 4, desgaste de flanco – região 1 e o desgaste de entalhe – regiões 2 e 3.

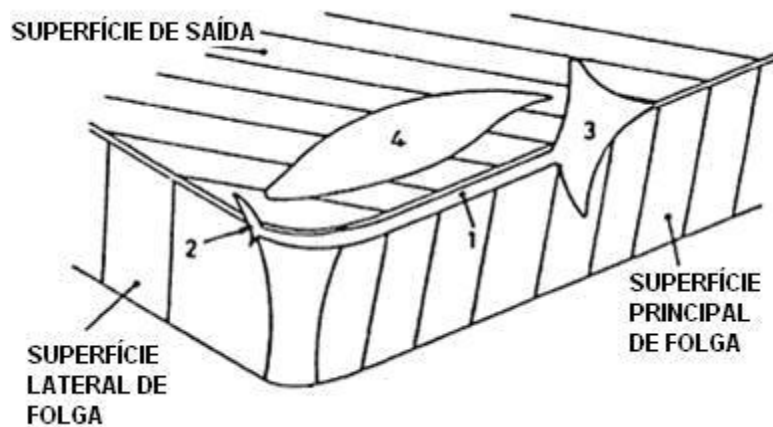


Figura 2.2 – Áreas de desgaste em ferramentas de corte (adaptado de DEARNLEY e TRENT, 1982 & EZUGWU, 2005)

A Figura 2.3 apresenta os parâmetros utilizados para quantificar os tipos de desgaste mostrados na Figura 2.2, de acordo com a norma ISO 3685 (1993) e Childs e outros (2001).

KT = profundidade da cratera;

KM = distância do centro da cratera;

VB_B = desgaste de flanco médio;

$VB_{B\max}$ = desgaste de flanco máximo;

VB_C = desgaste de ponta;

VB_N = desgaste de entalhe.

O tempo de vida da ferramenta é representado pelo tempo efetivo de processo de corte sem reafiação ou substituição da mesma. A evolução dos desgastes apresentados determina e em outros casos influencia a vida, antes que o processo de corte seja afetado. São estes desgastes que limitam o uso das ferramentas ou, em outras palavras determinar o fim de vida destas. Isto ocorre quando eles atingem proporções tão elevadas que não é mais possível produzir peças dentro de padrões de tolerâncias, acabamentos desejados, potência de usinagem e danos metalúrgicos ao componente (CHILDS *et al.*, 2001).

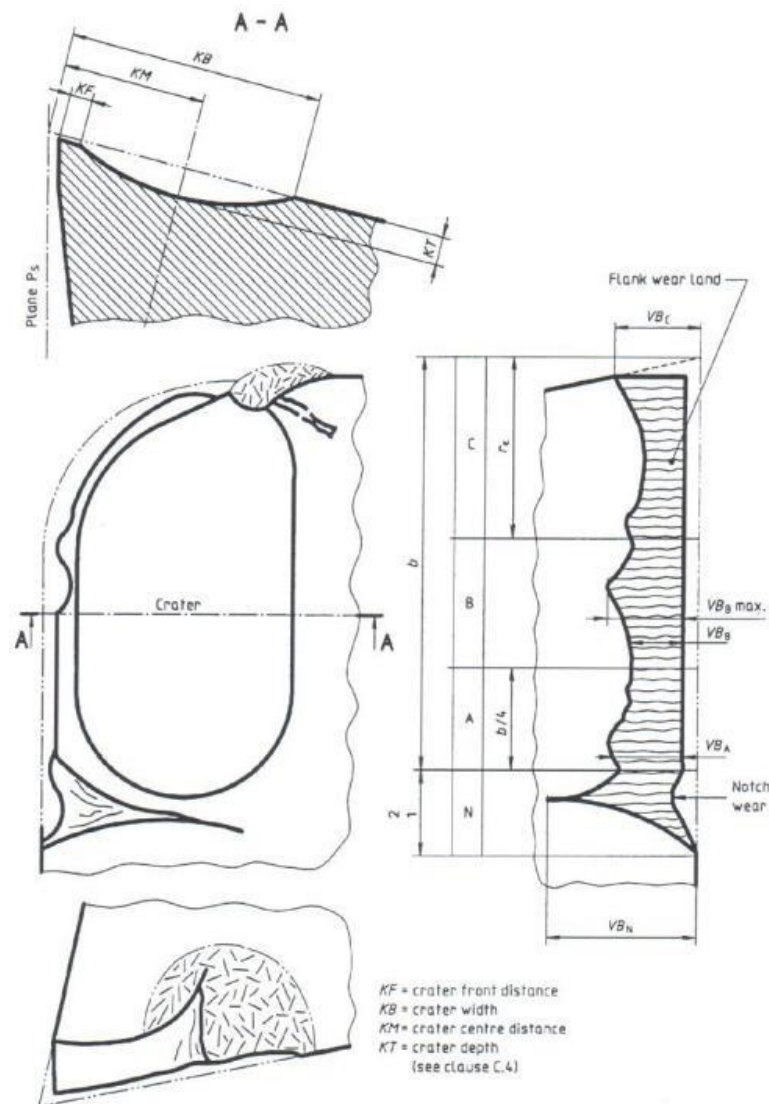


Figura 2.3 – Parâmetros de desgaste das ferramentas de corte (adaptado de ISO 3685, 2000 e CHILDS *et al.*, 2001)

2.1.1 Desgaste de Flanco

O desgaste de flanco ocorre tanto na superfície principal de folga, quanto na superfície lateral de folga. É atribuído à ação de fricção da ferramenta junto à superfície usinada, o que desencadeia adesão (ou *attrition*) e/ou abrasão, acentuadas pelo aumento da temperatura durante a usinagem, podendo ocorrer também difusão (CHILDS *et al.*, 2001).

Esse tipo de desgaste é caracterizado pela perda de material da cunha cortante, podendo ter largura uniforme em alguns casos, em outros não. Sua ocorrência se dá em praticamente todos os processos de usinagem, sendo assim o mais adotado como critério para o fim de vida das ferramentas de corte. A quantificação dos parâmetros são indicados pela norma ISO 3685

(2000) como VB_B (desgaste de flanco médio) e $VB_{Bmáx}$ (desgaste de flanco máximo), conforme a Figura 2.3.

2.1.2 Desgaste de Cratera

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta devido às altas temperaturas geradas durante a usinagem e a afinidade química entre a ferramenta e o material da peça. A superfície de saída é submetida a altos níveis de tensão e temperatura devido ao atrito da parte inferior do cavaco com a mesma. A localização do desgaste de cratera coincide com a região de maior temperatura na superfície de saída da ferramenta, conforme a Figura 2.3. Normalmente a difusão é o principal mecanismo, podendo ocorrer também abrasão e adesão ou *attrition* (CHILDS *et al.*, 2001).

O parâmetro mais usado pela norma ISO 3685 (1993) para quantificar o desgaste de cratera é KT (profundidade da cratera), conforme a Figura 2.3. A dificuldade em se medir esse parâmetro faz com que o desgaste de cratera seja apenas um indicador de evolução de desgaste, não determinando na maioria das vezes o fim de vida da ferramenta.

2.1.3 Desgaste de Entalhe

O desgaste de entalhe ocorre na superfície principal de folga e também na superfície lateral de folga, em alguns casos pode invadir a superfície de saída. No caso da superfície principal de folga a localização é especificamente onde se inicia o contato entre a aresta principal de corte e a peça, na altura da profundidade de corte. E no caso da superfície lateral de folga a localização é onde termina o contato entre a aresta lateral de corte e a peça usinada (ASM METALS HANDBOOK V.16, 2004).

Os parâmetros utilizados para medir o desgaste de entalhe, indicado pela norma ISO 3685 (2000) são VB_C (desgaste de ponta) e VB_N (desgaste de entalhe), conforme mostra a Figura 2.3.

O entalhe ocorre quando o material da peça usinada tem sua superfície encruada previamente pelo corte ou por efeito de alguma variação de temperatura. Sua localização sobre as arestas principal e lateral de corte ocorre no ponto onde prevalece uma condição de escorregamento, agravada pelo efeito do meio envolvente, na maioria dos casos o ar ou o fluido de corte.

O material da peça desenvolve o entalhe no material da ferramenta produzindo um sulco em forma de V, na altura da profundidade de corte da aresta principal e/ou na outra extremidade da profundidade de corte, na aresta secundária de corte. Entalhes mais profundos e melhor caracterizados podem ser observados quando da usinagem de ligas resistentes ao calor e com tendência a encruarem, como é o caso das superligas a base de níquel (MACHADO *et al.*, 2009).

Na Figura 2.4 podem ser observadas diversas formas de avarias e desgastes em diversos tipos de ferramentas de corte (ASM METALS HANDBOOK V.16, 2004). Na usinagem das superligas a base de níquel o desgaste de flanco é bastante crítico em paralelo ao desgaste de entalhe, formando ambos a principal causa de rejeição das ferramentas.

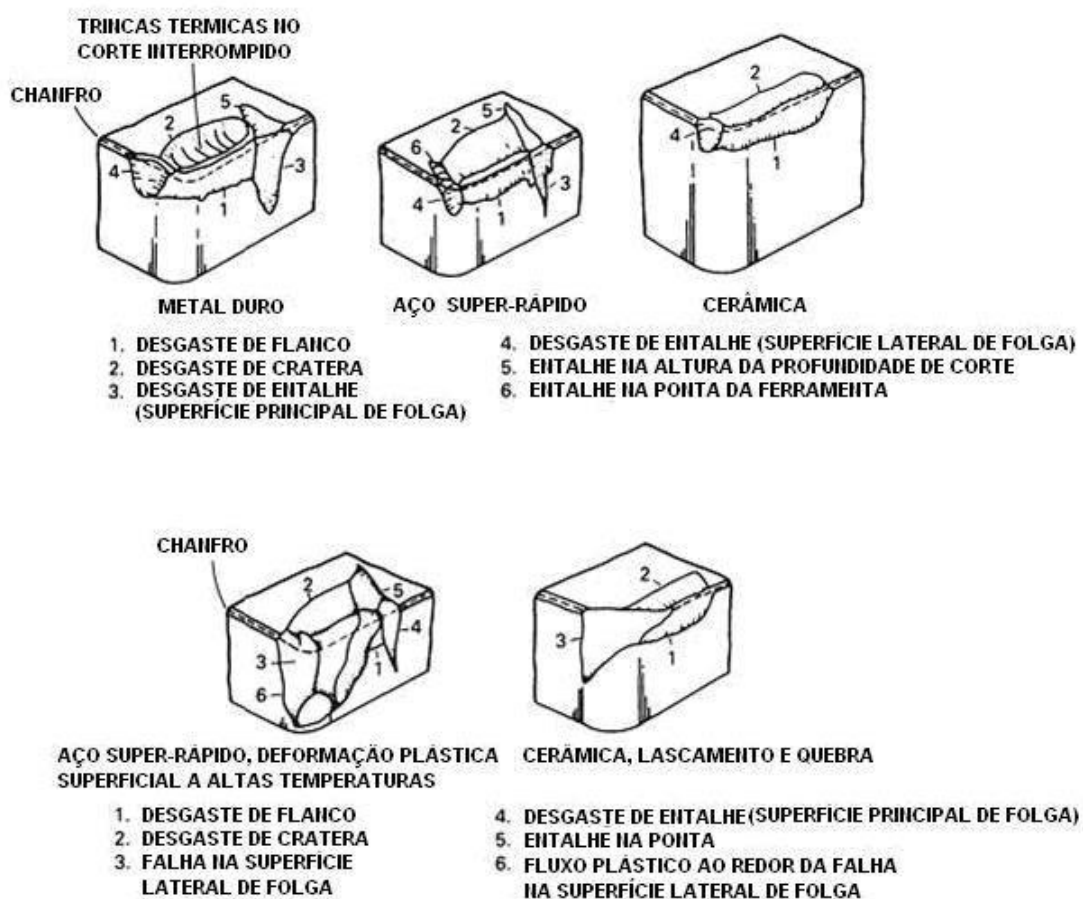


Figura 2.4 – Avarias e desgastes em diversos tipos de ferramentas de corte (adaptado de ASM METALS HANDBOOK V.16, 2004)

Apesar de a Figura 2.4 não indicar, as cerâmicas podem também sofrer desgastes de entalhe, principalmente quando usinando as ligas de níquel.

2.2 Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Corte

Em condições normais de usinagem, os tipos (ou formas) de desgastes apresentados no Item 2.1, ou seja, o desgaste de flanco, desgaste de cratera e o desgaste de entalhe surgirão com o decorrer do tempo e estas formas de desgaste se desenvolvem por vários mecanismos, dependendo estes ainda de uma série de fatores.

A classificação dos mecanismos de desgaste é bastante variada, observando-se pelo menos seis mecanismos, ou processos, mais importantes (TRENT e WRIGHT, 2000):

- Aderência e arrastamento;
- Abrasão;
- Difusão;
- Cisalhamento a altas temperaturas;
- Deformação plástica causada pela carga compressiva;
- Entalhe

Na Figura 2.5 observa-se que em baixas temperaturas predominam os mecanismos de adesão e abrasão, com maior influência do primeiro. Mas, à medida que a temperatura se eleva surgem novos mecanismos, como é o caso da difusão e da oxidação. O mecanismo de difusão é o que mais predomina em temperaturas elevadas, crescendo em escala exponencial, afetando sobremaneira o desgaste total da ferramenta. Esta figura, porém, não considera a deformação plástica, que também predomina em temperaturas elevadas (VIEREGGE, 1970, apud KÖNIG e KLOCKE, 1997).

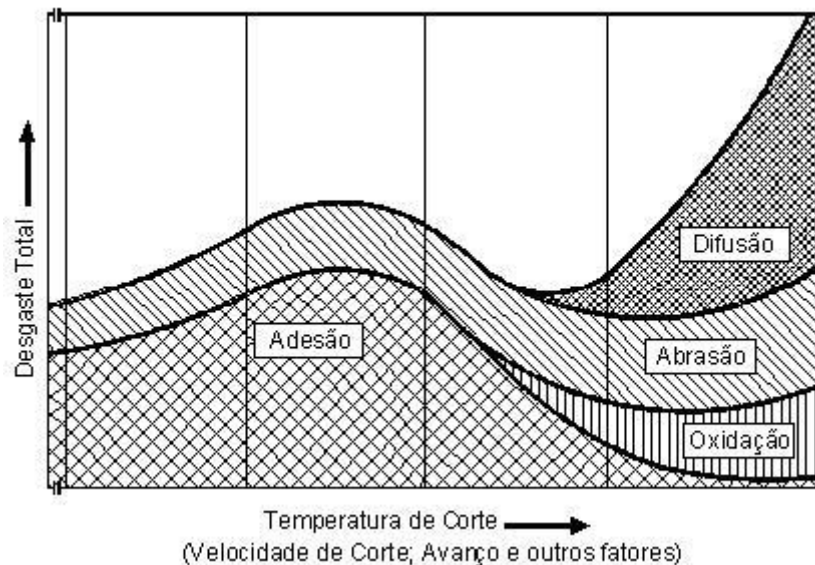


Figura 2.5 – Distribuição dos mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, em função da temperatura (VIEREGGE, 1970, apud KÖNIG e KLOCKE, 1997)

2.2.1 Aderência e Arrastamento

A aderência e arrastamento também são tratados na literatura por adesão. Na literatura inglesa são conhecidos como *attrition*.

O mecanismo de aderência e arrastamento tende a ocorrer quando duas superfícies metálicas são colocadas em contato e sujeitas a uma pressão normal, formando-se entre elas um extrato metálico (mistura de dois materiais) causando a aderência. O extrato possui uma elevada resistência, a tal ponto que na tentativa de separação das superfícies aderidas, ocorre a ruptura em um dos materiais e não na superfície de contato. Dessa forma partículas da superfície de um material, no caso a ferramenta, são arrancadas e levadas pelo fluxo plástico de deformação metálica, no caso a peça ou o cavaco (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.2.2 Abrasão

O mecanismo de abrasão envolve a perda de material por microlascamento, microsulcamento ou microcorte provocado por partículas duras. As partículas podem estar no material da peça ou serem provenientes de regiões da ferramenta e que foram arrancadas por adesão ou abrasão. Este

mecanismo é considerado como um dos principais causadores de desgaste nas ferramentas de corte, atuando principalmente na superfície de folga das mesmas (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.2.3 Difusão

A difusão é um tipo de desgaste químico e ocorre devido às condições de temperatura e tensão a que são submetidos corpos em contato. Envolve a transferência de átomos de um material para o outro sendo fortemente afetada pela temperatura e pela solubilidade dos elementos envolvidos dentro da zona de fluxo, na zona de cisalhamento secundário (MACHADO *et al.*, 2009). A solubilidade dos elementos envolvidos pode ser entendida como afinidade química entre constituintes, sendo o tamanho atômico relevante nesse caso.

Durante a usinagem, a velocidade relativa entre a ferramenta e o cavaco é alta e o tempo de contato entre os materiais muito curto, levando a se pensar que o fenômeno de difusão seja desprezível; no entanto, há que considerar a existência de uma zona de aderência na interface cavaco-ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000), garantindo assim a possibilidade de difusão. É importante mencionar que a zona de fluxo pode estar presente também na superfície de folga o que permite ocorrer difusão no flanco da ferramenta.

2.2.4 Cisalhamento a Altas Temperaturas

A deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas é um tipo de mecanismo que ocorre mais frequentemente em ferramentas de aço-rápido (TRENT e WRIGHT, 2000). É um fenômeno mais comumente encontrado na usinagem de metais com alto ponto de fusão.

As tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta são muito elevadas e causam a deformação plástica na superfície de saída da ferramenta de corte. Devido às altas temperaturas presentes, a resistência ao escoamento do material da ferramenta fica reduzida próximo à interface, tendo como consequência o cisalhamento do mesmo junto ao cavaco removido de sua superfície, dando origem a cratera (MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Trent e Wright (2000), as ferramentas de metal duro, cermetes, cerâmicas e as ultraduras possuem resistência suficiente para não desenvolver o mecanismo de deformação plástica. No entanto, Ávila (2003)

estudando o desgaste de cratera em ferramentas de metal duro com e sem revestimento, no torneamento de um aço ABNT 4340 endurecido, utilizando perfilômetro, constatou cotas positivas de material nas imediações da cratera. Este fato evidencia que houve o deslocamento de material da superfície para fora da cratera, incluindo-se aí os revestimentos das ferramentas. As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram as crateras obtidas por Ávila (2003).

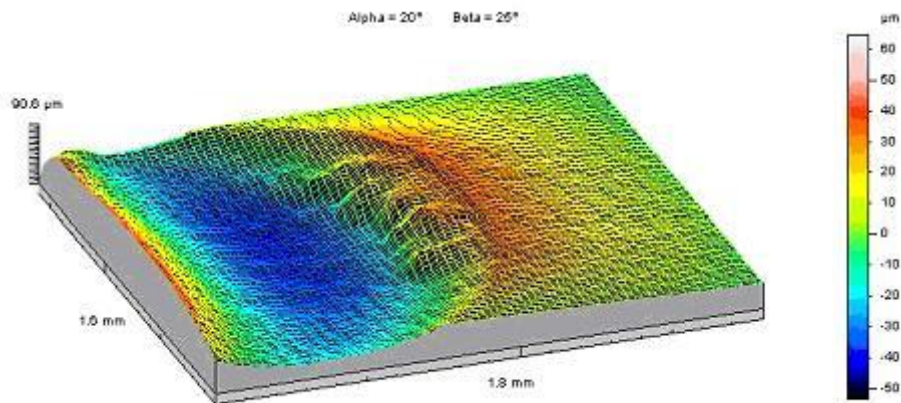


Figura 2.6 – Perfil da superfície de saída de uma ferramenta de metal duro sem revestimento, após torneamento de aço ABNT 4340. Cotas positivas indicam a presença de deformação plástica (ÁVILA, 2003)

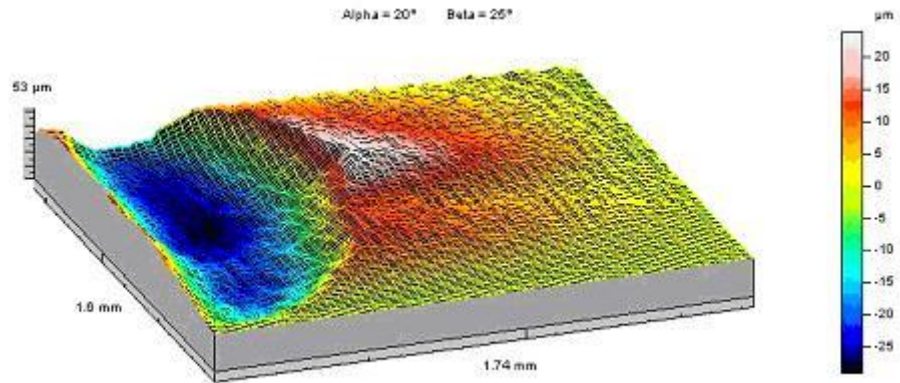


Figura 2.7 – Perfil da superfície de saída de uma ferramenta de metal duro revestida com TiAlN, após torneamento de aço ABNT 4340, onde são observadas cotas positivas (ÁVILA, 2003)

Este mecanismo ocorre em geral, durante a usinagem de materiais com elevada dureza, havendo a combinação de altas tensões de compressão e altas temperaturas na superfície de saída da ferramenta. Ocorre então o desencadeamento da deformação plástica, podendo levar a uma falha catastrófica da ferramenta de corte (ÁVILA, 2003).

A ocorrência é mais frequente com avanços maiores que 0,20 mm/rot e velocidades de corte acima de 50 m/min, afetando em maior grau as ferramentas de aço-rápido e de metal duro. No caso de ferramentas cerâmicas, que apresentam baixa tenacidade, não há a ocorrência deste tipo de mecanismo. As cerâmicas possuem campo plástico muito pequeno, e quando o limite de resistência é atingido, a mesma rompe subitamente sem chance de ocorrer deformação plástica considerável (ÁVILA, 2003).

2.2.5 Deformação Plástica causada pela Carga Compressiva

A deformação plástica compressiva ou deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão ocorre preferencialmente em ferramentas de aço rápido e metal duro, durante a usinagem de materiais com dureza elevada. A principal causa desse processo ou mecanismo de desgaste é a associação de altas temperaturas com elevadas tensões compressivas na ponta da ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000).

Outro fator que parece desencadear a deformação plástica compressiva é o uso de velocidades de corte acima de 50 m/min, que em algumas circunstâncias provoca desgaste de flanco na ferramenta o que acaba induzindo a deformação compressiva da ponta.

A combinação de elevados avanços e altas velocidades de corte, também pode motivar a deformação plástica da ponta da ferramenta por compressão (TRENT, 1991).

A ponta da ferramenta é mais suscetível a esse mecanismo de desgaste devido à concentração máxima de tensão compressiva nessa região, que decai à medida que se avança em direção ao ponto onde o cavaco perde o contato com a ferramenta, na superfície de saída da ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000).

Os relatos da ocorrência desse tipo de deformação plástica indicam que o mesmo acontece preferencialmente nas ferramentas com maior tenacidade, que permitem deformação do material. Não foi evidenciado a ocorrência em insertos cerâmicos por exemplo, pois como esse tipo de material possui elevada dureza e grande fragilidade, não torna possível as condições para que aconteça deformação plástica considerável (TRENT e WRIGHT, 2000).

O que se pode supor é que no caso da ocorrência de altos esforços de compressão na ponta de uma ferramenta na qual o campo plástico seja reduzido, o mais certo é que ocorra uma falha catastrófica tal como um lascamento ou até mesmo a quebra da ponta.

Segundo Trent (1991), as ferramentas compostas por WC–TiC–TaC–Co são mais resistentes à compressão em altas temperaturas do que as de metal duro compostas exclusivamente por WC–Co. A Figura 2.8 apresenta a resistência à compressão em função da temperatura para uma ferramenta de metal duro composta por WC–TiC–TaC–Co. Mesmo sendo mais resistente, o aumento da temperatura promove uma redução considerável em sua resistência, sendo que a 800 °C a resistência é 3 vezes menor que à temperatura ambiente.

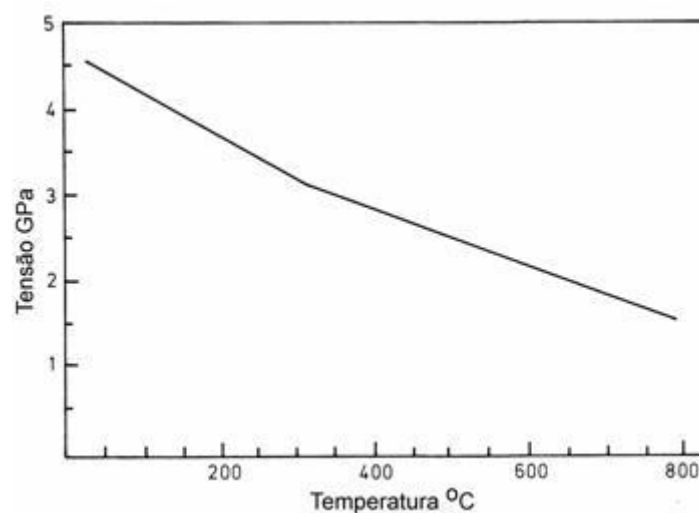


Figura 2.8 – Resistência à compressão em função da temperatura, para uma ferramenta de metal duro composta por 19% TiC–16% TaC–5,5% WC e 9,5% Co (TRENT, 1991)

2.2.6 Entalhe

O desgaste de entalhe tratado como um mecanismo e também como uma forma de desgaste, aparece nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco.

Não existem estudos suficientes para determinar as reais causas do mecanismo, no entanto, podem ser indicadas possíveis justificativas para o seu surgimento e desenvolvimento (SHAW, 1986), conforme segue:

- a) Aparecimento de uma camada encruada de material na superfície da ferramenta ou da peça usinada previamente;
- b) Concentração de tensões devido a um gradiente de tensão na superfície livre;
- c) Surgimento de trincas térmicas na aresta de corte devido a um gradiente de temperatura na superfície livre;
- d) Presença de rebarba na superfície usinada previamente;
- e) Maior velocidade de corte na altura da profundidade de corte, devido ao maior diâmetro da peça;
- f) Presença de uma camada de óxido abrasivo na superfície usinada previamente;
- g) Fluxo de material da aresta postiça de corte em paralelo à aresta de corte;
- h) Fadiga do material da ferramenta provocado pela flutuação da força na superfície livre acompanhando os movimentos laterais das arestas dos cavacos;
- i) Deposição de partículas da ferramenta na superfície usinada previamente, que atuam como pequenas ferramentas de corte;
- j) Geometria inadequada para usinagem

Observa-se que estas justificativas são variadas e independentes. Sendo algumas incorretas, como são os casos das letras e e g. Na letra e a incorreção está no fato do entalhe aparecer também na aresta secundária, onde a velocidade de corte é menor. Na letra g o contrassenso está no fato do entalhe ocorrer também em velocidades de corte elevadas, acima da velocidade crítica, onde não se forma mais APC (aresta postiça de corte).

2.3 Outros Comentários sobre Desgaste de Entalhe

A ocorrência do desgaste de entalhe aparece principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e/ou com tendências ao encruamento, como é o caso das superligas de níquel, aço inoxidável e outros. Ele pode se desenvolver tanto na superfície de saída quanto na de folga, e tanto na aresta principal quanto na secundária da ferramenta de corte.

O desgaste de entalhe ocorre sempre nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco. No caso da usinagem das superligas e com diferentes tipos de ferramentas, conforme apresentado por Childs e outros (2001) na Figura 2.9 e ASM Metals Handbook V.5 (2004) na Figura 2.10.

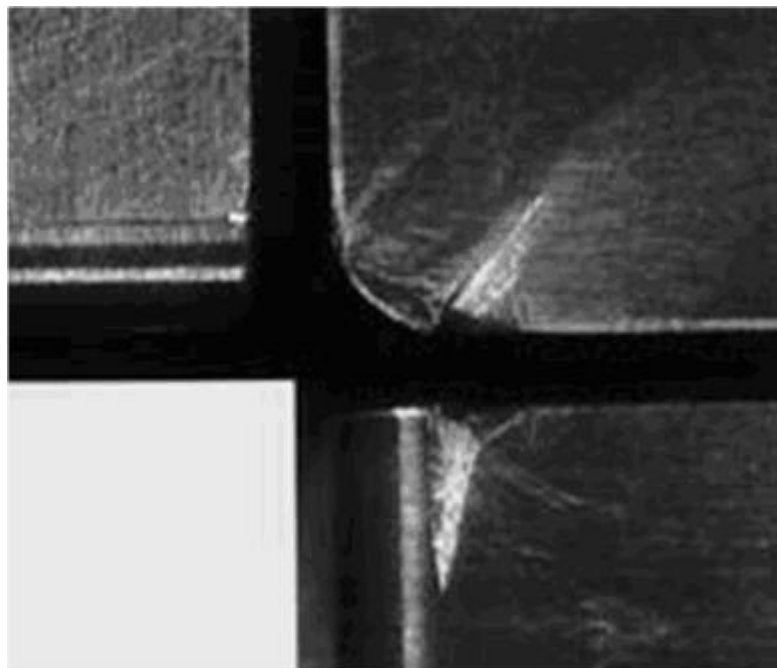


Figura 2.9 – Desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte em uma ferramenta cerâmica ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$) após operação de torneamento da liga Inconel[®] 718 (CHILDS *et al.*, 2001)

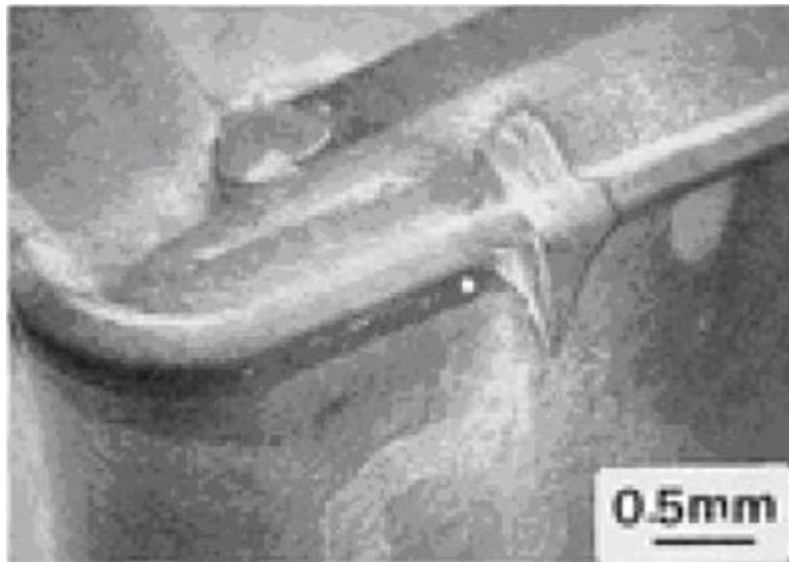


Figura 2.10 – Desgaste de entalhe em ferramenta de metal duro após usinagem de superliga à base de níquel (ASM METALS HANDBOOK V.5, 2004)

Os mecanismos envolvidos no desgaste de entalhe são vários, mas pode ser notada a condição de escorregamento envolvendo abrasão e *attrition*, possivelmente influenciado por condições atmosféricas (MACHADO *et al.*, 2009).

O desgaste de entalhe desenvolvido na altura da profundidade de corte, na superfície principal e/ou lateral de folga, pode-se estender em direção à superfície de saída da ferramenta, conforme Figuras 2.11, 2.12 e 2.13.

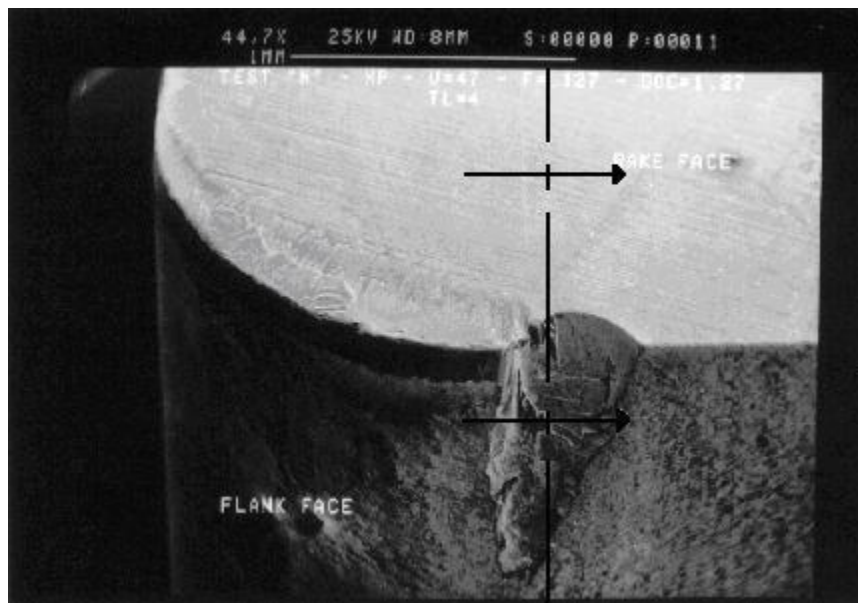


Figura 2.11 – Desgaste de entalhe observado em uma ferramenta de metal duro da classe K20 após usinagem de Inconel[®] 901 (MACHADO, 1990)

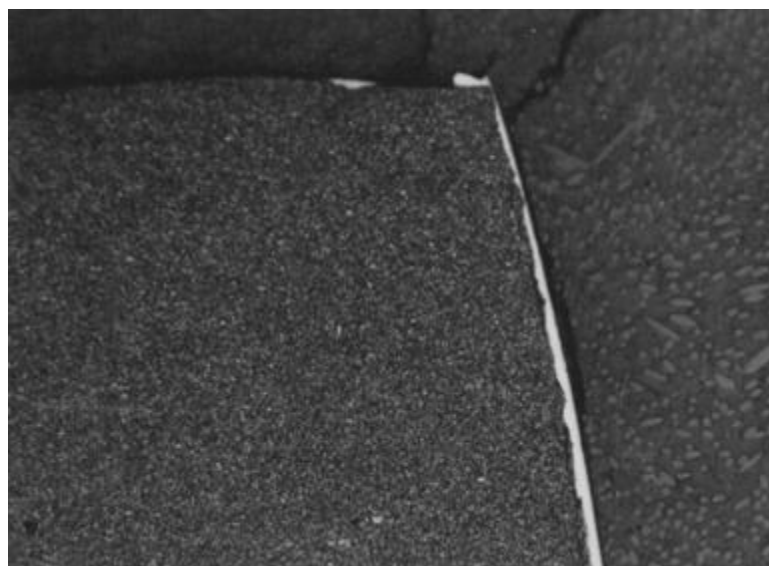


Figura 2.12 – Corte transversal no centro do entalhe de uma ferramenta, conforme indicado na Figura 2.11, após torneamento de Inconel[®] 901 (MACHADO, 1990)

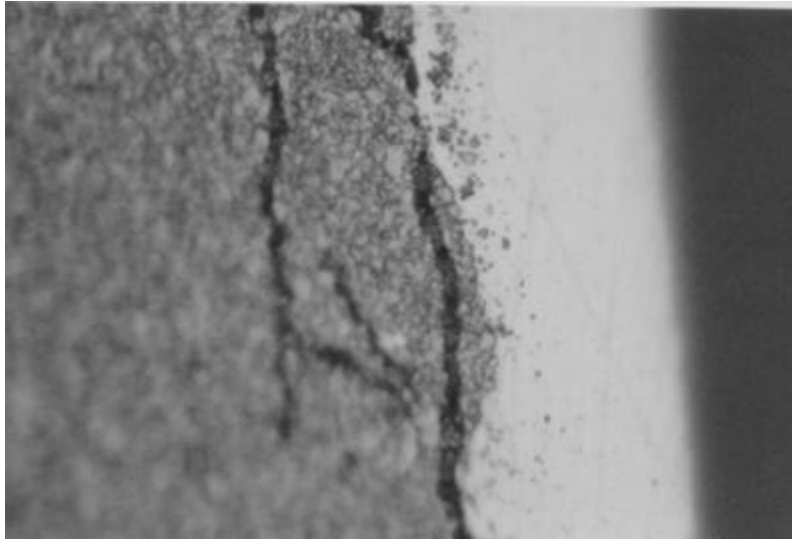


Figura 2.13 – Borda da superfície de folga de uma ferramenta após torneamento de Inconel[®] 901 (MACHADO, 1990)

As trincas que aparecem na Figura 2.13 não ocorreram durante a usinagem, mas durante a preparação da amostra em disco diamantado (MACHADO, 1990). A camada clara da figura representa o material da peça (Inconel[®] 901) aderido na superfície do entalhe, onde são observadas inúmeras partículas de carbonetos da ferramenta sendo arrastadas pelo fluxo deste material. Este fato é a comprovação evidente da presença do mecanismo de desgaste adesivo (ou *attrition*).

O aumento da velocidade de corte implica no aumento da temperatura e tende a acelerar o processo de desgaste da ferramenta. Nesse caso, conforme pode ser previsto pela Figura 2.5, a difusão pode passar a fazer parte do processo, caso haja condições de aderência envolvida. A formação contínua de óxidos que se aderem à ferramenta e havendo a quebra dessas junções de aderência entre óxidos e ferramenta, pode também remover material desta última (TRENT e WRIGHT, 2000).

O desgaste de entalhe também pode ser formado, segundo outra vertente, pelas rebarbas das arestas laterais do cavaco, havendo interação entre os mecanismos, incluindo-se *attrition*.

A observação da cor do cavaco durante a usinagem de ligas de níquel em que o mesmo possuía coloração rubra em suas bordas e acinzentado no centro, levou a conclusão de que nas bordas a temperatura era maior. Diferenças de temperatura na seção transversal do cavaco, podem afetar o tipo e a forma do mesmo (SHAW, 1986).

2.3.1 Materiais que tendem a Desenvolver Desgaste de Entalhe

2.3.1.1 Superligas

As superligas possuem uma faixa bastante ampla de utilização. As indústrias aeroespacial, automobilística, naval e química absorvem uma grande quantidade de componentes produzidos com esses materiais, que apresentam elevado teor de elementos de liga em sua composição (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

De acordo com Choudhury e El-Baradie (1998), as superligas podem ser subdivididas em famílias, conforme os metais base que as originam. Alguns exemplos de cada família podem ser vistos na Figura 2.14. A liga Inconel 751 se enquadra na família de base níquel.

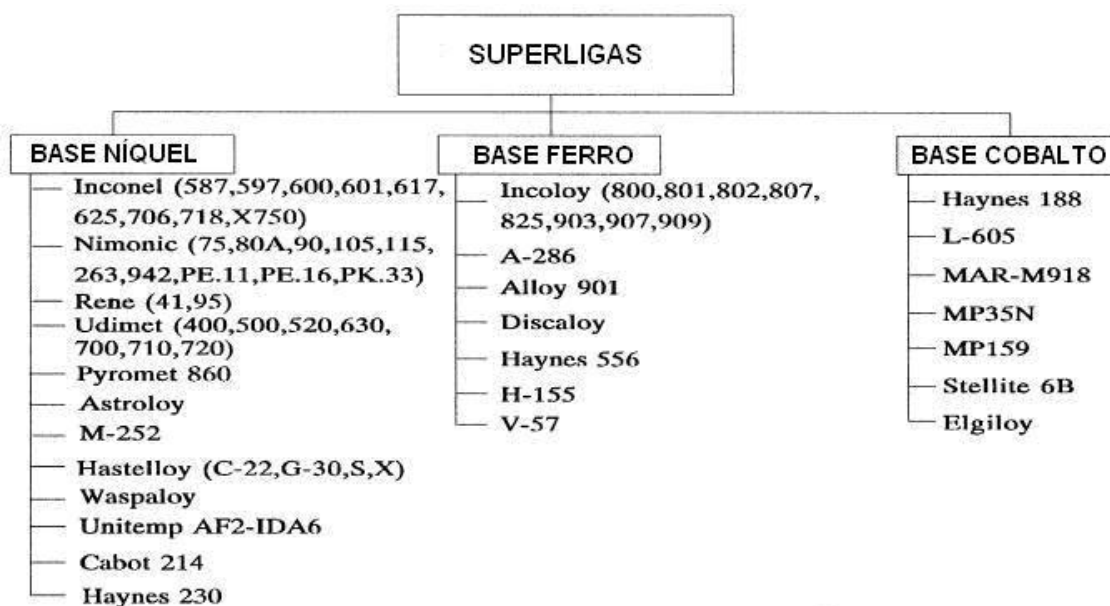


Figura 2.14 – Classificação das superligas (adaptado de CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998)

2.3.1.2 Superligas de Níquel

As séries Inconel[®], Nimonic, Udimet e Waspalloy fazem parte da família das superligas a base de níquel, que ainda segundo Choudhury e El-Baradie (1998), são conhecidas por possuírem excelentes propriedades, tais como elevada resistência mecânica em altas temperaturas, grande resistência à fluência e à fadiga e ótima resistência à corrosão. Devido a isso são os materiais preferidos para a fabricação de elementos mecânicos submetidos ao funcionamento em elevadas temperaturas.

Especificamente as superligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718 que foram usadas neste trabalho, conforme Figura 2.14, são compostas por um teor de níquel mais elevado do que o encontrado nas outras superligas da mesma família de acordo com Special Metals (2004) e Brandes e Brook (1992). As composições químicas das superligas podem ser vistas nas Tabelas 2.1 e 2.2. Pode-se observar que além do metal base, outros elementos de liga também possuem participação nas composições das mesmas, influenciando direta ou indiretamente nas propriedades citadas.

Tabela 2.1 – Composição química da liga Inconel[®] 751, % em peso (SPECIAL METALS, 2004; BRANDES e BROOK, 1992)

Níquel (+ Cobalto)	70,0 mínimo
Cromo	14,0 – 17,0
Ferro	5,0 – 9,0
Titânio	2,0 – 2,6
Alumínio	0,9 – 1,5
Nióbio (+ Tântalo)	0,7 – 1,2
Manganês	1,0 máximo
Silício	0,5 máximo
Enxofre	0,01 máximo
Cobre	0,5 máximo
Carbono	0,10 máximo

Tabela 2.2 – Composição química da liga Inconel® 718, % em peso (SPECIAL METALS, 2004; BRANDES & BROOK, 1992)

Níquel (+ Cobalto)	50,0 – 55,0
Cromo	17,0 – 21,0
Ferro	5,0 – 9,0
Nióbio (+ Tântalo)	4,75 – 5,5
Molibdênio	2,8 – 3,3
Titânio	0,65 – 1,15
Alumínio	0,2 – 0,8
Cobalto	1,0 máximo
Manganês	0,35 máximo
Silício	0,35 máximo
Cobre	0,3 máximo
Carbono	0,08 máximo
Fósforo	0,015 máximo
Enxofre	0,015 máximo
Boro	0,006 máximo

Em oposição às ótimas propriedades térmicas e mecânicas dos componentes fabricados, o processo de usinagem desses materiais apresenta elevado grau de dificuldade. As ligas de níquel apresentam estrutura CFC (Cúbico de Face Centrada) e as boas propriedades à elevadas temperaturas, citadas anteriormente, são obtidas por: (i) - precipitação de fases gama primária (γ), que também são CFC, composto de $Ni_3(Al,Ti)$; (ii) - soluções sólidas, sendo que os principais elementos são o Cr e o Co; (iii) - precipitação de carbonetos. Os principais são de Cr, Ti, Mo, W, Fe e Nb (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997).

Os efeitos da fluência sobre as superligas podem ser observados a nível atômico, provocando alterações na microestrutura dos materiais em diversos níveis. A elevadas temperaturas e pressões constantes, os esforços aplicados

a esses materiais induzem a propagação de trincas e ruptura do material em direções preferenciais nos contornos de grão (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997). As Figuras 2.15 e 2.16 ilustram essas situações.

Os elementos de liga têm grande influência nas propriedades das superligas em geral, e a Tabela 2.3 apresenta essas influências.

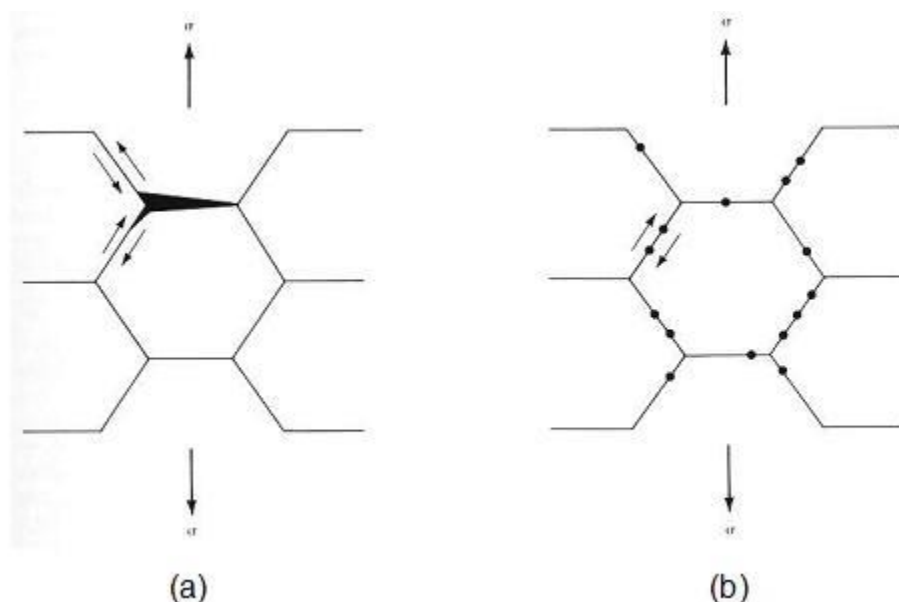


Figura 2.15 – (a) Cavitação e (b) ruptura intergranular, nos contornos de grão (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)

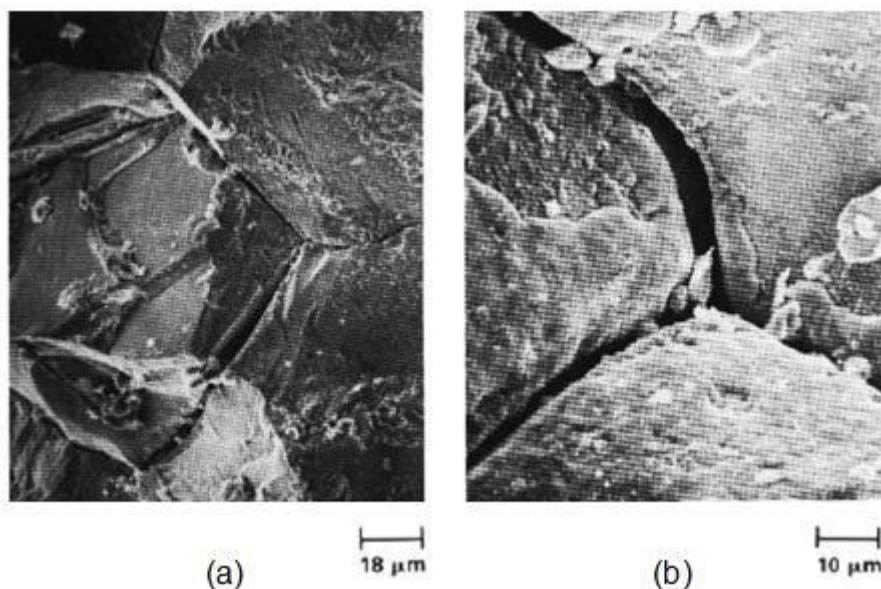


Figura 2.16 – Fratura intergranular por fluência numa liga Inconel 625 (a) e Incoloy 800 (b) (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)

Tabela 2.3 – Influência dos elementos químicos nas propriedades das superligas (adaptado de ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)

Efeito	Base Ferro	Base Cobalto	Base Níquel
Formadores de solução-sólida	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta, Re
Estabilizadores da matriz CFC	C, W, Ni	Ni	-
Formadores de carbonetos:			
MC	Ti	Ti	W, Ta, Ti, Mo, Nb, Hf
M ₇ C ₃	-	Cr	Cr
M ₂₃ C ₆	Cr	Cr	Cr, Mo, W
M ₆ C	Mo	Mo, W	Mo, W, Nb
Carbonitreto: M(CN)	C, N	C, N	C, N
Promotores da precipitação de carbonetos	P	-	-
Formadores γ' Ni ₃ (Al, Ti)	Al, Ni, Ti	-	Al, Ti
Retardadores da formação de Ni ₃ Ti	Al, Zr	-	-
Elevadores da temperatura de γ'	-	-	Co
Formadores de precipitados e/ou intermetálicos	Al, Ti, Nb	Al, Mo, Ti, W, Ta	Al, Ti, Nb
Resistência à oxidação	Cr	Al, Cr	Al, Cr, Y, La, Ce
Resistência à corrosão a quente	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Resistência à sulfuração	Cr	Cr	Cr, Co, Si
Resistência à fluência	B	-	B, Ta
Resistência à ruptura	B	B, Zr	B
Refinadores de grão	-	-	B, C, Zr, Hf
Trabalhabilidade	-	Ni ₃ Ti	-

Os principais problemas na usinagem das superligas de níquel são, segundo Machado e Da Silva (2004):

Possuem matrizes austeníticas que promovem rápido encruamento durante a usinagem;

Alta resistência a altas temperaturas, dificultando a formação do cavaco;

Tendência do material reagir com alguns dos materiais das ferramentas, sob certas condições atmosféricas;

Aderência do material da peça nas superfícies da ferramenta, comprometendo o acabamento da superfície usinada e a vida desta;

O desgaste das ferramentas de corte é agravado pela presença de carbonetos duros na matriz austenítica da liga;

Baixa condutividade térmica agravando a variável temperatura durante o processo de corte, quando comparado aos aços por exemplo.

Richards e Aspinwall (1989) citam que, por suas características as superligas a base de níquel provocam temperaturas superiores a 1000 °C e tensões maiores que 3,450 GPa na região de corte durante a usinagem, o que desencadeia acelerados desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe, dependendo do material da ferramenta e das condições de corte usadas, como no caso da usinagem de superligas a base de níquel.

A presença de carbonetos duros na matriz austenítica das superligas a base de níquel, acelera o desgaste das ferramentas de corte. Na Figura 2.17 podem ser vistos a distribuição de carbonetos $M_{23}C_6$ e MC na matriz de uma liga Waspaloy®.

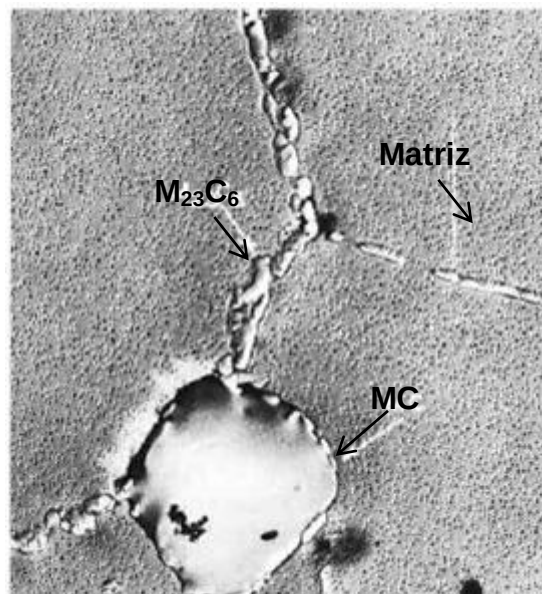


Figura 2.17 – Distribuição de carbonetos $M_{23}C_6$ e MC na matriz da superliga Waspaloy (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1997)

2.4 Fatores que afetam o Desenvolvimento do Desgaste em Ferramentas de Corte

Childs e outros (2001) apresentam um estudo da variação do desgaste de entalhe em função do aumento da temperatura medida, para o torneamento da liga Inconel® 718 com ferramenta Al_2O_3/TiC com profundidade de corte de

0.5 mm – Figura 2.18. Ainda segundo os autores, os maiores valores de entalhe foram obtidos em temperaturas em torno de 1050 °C, o aumento da temperatura (em velocidades de corte superiores) implicou na diminuição do desgaste de entalhe, sugerindo que este tipo de desgaste ocorra preferencialmente até a temperatura citada anteriormente.

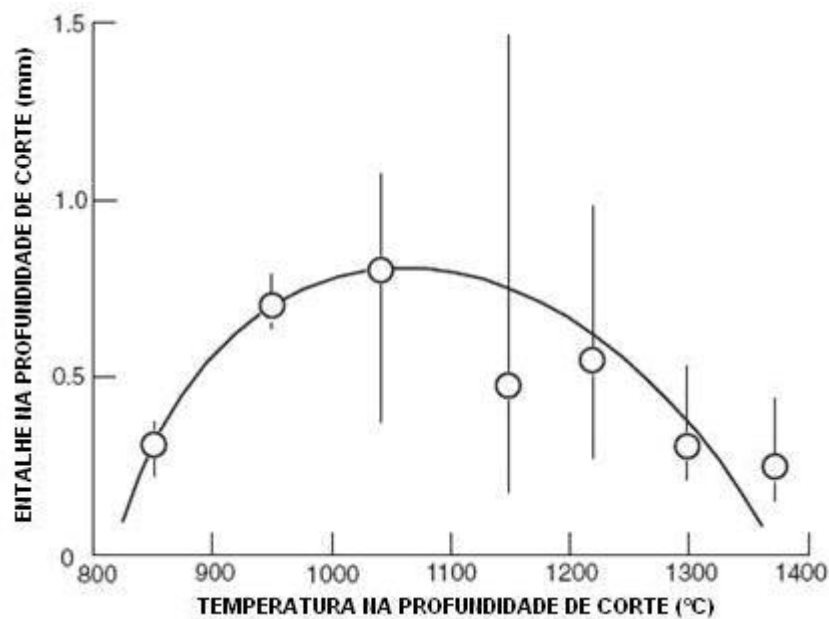


Figura 2.18 – Variação do desgaste de entalhe em função do aumento da temperatura, para torneamento da liga Inconel[®] 718 com ferramenta Al₂O₃/TiC (adaptado de CHILDS *et al.*, 2001)

Das variáveis que afetam o desempenho do processo de usinagem, o material da ferramenta de corte é a mais crítica. Jun e outros (1997) e Thangaraj e Weinmann (1992) afirmam que na maior parte, os principais parâmetros que contribuem para um melhor desempenho do processo são:

- Seleção do material da ferramenta;
- Geometria da ferramenta;
- Método de usinagem (torneamento, fresamento, furação, etc.);
- Velocidade de corte;
- Avanço;
- Profundidade de corte;

Em seus experimentos usinando ligas de níquel com cerâmicas reforçadas com whiskers, Richards e Aspinwall (1989) obtiveram resultados satisfatórios com velocidades de corte da ordem de 750 m/min.

Na predominância do desgaste de entalhe outro fator que pode atenuar sua influência é o ângulo de posição. Nesse caso passa-se a usar pequeno ângulo de posição ($\chi_R = 45^\circ$, por exemplo) associado a um ângulo de saída negativo (KÖNIG; GERSCHWILER, 1999). Aparentemente ângulos de posição pequenos demonstram serem favoráveis às operações de torneamento com cerâmicas, devido a maior distribuição das forças de corte sobre a aresta.

As formas e os mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte na usinagem das superligas de níquel são complexos, principalmente em ferramentas cerâmicas. Destacam-se a difusão, abrasão na superfície de folga, adesão na superfície de saída, desgaste de cratera e desgaste de entalhe na aresta principal e na aresta lateral (WAYN; BULJAN, 1990).

As ligas de níquel têm afinidade química com diversos materiais de ferramentas e formam uma camada de aderência que leva ao desgaste por difusão e por *attrition*. Em geral, a baixas velocidades de corte e na altura da profundidade o desgaste de entalhe torna-se o principal motivo de rejeição das ferramentas na usinagem das ligas de níquel, mas em compensação em altas velocidades de corte o desgaste de flanco se torna mais crítico (JUN *et al.*, 1997). Soma-se a isso ainda a deformação plástica da aresta de corte devido as altas tensões desenvolvidas, nas ferramentas de metal duro.

Na usinagem de superligas a base de níquel, Ezugwu e outros (1999) comprovaram que a forma e a geometria das ferramentas influenciam na determinação da vida das ferramentas de corte e no acabamento das superfícies usinadas. Ferramentas com formato losangular não apresentam bom desempenho na usinagem de superligas, mas com os formatos quadrado e redondo proporcionam melhor desempenho, assim como acabamento superficial melhor. O ângulo de ponta da ferramenta é responsável por isto.

2.5 Ferramentas de Corte

De acordo com ASM METALS HANDBOOK V.5 (2004) diversos materiais podem ser empregados na fabricação de ferramentas de corte para a usinagem em geral, conforme mostra a Figura 2.19. Segundo Machado e outros (2009) o metal duro das classes ISO K10 a K40 foram considerados por algum tempo como os melhores materiais para o corte das ligas de níquel. Hoje esses materiais receberam designações específicas (S10-S40), conforme ISO 513 (2004).

Atualmente as cerâmicas da família dos SiAlONs ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) e as aluminas reforçadas com *Whiskers* ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), além das cerâmicas pretas ou mistas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) incrementaram a taxa de remoção de material na usinagem específica das superligas a base de níquel.

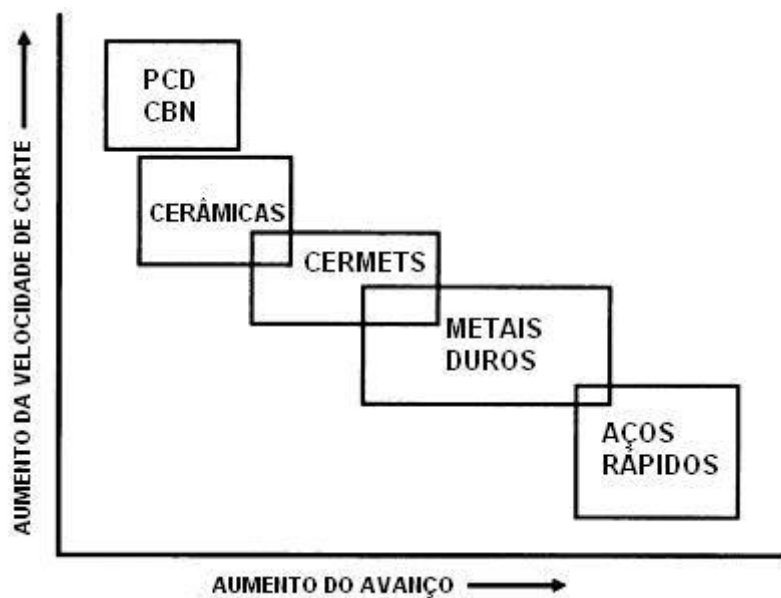


Figura 2.19 – Indicações para aplicação de materiais de ferramentas de corte (adaptado de ASM METALS HANDBOOK V.5, 2004)

Conforme ASM METALS HANDBOOK V.16 (2004) para cada tipo de material de ferramenta existe corresponder uma geometria apropriada, associado a isso encontram-se as variáveis de corte envolvidas no processamento das superligas. Todos esses fatores atuando em conjunto determinam a vida da ferramenta.

No processo de torneamento das superligas, os fenômenos de desgaste se sobressaem às avarias (MACHADO *et al.* 2009), embora não se possam descartar estas últimas sob certas condições.

Conforme Choudhury e El-Baradie (1998), superligas a base de níquel são normalmente usinadas utilizando ferramentas de metal duro com velocidades de corte na ordem de 50 m/min. Com a introdução das ferramentas SiAlON foi possível aumentar essa velocidade em cinco vezes, e mais recentemente com ferramentas a base de alumina reforçada com *Whiskers* o aumento alcança dez vezes as velocidades utilizadas para o metal duro (CHILDS *et al.*, 2001).

A Figura 2.20 apresenta uma estimativa global do uso de materiais em ferramentas de corte no ano de 2005, onde pode ser visto que os metais duros revestidos (PVD e CVD) ocupam a maior fatia do mercado com aproximadamente 53%.

A fatia ocupada pelos metais duros sem revestimento ainda é considerável (17%), mas a tendência para esse tipo de material em ferramentas de corte é de queda nos próximos anos, segundo pesquisas.

As cerâmicas a base de Al_2O_3 ficam com 4% do mercado, o mesmo que as cerâmicas a base de Si_3N_4 , totalizando juntas algo em torno de 8% do mercado global de materiais para ferramentas de corte. Conclui-se que com o passar do tempo as cerâmicas a base de Al_2O_3 e a base de Si_3N_4 , passem a ocupar espaços hoje atendidos pelos metais duros.

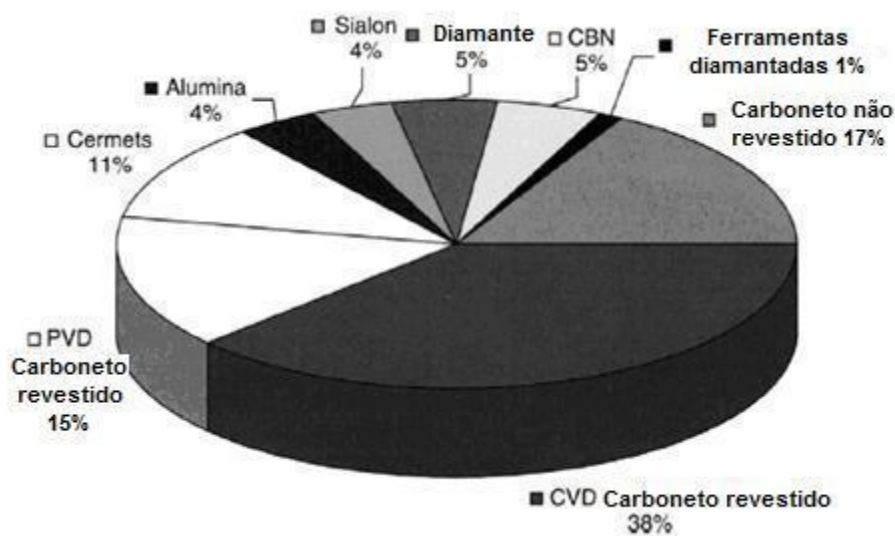


Figura 2.20 – Estimativa global de uso de materiais em ferramentas de corte no ano de 2005 (adaptado de GRZESIK, 2008)

2.5.1 Ferramentas para Usinagem de Superligas

Childs e outros (2001) apresentam os graus de interação química e de adesão entre diversos sistemas ferramenta-peça na usinagem de superligas – Tabela 2.4.

Os metais duros (WC/Co) apresentam baixa interação química e adesiva com as ligas resistentes ao calor, assim como as cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$). No entanto, as cerâmicas reforçadas com Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) tem afinidade moderada com essas ligas, assim como as cerâmicas SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$).

Tabela 2.4 – Interação química e adesiva entre sistemas ferramenta-peça
(adaptado de CHILDS *et al.*, 2001)

Materiais de ferramenta	Interações com		
	Ni-Cr ligas resistentes a altas temperaturas	Aços-carbono	Ligas de Ti
Carboneto WC/Co	fraca	forte	moderada
Carboneto WC/Co-TiC-TaC	fraca	moderada	muito forte
Cermet TiCN/Ni-Co	moderada	fraca	muito forte
Cerâmica Al ₂ O ₃	fraca	nenhuma	muito forte
Cerâmica Al ₂ O ₃ /TiC	fraca	nenhuma	muito forte
Cerâmica Al ₂ O ₃ /SiC	fraca/moderada	moderada	muito forte
Cerâmicas a base Si ₃ N ₄	fraca/moderada	forte	muito forte
PCBN	nenhuma	fraca	moderada
PCD	moderada	moderada	moderada

2.5.1.1 Metal Duro

O metal duro constitui um dos mais importantes grupos de materiais para ferramentas de corte existente. Foi criado na Alemanha a partir da metalurgia do pó de WC e do Co. Posteriormente foi adicionado de TiC, TaC, NbC para amenizar o problema de craterização das ferramentas. Admitem revestimentos o que aumenta ainda mais o desempenho destes materiais. Possuem indicações para utilização na usinagem de quase todos os materiais conhecidos (MACHADO *et al.*, 2009).

Inicialmente os metais duros apresentavam duas fases ver Figura 2.21. A primeira conhecida como fase α referia-se ao WC e uma segunda fase designada como β composta por Co ou Ni, servindo como material ligante. Devido à afinidade do carbono com estes constituintes, durante a usinagem dos aços, havia acelerada craterização das ferramentas, diminuindo drasticamente a vida destas (GRZESIK, 2008).

Com a introdução da fase γ composta por TiC, TaC e NbC o problema de craterização foi reduzido.

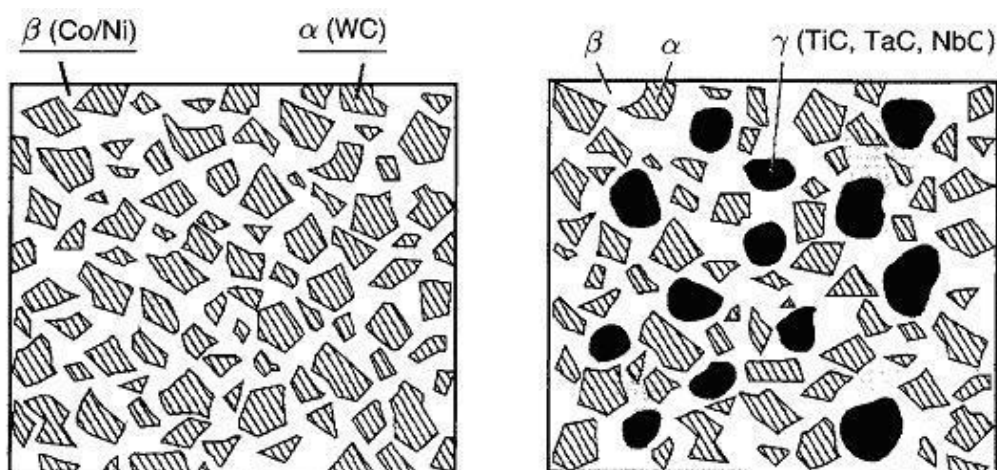


Figura 2.21 – Fases presentes em metais duros sinterizados (GRZESIK, 2008)

Outro fator com grande influência sobre as propriedades dos metais duros é a relação entre os teores de WC e Co na matriz. A Figura 2.22 mostra a relação dessa influência sobre as propriedades das ferramentas, onde:

Hv → Dureza;

Cs → Resistência à compressão;

Be → Resistência à flexão;

Trs → Resistência à ruptura transversal;

Imp → Resistência ao choque;

E → Módulo de Young.

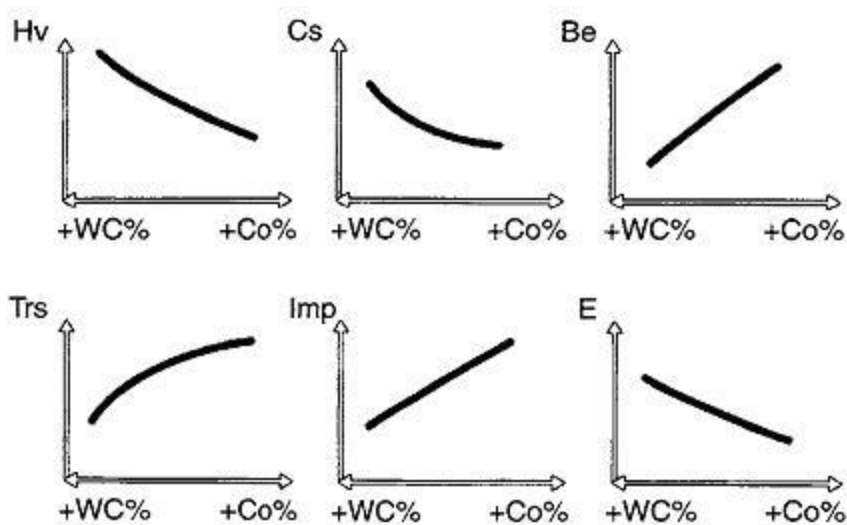


Figura 2.22 – Influência dos teores de WC e Co sobre as propriedades dos metais duros (GRZESIK, 2008)

2.5.1.2 Cerâmicas

As cerâmicas podem ser puras, ou seja, constituídas basicamente por Al_2O_3 e Si_3N_4 ou com adições. As cerâmicas puras são pouco utilizadas como ferramentas de corte, devido à sua baixa tenacidade (GRZESIK, 2008).

Quando a matriz de Al_2O_3 recebe adições de outros elementos, tais como ZrO_2 , TiC e SiC passa a ter maior tolerância a choques mecânicos e térmicos. Pode-se ter também cerâmicas a base de Si_3N_4 conforme dito anteriormente (GRZESIK, 2008).

A adição de zircônia (ZrO_2) à cerâmica a base de Al_2O_3 melhora muito a sua tenacidade e produz uma ferramenta conhecida como cerâmica branca. A cerâmica com adição de TiC , também chamada cerâmica preta ou mista, possui boa tenacidade e condutividade térmica, além de aliar dureza e resistência ao desgaste (KENNAMETAL, 2007). Esse tipo de cerâmica apresenta bons resultados no torneamento dos aços laminados.

A cerâmica a base de Si_3N_4 , possui uma fase intergranular de SiO_2 sinterizada na presença de Al_2O_3 , MgO e outros. Quando estas ferramentas recebem adições consideráveis de Al_2O_3 (acima de 10%), elas são denominadas de SiALON, indicando os elementos químicos presentes na sua base. Estas ferramentas apresentam excelentes resultados na usinagem de ligas de níquel e ferros fundidos, mas não são indicados para usinagem dos aços.

Outra ferramenta que tem mostrado bons resultados na usinagem das superligas de níquel é a cerâmica a base de Al_2O_3 com adição de SiC . Também é conhecida como cerâmica com adição de *Whiskers* ou reforçada com *Whiskers*. O SiC é adicionado ao Al_2O_3 até 20% na forma de cilindros com 0,5 μm a 6 μm de diâmetro por 10 μm a 80 μm de comprimento (KENNAMETAL, 2006).

Esse tipo de cerâmica apresenta boa tenacidade e grande resistência ao choque térmico, sendo também indicadas para usinagem de aços endurecidos e inoxidáveis, além das superligas a base de níquel.

A Figura 2.23 apresenta uma comparação entre as propriedades de diversos materiais cerâmicos utilizados em ferramentas de corte, onde:

T → Tenacidade;

HV → Dureza Vickers;

TSR → Resistência ao choque térmico;

CS_{Fe} → Estabilidade química ao ferro

CS_{Ni} → Estabilidade química ao níquel.

	Cerâmica branca	Cerâmica Mista	Cerâmica Whisker	Cerâmica Si ₃ N ₄
T				
HV				
TSR				
CS _{Fe}				
CS _{Ni}				

* Aços (pouco estável)

Figura 2.23 – Comparação entre as propriedades de materiais cerâmicos utilizados em ferramentas de corte (adaptado de GRZESIK, 2008)

2.5.1.3 Ultraduras

As ferramentas chamadas ultraduras são aquelas compostas por materiais cuja dureza ultrapassa 3000 HV (MACHADO *et al.*, 2009), podendo-se citar os seguintes materiais:

Diamante natural;

Diamante sintético monocristalino;

Diamante sintético policristalino (PCD);

Nitreto cúbico de boro sintético monocristalino (CBN);

Nitreto cúbico de boro sintético policristalino (PCBN)

Os materiais mais utilizados em ferramentas ultraduras são o diamante sintético policristalino (PCD) – Figura 2.24, e o nitreto cúbico de boro sintético policristalino (PCBN). Apesar de possuírem alta dureza, os diamantes sintéticos quando utilizados em ferramentas de corte apresentam o

inconveniente de não resistirem a temperaturas que ultrapassem 780 °C, iniciando um processo de desintegração do diamante em grafite, o que inviabiliza a sua aplicação no corte de materiais ferrosos como o aço. O alumínio e suas ligas e o cobre e suas ligas podem ser usinados com grande produtividade e excelente acabamento. Os nitretos cúbicos de boro sintéticos podem ser usados com excelentes resultados no corte de materiais ferrosos como aços e ferros fundidos, além de ligas de titânio e de níquel. Um grande inconveniente das ferramentas ultraduras é o custo elevado, o que pode tornar inviável sua aplicação e alguns casos (GRZESIK, 2008).



Figura 2.24 – Formatos de insertos ultraduros em PCD (GRZESIK, 2008)

2.5.2 Revestimentos em Ferramentas para Usinagem de Superligas

A utilização de revestimentos em ferramentas de corte ganhou importância nos últimos dez anos, devido à melhoria de desempenho proporcionados pelos mesmos, tanto na usinagem de materiais ferrosos como não ferrosos, além de ligas e compósitos (ASTAKHOV, 2006).

Estima-se que 50% das ferramentas em HSS, 86% dos metais duros e 40% das ultraduras utilizadas na indústria sejam revestidas com algum tipo de material em camada única ou em multicamadas (KLOCKE; KRIEG, 1999).

Entre os materiais mais utilizados em revestimentos de ferramentas de corte, destacam-se TiC, TiCN, TiN, Al₂O₃ e TiAlN.

Na Figura 2.25 são apresentadas faixas de dureza de revestimentos utilizados em ferramentas de corte.

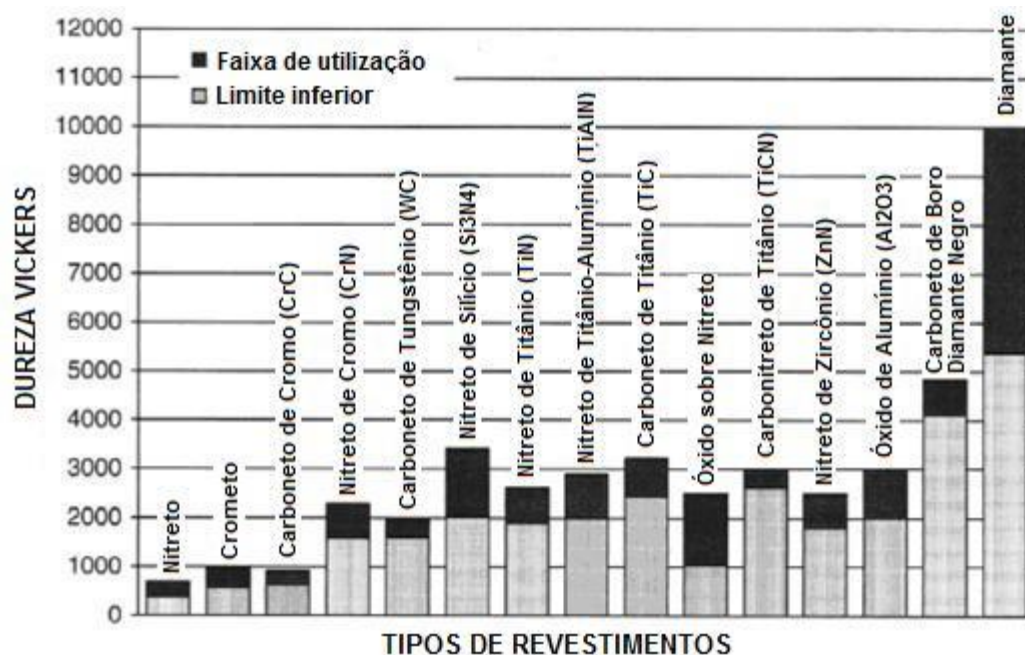


Figura 2.25 – Comparação entre as durezas de revestimentos utilizados em ferramentas de corte (adaptado de GRZESIK, 2008)

Também se deve citar os revestimentos a base de AlCrN (Hélica e Alcrona) muito utilizadas em ferramentas para o corte de materiais ferrosos (MACHADO *et al.*, 2009).

2.6 Planejamento de Experimentos

2.6.1 Introdução ao Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos é uma ferramenta estatística importante, utilizada quando se deseja analisar grande quantidade de informações.

Na atividade estatística, a análise dos dados não constitui o fator mais importante, mas sim o planejamento como esses dados devem ser obtidos. Se o planejamento não for feito de forma adequada, as informações não serão confiáveis, das quais se poderá tirar quaisquer conclusões (BRUNS *et al.*, 2006).

A essência de um bom planejamento de experimentos está na forma de como este é capaz de fornecer as informações que se procura, sendo importante antes de tudo saber exatamente o que se procura (ANTONY, 2003).

Várias técnicas podem ser utilizadas no planejamento de experimentos, sendo algumas mais vantajosas do que outras. em certas circunstâncias. Podem ser citados o planejamento fatorial completo, planejamento fatorial 2^k , planejamento composto central e superfícies de resposta entre outros (MONTGOMERY, 2001).

2.6.2 Planejamento Fatorial Completo

É utilizado quando, após a seleção dos fatores de interesse na pesquisa, procede-se à avaliação quantitativa de suas influências sobre a variável de resposta, assim como as interações de uns fatores com os outros (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

O planejamento fatorial completo é a técnica que realiza essa tarefa com o menor número de experimentos possíveis. Os fatores ou variáveis independentes são combinadas em seus diversos níveis, dando origem ao planejamento fatorial completo.

Em geral se tem duas ou mais variáveis independentes, em dois ou mais níveis. O aumento do número de níveis acarreta sobremaneira o número de pontos experimentais necessários, o que algumas vezes pode inviabilizar o experimento. O usual é realizar um planejamento com dois níveis ou no máximo três níveis, tendo-se então:

Planejamento fatorial em dois níveis $\rightarrow 2^k$

Planejamento fatorial em três níveis $\rightarrow 3^k$

Onde os números 2 e 3 significam a quantidade de níveis e k o número de fatores ou variáveis independentes.

Como exemplo um planejamento fatorial 2^5 corresponde à realização de 32 pontos experimentais, sendo cinco variáveis independentes variadas em dois níveis cada.

2.6.3 Planejamento Fatorial 2^k

O planejamento fatorial 2^k é um tipo de planejamento em que k fatores são analisados em 2 níveis. Por exemplo, tendo-se 4 variáveis independentes em 2 níveis, resultarão 16 experimentos a serem realizados.

O planejamento fatorial 2^k é bastante aplicado em estágios iniciais da pesquisa, quando se tem muitas variáveis a investigar sem, no entanto, ter-se a certeza de quais fatores influenciam mais os resultados.

Esse tipo de planejamento fornece o menor número de experimentos com os quais os k fatores podem ser estudados em um planejamento fatorial completo (DEAN; VOSS, 1999).

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para a realização do trabalho, detalhando o processo, os materiais e os equipamentos necessários à pesquisa. É destacado o método experimental adotado, no tocante ao planejamento de experimentos utilizado na condução dos ensaios.

A estratégia adotada foi considerar diversas variáveis, tais como: velocidade de corte, atmosfera envolvente, material e geometria da ferramenta. A variação destes parâmetros permitiu estudar a influência dos mesmos no comportamento da vida e do desgaste das ferramentas. O fluxograma da Figura 3.1 destaca todos os ensaios realizados.

3.1 Materiais

3.1.1 Equipamentos Utilizados

Os ensaios de torneamento foram realizados em um torno CNC da marca ROMI modelo Multiplic 35D com 11 kW (15 cv) de potência no motor do eixo-árvore e faixa de rotação de 100-3000 rpm, conforme mostra a Figura 3.2.

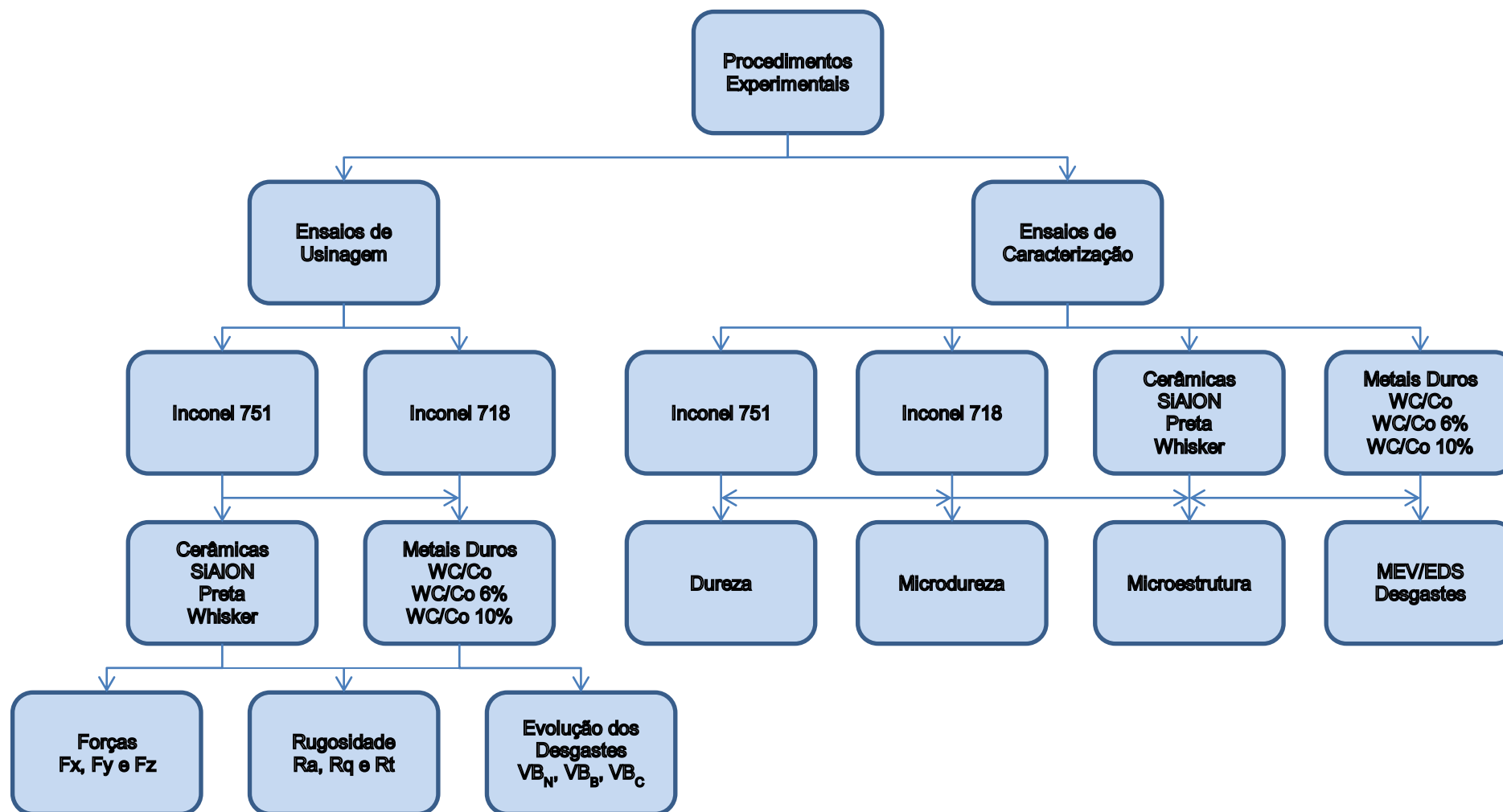


Figura 3.1 – Fluxograma dos testes experimentais de vida e análise de desgaste



Figura 3.2 – Torno CNC utilizado nos experimentos

As análises por microscopia óptica utilizaram um estereomicroscópio de marca OLYMPUS modelo SZ6145TR com câmera e software analisador de imagens Image-Pró Express v5.1 produzido pela empresa Media Cybernetics Inc. com calibração de ampliação para 45x, conforme Figura 3.3.



Figura 3.3 - Estereomicroscópio utilizado para medição dos desgastes das ferramentas

A rugosidade superficial foi medida utilizando-se um rugosímetro portátil da marca MITUTOYO modelo SJ-201, regulado para o comprimento de amostragem de 0,8 mm e medição dos parâmetros Ra, Rq e Rt. A medição da rugosidade superficial foi realizada na peça montada na máquina-ferramenta, como mostrado na Figura 3.4.

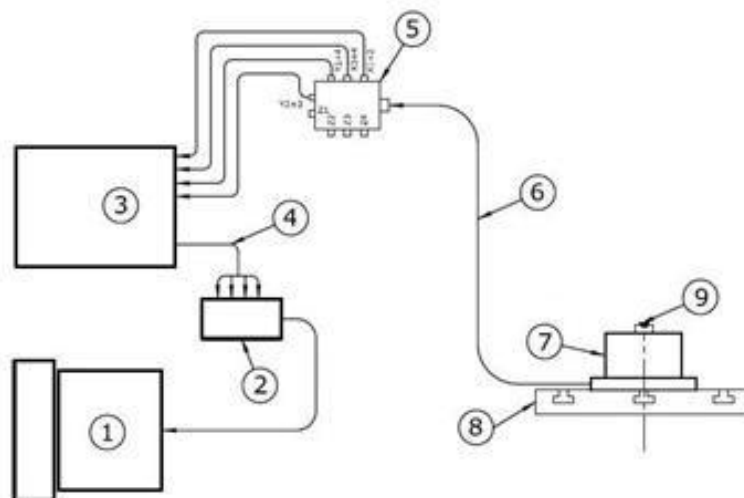


Figura 3.4 – Medição da rugosidade superficial na peça montada

Para caracterização do material foram feitos ensaios de macro e microdureza. As medições de macrodureza utilizaram um durômetro universal da marca WOLPERT com carga de 150 kgf aplicada durante 30 segundos usando a escala HRC.

Os valores medidos de microdureza foram obtidos utilizando um microdurômetro da marca SHIMATSU, com carga de 25g aplicadas durante 10 segundos usando a escala μHV .

As componentes de usinagem foram medidas utilizando um dinamômetro da marca KISTLER modelo 9265B. A Figura 3.5 apresenta um esquema simplificado do sistema de aquisição das componentes da força de usinagem (F_x , F_y e F_z) com esse dinamômetro.



- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1 - Computador PC com placa de aquisição | 6 - Cabo da Kistler 1687B5 |
| 2 - Bloco conector BNC-2110 | 7 - Dinamômetro da Kistler 9265B |
| 3 - Amplificador de sinais | 8 – Mesa Transversal do torno CNC |
| 4 - Cabos de conexão RS232 | 9 – Porta-ferramenta do torno |
| 5 - Caixa de distribuição Kistler 5407A | |

Figura 3.5 – Esquema simplificado do sistema de aquisição de forças com dinamômetro (adaptado de KISTLER, 1991)

A taxa de aquisição de dados foi de 5 kHz.

A Tabela 3.1 descreve os principais acessórios utilizados para a medição das forças de corte.

Tabela 3.1 – Principais acessórios para medição das forças de corte com o dinamômetro KISTLER

Equipamentos	Descrição das características técnicas
01 - Computador PC com placa aquisição e LabVIEW	Microcomputador com placa de aquisição de sinais e o programa LabVIEW. Processador AMD K6II, com 64 Mbytes de memória RAM; sistema operacional Microsoft Windows 98 SE; placa de aquisição NI 6035E, resolução 16 bits e taxa de amostragem máxima de 200 KS/s.
02 - Bloco conector BNC-2110	Bloco conector BNC-2110 National Instruments para receber os sinais provenientes do amplificador de carga multicanal e enviá-los para a placa de conversão e aquisição de sinais A/D.
03 - Amplificador de carga* Kistler	Amplificador de carga Kistler 5070A microprocessada com 4 canais para conversão de sinais de carga gerados por transdutores piezoelétricos em tensão proporcional. Todos os parâmetros e funções são ajustados por um <i>menu</i> de navegação através de um botão de controle e 3 (três) teclas, visualização dos mesmos através de display de cristal líquido (128 x 128 <i>pixels</i>), com faixas de medição de 200 a 200.000 pC. Saída de tensão de 10 VDC. Saída de corrente de < 2 mA. Filtros passa-baixa e passa-alta. Com interface RS232C.
(* - Foi utilizado dois amplificadores de carga porque são necessários 5 canais para aquisição de dados, Fx, Fy, Fz e Mz)	Amplificador de carga 5019B microprocessada com 3 canais para conversão de sinais de carga gerados por transdutores piezoelétricos em tensão proporcional. Todos os parâmetros e funções são ajustados através de um teclado alfanumérico frontal e visualização dos mesmos através de display de cristal líquido com 4 linhas e 20 caracteres, com faixas de medição de 10 a 999.000 pC. Ajuste da sensibilidade do sensor de 0,01 a 9.990 pC/unidade e ajuste da escala de 0,0001 a 999.000 unidade/ V (unidade mecânica/ Volts), tensão de saída de 10 VDC. Corrente de saída de 0 a 5mA.
04 - Cabos de conexão RS232	Cabo de conexão RS232 com 2 metros de comprimento. Para conexão entre o amplificador de carga multicanal da Kistler 5070A e o bloco conector BNC-2110.
05 - Caixa de distribuição da Kistler 5407A	Caixa de distribuição da Kistler 5407A com cabo de conexão modelo 1687B5 de 3 condutores, comprimento de 5 metros com proteção metálica flexível.
06 – Cabo da Kistler 1687B5	Cabo de conexão da Kistler modelo 1687B5 com 3 condutores, comprimento de 5 metros com proteção metálica flexível.
07 - Dinamômetro universal da Kistler 9265B	Dinamômetro universal com 3 componentes a cristal de quartzo para medição das 3 componentes ortogonais de uma força (Fx, Fy, Fz). Faixas de Medição com placa de fixação: ± 15 kN para Fx, Fy/ -10 a 30 kN para Fz. Sensibilidade: -8 pC/N para Fx, Fy / -3,7 pC/N para Fz. Frequência Natural: 1,5 kHz para Fx, Fy/ 2,5 kHz para Fz. Temperatura de operação: 0 a 70°C. Dimensões: 175 x 100 x 126 mm. Peso: 20 kg.
08 - Carro	Carro transversal do torno.
09 – Porta-ferramenta	Porta-ferramenta montado sobre o dinamômetro.

3.1.2 Insertos

Os insertos utilizados nesta pesquisa foram fabricados pela Kennametal Inc. Eles foram especificados seguindo recomendações do catálogo do fabricante, em conjunto com a literatura especializada (KENNAMETAL, 2007).

As classes dos insertos e as variáveis de corte, tais como a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f), utilizados durante os testes de usinagem seguiram as recomendações do fabricante.

Foram selecionados os seguintes insertos cerâmicos:

Cerâmica SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) / Classe KY1540;

Cerâmica preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) / Classe KY1615;

Cerâmica whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) / Classe KY4300.

Os insertos de metal duro selecionados foram os descritos a seguir:

Metal duro (WC/Co) sem revestimento / Classe K313;

Metal duro (WC/Co 6%) com revestimento PVD TiAlN / Classe KC5510;

Metal duro (WC/Co 10%) com revestimento PVD TiAlN / Classe KC5525

O formato de todos os insertos foi o quadrado. Os insertos de metal duro possuíam quebra cavacos, enquanto os insertos cerâmicos não. A designação ISO da geometria dos insertos cerâmicos e de metal duro são, respectivamente: SNGN120716T e SNMG120412.

Os materiais cerâmicos, os insertos após limpeza foram recobertos com uma fina camada de uma liga ouro-paládio (Au-Pd) para a realização das análises.

A Figura 3.6 mostra os insertos utilizados nos ensaios.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.6 – Insertos utilizados: (a) Cerâmica SiAlON, (b) cerâmica preta, (c) cerâmica whisker, (d) metal duro sem revestimento, (e) metal duro com 6% Co com revestimento PVD TiAlN e (f) metal duro com 10% Co com revestimento PVD TiAlN

3.1.3 Suportes

A empresa KENNAMETAL Inc. também forneceu os suportes para os ensaios.

Assim como os insertos, os suportes também seguiram as recomendações do fabricante para usinagem das ligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718 em conjunto com a literatura específica da área (KENNAMETAL, 2007). As designações ISO dos suportes são respectivamente: CSSNR2525M12-MN7 (GC1) e CSXNR2525M12-MN4 (GC2).

As Figuras 3.7 e 3.8 mostram os suportes utilizados, tanto para as ferramentas cerâmicas quanto de metal duro.



Figura 3.7 – Suporte para a primeira geometria de corte (GC1)



Figura 3.8 – Suporte para a segunda geometria de corte (GC2)

Os conjuntos de insertos e suportes definiram as seguintes geometrias de corte, designadas como GC1 (primeira geometria de corte) e GC2 (segunda geometria de corte). A Tabela 3.2 ilustra as geometrias resultantes da interação. O principal fator da geometria a ser observado foi o ângulo de posição principal χ_r .

Tabela 3.2 – Geometrias de corte resultantes

Ângulo	Geometria	
	GC1	GC2
Ângulo de posição principal (χ_r)	45°	85°
Ângulo de posição secundário (χ'_r):	45°	5°
Ângulo de folga principal (α_o):	8°	6°
Ângulo de cunha (β_o)	90°	90°
Ângulo de saída (γ_o)	-8°	-6°
Ângulo da ponta (ε_r)	90°	90°
Ângulo de inclinação (λ_s)	0°	-6°

3.1.4 Informações de Corte Complementares

Outros dados de corte foram também selecionados segundo dados do fabricante das ferramentas em conjunto com a literatura especializada (KENNAMETAL, 2007).

Os insertos cerâmicos possuíam raio da ponta de 1,6 mm, enquanto que para os insertos de metal duro, o raio foi 1,2mm.

A profundidade de corte (a_p) selecionada foi igual a 2mm.

O porta-suporte utilizado foi do tipo *gang tools* (montado diretamente no carro transversal da máquina), para maior rigidez do conjunto sobre a mesa do torno.

3.1.5 Atmosferas Envolventes

Nos testes com ferramentas de metal duro e cerâmicas foi utilizado a condição atmosférica normal, isto é, sem fluido de corte.

Além desta, foram feitos testes com atmosferas controladas tanto na usinagem com ferramentas de metal duro, como com ferramentas cerâmicas.

Para criação da atmosfera envolvente rica em oxigênio na região de corte foi utilizado o gás O_2 acondicionado em cilindro sob alta pressão com grau de pureza de 99,5%, conforme a Figura 3.9.



Figura 3.9 – O_2 para criação de atmosfera oxidante

A atmosfera inerte foi obtida com a injeção de argônio na região de corte. O gás utilizado também estava acondicionado em cilindro, como apresenta a Figura 3.10.



Figura 3.10 – Argônio utilizado para criação de atmosfera inerte

A aplicação dos gases na ponta dos insertos foi realizada utilizando um bico injetor de gás com capacidade volumétrica máxima de 25 l/min. A Figura 3.11 mostra a montagem do sistema de injeção dos gases O_2 e Ar utilizados durante os ensaios. A distância entre o bico de aplicação dos gases e a região de corte foi de 10mm.

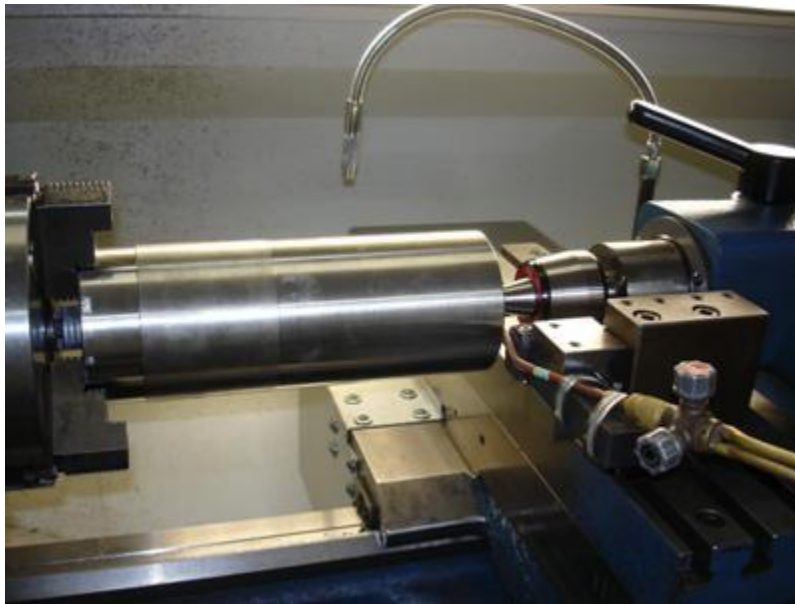


Figura 3.11 – Montagem do sistema de injeção dos gases durante os experimentos

A Figura 3.12 mostra em detalhe o bico injetor na aresta de corte principal de um inserto cerâmico.

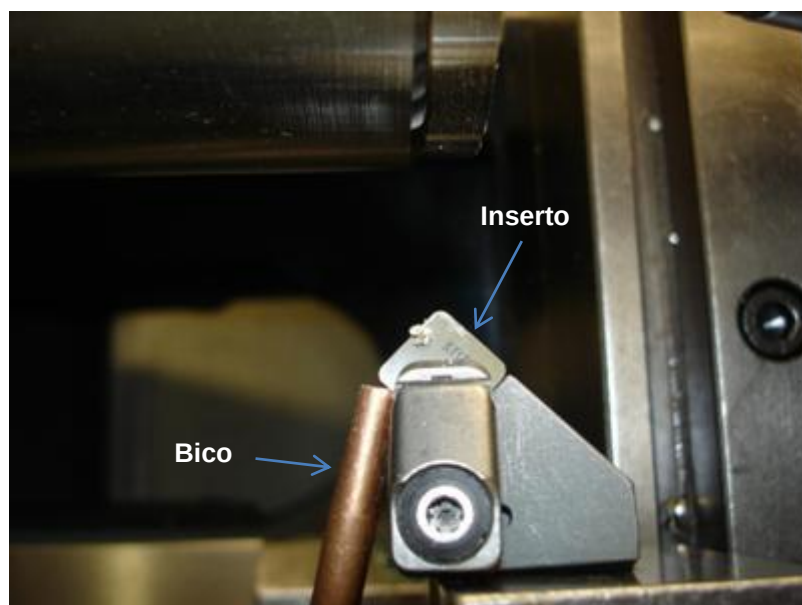


Figura 3.12 – Montagem do bico injetor dos gases na aresta de corte principal dos insertos

3.1.6 Caracterização dos Materiais Ensaitados

A ligas a base de níquel utilizadas nos ensaios foram, Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718 fornecidas pela empresa VILLARES METALS S.A. sob a designação comercial VAT[®] 751 e VAT[®] 718, respectivamente. O formato escolhido foi o redondo, apropriado para operações de torneamento, com as dimensões 105mm x 250mm para a Inconel[®] 751 e 50mm x 300mm para a Inconel[®] 718, produzidas por laminação à quente e posteriormente recozidas. Foram utilizadas 06 (seis) barras Inconel[®] 751 e 01 (uma) barra Inconel[®] 718 para a realização do trabalho. As ligas a base de níquel Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718 foram selecionadas para os ensaios de evolução de desgaste por terem grande utilização nas indústrias aeronáutica, marítima, química e automobilística, especificamente em componentes que trabalham a altas temperaturas e requerem grande resistência mecânica, sujeitas à fadiga, corrosão e tensões residuais elevadas (VILLARES METALS, 2008).

A preparação dos corpos de prova consistiu nas operações de faceamento e furação de centro para fixação entre placa e ponta no torno, conforme mostra a Figura 3.13.



Figura 3.13 – Fixação das barras entre placa e ponta para os ensaios de torneamento longitudinal

As composições químicas, fornecidas pelo fabricante das ligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718 são mostradas nas Tabelas 3.3 e 3.4 respectivamente.

Tabela 3.3 – Composição química da liga Inconel[®] 751 (VILLARES METALS, 2008)

Elemento	% em peso
Níquel	71,12
Cromo	16,70
Ferro	6,97
Titânio	2,34
Alumínio	1,33
Nióbio	0,88
Manganês	0,27
Silício	0,13
Molibdênio	0,08
Carbono	0,06
Cobre	0,04
Cobalto	0,04
Tungstênio	0,02
Vanádio	0,01
Enxofre	0,001
Fósforo	0,001

Tabela 3.4 – Composição química da liga Inconel® 718 (VILLARES METALS, 2008)

Elemento	% em peso
Níquel	52,00
Cromo	19,00
Ferro	18,00
Nióbio	4,75
Molibdênio	3,00
Titânio	1,15
Cobalto	0,40
Alumínio	0,30
Manganês	0,27
Cobre	0,20
Silício	0,15
Carbono	0,05
Boro	0,004
Enxofre	0,001
Fósforo	0,001

A dureza média apresentada pelo Inconel® 751 foi de 30 HRC e do Inconel® 718 foi 33 HRC, tendo sido determinadas no Laboratório de Materiais da FEMEC / UFU, assim como as análises microestruturais das ligas.

A Figura 3.14 apresenta o procedimento para retirada dos corpos de prova para a determinação da dureza, microdureza e análise microestrutural das ligas Inconel® 751 e Inconel® 718. As dimensões das amostras para confecção dos corpos de prova foram de 105mm x 10mm e 50mm x 10mm, respectivamente.

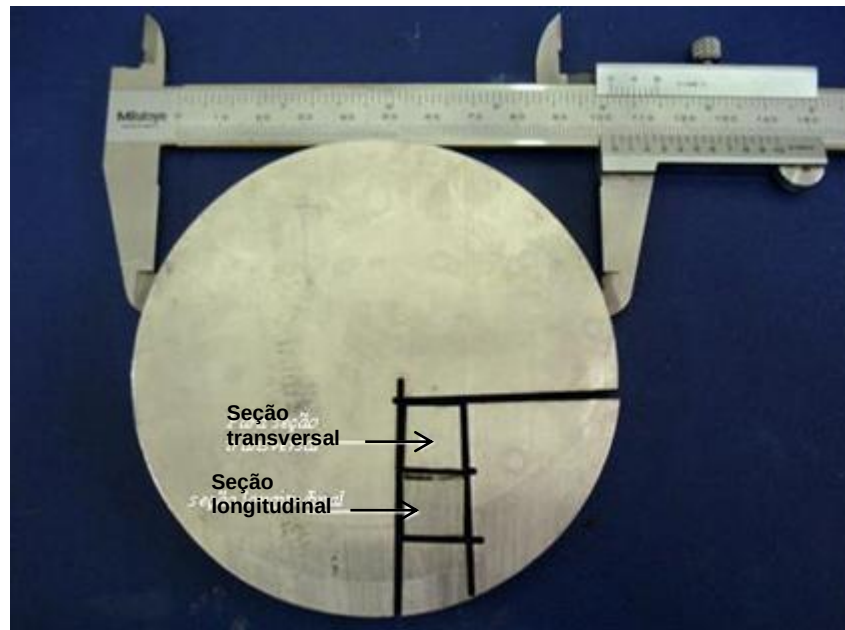


Figura 3.14 – Seção transversal para retirada dos corpos de prova nas análises de dureza, microdureza e análise microestrutural das ligas

3.2 Métodos

Para a condução dos ensaios foram realizados pré-testes com a finalidade de ajustar as variáveis:

v_c → Velocidade de corte (m/min);

GC → Geometria de corte (vide Item 3.1.3);

AE → Atmosfera envolvente (vide Item 3.1.5);

MI → Material do inserto (vide Item 3.1.2).

A variável de entrada AE Normal, se refere à atmosfera ambiente em condições normais.

A variável de saída selecionada para acompanhamento dos desgastes identificados durante os testes foi o tempo de vida (t) medido em segundos (s).

Para a investigação da evolução do desgaste no tempo, foram criados dois blocos de ensaios:

Insertos cerâmicos;

Insertos de metal duro.

A Tabela 3.5 apresenta os valores assumidos pela variável v_c para os insetos cerâmicos e de metal duro, definidos após os pre-testes.

Tabela 3.5 – Velocidades de corte selecionadas

Material do inserto	v_c1	v_c2
Cerâmica	150 m/min	300 m/min
Metal duro	45 m/min	60 m/min

Os valores testados foram selecionados de acordo com as recomendações do fabricante das ferramentas e a literatura específica da área de usinagem (KENNAMETAL, 2007). Foi testada a v_c de 30 m/min nos insertos de metal duro inicialmente, mas não houve evolução de nenhuma forma de desgaste considerável num tempo total de 960 s (16 minutos), sendo portanto descartada sua utilização nos ensaios. Utilizando-se óleo emulsionável a 10% por jorro, nas condições citadas para os metais duros, não foram verificados desgastes num tempo de 1200 s (20 minutos).

As demais variáveis de entrada geometria de corte, atmosfera envolvente e material do inserto, já foram discutidas nos Itens 3.1.3, 3.1.5 e 3.1.2, respectivamente.

As condições de corte que não sofreram alteração durante os ensaios foram:

$a_p \rightarrow$ Profundidade de corte = 2 mm;

$f \rightarrow$ Avanço = 0,2 mm/rot;

3.2.1 Critérios de Fim de Vida

Após a realização da fase de pré-testes e identificados os tipos de desgaste atuantes foram aplicados os seguintes critérios de fim de vida, quanto aos limites de desgastes admissíveis, de acordo com a norma ISO 3685 (2000) e a literatura especializada, conforme a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Critérios de fim de vida das ferramentas para evolução máxima tolerada dos desgastes identificados durante os pré-testes

Tipo de Desgaste	Material do Inserto	
	Cerâmica	Metal Duro
Desgaste de Entalhe (VB_N)	1,00mm	
Desgaste de Flanco Médio (VB_B)	0,40mm	
Desgaste de Flanco Máximo ($VB_{Bmáx}$)	0,60mm	
Desgaste de Ponta (VB_C)	0,60mm	

Foram levadas em conta também as falhas catastróficas como limite de fim de vida das ferramentas.

3.2.2 Esquemas dos Ensaios

Foram montadas matrizes de planejamento de experimentos para os ensaios com os inserts cerâmicos e a liga Inconel[®] 751, utilizando o software STATISTICA 7.0 da empresa StatSoft Inc., seguindo o esquema mostrado na Figura 3.15.

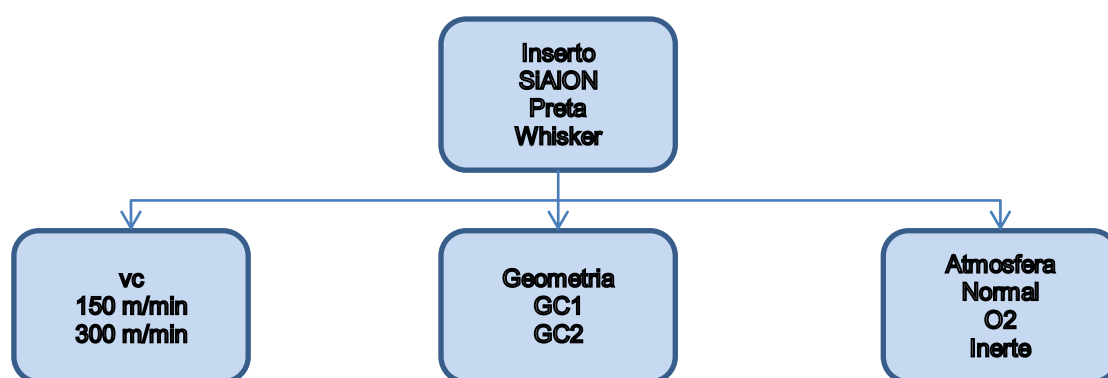


Figura 3.15 – Esquema dos ensaios para inserts cerâmicos e a liga Inconel[®] 751

Igualmente foram aplicadas matrizes de planejamento de experimentos para os insertos de metal duro e a liga Inconel[®] 751, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.16, a seguir.

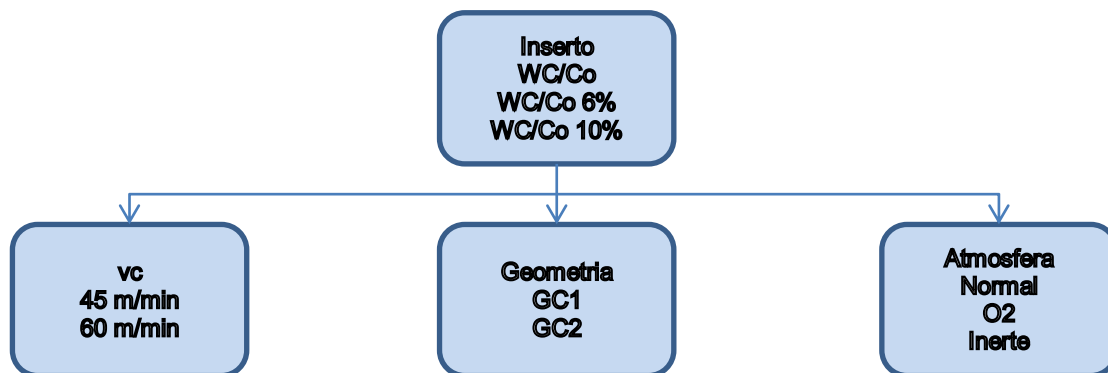


Figura 3.16 – Esquema dos ensaios para insertos de metal duro e a liga Inconel[®] 751

Os ensaios com insertos de metal duro e a liga Inconel[®] 718 seguiram os esquemas apresentados na Figura 3.17.

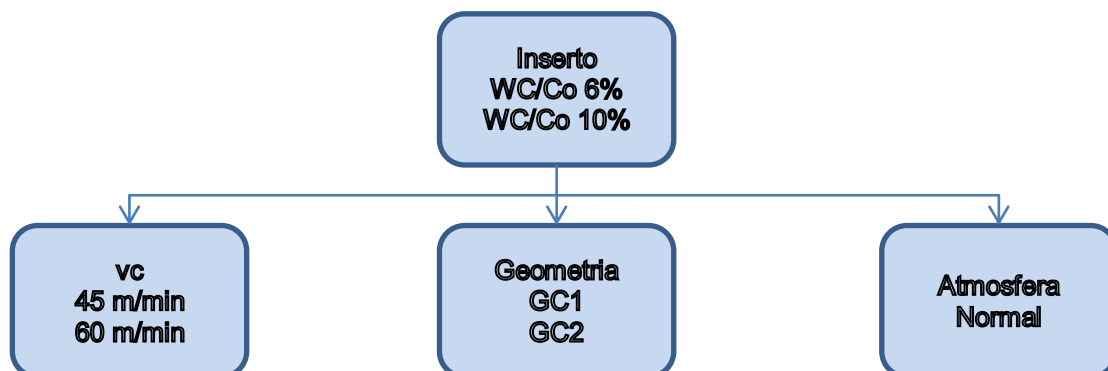


Figura 3.17 – Esquema dos ensaios para insertos de metal duro e a liga Inconel[®] 718

Optou-se por efetuar a comparação de evolução de desgaste dos insertos dentro do mesmo bloco, como já foi mencionado no Item 3.2, dois a dois. Assim sendo essa opção gerou um planejamento fatorial 2^4 com 16 experimentos para cada dupla de materiais.

Foram realizados 36 experimentos para os insertos cerâmicos e 36 experimentos para os insertos de metal duro, totalizando 72 experimentos de evolução de desgaste com a liga Inconel[®] 751 e 8 experimentos para os insertos de metal duro com a liga Inconel[®] 718. O menor número de ensaios com a liga Inconel[®] 718 foi em função da pequena quantidade disponível deste material (apenas uma barra).

Não foram realizadas réplicas dos ensaios devido a quantidade de testes e a disponibilidade limitada dos materiais, com elevado custo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As ligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718 foram medidas e analisadas, sendo em seguida usinadas utilizando os esquemas apresentados no Sub-item 3.2.2, foram identificados para cada condição de corte os principais tipos de desgaste presentes. A partir disso procedeu-se o acompanhamento da evolução dos mesmos no tempo, até que fosse atingido o fim de vida das ferramentas utilizando os critérios explicitados no Sub-item 3.2.1.

4.1 Análise das Ligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das medidas de dureza Rockwell C, nas seções transversal e longitudinal dos corpos de prova da liga Inconel[®] 751.

Tabela 4.1 – Resultados das medidas de dureza (HRC) nas seções transversal e longitudinal da liga Inconel[®] 751

Ensaio	Seção Transversal	Seção Longitudinal
1	28,00	29,00
2	27,00	31,00
3	29,00	31,00
4	29,00	31,00
5	29,00	31,00
Média	28,40	30,60
Desvio Padrão	0,89	0,89

Na Tabela 4.2 são mostrados os resultados das medidas de microdureza Vickers 0,025, na matriz da liga e nos carbonetos precipitados do Inconel[®] 751.

Tabela 4.2 – Resultados das medidas de microdureza ($\mu\text{HV}0,025$) matriz x carbonetos da liga Inconel[®] 751

Ensaio	Matriz	Carbonetos
1	778,00	2.092,00
2	660,00	2.010,00
3	660,00	1.238,00
4	646,00	1.609,00
5	707,00	1.935,00
6	778,00	2.011,00
7	724,00	1.934,00
Média	707,57	1.832,71
Desvio Padrão	55,54	304,11

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das medidas de dureza Rockwell C, nas seções transversal e longitudinal dos corpos de prova da liga Inconel[®] 718.

Tabela 4.3 – Resultados das medidas de dureza (HRC) nas seções transversal e longitudinal da liga Inconel[®] 718

Ensaio	Seção Transversal	Seção Longitudinal
1	29,00	33,00
2	31,00	25,00
3	30,00	32,00
4	32,00	34,00
5	33,00	34,00
Média	32,50	33,50
Desvio Padrão	0,75	0,90

Na Tabela 4.4 são mostrados os resultados das medidas de microdureza Vickers 0,025, na matriz da liga e nos carbonetos precipitados do Inconel[®] 718.

Tabela 4.4 – Resultados das medidas de microdureza ($\mu\text{HV0,025}$) matriz x carbonetos da liga Inconel[®] 718

Ensaio	Matriz	Carbonetos
1	605,00	4.034,00
2	646,00	4.524,00
3	605,00	4.526,00
4	646,00	4.526,00
5	660,00	4.802,00
6	605,00	4.803,00
7	605,00	4.525,00
Média	625,00	4.534,00
Desvio Padrão	24,00	256,00

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as micrografias ópticas realizadas nos corpos de prova do Inconel[®] 751 após embutimento, lixamento, polimento com pasta de diamante com granulometria de 3 μm . As amostras foram atacadas com reagentes Gliceregia (10 ml HNO_3 , 20 ml HCl , 30 ml Glycerol) e Kroll (10 ml HF , 30 ml HNO_3 , 50 ml H_2O), os resultados são mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4, na sequência. O objetivo do ataque químico em ambos os casos foi facilitar a visualização da estrutura dos materiais analisados.

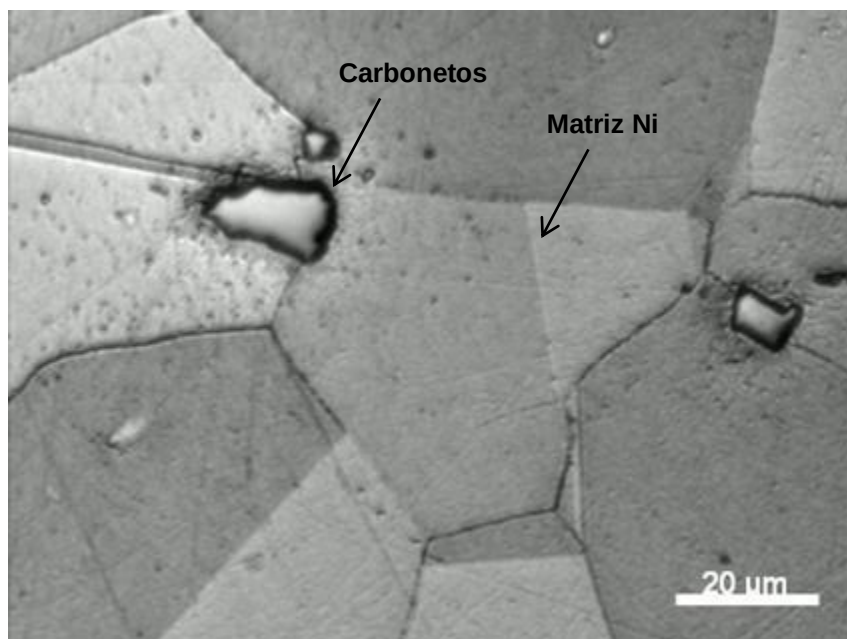


Figura 4.1 - Micrografia ótica da seção longitudinal do Inconel® 751 - reagente Gliceregya

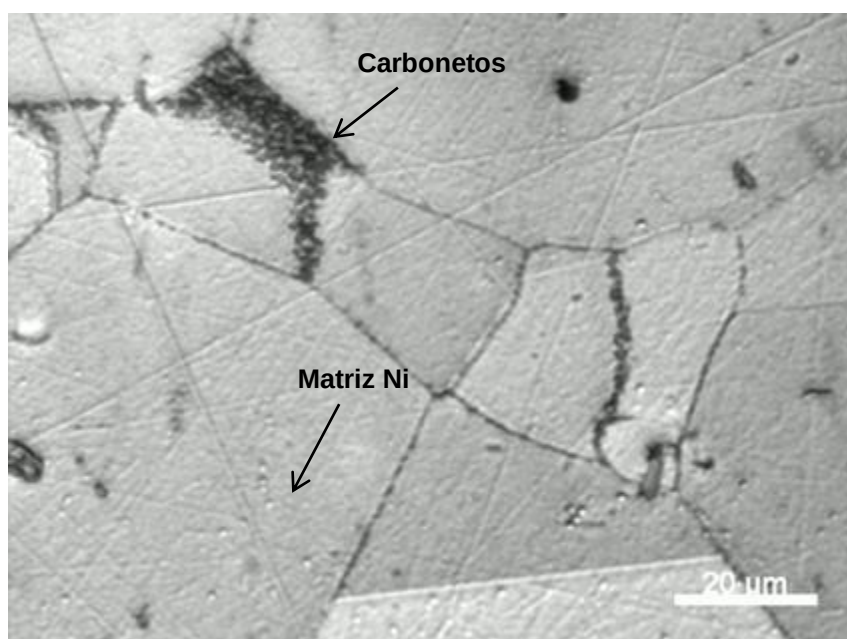


Figura 4.2 - Micrografia ótica da seção transversal do Inconel® 751 - reagente Gliceregya

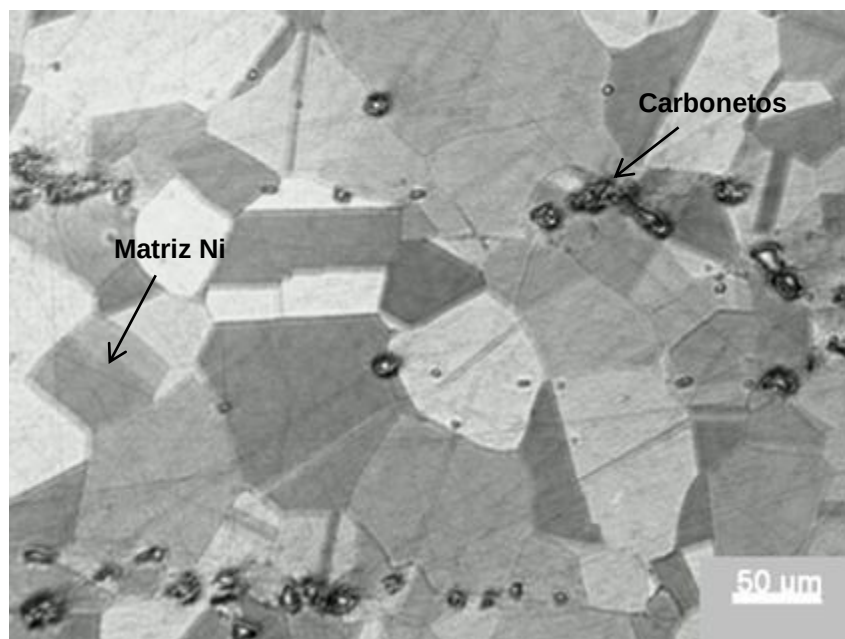


Figura 4.3 - Micrografia ótica da seção longitudinal do Inconel® 751- reagente Kroll

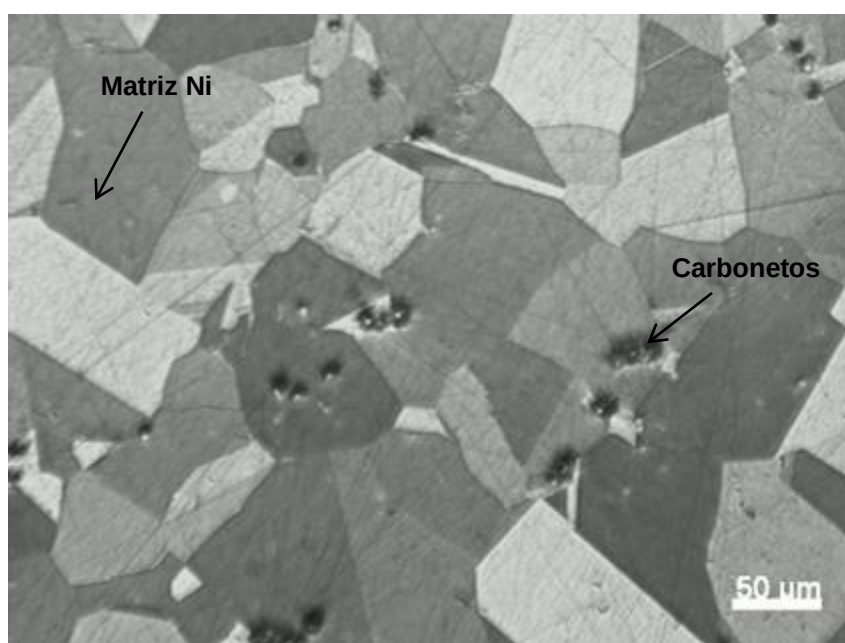


Figura 4.4 - Micrografia ótica da seção transversal do Inconel® 751 - reagente Kroll

Análises por microscopia eletrônica de varredura - MEV, utilizando um microscópio eletrônico da marca Zeiss, modelo EVO 40, equipado com módulo EDS, da UFES, também foram aplicadas às amostras nos dois materiais ensaiados – Inconel® 751 e Inconel® 718. O módulo de espectroscopia de

energia dispersiva – EDS possibilitou a realização de análises químicas qualitativas detalhadas nos materiais.

As Figuras 4.5 a 4.8 apresentam os resultados para a superliga Inconel® 751.

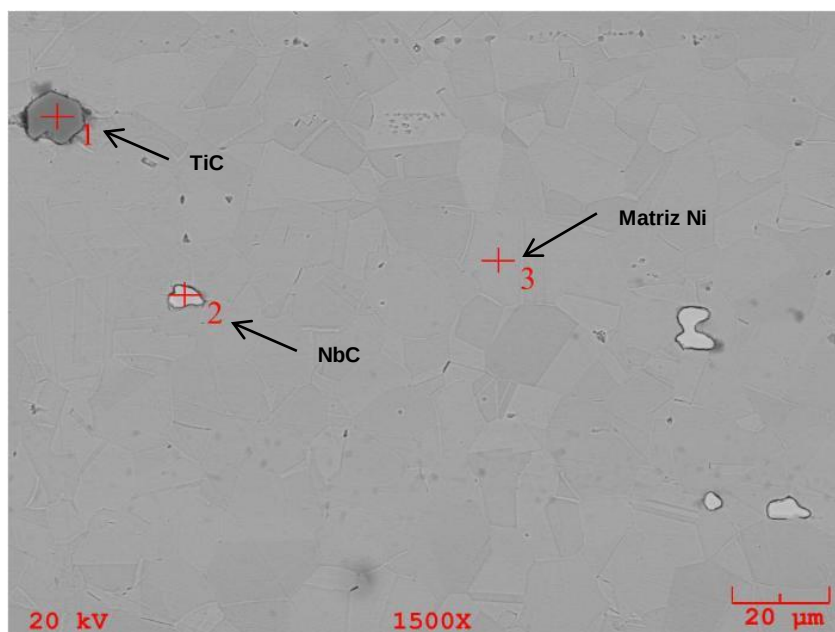


Figura 4.5 – Superfície da amostra transversal da superliga Inconel® 751

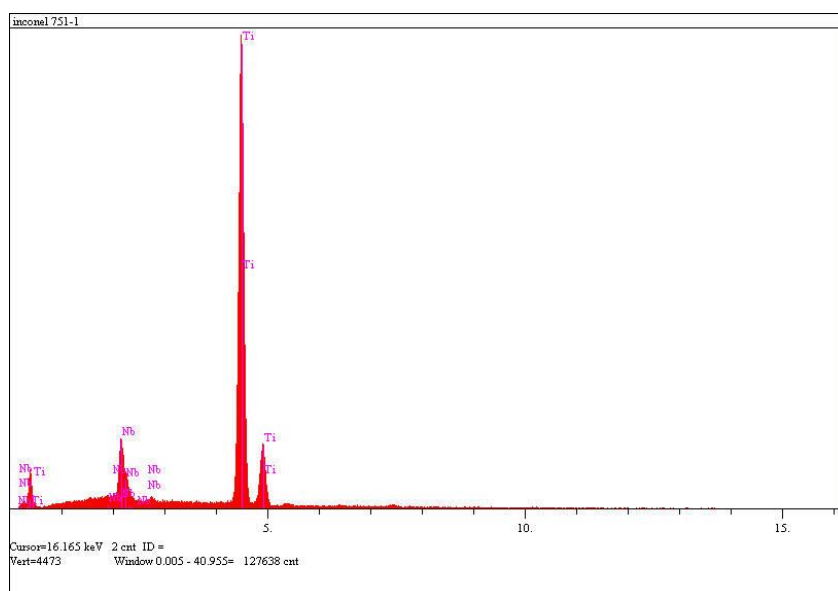


Figura 4.6 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 751 no ponto 1

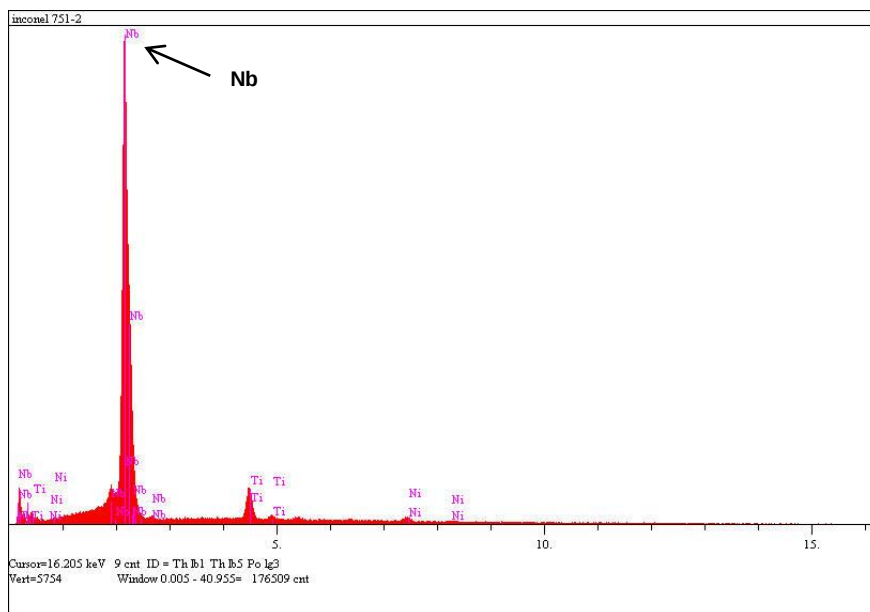


Figura 4.7 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 751 no ponto 2

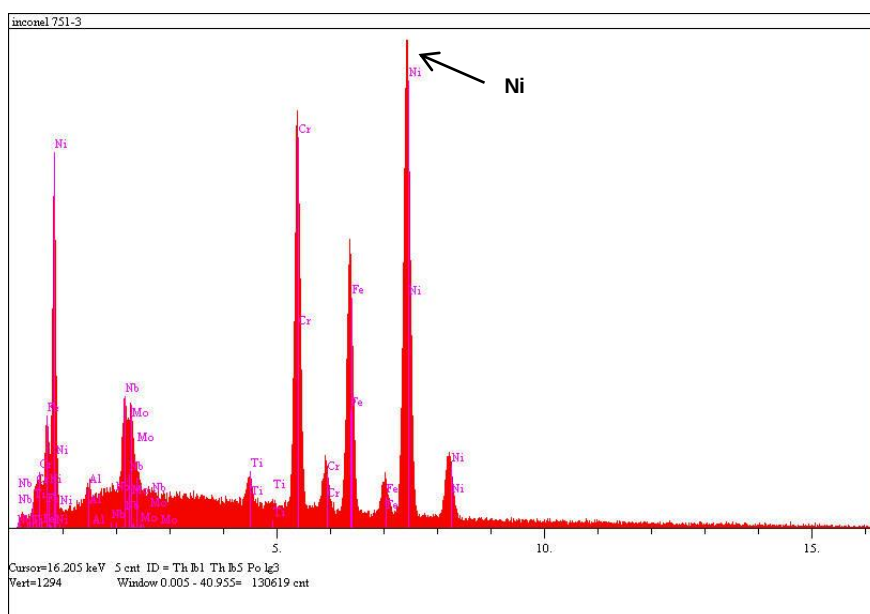


Figura 4.8 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 751 no ponto 3

Os resultados indicam que o precipitado do ponto 1 é um carboneto predominantemente de Ti, enquanto que o do ponto 2 é um carboneto predominantemente de Nb e o ponto e 3 é a matriz da liga, com a presença de todos os seus elementos constituintes.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as micrografias ópticas realizadas nos corpos de prova do Inconel[®] 718 após embutimento, lixamento, polimento com pasta de diamante e ataque com reagentes.

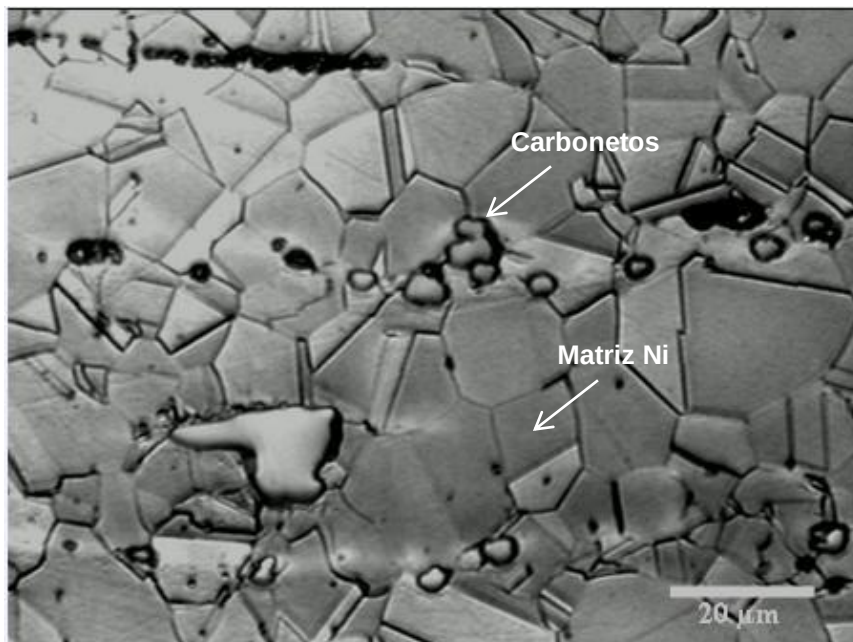


Figura 4.9 – Micrografia óptica da seção longitudinal do Inconel[®] 718 – reagente Gliceregia

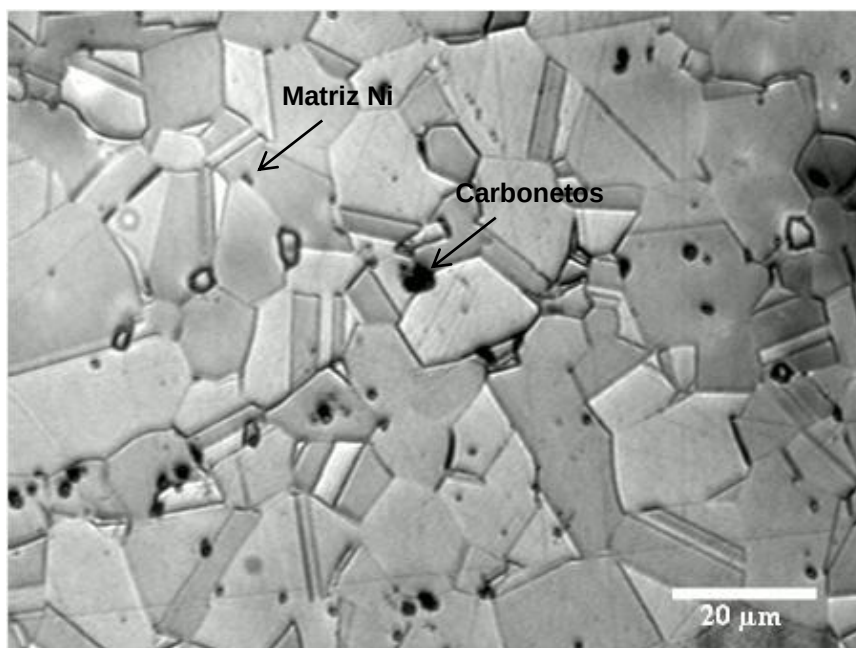


Figura 4.10 - Micrografia óptica da seção transversal do Inconel[®] 718 – reagente Gliceregia

As análises por MEV e EDS na amostra da liga Inconel® 718 também seguiram os mesmos procedimentos descritos anteriormente para a liga Inconel® 751.

As Figuras 4.11 a 4.14, apresentam os resultados para a superliga Inconel® 718.

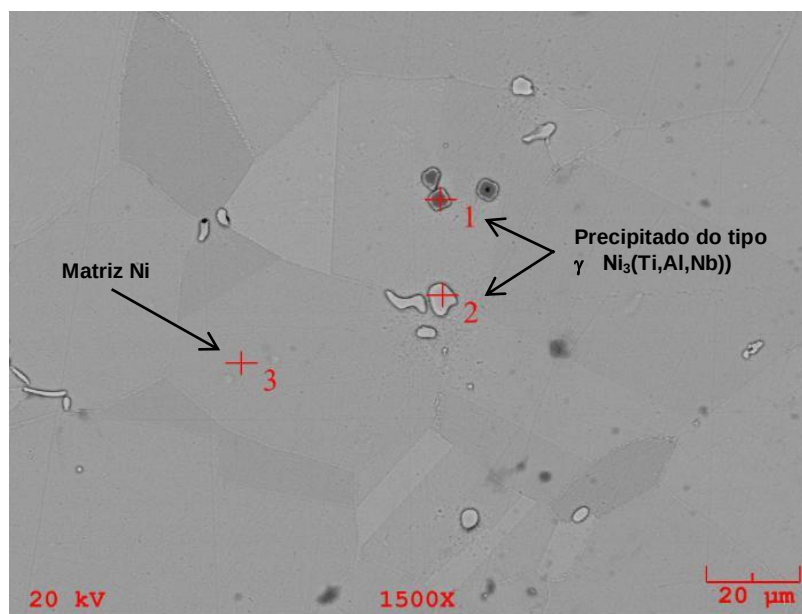


Figura 4.11 – Superfície da amostra transversal da superliga Inconel® 718

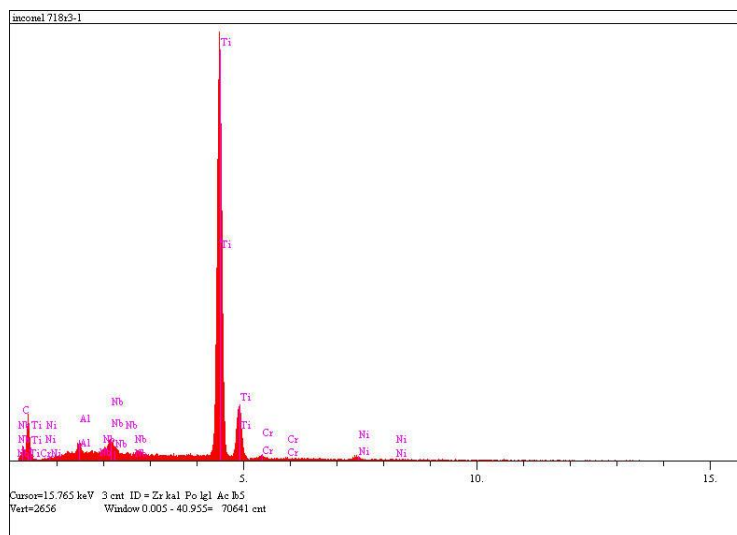


Figura 4.12 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel® 718 no ponto 1

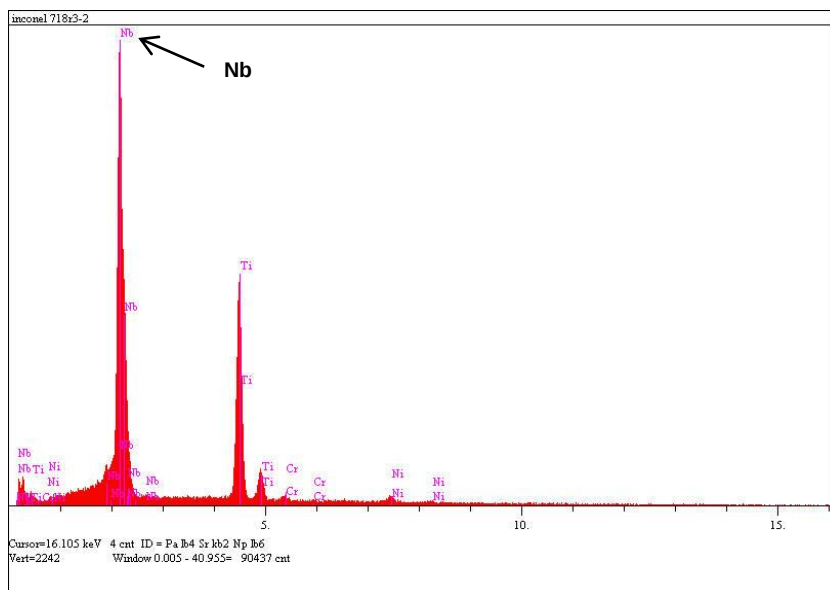


Figura 4.13 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel[®] 718 no ponto 2

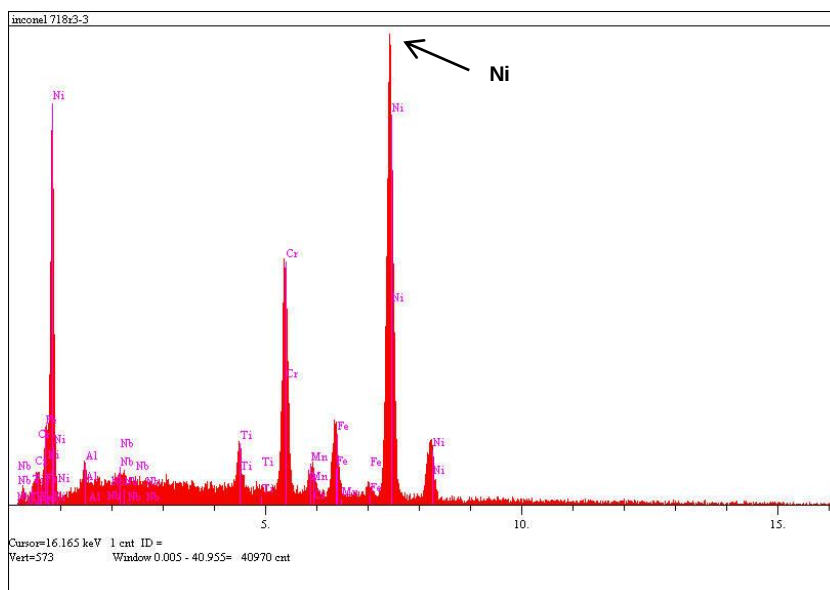


Figura 4.14 – Análise química da superfície da amostra da superliga Inconel[®] 718 no ponto 3

Os elementos presentes nos pontos 1 e 2 indicam se tratar de um precipitado do tipo γ ($\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al}, \text{Nb})$), não descartando a possibilidade da presença de carbonetos, enquanto que o ponto 3 se trata da matriz da liga. Estes precipitados γ são fundamentais para o aumento da resistência da liga, dificultando a movimentação de discordâncias e, por serem estáveis do ponto de

vista termodinâmico, garantem a manutenção da resistência em temperaturas elevadas (EZUGWU *et al.*, 1998).

4.2 Evolução dos Desgastes em Insertos de Cerâmica

A Tabela 4.5 mostra os resultados dos ensaios (N) realizados com insertos cerâmicos durante a usinagem da liga Inconel[®] 751, nas condições propostas descritas no Item 3.2.

Durante os ensaios com insertos cerâmicos e o Inconel[®] 751 foram detectados três tipos de desgaste:

Cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) → Desgaste de flanco médio (VB_B) e eventualmente microlascamentos – Figura 4.15;

Cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) → Desgaste de entalhe (VB_N) e desgaste de ponta (VB_C) – Figura 4.16;

Cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) → Desgaste de entalhe (VB_N) – Figura 4.17.

Tabela 4.5 – Condições de corte e vidas em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	V _c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	MI	Desgaste	t (s)
1	150	45	Normal	SiAlON	VB _B	390
5	150	45	Rica em O ₂	SiAlON	VB _B	337
7	150	85	Rica em O ₂	SiAlON	VB _C	260
21	150	45	Inerte	Preta	VB _B	247
9	150	45	Inerte	SiAlON	VB _B	244
17	150	45	Rica em O ₂	Preta	VB _B	240
11	150	85	Inerte	SiAlON	VB _N	176
29	150	45	Rica em O ₂	Whisker	VB _C	131
35	150	85	Inerte	Whisker	VB _N	124
33	150	45	Inerte	Whisker	VB _C	105
25	150	45	Normal	Whisker	VB _N	105
31	150	85	Rica em O ₂	Whisker	VB _B	95
14	300	45	Normal	Preta	VB _C	95
3	150	85	Normal	SiAlON	VB _N	90
8	300	85	Rica em O ₂	SiAlON	VB _B	90
24	300	85	Inerte	Preta	VB _N	80
19	150	85	Rica em O ₂	Preta	VB _N	75
2	300	45	Normal	SiAlON	VB _B	75
12	300	85	Inerte	SiAlON	VB _C	64
18.	300	45	Rica em O ₂	Preta	VB _C	60
13	150	45	Normal	Preta	VB _C	60
6	300	45	Rica em O ₂	SiAlON	VB _B	60
26	300	45	Normal	Whisker	VB _C	59
20	300	85	Rica em O ₂	Preta	VB _N	56
34	300	45	Inerte	Whisker	VB _C	52
30	300	45	Rica em O ₂	Whisker	VB _C	52
4	300	85	Normal	SiAlON	VB _C	50
10	300	45	Inerte	SiAlON	VB _B	50
32	300	85	Rica em O ₂	Whisker	VB _N	36
22	300	45	Inerte	Preta	VB _B	34
23	150	85	Inerte	Preta	VB _N	30
16	300	85	Normal	Preta	VB _B	30
36	300	85	Inerte	Whisker	VB _C	25
15	150	85	Normal	Preta	VB _N	19
28	300	85	Normal	Whisker	VB _N	16
27	150	85	Normal	Whisker	VB _N	14

Como pode ser visto na Tabela 4.5 os maiores tempos de vida (t) foram obtidos nas menores velocidades de corte de 150 m/min. Outro fator que se destacou foi a geometria GC. A interação desses dois fatores com o material do inserto SiAlON fizeram dessas condições as que proporcionaram os maiores tempos de vida. A atmosfera envolvente parece ter sido o fator que menos influenciou na evolução dos desgastes durante os ensaios com insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751. De uma forma geral nos ensaios com insertos cerâmicos não houve a predominância de apenas um tipo de desgaste, no entanto os tipos de desgaste presentes foram influenciados por praticamente todas as condições de corte.

As menores vidas foram observadas em insertos de cerâmica whisker e preta, onde o desgaste de entalhe se destacou. Nesse caso a geometria GC2 associada à atmosfera envolvente normal foram as mais influentes.

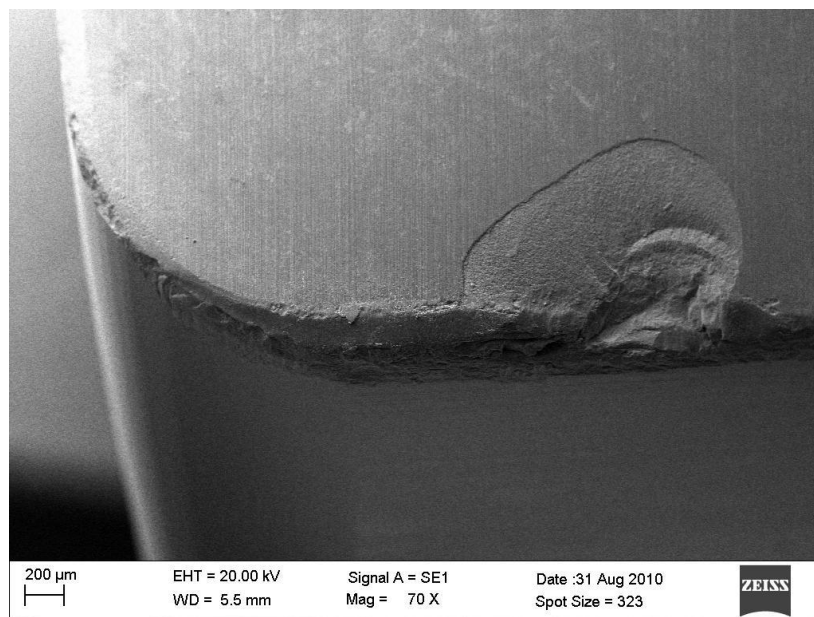


Figura 4.15 – Desgaste de flanco médio (VB_B) no inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) e microlascamentos, após 60s (N6)

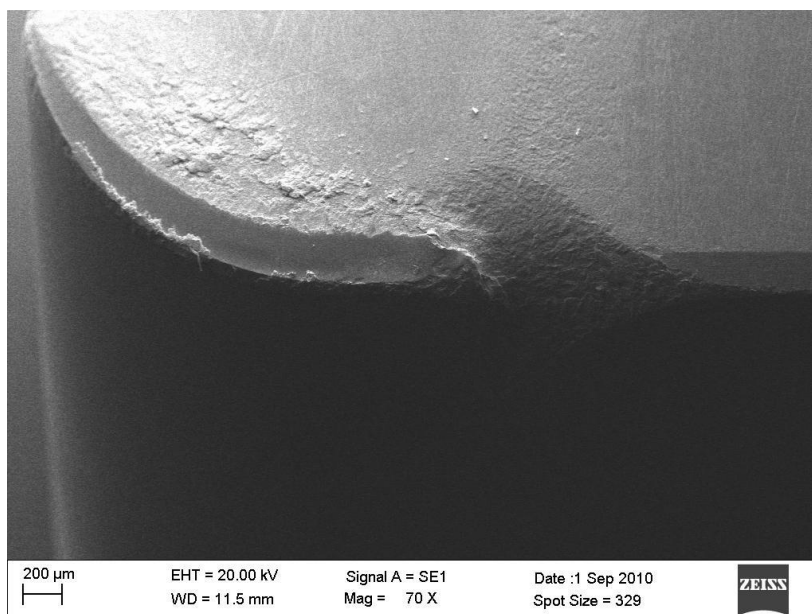


Figura 4.16 – Desgaste de entalhe (VB_N) no inserto de cerâmica Mista ($Al_2O_3 + TiC$), após 60s (N13)

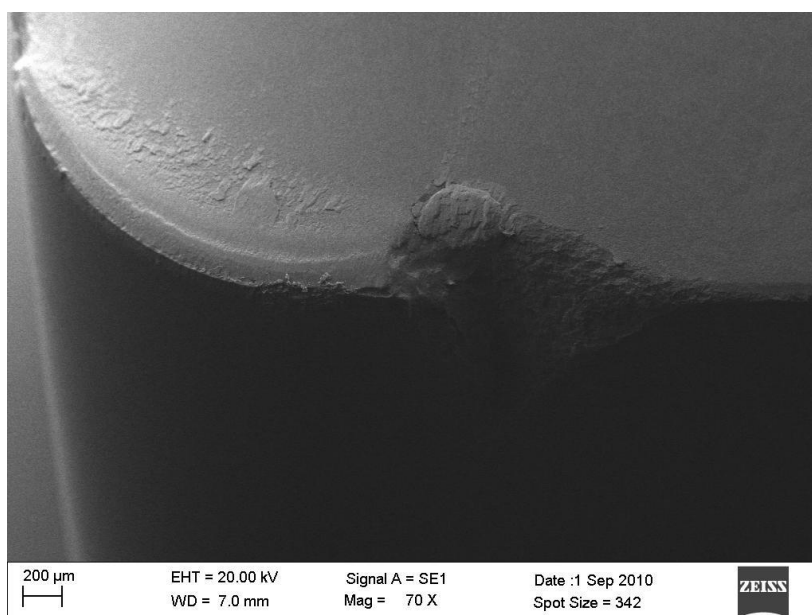


Figura 4.17 – Desgaste de entalhe (VB_N) no inserto de cerâmica Whisker ($Al_2O_3 + SiC$), após 14s (N27)

Análises por microscopia eletrônica de varredura – MEV associadas à espectroscopia de energia dispersiva – EDS, conforme descrito no Item 3.2, dos insertos cerâmicos utilizados na usinagem da liga Inconel® 751 objetivaram encontrar evidências que facilitassem a identificação dos tipos e mecanismos de desgaste atuantes os ensaios. Devido a baixa condutividade elétrica dos materiais cerâmicos, os insertos após limpeza foram recobertos com uma fina camada de uma liga ouro-paládio (Au-Pd) para a realização das análises.

As Figuras 4.18 a 4.32 apresentam os resultados dessas análises para os insertos de cerâmicas na usinagem da liga Inconel® 751.

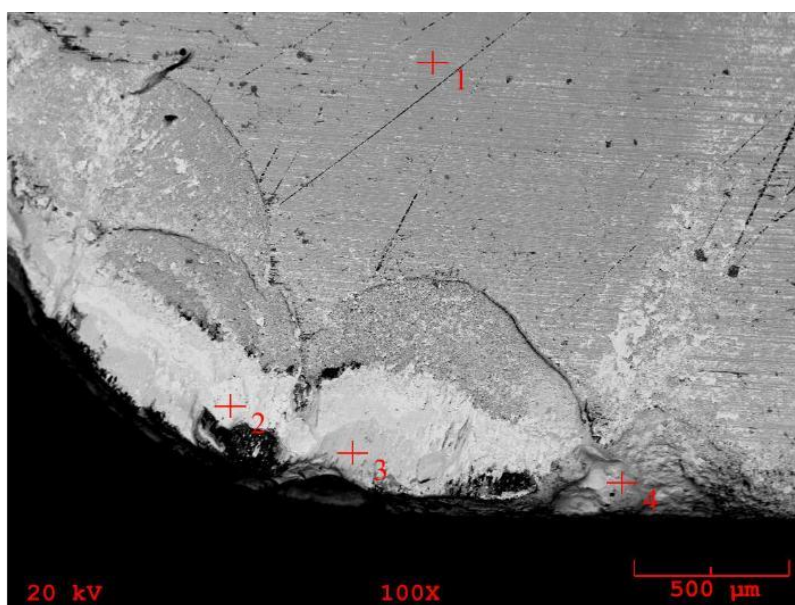


Figura 4.18 – Superfície de saída de um inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) com microlascamentos, após 390s na usinagem da liga Inconel® 751

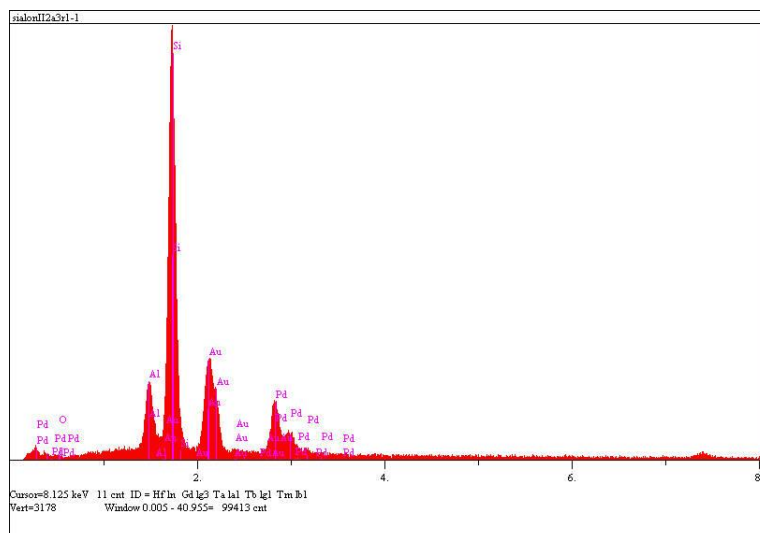


Figura 4.19 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 1 da Figura 4.18

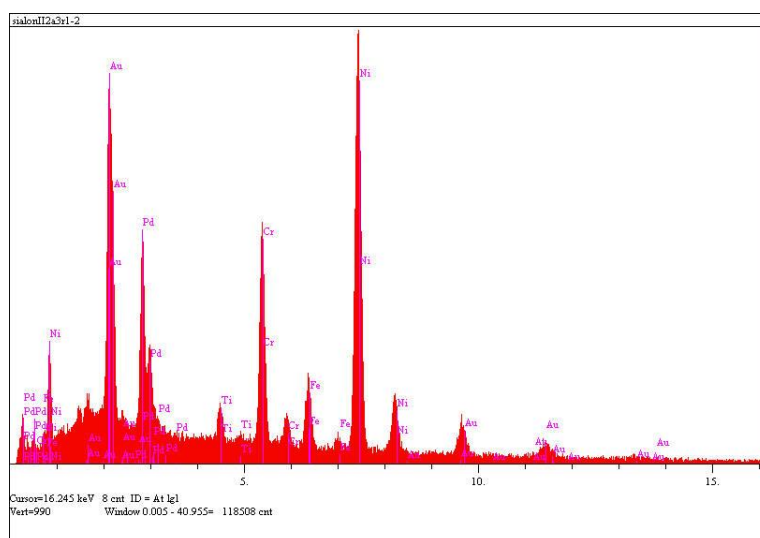


Figura 4.20 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 2 da Figura 4.18

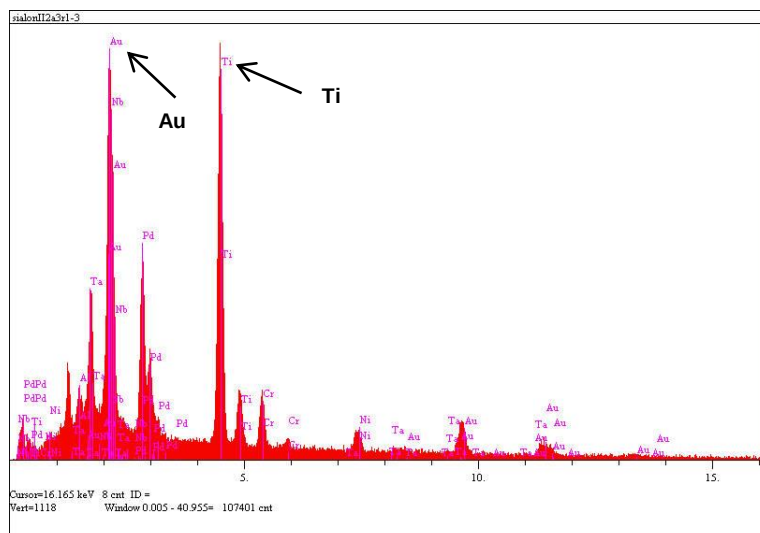


Figura 4.21 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 3 da Figura 4.18

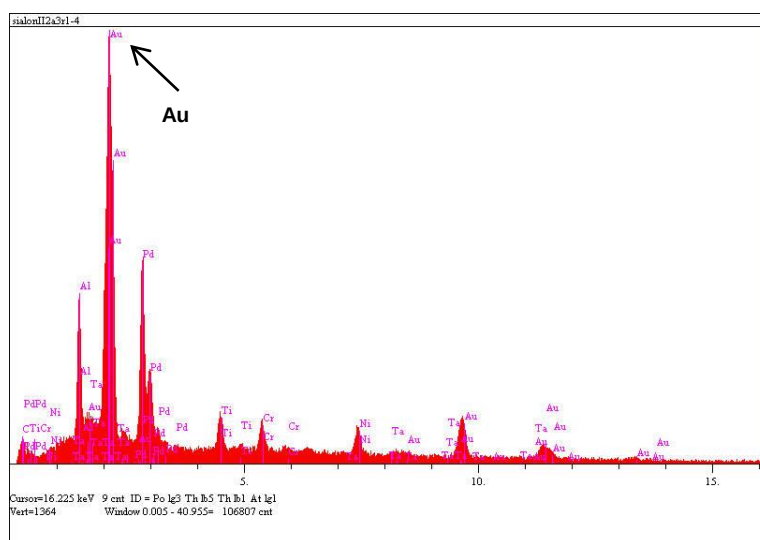


Figura 4.22 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 4 da Figura 4.18

Observa-se que no ponto 1 os elementos pesados (metálicos) presentes nos resultados de EDS são aqueles que compõem a ferramenta de corte, pois trata-se de um ponto fora da região de formação do cavaco. Os demais pontos

analisados (pontos 2, 3 e 4 da Figura 4.18) além desses elementos, observa-se também os elementos do material da peça em diferentes proporções, indicando a ocorrência de adesão de material do cavaco nestes pontos.

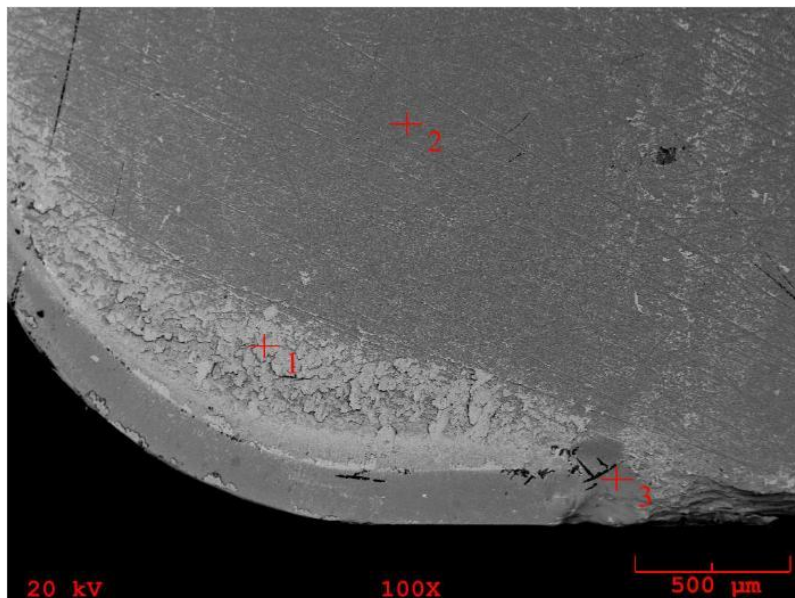


Figura 4.23 – Superfície de saída de um inserto de cerâmica Mista (Al_2O_3 + TiC), após 247s na usinagem da liga Inconel[®] 751

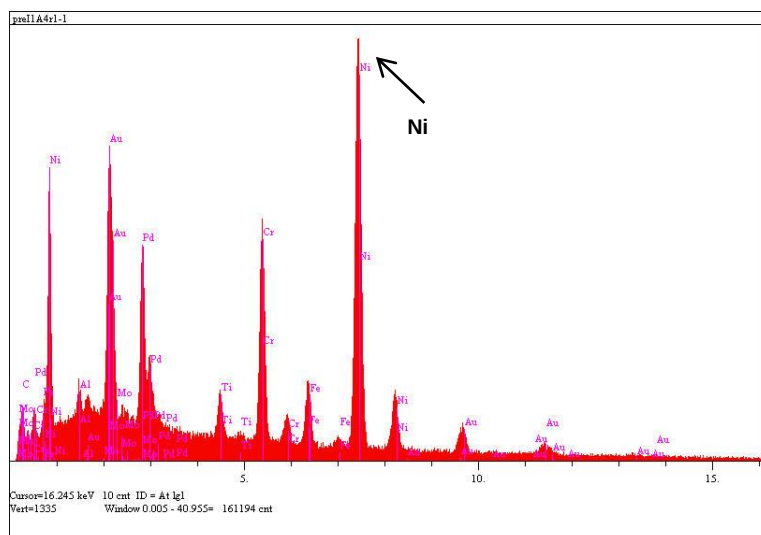


Figura 4.24 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Mista (Al_2O_3 + TiC), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 1 da Figura 4.23

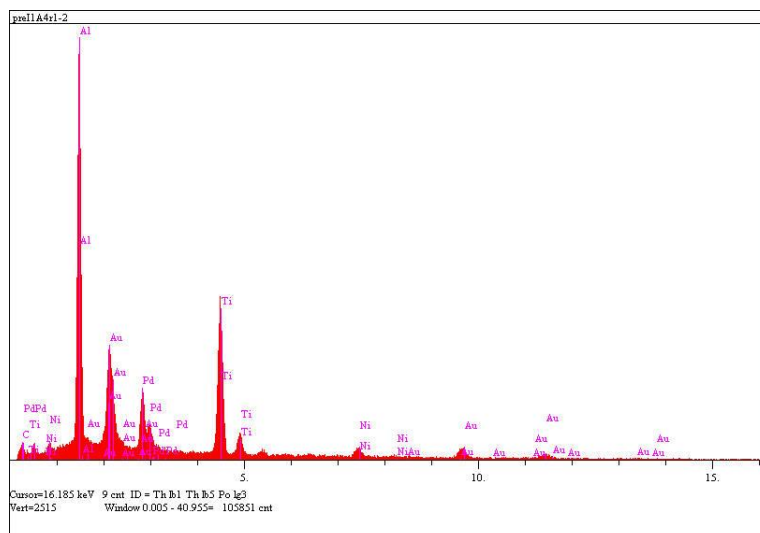


Figura 4.25 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 2 da Figura 4.23

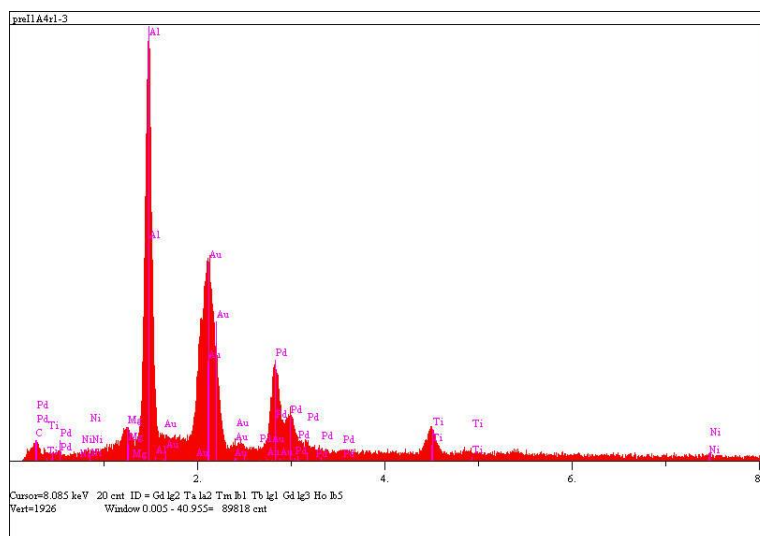


Figura 4.26 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 3 da Figura 4.23

Na cerâmica mista, o resultado de EDS mostrou a predominância dos elementos constituintes da ferramenta no ponto 2, com a presença também do

elemento níquel da liga, embora afastado da região de formação do cavaco. No ponto 1, o resultado de EDS mostra grande quantidade de material da peça aderido na superfície de saída da ferramenta. No ponto 3, região de entalhe, predomina os elementos constituintes da ferramenta, mas com alguma aderência de material da peça.

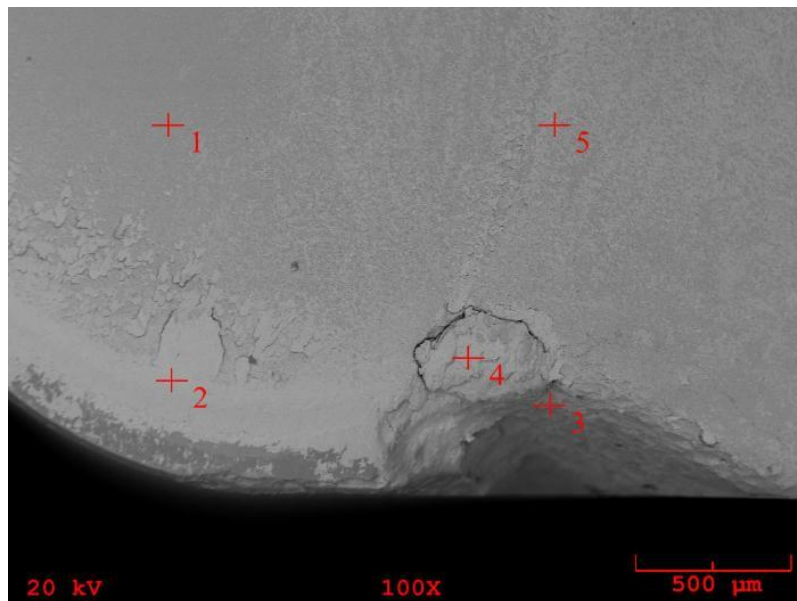


Figura 4.27 – Superfície de saída de um inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), após 131s na usinagem da liga Inconel[®] 751

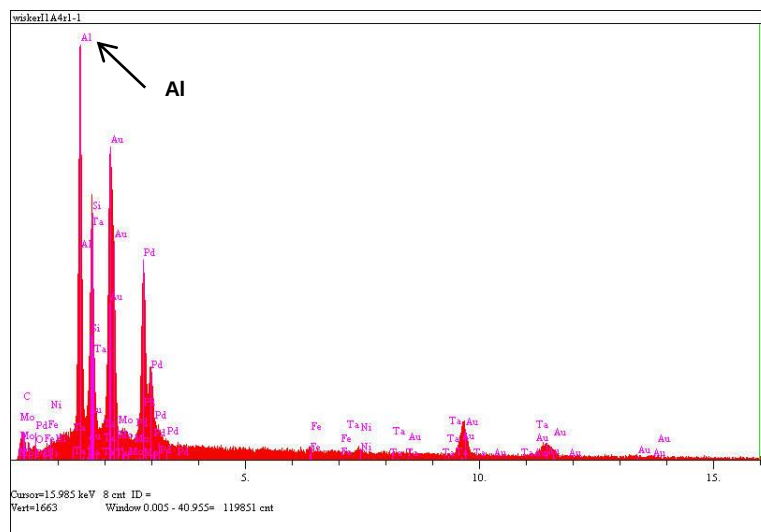


Figura 4.28 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 1 da Figura 4.27

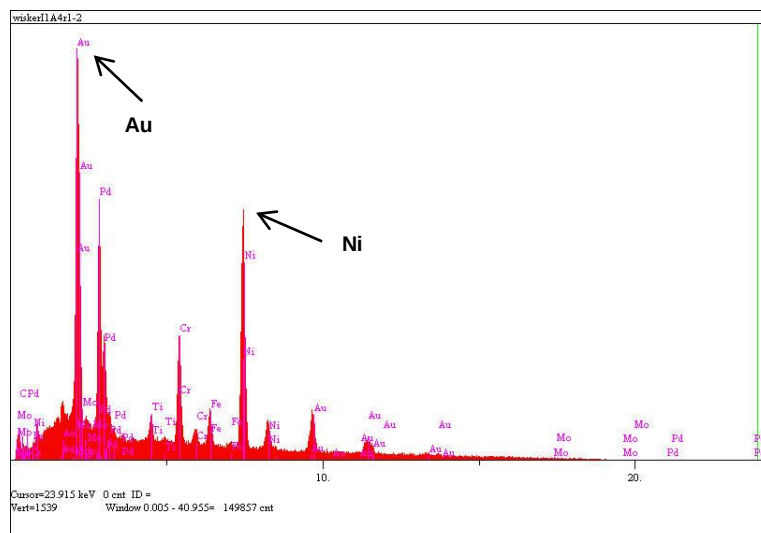


Figura 4.29 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 2 da Figura 4.27

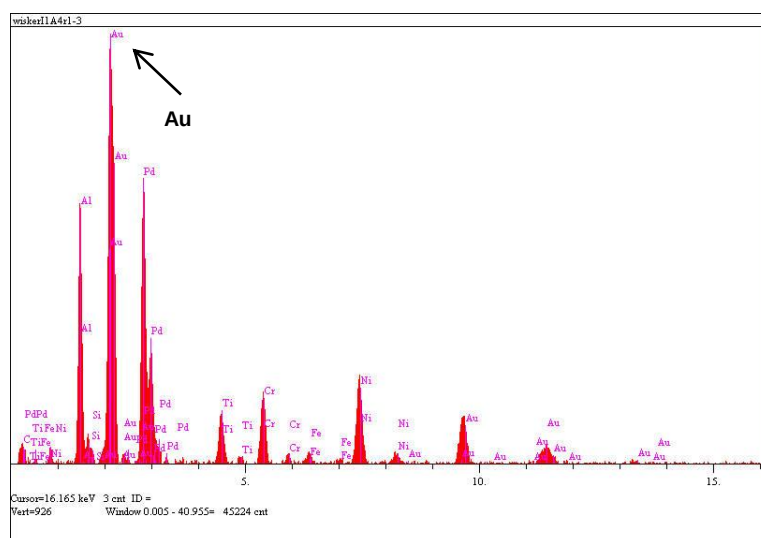


Figura 4.30 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 3 da Figura 4.27

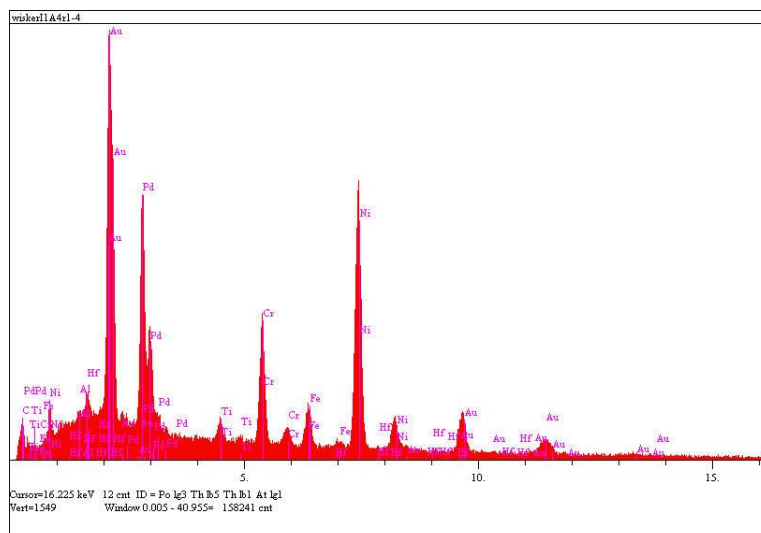


Figura 4.31 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 4 da Figura 4.27

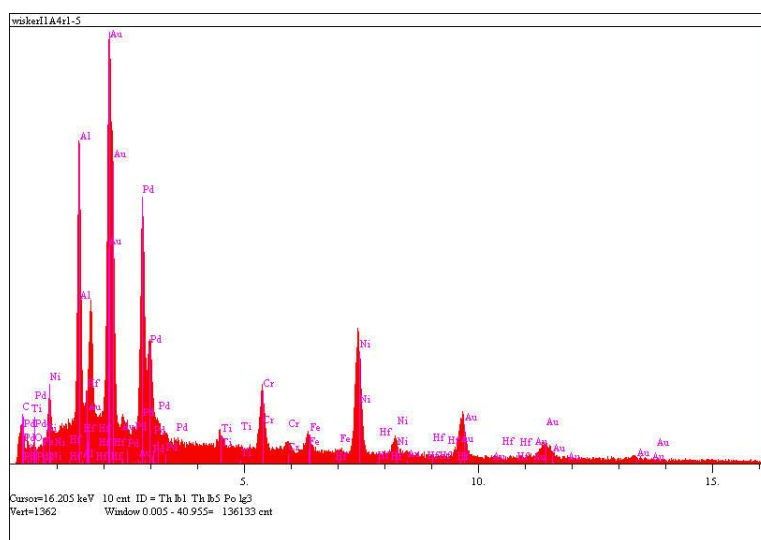


Figura 4.32 – Análise química da superfície de saída do inserto de cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 5 da Figura 4.27

Os resultados do EDS na cerâmica Whisker mostram que no ponto 1, mais afastado da região de formação do cavaco, predomina os elementos da ferramenta, com poucos elementos da liga de níquel. Nos pontos 2 e 4 há

grandes quantidades de elementos da liga de níquel aderido na superfície de ferramenta, enquanto que no ponto 3, esses elementos são em menores proporções. O ponto 5, embora também afastado da aresta de corte da ferramenta, apresenta alguma aderência da liga de níquel.

Embora as análises de EDS mostrassem evidências de adesão do material da peça nas superfícies das ferramentas, as interações químicas e adesivas entre as ligas de níquel e as cerâmicas são relativamente fracas, o que tende a não favorecer o mecanismo difusivo. No entanto, a alta velocidade de corte para esses materiais ($v_c = 300$ m/min) provocam intensa geração de calor na interface, colocando este mecanismo de desgaste também ocorrente (ASM HANDBOOK V.5, 1994 e ASM HANDBOOK V.16, 1989).

A influência da geometria de corte (GC) sobre o desgaste de flanco médio (VB_B) e o desgaste de ponta (VB_C) nos insertos de cerâmica foram mais favoráveis na primeira geometria de corte (CG1), onde houve uma redução nas taxas de desgaste e conseqüentemente a inibição dos mecanismos de desgaste em baixa velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min). Na maior velocidade de corte ($v_c = 300$ m/min) houve aumento desses tipos de desgaste, onde as temperaturas de corte foram também maiores (ASM HANDBOOK V.16, 1989 e GRZESIK, 2008).

Na observação da cor do cavaco durante a usinagem constatou-se que a borda dos mesmos possuía a cor rubra, durante a utilização dos insertos cerâmicos (Liao et al, 1996). As temperaturas mais elevadas nas bordas tendem a favorecer os mecanismos de desgaste, principalmente os termicamente ativados, tais como a difusão e a oxidação (SHAW, 1986), acelerando o desgaste de entalhe.

4.2.1 Evolução do Desgaste de Entalhe em Insertos de Cerâmica

Durante os ensaios o menor entalhe foi observado na maior velocidade de corte utilizando a cerâmica preta com a geometria GC2 em atmosfera envolvente inerte, o tempo de vida foi igual a 80s. Enquanto o maior entalhe foi obtido também num inserto de cerâmica preta, mas a velocidade de corte nesse caso foi menor (150 m/min) e associado a geometria GC1, nesse caso a atmosfera envolvente foi rica em oxigênio, o que parece ter favorecido o desenvolvimento desse tipo de desgaste, o tempo de vida foi de 240s.

Para melhor entendimento da evolução do desgaste de entalhe em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel[®] 751, elaborou-se um índice de desgaste de entalhe no tempo VB_N/t (taxa de desgaste em mm/s) o que permitiu classificar a evolução deste tipo de desgaste e visualizar a influência das variáveis de entrada sobre o tempo de desenvolvimento desse tipo de desgaste. A Tabela 4.6 resume a aplicação do índice de desgaste de entalhe aos insertos cerâmicos.

Tabela 4.6 – Condições de corte e evolução do desgaste de entalhe em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel[®] 751

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	MI	VB_N/t (mm/s)
11	150	GC2	Inerte	SiAlON	0,00568
35	150	GC2	Inerte	Whisker	0,00806
25	150	GC1	Normal	Whisker	0,00952
3	150	GC2	Normal	SiAlON	0,01111
24	300	GC2	Inerte	Preta	0,01250
19	150	GC2	Rica em O ₂	Preta	0,01333
20	300	GC2	Rica em O ₂	Preta	0,01786
32	300	GC2	Rica em O ₂	Whisker	0,02778
23	150	GC2	Inerte	Preta	0,03333
15	150	GC2	Normal	Preta	0,05263
28	300	GC2	Normal	Whisker	0,06250
27	150	GC2	Normal	Whisker	0,07143

A utilização do índice de desgaste de entalhe VB_N/t , permite identificar o nível de desgaste no tempo e quantificar para efeitos comparativos os experimentos onde prevaleceu esse tipo de desgaste durante os ensaios.

Pode-se perceber que as menores taxas de desgaste de entalhe foram obtidas em velocidades de corte menores ($v_c = 150$ m/min), sendo que, na quase totalidade dos casos a geometria GC2 esteve presente. No tocante ao material dos insertos a cerâmica SiAlON foi a que menos favoreceu a evolução do entalhe, enquanto as cerâmicas preta e whisker as que tiveram maior incidência. As maiores taxas de entalhe foram observadas em atmosfera normal. A atmosfera rica em oxigênio não teve influência significativa na taxa de desgaste de entalhe.

4.2.2 Evolução do Desgaste de Flanco Médio em Insertos de Cerâmica

A cerâmica SiAlON foi o inserto com os menores desgastes de flanco médio, sendo que a geometria GC1 foi um dos fatores que influenciaram esse aumento de vida.

A cerâmica preta foi a que apresentou os maiores desgastes de flanco médio entre as cerâmicas. A atmosfera inerte foi um dos fatores que contribuíram para os maiores desgastes de flanco médio nos insertos de cerâmica preta.

Nos ensaios em que se salientou o desgaste de flanco médio a geometria GC1 foi a mais encontrada.

O efeito das atmosferas envolventes foi alternada entre todos os tipos de materiais cerâmicos, não sendo um dos fatores determinantes do desgaste de flanco médio – conforme Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Condições de corte e evolução do desgaste de flanco médio em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	MI	VB_B/t (mm/s)
1	150	GC1	Normal	SiAlON	0,00103
5	150	GC1	Rica em O_2	SiAlON	0,00119
21	150	GC1	Inerte	Preta	0,00162
9	150	GC1	Inerte	SiAlON	0,00164
17	150	GC1	Rica em O_2	Preta	0,00167
31	150	GC2	Rica em O_2	Whisker	0,00421
8	300	GC2	Rica em O_2	SiAlON	0,00444
2	300	GC1	Normal	SiAlON	0,00533
6	300	GC1	Rica em O_2	SiAlON	0,00667
10.	300	GC1	Inerte	SiAlON	0,00800
22	300	GC1	Inerte	Preta	0,01176
16	300	GC2	Normal	Preta	0,01333

Utilizando-se a taxa de desgaste de flanco médio VB_B/t como forma de quantificar a evolução deste tipo de desgaste, pode-se perceber que os insertos SiAlON apresentaram as menores taxas de desgaste, estando associado a isto as menores velocidades de corte ($v_c = 150$ m/min). Na maioria dos casos em que o desgaste de flanco médio foi dominante a geometria de corte que prevaleceu foi a GC1.

As maiores taxas de desgaste de flanco médio ocorreram para $v_c = 300$ m/min.

A influência das atmosferas envolventes foi alternada em todos os casos de desgaste de flanco médio, mas pode-se perceber que a atmosfera rica em oxigênio foi a mais presente, seguida da atmosfera inerte e normal na sequência.

4.2.3 Evolução do Desgaste de Ponta em Insertos de Cerâmica

Nos casos em que houve predominância do desgaste de ponta nos insertos de cerâmica, pode-se observar que a velocidade de corte que mais influenciou foi $v_c = 300$ m/min.

A geometria de corte mais favorável ao desenvolvimento do desgaste de ponta (VB_c) foi GC1.

Os menores desgastes de ponta foram encontrados quando a atmosfera ambiente, e os maiores desgastes foram obtidos em atmosfera rica em oxigênio, seguida da atmosfera inerte.

Os materiais que mais desenvolveram o desgaste de ponta nos insertos cerâmicos foram as cerâmicas whisker e preta. Novamente a cerâmica SiAlON não teve propensão ao desenvolvimento desse tipo de desgaste – Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Condições de corte e evolução do desgaste de ponta em insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	MI	VB_c/t (mm/s)
7	150	GC2	Rica em O_2	SiAlON	0,00231
29	150	GC1	Rica em O_2	Whisker	0,00458
33	150	GC1	Inerte	Whisker	0,00571
14	300	GC1	Normal	Preta	0,00632
12	300	GC2	Inerte	SiAlON	0,00938
18	300	GC1	Rica em O_2	Preta	0,01000
13	150	GC1	Normal	Preta	0,01000
26	300	GC1	Normal	Whisker	0,01017
34	300	GC1	Inerte	Whisker	0,01154
30	300	GC1	Rica em O_2	Whisker	0,01154
4	300	GC2	Normal	SiAlON	0,01200
36	300	GC2	Inerte	Whisker	0,02400

Aplicando-se a taxa de desgaste de ponta (VB_C/t) na análise da evolução do desgaste de ponta em insertos de cerâmica na usinagem da liga Inconel[®] 751, pode-se perceber que as menores taxas de desgaste de ponta ocorreram para as menores velocidades de corte ($v_c = 150$ m/min), enquanto que as maiores velocidades de corte ($v_c = 300$ m/min) estiveram associadas às maiores taxas.

A geometria de corte que foi mais observada foi a GC1, como já havia sido citado. A segunda geometria de corte GC2, não foi fator determinante no desgaste de ponta.

O efeito das atmosferas foi alternado, mas pode-se constatar que as menores taxas de desgaste de ponta foram encontradas em atmosfera rica em oxigênio, o que sugere que esse tipo de atmosfera não favoreceu a oxidação.

4.2.4 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$)

Os insertos SiAlON foram os que apresentaram as maiores vidas, não favorecendo o desgaste de entalhe (VB_N). Para esses insertos o tipo de desgaste dominante foi o desgaste de flanco médio (VB_B) seguido pelo desgaste de ponta (VB_C).

Nas Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 podem ser vistos desgastes de flanco médio (VB_B) em insertos de cerâmica SiAlON, que foi o tipo de desgaste predominante neste tipo de material cerâmico. Apesar ter sido o tipo de desgaste mais freqüentemente encontrado nesse caso, ou seja, o desgaste que limitou a vida das cerâmicas SiAlON, ele não foi o único tipo observado. Pôde-se notar diversas vezes que os desgastes de entalhe (VB_N) e de ponta (VB_C) estiveram presentes concomitantemente, eles apenas não evoluíram tão rápido quanto o desgaste de flanco médio (VB_B).

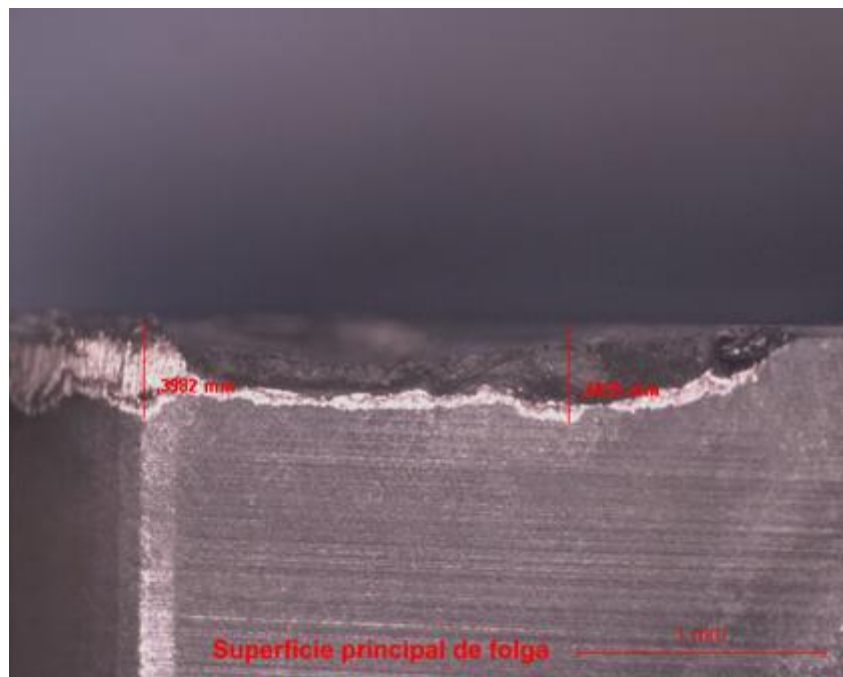


Figura 4.33 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto cerâmico SiAlON

Na Figura 4.33 pode ser observado uma acentuada perda de material da ferramenta em sua superfície de saída e um desgaste de flanco médio uniforme na superfície principal de folga da ferramenta. O desgaste de ponta atingiu aproximadamente 66% do limite de fim de vida estipulado para este tipo de desgaste. As condições de corte utilizadas no ensaio foram:

$v_c = 150$ m/min;

GC1;

AE = Normal.

O segundo tipo de desgaste mais freqüente nas cerâmicas SiAlON foi o desgaste de ponta (VB_C), como mostra a Figura 4.34.

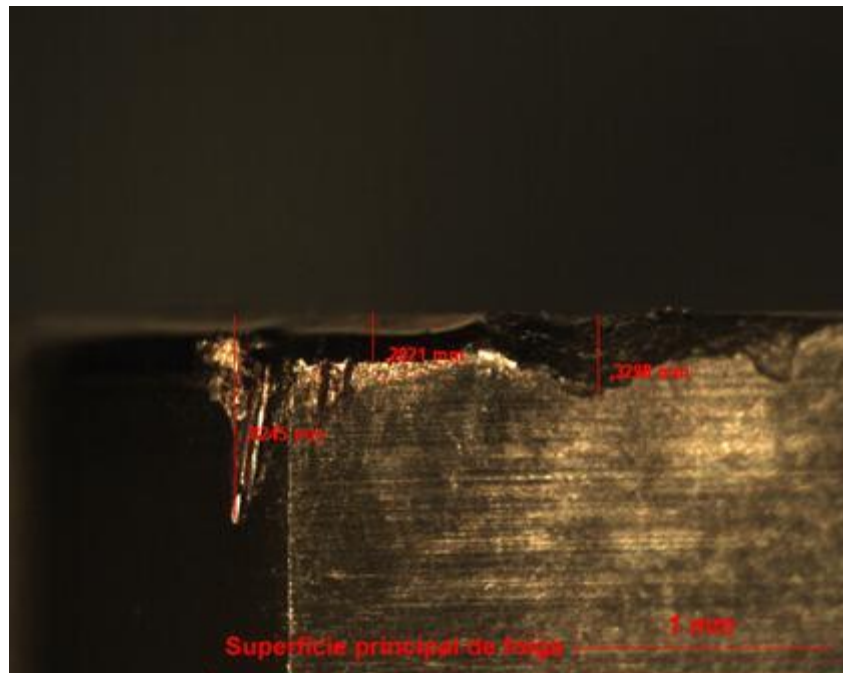


Figura 4.34 - Desgaste de ponta (VB_C), em inserto cerâmico SiAlON

Foram utilizadas as seguintes condições no ensaio mostrado na Figura 4.34:

$v_c = 300$ m/min;

GC2;

AE = Inerte.

A interação entre as variáveis velocidade de corte ($v_c = 300$ m/min) e a segunda geometria de corte GC2 foi o fator que desencadeou a evolução mais acentuada do desgaste de ponta (VB_C) nos experimentos com as cerâmicas SiAlON. O efeito da atmosfera envolvente (AE) inerte parece não ter sido um dos fatores preponderantes para evolução desse tipo de desgaste, embora as maiores vidas foram para a atmosfera rica em O_2 , como mostrado na Tabela 4.5. Pode-se notar na Figura 4.34, no entanto, que o desgaste de entalhe atingiu aproximadamente 33% de seu limite e o desgaste de flanco médio nesse caso chegou a 50%.

Como comentado anteriormente a cerâmica SiAlON não foi propensa ao desenvolvimento do desgaste de entalhe na maioria dos ensaios realizados com a liga Inconel[®] 751, apresentando as maiores vidas entre todos os tipos de materiais cerâmicos ensaiados.

A Figura 4.35, no entanto, mostra o caso em que a evolução do desgaste de entalhe (VB_N) foi mais acentuada do que os outros tipos de desgaste para as cerâmicas SiAlON.

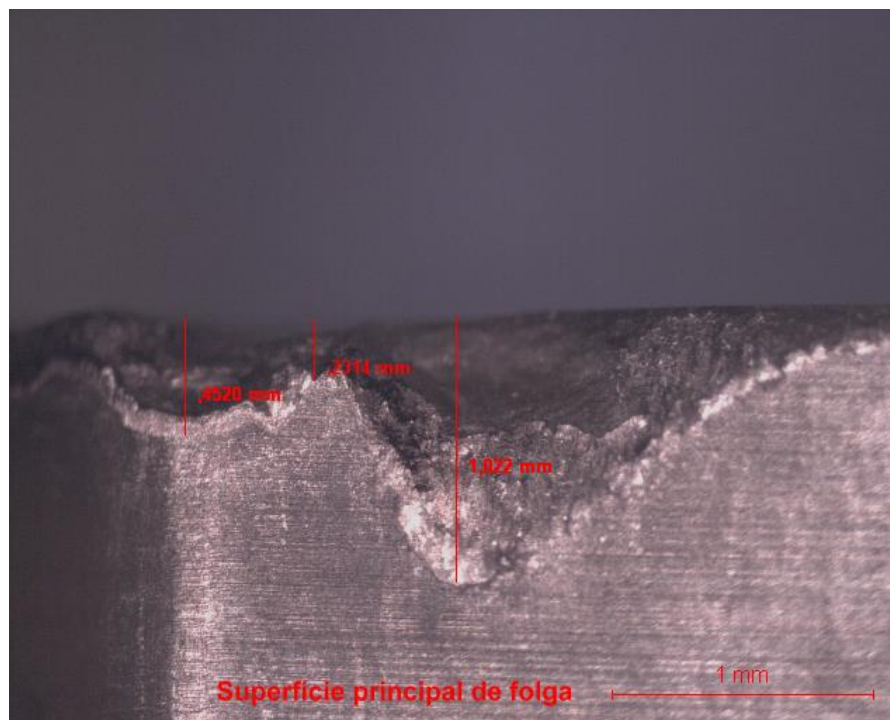


Figura 4.35 - Desgaste de entalhe (VB_N) em inserto cerâmico SiAlON

As condições de corte utilizadas no ensaio apresentado na Figura 4.35 foram:

$v_c = 150$ m/min;

GC2;

AE = Normal.

Como na maioria dos casos o desgaste de entalhe teve sua evolução acelerada quando se utilizou a menor velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min) e a segunda geometria de corte GC2.

O efeito da atmosfera envolvente não foi fator influente na formação do entalhe nos ensaios das cerâmicas SiAlON.

De forma geral os insertos cerâmicos baseados em SiAlON foram os que obtiveram as maiores vidas entre às cerâmicas ensaiadas.

As taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t), de desgaste de ponta (VB_C/t) e de desgaste de entalhe (VB_N/t) foram mais baixas quando comparadas com as cerâmicas pretas e whiskers. Isto mostra a maior aptidão desse tipo de material para usinagem da liga Inconel[®] 751.

Os fatores que mais afetaram no desenvolvimento do desgaste das cerâmicas SiAlON, reduzindo a vida das ferramentas foram:

A velocidade de corte maior que $v_c = 300$ m/min;

A geometria de corte maior para GC2.

O efeito das atmosferas envoltentes pouco influenciou na evolução de praticamente todos os tipos de desgaste identificados, quando da usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos cerâmicos SiAlON. Em alguns casos pode-se identificar o aumento das taxas de desgaste com a utilização da atmosfera envolvente rica em oxigênio, mas isto não foi regra geral nos ensaios realizados (GRZESIK, 2008).

Apesar do tipo de desgaste dominante nas cerâmicas SiAlON, ter sido o desgaste de flanco médio (VB_B), os outros tipos de desgaste (de ponta VB_C e de entalhe VB_N) também tiveram evolução em menor escala.

4.2.5 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Cerâmica Preta ($Al_2O_3 + TiC$)

Para os insertos de cerâmica preta os resultados se revelaram bastante semelhantes aos encontrados para os insertos whisker, como será visto mais adiante. Porém os tempos de vida foram inferiores aos das cerâmicas SiAlON, na maioria das condições de corte aplicadas durante os ensaios, conforme pode ser visto na Tabela 4.5.

Os tipos de desgaste dominantes, para os insertos de cerâmica preta, foram os desgastes de entalhe (VB_N), desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C), nesta ordem.

A Figura 4.36 apresenta os desgastes de flanco médio (VB_B) e desgaste de entalhe (VB_N) em insertos de cerâmica preta. O desgaste de entalhe foi um dos principais tipos de desgaste que determinou o fim de vida das ferramentas, porém, pode-se notar nas figuras seguintes que o desgaste de flanco médio também evoluiu durante os ensaios.

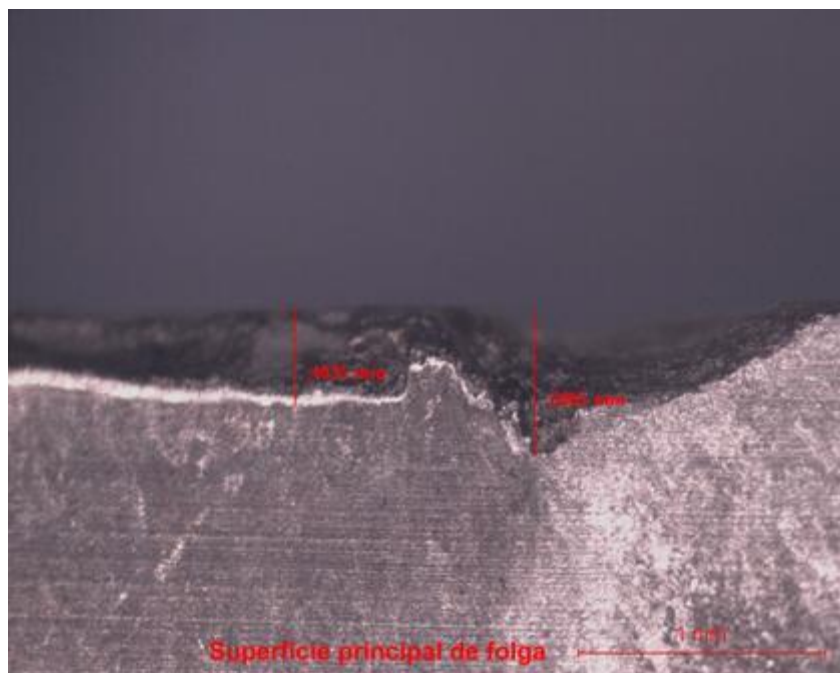


Figura 4.36 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de entalhe (VB_N) em inserto de cerâmica preta

Observa-se na Figura 4.36 que o desgaste de flanco médio (VB_B) evoluiu mais rapidamente que o desgaste de entalhe (VB_N). Não houve evolução do desgaste de ponta (VB_C) nesse caso. Embora o desgaste de entalhe tenha alcançado 58% do limite de desgaste admitido, a evolução do desgaste de flanco médio foi a que atingiu o fim de vida da ferramenta. As condições de corte utilizadas no ensaio da Figura 4.36 foram:

$v_c = 150 \text{ m/min}$;

GC1;

AE = Rica em O_2 .

A Figura 4.37 mostra o desgaste de entalhe (VB_N), desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de cerâmica preta.

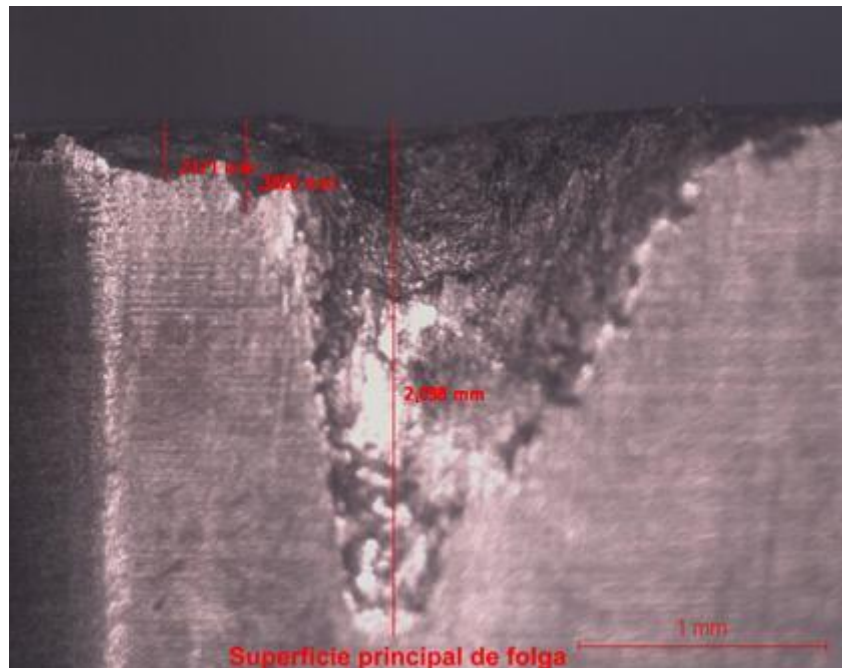


Figura 4.37 – Desgaste de entalhe (VB_N), desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de cerâmica preta

As condições de corte utilizadas no ensaio da Figura 4.37 foram:

$v_c = 150 \text{ m/min}$;

GC2;

AE = Rica em O_2 .

Pode-se perceber da análise dos desgastes na figura anterior, que o desgaste de entalhe foi o tipo de desgaste dominante.

Durante a usinagem com inserts de cerâmica preta, a interação da menor velocidade de corte ($v_c = 150 \text{ m/min}$) e a geometria de corte GC2 foram os fatores que mais concorreram para o aumento da evolução do desgaste de entalhe. Nos inserts cerâmicos os maiores valores obtidos para os entalhes

foram conseguidos utilizando atmosfera rica em oxigênio. Outro resultado que pôde ser constatado foi que a taxa de desgaste de entalhe (VB_N/t) também foi afetada por essas variáveis de entrada, fazendo com que a mesma aumentasse seu valor.

A Figura 4.38 mostra o desgaste de ponta (VB_C) em um inserto de cerâmica preta.

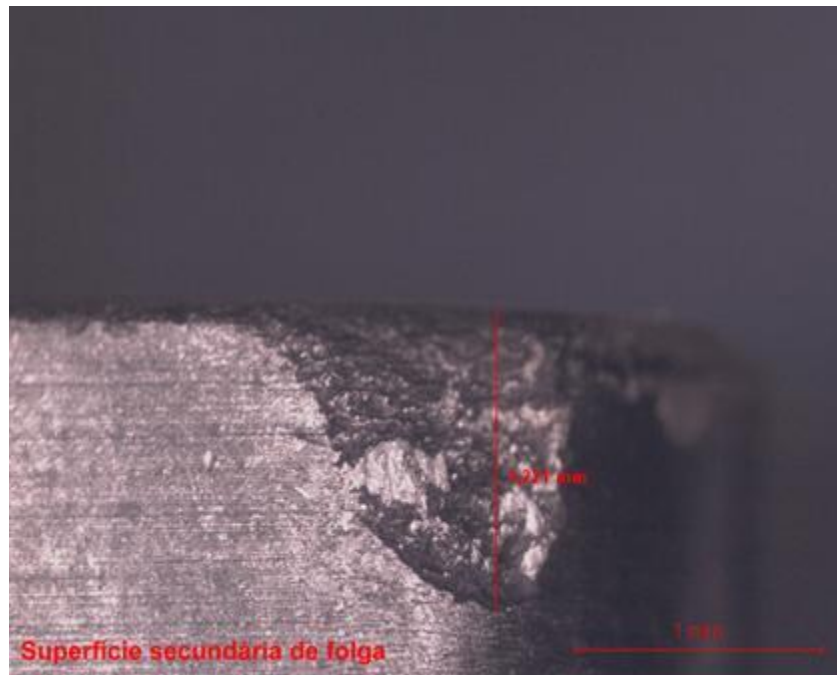


Figura 4.38 – Desgaste de ponta (VB_C) em inserto de cerâmica preta

As condições de corte utilizadas no ensaio da Figura 4.38 foram:

$v_c = 300$ m/min;

GC1;

AE = Rica em O_2 .

A ocorrência do desgaste de ponta em insertos de cerâmica preta ocorreu preferencialmente nas situações em que a velocidade de corte foi maior ($v_c = 300$ m/min) e com a geometria de corte GC1. A atmosfera preferencial foi a normal, mas a taxa de desgaste de ponta (VB_C/t) aumentou em atmosfera rica em O_2 .

Os insertos de cerâmica preta apresentaram desempenho intermediário entre as cerâmicas SiAlON e whisker.

O tipo de desgaste predominante nesse tipo de inserto foi o de entalhe (VB_N) seguido pelos desgastes de flanco médio (VB_B) e pelo desgaste de ponta (VB_C). A ocorrência dos desgastes não se deu de forma isolada, mas houve concomitância entre eles.

As taxas de desgaste de entalhe (VB_N/t) também ficaram entre as das cerâmicas SiAlON, que foi a melhor cerâmica, e as das cerâmicas whisker, no entanto os maiores desgastes de entalhe ocorreram nas cerâmicas pretas em valor nominal. Contribuíram para esse fato a menor velocidade de corte utilizada ($v_c = 150$ m/min) e a geometria de corte GC2. A atmosfera rica em O_2 parece ter acelerado a formação do entalhe nas cerâmicas pretas, podendo ter sido influenciada pela oxidação.

A evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) foi o segundo mais comum, ocorrendo simultaneamente aos outros tipos de desgaste. As cerâmicas pretas obtiveram também os maiores valores de desgaste de flanco médio entre todas as cerâmicas, além das maiores taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t). O fator que mais contribuiu para a evolução do desgaste de flanco médio nos insertos de cerâmica preta foi a utilização da maior velocidade de corte ($v_c = 300$ m/min).

Na evolução do desgaste de ponta (VB_C) nos insertos de cerâmica preta, menos comum nesse caso, pois foram identificados os menores desgastes de ponta entre todos os insertos cerâmicos, sendo que os fatores que interagiram para esse feito foram a geometria GC1 e a atmosfera normal. A maior velocidade de corte ($v_c = 300$ m/min) associado à atmosfera rica em O_2 , fez com que o desgaste de ponta nos insertos de cerâmica preta passasse a ser o maior entre todas as cerâmicas. O aumento da temperatura favoreceu o desgaste de ponta nos insertos, associado a uma possível formação de óxidos.

4.2.6 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$)

Identicamente aos insertos de cerâmica preta os insertos de cerâmica whisker tiveram desempenhos intermediários, não se aproximando dos tempos de vida obtidos pelas cerâmicas SiAlON, durante a usinagem da liga Inconel[®] 751.

Os tipos de desgaste dominantes para as cerâmicas whisker, foram desgaste de entalhe (VB_N) e desgaste de ponta (VB_C), seguido pelo desgaste de flanco médio (VB_B).

Desgaste de entalhe (VB_N) é apresentado na Figura 4.39, sendo esse tipo de desgaste um dos mais frequentes nas cerâmicas whisker. Os desgastes de ponta (VB_C) e de flanco médio (VB_B) ocorreram simultaneamente ao desgaste de entalhe, como será visto a seguir.

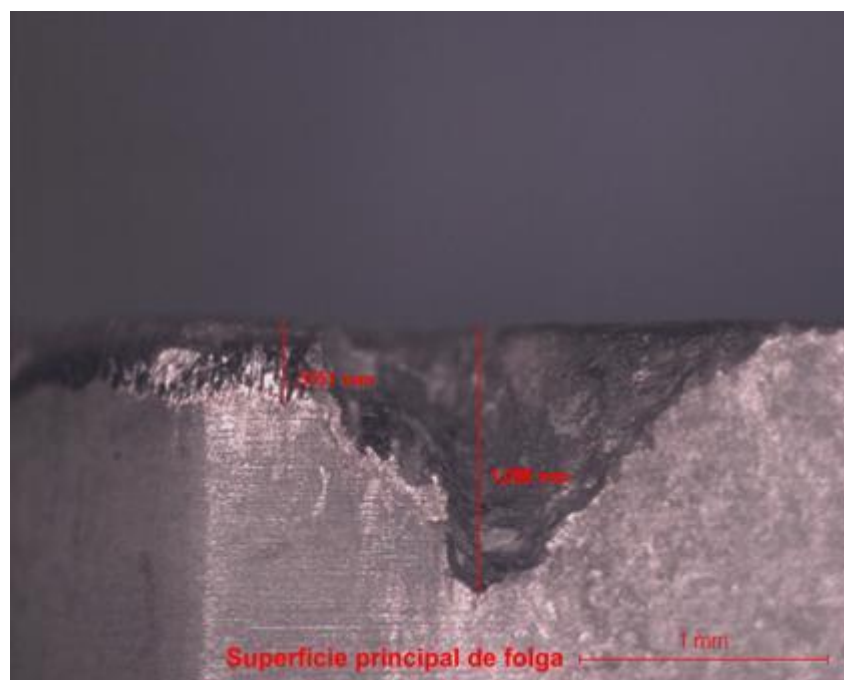


Figura 4.39 – Desgaste de entalhe (VB_N) e desgaste de flanco médio (VB_B) em inserto de cerâmica whisker

Pode ser visto na Figura 4.39 que o desgaste de entalhe (VB_N) teve a maior evolução entre todos os desgastes, seguido pelo desgaste de flanco médio (VB_B) que atingiu 88% do valor limite de fim de vida. O desgaste de ponta (VB_C) não foi considerável nesse caso.

As condições de corte utilizadas no ensaio da Figura 4.39 foram:

$v_c = 150$ m/min;

GC2;

AE = Inerte.

Assim como nas cerâmicas pretas, o desgaste de entalhe nos ensaios com cerâmicas whisker foi incrementado pela utilização da menor velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min) e da segunda geometria de corte GC2. A atmosfera inerte nesse caso fez com que a taxa de desgaste de entalhe ($VB_N/t = 0,00845$ mm/s) fosse a menor entre os ensaios com cerâmicas whisker.

Na avaliação dos desgastes de entalhe durante a usinagem da liga Inconel® 751 com cerâmicas whisker, a utilização de atmosfera rica em oxigênio não promoveu o aumento do desgaste de entalhe, nem o aumento da taxa deste tipo de desgaste (VB_N/t).

Em valores os desgastes de ponta (VB_C) nos insertos de cerâmica whisker estiveram entre os maiores. Os fatores que mais influíram para este fato foram a velocidade de corte maior ($v_c = 300$ m/min), associado à geometria GC1. A Figura 4.40 apresenta um exemplo deste tipo de desgaste.

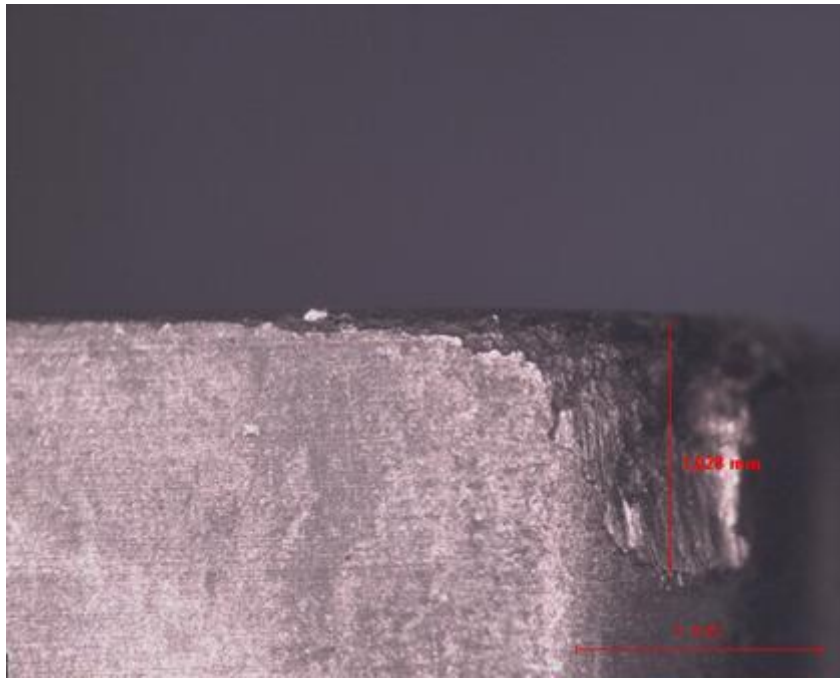


Figura 4.40 – Desgaste de ponta (VB_C) em inserto de cerâmica whisker

Na Figura 4.40 foram utilizadas as seguintes condições de corte:

$v_c = 300$ m/min;

GC1;

AE = Normal.

A maior taxa de desgaste de ponta (VB_C/t) foi encontrada em atmosfera inerte, mas a atmosfera normal também apareceu nesse quadro. Essa constatação vale para a evolução do desgaste de ponta (VB_C) em insertos de cerâmica whisker. O mesmo não se confirmou para a evolução dos outros tipos de desgaste.

O desgaste de flanco médio (VB_B) foi o tipo de desgaste que menos evoluiu nos ensaios com cerâmicas whisker. Na maior parte dos casos esse tipo de desgaste acompanhou as outras formas de desgaste dominantes.

A Figura 4.41 ilustra um caso onde o desgaste de flanco médio evoluiu mais rapidamente do que os outros tipos de desgaste, o que acabou determinando o fim de vida da ferramenta.

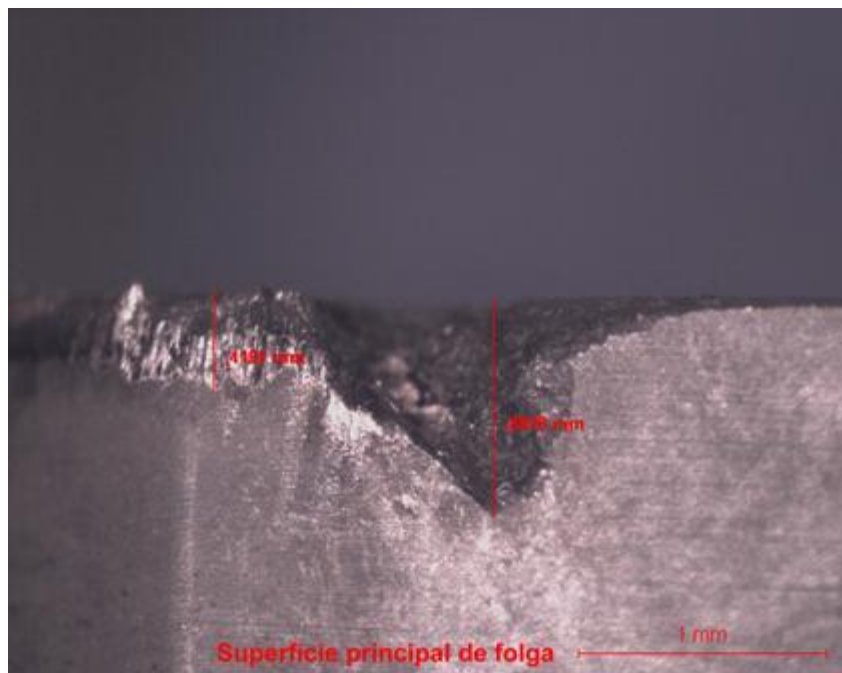


Figura 4.41 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de entalhe (VB_N) em inserto de cerâmica whisker

Condições de corte utilizadas no ensaio da Figura 4.41 foram:

$v_c = 150$ m/min;

GC2;

AE = Rica em O_2 .

Embora menos comum o desgaste de flanco médio (VB_B) também teve evolução nos insertos whiskers. Esse tipo de material de ferramenta apresentou uma maior resistência a evolução desse tipo de desgaste. O limite de vida desse tipo de material foi determinado pelos outros tipos de desgaste (EZUGWU et al, 1999).

4.2.7 Influência das Variáveis de Entrada sobre os Tempos de Vida em Insertos de Cerâmica

A influência das variáveis de entrada na usinagem do Inconel® 751: Velocidade de corte (v_c), geometria de corte (GC), material do inserto (MI) e atmosfera envolvente (AE), sobre o tempo de vida da ferramenta (t) dos insertos cerâmicos foi realizada utilizando-se a análise de variância – ANOVA (MONTGOMERY, 2001).

Os materiais dos insertos (MI) e as atmosferas envoltentes (AE) foram comparados dois a dois, variando-se a velocidade de corte (v_c) e a geometria da ferramenta (GC). O valor de p (p value) máximo admitido foi de 0,20 e o coeficiente de correlação $R^2 > 0.90$ para todas as comparações. O erro padrão máximo foi de 31,84s.

As Tabelas 4.9 a 4.17 apresentam a influência das variáveis sobre os tempos de vida (t) dos insertos de cerâmica na usinagem da liga Inconel® 751.

Tabela 4.9 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-119,37	-3,74	0,013320
GC	-80,87	-2,53	0,051941
AE	46,12	1,44	0,207226
MI	-89,62	-2,81	0,037373

Tabela 4.10 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-97,25	-3,04	0,018672
GC	-82,00	-2,56	0,037069
AE	14,50	0,42	0,204350
MI	-68,00	-2,00	0,092172

Tabela 4.11 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O_2

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-139,37	-8,38	0,000394
GC	-55,12	-3,31	0,021057
AE	31,62	1,90	0,115350
MI	-57,37	-3,45	0,018173

Tabela 4.12 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-123,00	-5,40	0,000639
GC	-69,75	-3,06	0,015404
AE	32,75	1,44	0,187737
MI	-105,50	-4,63	0,001667

Tabela 4.13 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-107,12	-3,73	0,013563
GC	-65,12	-2,26	0,072627
AE	5,12	0,17	0,205357
MI	-79,87	-2,78	0,038829

Tabela 4.14 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O_2

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-130,37	-9,41	0,000032
GC	-20,12	-1,45	0,189349
AE	27,62	1,99	0,086197
MI	-82,62	-5,96	0,000560

Tabela 4.15 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-41,87	-2,17	0,081616
GC	-57,62	-2,99	0,030336
AE	43,37	2,25	0,073997
MI	-15,87	-0,82	0,207792

Tabela 4.16 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-39,12	-1,67	0,122997
GC	-52,37	-2,23	0,047011
AE	37,37	1,59	0,138844
MI	-39,62	-1,69	0,118774

Tabela 4.17 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de cerâmica Mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) x cerâmica Whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O_2

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-81,50	-3,76	0,005504
GC	-50,00	-2,30	0,049701
AE	6,00	0,27	0,208668
MI	-25,25	-1,16	0,207017

Observa-se que em todas as ANOVAS realizadas a velocidade de corte ocasionou uma redução na vida das ferramentas quando esta passou de 150 para 300 m/min. Este resultado está de acordo com a literatura (MACHADO et al, 2009; TRENT; WRIGHT, 2000), onde a maior geração de calor na maior velocidade de corte acelera os mecanismos de desgaste e diminui a vida das ferramentas.

Ao passar da geometria GC1 para GC2 as vidas das ferramentas cerâmicas também diminuíram em todos os ensaios executados. Assim, a geometria com ângulo de posição (ϕ_r) de 45°, de saída (γ_o) -8°, de folga (ϕ_o) 8° e de inclinação (ϕ_s) 0° se mostrou mais adequada para tornear o Inconel® 751, superando a geometria onde estes ângulos foram de 85°, -6°, 6° e -6° respectivamente. Esta geometria GC2 foi também muito vulnerável ao microlascamento. Isto pode ser explicado pelo menor comprimento da aresta de corte em contato com a peça. A justificativa para esse fato foi a diminuição do comprimento da aresta de corte na geometria GC2.

Com relação ao material cerâmico da ferramenta, o SiAlON foi o que apresentou melhores resultados. Houve superação aos concorrentes nas comparações, seguido pela cerâmica Mista e Whisker. A literatura (EZUGWU *et al*, 1999) indica que as três cerâmicas utilizadas são apropriadas para a usinagem de ligas de níquel, sendo que a SiAlON e a Whisker, normalmente apresentam melhores resultados quando o desgaste de entalhe predomina. Os resultados deste trabalho indicam que além do entalhe, os tipos de desgastes de flanco e de ponta também estiveram presentes e assim os insertos Whisker não conseguiram ter o mesmo desempenho das demais. Além disto, as ferramentas de SiAlON comprovaram a boa resistência contra o desgaste de entalhe, fazendo que o desgaste de flanco fosse a forma de desgaste dominante, com vidas maiores nas ferramentas. A maior tenacidade apresentada pelos insertos SiAlON pode ser uma das justificativas para o melhor desempenho desse tipo de material nas ferramentas (GRZESIK, 2008).

As Tabelas 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam uma síntese dos tipos de desgaste dominantes e os prováveis mecanismos envolvidos nos ensaios realizados com insertos cerâmicos na usinagem da liga Inconel® 751.

Tabela 4.18 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de cerâmica SiAlON durante a usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
1	$V_C = 150$ m/min GC1 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
2.	$V_C = 300$ m/min GC1 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
3	$V_C = 150$ m/min GC2 AE = Normal	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
4	$V_C = 300$ m/min GC2 AE = Normal	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
5	$V_C = 150$ m/min GC1 AE = Rica em O_2	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
6	$V_C = 300$ m/min GC1 AE = Rica em O_2	Flanco médio	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
7	$V_C = 150$ m/min GC2 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
8	$V_C = 300$ m/min GC2 AE = Rica em O_2	Flanco médio	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
9	$V_C = 150$ m/min GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
10	$V_C = 300$ m/min GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
11	$V_C = 150$ m/min GC2 AE = Inerte	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta
12	$V_C = 300$ m/min GC2 AE = Inerte	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Tenacidade ferramenta

Tabela 4.19 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de cerâmica preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) durante a usinagem da liga Inconel[®] 751

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
13	$V_c = 150 \text{ m/min}$ GC1 AE = Normal	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
14	$V_c = 300 \text{ m/min}$ GC1 AE = Normal	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
15	$V_c = 150 \text{ m/min}$ GC2 AE = Normal	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
16	$V_c = 300 \text{ m/min}$ GC2 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
17	$V_c = 150 \text{ m/min}$ GC1 AE = Rica em O_2	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
18	$V_c = 300 \text{ m/min}$ GC1 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
19	$V_c = 150 \text{ m/min}$ GC2 AE = Rica em O_2	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
20	$V_c = 300 \text{ m/min}$ GC2 AE = Rica em O_2	Entalhe	<i>Attrition</i> Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
21	$V_c = 150 \text{ m/min}$ GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
22.	$V_c = 300 \text{ m/min}$ GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
23.	$V_c = 150 \text{ m/min}$ GC2 AE = Inerte	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta
24.	$V_c = 300 \text{ m/min}$ GC2 AE = Inerte	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑↑ Dureza ferramenta

Tabela 4.20 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de cerâmica whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) durante a usinagem da liga Inconel[®] 751

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
25	$V_C = 150 \text{ m/min}$ GC1 AE = Normal	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
26	$V_C = 300 \text{ m/min}$ GC1 AE = Normal	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
27	$V_C = 150 \text{ m/min}$ GC2 AE = Normal	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
28	$V_C = 300 \text{ m/min}$ GC2 AE = Normal	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
29	$V_C = 150 \text{ m/min}$ GC1 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
30	$V_C = 300 \text{ m/min}$ GC1 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
31	$V_C = 150 \text{ m/min}$ GC2 AE = Rica em O_2	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
32	$V_C = 300 \text{ m/min}$ GC2 AE = Rica em O_2	Entalhe	<i>Attrition</i> Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
33	$V_C = 150 \text{ m/min}$ GC1 AE = Inerte	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
34	$V_C = 300 \text{ m/min}$ GC1 AE = Inerte	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
35	$V_C = 150 \text{ m/min}$ GC2 AE = Inerte	Entalhe	<i>Attrition</i>	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta
36	$V_C = 300 \text{ m/min}$ GC2 AE = Inerte	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça Afinidade química moderada ↑ Dureza/tenacid. ferramenta

Os insertos cerâmicos SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) tiveram as maiores vidas entre as cerâmicas ensaiadas. O tipo de desgaste dominante para esse material foi o desgaste de flanco médio (VB_B), seguido pelo desgaste de ponta (VB_C) e em menor escala o desgaste de entalhe (VB_N). As taxas de desgaste, em todos os casos, também foram as menores quando comparadas com as cerâmicas preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) e whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$).

Segundo Childs e outros (2001) a interação química entre as ligas resistentes a altas temperaturas Ni-Cr e as cerâmicas a base de Si_3N_4 é moderada, o que pode ter favorecido a redução do mecanismo difusivo. O aumento da velocidade de corte ($v_c = 300 \text{ m/min}$) foi o fator que mais afetou a redução da vida desse tipo de inserto. No entanto a adesão moderada mencionada pelo autor não se verificou, sendo que houve uma grande adesão do material da peça na ferramenta, o que favorece os mecanismos de adesão ou *attrition*, especialmente nos casos de desgaste de ponta e de entalhe ocorridos nas cerâmicas SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$).

GRZESIK (2008) demonstra que a dureza das cerâmicas à base de Si_3N_4 é menor do que a das cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) e whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), mas a tenacidade é maior, o que justifica a maior resistência aos mecanismos de adesão ou *attrition* seguidos de abrasão, presentes no desgaste de flanco médio, que foi o tipo de desgaste dominante. Os maiores tempos de vida também foram afetados pela maior tenacidade desse tipo de material cerâmico, o que permite maior resistência.

O segundo fator mais influente na redução da vida das cerâmicas SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) foi a geometria de corte GC2, o que também foi verificado por Thangaraj e Weinmann (1992) nos mecanismos de desgaste envolvidos durante a usinagem com cerâmicas.

Especificamente no caso do desgaste de entalhe (VB_N), König e Gerschwiler (1999) apresentaram resultados em que a interação de pequenos ângulos de posição ($\chi_r = 45^\circ$) com ângulos de saída negativos atenuaram os efeitos desse tipo de desgaste durante o torneamento de ligas à base de níquel com cerâmicas. Esse fato pôde ser constatado durante os experimentos realizados, inclusive com a formação de rebarba na superfície da peça com a utilização da geometria GC2.

Wayne e Buljan (1990) demonstraram que os mecanismos de desgaste em ferramentas cerâmicas durante a usinagem de superligas à base de níquel são muito complexos. Os mecanismos envolvidos descritos pelos autores são de difusão em altas temperaturas, abrasão na superfície de folga e adesão na superfície de saída. Os tipos de desgaste mais comuns foram o desgaste de cratera (K_T) e o desgaste de entalhe (VB_N). Durante os ensaios com cerâmicas na usinagem da liga Inconel[®] 751 houve grande geração de calor (cor do cavaco), principalmente com a velocidade de corte superiores ($v_c = 300$ m/min), o que pode ter favorecido o desgaste difusivo. O mecanismo abrasivo foi mais presente no desgaste de flanco médio na superfície principal de folga da ferramenta e no desgaste da superfície de saída da mesma.

As observações realizadas por Ezugwu e outros (1999) referindo-se a influência de atmosferas envolventes ricas em O_2 , nitrogênio e argônio na vida da ferramenta durante a usinagem de ligas à base de níquel, não foram constatadas no caso das cerâmicas SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) durante a usinagem da liga Inconel[®] 751, onde a influência não foi positiva nem negativa.

Durante a usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) observou-se, também, lascamentos, fato influenciado pela dureza dos materiais cerâmicos de modo geral (1600 HV).

Os insertos de cerâmica preta ($Al_2O_3 + TiC$) foram os que apresentaram desempenho intermediário entre as cerâmicas SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) e whisker ($Al_2O_3 + SiC$). O tipo de desgaste dominante nesses insertos foi o de entalhe (VB_N), seguido pelos desgastes de flanco médio (VB_B) e pelo desgaste de ponta (VB_C). As taxas de desgaste também foram intermediárias, quando comparadas com as cerâmicas SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) e whisker ($Al_2O_3 + SiC$). No entanto, em valores absolutos, os maiores valores de desgaste de entalhe foram obtidos com as cerâmicas pretas ($Al_2O_3 + TiC$).

Childs e outros (2001) classificam a afinidade química entre as ligas Ni-Cr e as cerâmicas pretas ($Al_2O_3 + TiC$) como fraca, não favorecendo o mecanismo de desgaste difusivo, embora possa ocorrer em velocidades de corte superiores ($v_c = 300$ m/min) onde as temperaturas são maiores. Assim como as cerâmicas SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) a adesão do material da peça na ferramenta foi elevada, ao contrário do que afirmaram os autores. Assim mecanismos como *attrition* foram favorecidos por essa condição, o que pode

ter desencadeado a predominância do desgaste de entalhe (VB_N) nas cerâmicas pretas ($Al_2O_3 + TiC$).

A dureza das cerâmicas pretas ($Al_2O_3 + TiC$) é 50% superior às das cerâmicas SiALON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) e whisker ($Al_2O_3 + SiC$) (GRZESIK, 2008), o que pode explicar os valores maiores que 1mm para os desgastes de entalhe (VB_N) encontrados, onde predominaram os mecanismos de *attrition* e abrasão. As cerâmicas whisker ($Al_2O_3 + SiC$) apresentam menor dureza, assim os tempos de vida obtidos para as cerâmicas pretas ($Al_2O_3 + TiC$) foram superiores.

As constatações de König e Gerschwiler (1999) quanto ao uso de pequenos ângulos de posição e ângulos de saída negativos, parecem ter minimizado o surgimento do entalhe nos insertos de cerâmica preta ($Al_2O_3 + TiC$) durante a usinagem da liga Inconel® 751. A condição preferencial do surgimento do desgaste de entalhe nas cerâmicas pretas ($Al_2O_3 + TiC$) foi a interação da menor velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min) e da segunda geometria de corte (GC2 com $\chi_r = 85^\circ$).

O surgimento de entalhe em velocidades de corte superiores ($v_c = 300$ m/min) nos insertos de cerâmica preta ($Al_2O_3 + TiC$) pode ser explicado, segundo Trent e Wright (2000), onde o aumento da velocidade de corte implicaria no aumento da temperatura diminuindo a resistência da ferramenta, tendendo a acelerar o processo de desgaste por difusão e a formação contínua de óxidos que se aderem à ferramenta e posteriormente havendo a quebra dessas junções de aderência entre óxidos e ferramenta, podendo remover material desta última por *attrition*.

Shaw (1986) apresenta possíveis causas para o surgimento do desgaste de entalhe, sendo as mais prováveis o encruamento do material na superfície da peça usinada, a presença de rebarba na aresta da superfície usinada e a fadiga do material da ferramenta provocada pela flutuação da força de corte que acompanha os movimentos laterais das arestas dos cavacos.

Durante a usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica pode-se constatar que a cor do cavaco nas bordas possuía coloração rubra, sendo que no centro do mesmo era acinzentado, levando a concluir que na periferia do cavaco a temperatura é maior, essa constatação também foi feita por Shaw (1986).

Richards e Aspinwall (1989) também citam a temperatura acima de 1000 °C e as tensões superiores a 3450 MPa na região de corte, característica das superligas de níquel, como a causa do desencadeamento de acelerados processos de desgaste, entre eles o desgaste de entalhe.

Além da temperatura e das tensões desenvolvidas na região de corte, a condição de escorregamento envolvendo abrasão e *attrition*, possivelmente influenciado por condições atmosféricas, também fazem parte das condições apropriadas para o surgimento do entalhe (MACHADO; DA SILVA, 2004). Childs e outros (2001) também citam as forças e tensões desenvolvidas durante a usinagem e a atmosfera envolvente como fatores que favorecem o desenvolvimento do desgaste de entalhe na usinagem, das ligas de níquel com insertos de cerâmica preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$).

A evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) nos insertos de cerâmica preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) foi o segundo tipo de desgaste mais observado. As velocidades de corte superiores favorecem a evolução do desgaste de flanco (VB_B) (JUN *et al.*, 1997).

Nos desgastes de ponta (VB_C) observados nas cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), o uso da maior velocidade de corte ($v_c = 300 \text{ m/min}$) parece ter favorecido esse tipo de desgaste, sendo os mecanismos difusivo e abrasivo os mais prováveis.

A influência das atmosferas rica em O_2 e inerte foi maior no caso da evolução do desgaste de entalhe (VB_N), enquanto no desgaste de ponta (VB_C) foi mais comum em atmosfera normal. A formação de óxidos com a maior disponibilidade de O_2 na atmosfera envolvente pode ter favorecido o mecanismo de *attrition*. No caso da usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de cerâmica preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) pode-se constatar a influência das atmosferas envolventes na evolução de diferentes tipos de desgaste conforme observado também por Ezugwu e outros (1999).

Os insertos de cerâmica reforçada com whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) apresentaram as maiores taxas de desgaste entre as cerâmicas ensaiadas, sendo o desgaste de ponta (VB_C) o tipo dominante, seguido pelo desgaste de entalhe (VB_N) e em apenas um caso o desgaste de flanco médio (VB_B). Apesar do desgaste de ponta (VB_C) ter sido dominante, houve evolução dos outros tipos de desgaste simultaneamente.

As interações química e adesiva entre as ligas Ni-Cr resistentes a altas temperaturas e as cerâmicas whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) são consideradas moderadas por Childs e outros (2001), o que favorece o mecanismo difusivo de desgaste, podendo explicar a maior parte dos desgastes de ponta (VB_C) em velocidades de corte superiores ($v_c = 300 \text{ m/min}$), observados durante a usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de cerâmica whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$). O mecanismo abrasivo também pode ter sido um dos responsáveis pela maior evolução do desgaste de ponta (VB_C) em velocidades de corte inferiores ($v_c = 150 \text{ m/min}$) nos ensaios com cerâmica whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$). Identicamente às cerâmicas SiALON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) e preta ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), as cerâmicas whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) tiveram grande adesão do material da peça nos insertos, contrariando alguns autores citados acima. Essa condição favorece mecanismos como *attrition*, explicando o segundo tipo de desgaste mais comum que foi o desgaste de entalhe (VB_N).

As cerâmicas whiskers ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) apresentam dureza um pouco inferior às cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), o que confere uma maior resistência à abrasão, conforme menciona Grzesik (2008). Entretanto, a maior tenacidade das whiskers ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) pode lhes garantir maior resistência ao desgaste por *attrition*, seguido de abrasão. Esse fato pode explicar a maior resistência a evolução do desgaste de flanco médio (VB_B) apresentado pelos insertos whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), em relação às cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$).

As recomendações de König e Gerschwiler (1999) para o uso de pequenos ângulos de posição e ângulos de saída negativos, na prevenção do surgimento de entalhe nos insertos de cerâmica whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) foram pertinentes, mas não tiveram efetividade na evolução do desgaste de ponta (VB_C).

As considerações sobre o desgaste de entalhe (VB_N) para os insertos de cerâmica whisker ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) durante a usinagem da liga Inconel[®] 751, são idênticas às das cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), segundo Trent e Wright (2000), Shaw (1986), Richards e Aspinwall (1989), Childs e outros (2001), Machado e Da Silva (2004).

Ao contrário das cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), o aumento da velocidade de corte ($v_c = 300 \text{ m/min}$) não favoreceu a evolução do desgaste de flanco médio (VB_B), tendo sido mais provável sua influência na maior evolução

do desgaste de ponta (VB_C), o que contraria as observações de JUN *et al.* (1997). No entanto, os mecanismos abrasivo e difusivo aparecem como os maiores responsáveis por essa tendência.

A atmosfera inerte foi a que mais favoreceu a evolução do desgaste de ponta (VB_C) da ferramenta, onde os mecanismos atuantes foram abrasão e difusão. O mecanismo de *attrition* presente no desgaste de entalhe (VB_N), que foi o segundo tipo mais observado, teve na atmosfera normal a condição mais comum. No caso da usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de cerâmica whisker ($Al_2O_3 + SiC$), as observações de EZUGWU *et al.* (1999) quanto à influência das atmosferas envolventes no desenvolvimento do desgaste de ponta e desgaste de entalhe foram percebidas.

4.2.8 Rugosidade Superficial na Usinagem com Insertos de Cerâmica

Os parâmetros de rugosidade superficial selecionados para acompanhar a evolução dos desgastes na usinagem da liga Inconel[®] 751 foram:

Rugosidade média (R_a);

Rugosidade média quadrática ou desvio médio quadrático (R_q);

Rugosidade total (R_t).

Esses parâmetros foram selecionados por apresentarem boas respostas no acompanhamento da evolução dos desgastes durante a fase de pré-testes com a liga Inconel[®] 751. Todas as unidades foram medidas em μm e representam o valor médio de rugosidade para cada parâmetro analisado. Os procedimentos para as medições de rugosidade superficial foram descritas no Item 3.1.1.

O parâmetro rugosidade total (R_t) foi o que se mostrou mais adequado para identificar a aceleração dos desgastes no fim de vida das ferramentas, assim como prever falhas catastróficas durante os ensaios. Os parâmetros rugosidade média (R_a) e rugosidade média quadrática (R_q) foram mais aptas no acompanhamento da evolução dos desgastes durante as medidas de vida, mas não mostraram indícios do fim da mesma.

Conforme a norma ABNT NBR 6405 (1985) a rugosidade média (R_a) é definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas (y) dos

afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição (L). A equação (1) expressa essa relação:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (1)$$

Onde:

L → Percurso de medição;

y → Altura da rugosidade;

dx → Largura de um percurso infinitesimal

Ainda segundo a mesma norma, a rugosidade ou desvio médio quadrático (R_q) é um parâmetro correspondente a R_a , sendo $R_q = 1,11$ a $1,25 R_a$. O efeito das irregularidades que se afastam da média é aumentado pela elevação ao quadrado da altura (y^2). A relação de R_q é expressa a seguir em (2):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \quad (2)$$

O parâmetro rugosidade total (R_t) é definido como a diferença entre o pico mais alto e a depressão mais baixa das irregularidades no percurso de medição (L). Pode ser considerado um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de usinagem.

Os valores médios das rugosidades obtidas durante os ensaios, por tipo de material cerâmico, são apresentados nas Tabelas 4.21, 4.22 e 4.23.

Tabela 4.21 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com ferramentas de cerâmica SiAlON

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
1	150	GC1	Normal	4,70	5,12	24,70
2	300	GC1	Normal	4,67	5,45	37,32
3	150	GC2	Normal	2,74	3,52	24,44
4	300	GC2	Normal	3,70	9,75	17,49
5	150	GC1	Rica em O_2	4,26	5,32	26,43
6	300	GC1	Rica em O_2	2,23	2,62	10,93
7	150	GC2	Rica em O_2	0,86	1,08	8,85
8	300	GC2	Rica em O_2	1,86	2,42	16,68
9	150	GC1	Inerte	3,76	4,10	14,66
10	300	GC1	Inerte	4,45	5,56	49,41
11	150	GC2	Inerte	2,60	3,35	25,24
12	300	GC2	Inerte	4,77	5,62	24,42

Tabela 4.22 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com ferramentas de cerâmica preta

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
13	150	GC1	Normal	2,43	3,07	16,51
14	300	GC1	Normal	1,60	2,20	21,53
15	150	GC2	Normal	1,60	2,20	11,58
16	300	GC2	Normal	1,20	1,61	7,69
17	150	GC1	Rica em O_2	2,76	3,25	12,54
18	300	GC1	Rica em O_2	1,55	1,86	10,92
19	150	GC2	Rica em O_2	2,78	3,69	19,58
20	300	GC2	Rica em O_2	1,70	2,32	22,95
21	150	GC1	Inerte	5,40	5,93	19,02
22	300	GC1	Inerte	2,45	2,99	16,71
23	150	GC2	Inerte	6,58	7,54	30,34
24	300	GC2	Inerte	2,86	3,46	14,74

Tabela 4.23 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com ferramentas de cerâmica whisker

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
25	150	GC1	Normal	5,33	6,61	25,38
26	300	GC1	Normal	7,52	7,67	40,22
27	150	GC2	Normal	2,30	2,89	17,53
28	300	GC2	Normal	4,35	5,41	28,34
29	150	GC1	Rica em O_2	2,50	3,21	35,68
30	300	GC1	Rica em O_2	5,53	6,60	41,59
31	150	GC2	Rica em O_2	6,25	7,73	36,83
32	300	GC2	Rica em O_2	3,12	3,90	36,97
33	150	GC1	Inerte	2,98	3,90	46,82
34	300	GC1	Inerte	7,59	9,17	58,40
35	150	GC2	Inerte	6,27	8,08	55,36
36	300	GC2	Inerte	4,03	4,86	25,04

Os gráficos das médias das rugosidades superficiais, por tipo de material cerâmico são mostrados nas Figuras 4.42, 4.43 e 4.44 a seguir:

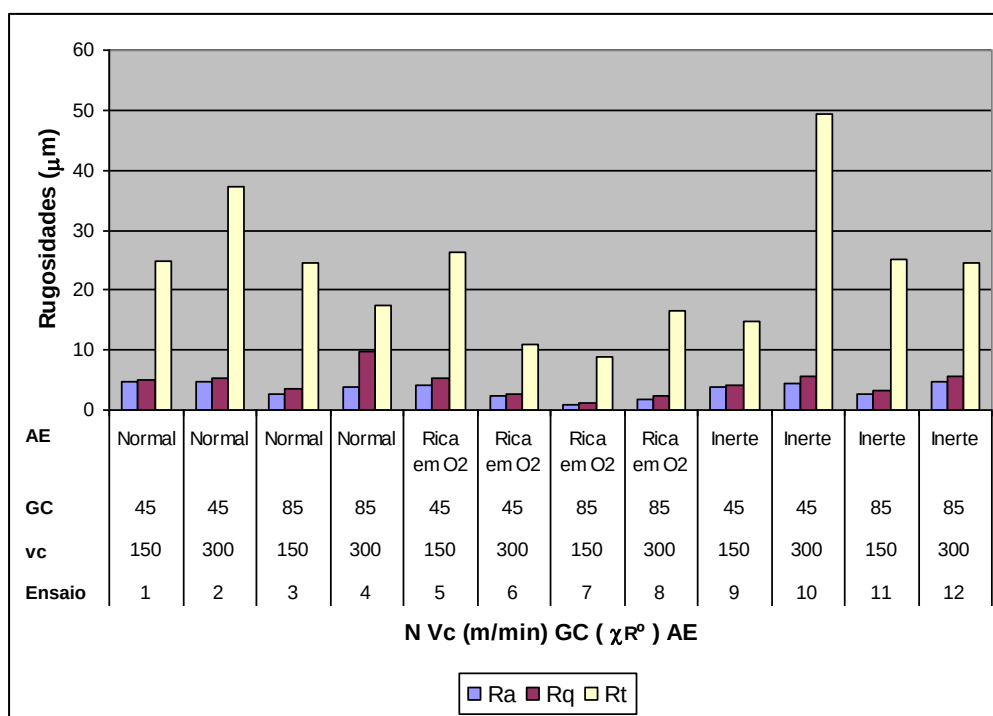


Figura 4.42 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com ferramentas de cerâmica SiAlON

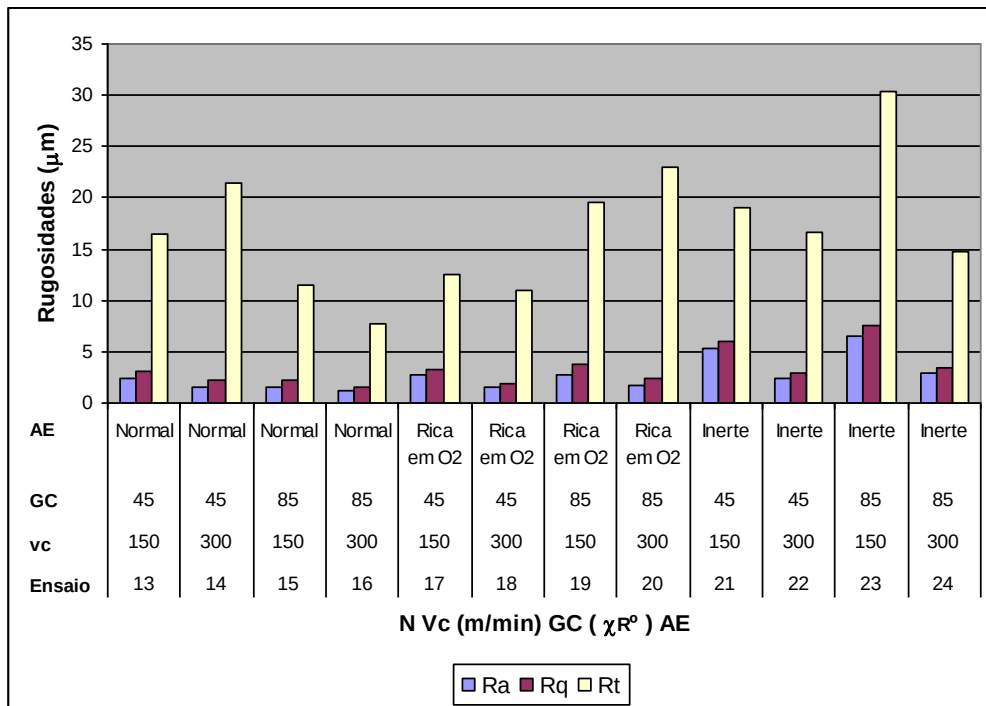


Figura 4.43 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com ferramentas de cerâmica preta

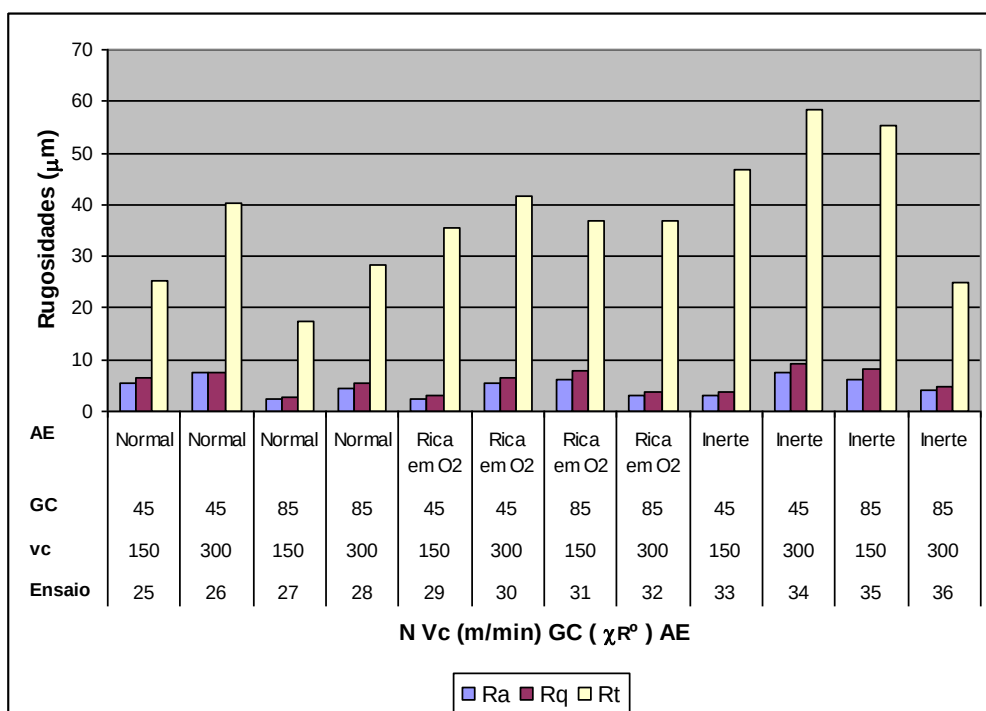


Figura 4.44 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com ferramentas de cerâmica whisker

A rugosidade média (R_a) nos insertos de cerâmica SiAlON se apresentou com valores um pouco superiores aos das cerâmicas pretas e aproximadamente igual aos das cerâmicas whisker. Este fato pode ser explicado pelas maiores vidas alcançadas por esse material em relação as outras cerâmicas. O parâmetro desvio médio quadrático (R_q) que acentua o efeito do afastamento das irregularidades da média das medidas no caso dessas cerâmicas também foi maior. Os valores das rugosidades totais acompanharam os outros parâmetros medidos, mas esse parâmetro serviu apenas como indicador de fim de vida durante os ensaios.

O efeito da maior velocidade de corte ($v_c = 300$ m/min) sobre os parâmetros de rugosidade nas cerâmicas SiAlON foi mais acentuado na interação com a geometria GC2, fazendo diminuir os valores das rugosidades. A interação da menor velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min) com a geometria GC1 teve o efeito contrário.

As atmosferas envolventes tiveram influência sobre os parâmetros de rugosidade das cerâmicas SiAlON, mostrando que as atmosferas normal e inerte exerceram pouca influência nos resultados, enquanto a atmosfera rica em oxigênio gerou os melhores (menores) valores finais em todos os parâmetros avaliados.

Para as cerâmicas pretas e whiskers os valores encontrados para as rugosidades médias (R_a) foram menores ou iguais aos das cerâmicas SiAlON, mas este fato também esteve associado a menores vidas das primeiras. Os valores dos desvios médios quadráticos (R_q) e das rugosidades totais (R_t) acompanharam a tendência das rugosidades médias.

A interação da menor velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min) com a geometria GC2 forneceu a menor rugosidade média (R_a), nos resultados dos ensaios com as cerâmicas pretas e whiskers. Os desvios médios quadráticos (R_q) acompanharam essa tendência, assim como os valores das rugosidades totais (R_t). Esse fato foi acentuado quando em atmosfera normal.

Verifica-se que as rugosidades médias (R_a) e os desvios médio quadráticos (R_q) para as cerâmicas pretas tiveram os valores aumentados em atmosfera inerte, o mesmo acontecendo com as rugosidades totais (R_t).

No caso das cerâmicas pretas a interação da geometria GC1 com a maior velocidade de corte ($v_c = 300$ m/min) também desencadeou o aumento das rugosidades, tanto em atmosfera rica em O_2 quanto em atmosfera inerte.

As rugosidades obtidas para as cerâmicas whisker indicaram que a atmosfera inerte obteve os maiores valores para todos os parâmetros de rugosidade avaliados.

Os valores de rugosidade média (R_a) e os desvios médios quadráticos (R_q) foram maiores em atmosfera inerte, tanto em velocidades menores quanto em velocidades maiores. As geometrias de corte também não parecem ter influenciado nos resultados das cerâmicas whiskers nesse caso.

Os melhores resultados de rugosidade superficial para as cerâmicas whisker foram obtidos em atmosfera normal. A menor velocidade de corte ($v_c = 150$ m/min) acentuou esses resultados.

4.2.9 Forças de Corte na Usinagem com Insertos de Cerâmica

Na determinação das forças envolvidas no processo de usinagem da liga Inconel® 751 com insertos cerâmicos, foram realizadas medições das componentes da força de usinagem conforme descrito a seguir:

Força de avanço (F_x);

Força passiva (F_y);

Força de corte (F_z).

O objetivo foi o de acompanhar a evolução, a possível influência no desgaste e tempo de vida das ferramentas.

As unidades utilizadas para as medidas de força foram expressas em Newton (N) e representam o valor médio para cada parâmetro analisado, no início de cada ensaio. Os procedimentos para as medições foram descritos no Sub-item 3.1.1

Os valores médios observados durante os ensaios com o Inconel® 751, por tipo de inserto cerâmico utilizado, podem ser vistos nas Tabelas 4.24, 4.25 e 4.26.

Tabela 4.24 – Forças F_x (avanço), F_y (passiva) e F_z (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica SiAlON

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	F_x (avanço)	F_y (passiva)	F_z (corte)
1	150	GC1	Normal	629	729	1273
2	300	GC1	Normal	717	878	1127
3	150	GC2	Normal	603	482	1299
4	300	GC2	Normal	623	501	1050
5	150	GC1	Rica em O_2	608	747	1368
6	300	GC1	Rica em O_2	624	794	1109
7	150	GC2	Rica em O_2	568	460	1251
8	300	GC2	Rica em O_2	570	475	992
9	150	GC1	Inerte	750	949	1368
10	300	GC1	Inerte	725	938	1100
11	150	GC2	Inerte	576	444	1291
12	300	GC2	Inerte	575	477	1010

Tabela 4.25 – Forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica Mista

Ensaio	V _c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	Fx (avanço)	Fy (passiva)	Fz (corte)
13	150	GC1	Normal	645	747	1461
14	300	GC1	Normal	571	882	1200
15	150	GC2	Normal	592	435	1278
16	300	GC2	Normal	510	421	1031
17	150	GC1	Rica em O ₂	588	686	1381
18	300	GC1	Rica em O ₂	493	582	1093
19	150	GC2	Rica em O ₂	682	479	1299
20	300	GC2	Rica em O ₂	631	426	1067
21	150	GC1	Inerte	696	814	1375
22	300	GC1	Inerte	615	710	1148
23	150	GC2	Inerte	547	421	1234
24	300	GC2	Inerte	477	367	1002

Tabela 4.26 – Forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica Whisker

Ensaio	V _c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	Fx (avanço)	Fy (passiva)	Fz (corte)
25	150	GC1	Normal	545	664	1390
26	300	GC1	Normal	502	617	1096
27	150	GC2	Normal	521	389	1291
28	300	GC2	Normal	459	329	1006
29	150	GC1	Rica em O ₂	492	591	1336
30	300	GC1	Rica em O ₂	437	536	1063
31	150	GC2	Rica em O ₂	556	407	1340
32	300	GC2	Rica em O ₂	505	366	1088
33	150	GC1	Inerte	626	777	1357
34	300	GC1	Inerte	579	725	1081
35	150	GC2	Inerte	565	421	1240
36	300	GC2	Inerte	518	394	1007

Os gráficos das medições das forças de usinagem, por tipo de material cerâmico durante a usinagem da liga Inconel® 751, são ilustrados nas Figuras 4.45, 4.46 e 4.47.

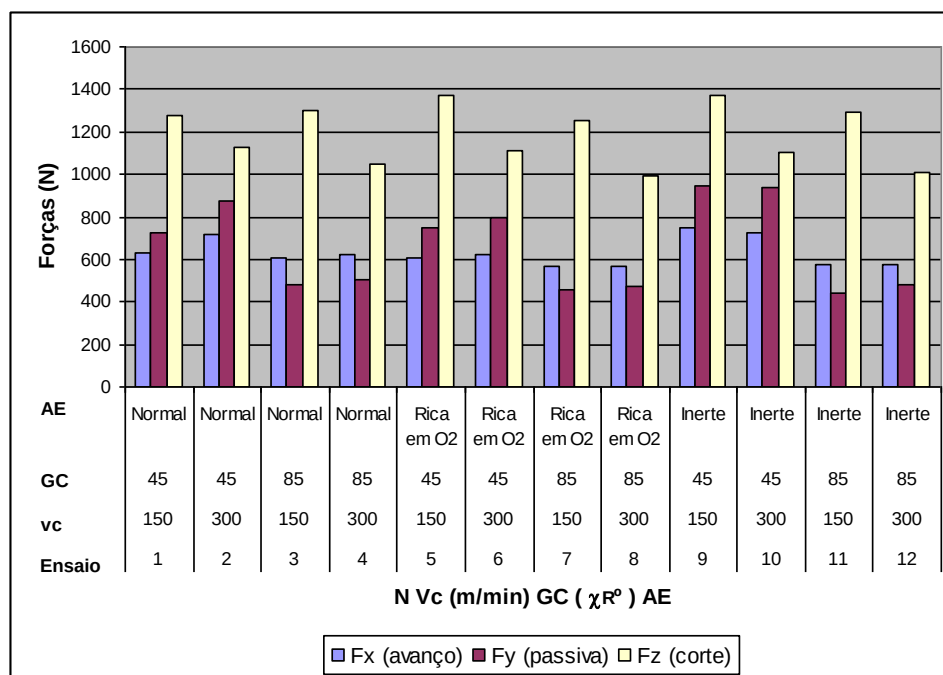


Figura 4.45 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica SiAlON

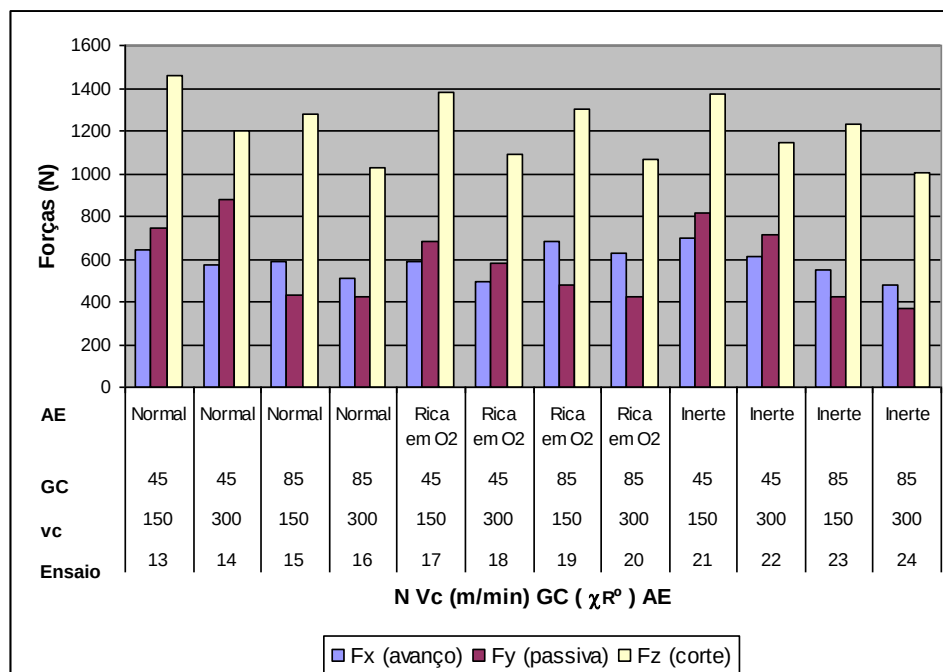


Figura 4.46 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de cerâmica Mista

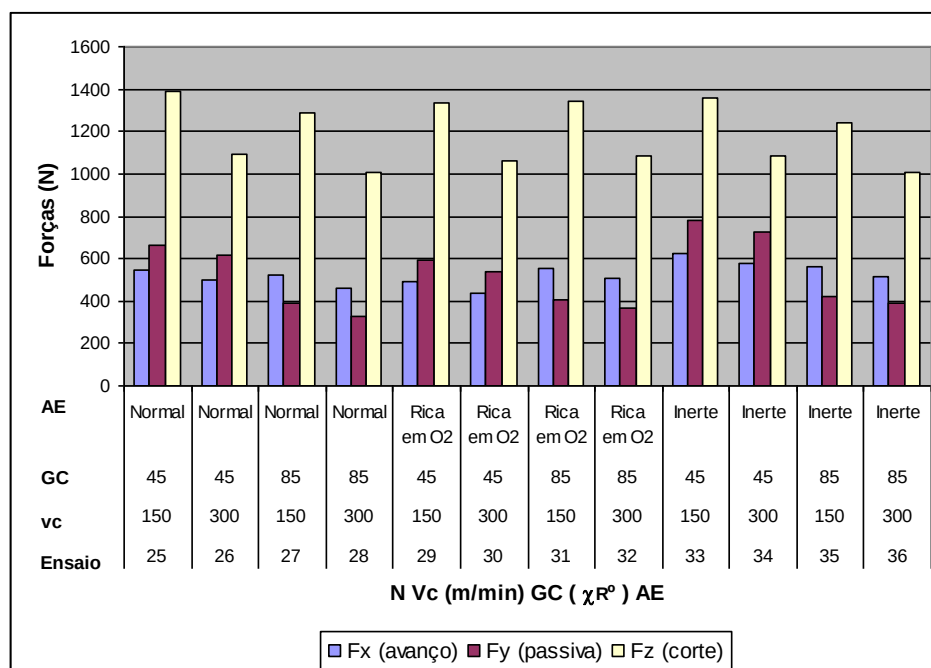


Figura 4.47 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de cerâmica Whisker

Os valores médios das componentes de força de usinagem para os insertos SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) são menores do que para as demais cerâmicas. Lembrando que esse tipo de material cerâmico foi o que teve o maior tempo de vida, porém com pobres acabamentos superficiais. Esse fato pode ser explicado devido à evolução de mais de um tipo de desgaste simultaneamente, com influência de diversos mecanismos atuantes (LO CASTO *et al.*, 1999; ZOU *et al.*, 2009).

No caso das cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) os parâmetros médios das componentes das forças apresentaram os maiores valores quando comparados com as outras cerâmicas. A atmosfera inerte foi o caso em que esses parâmetros apresentaram valores um pouco superiores, mas como no caso dos insertos SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) houve influência de mais de um tipo de desgaste, principalmente o desgaste de ponta (VB_C), (ZOU *et al.*, 2009).

Os parâmetros médios das componentes das forças de usinagem das cerâmicas Whisker podem ter sido influenciados pelo desgaste de ponta (VB_C), que foi o mais observado durante os ensaios, tendo valores intermediários entre as cerâmicas SiAlON ($\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3$) e as cerâmicas pretas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$). Essa condição foi pior quando em atmosfera inerte, onde o mecanismo mais atuante foi abrasão.

4.3 Evolução dos Desgastes em Insertos de Metal Duro

A Tabela 4.27 mostra os resultados dos ensaios realizados com insertos de metal duro durante a usinagem da liga Inconel[®] 751, nas condições descritas no Item 3.2.

Durante os ensaios com insertos de metal duro e o Inconel[®] 751 foram detectados, além do desgaste de cratera, dois tipos de desgaste:

Metal duro WC/Co → Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) – Figura 4.48;

Metal duro WC/Co 6% → Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) – Figura 4.49;

Metal duro WC/Co 10% → Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) – Figura 4.50.

Tabela 4.27 – Condições de corte e vidas em insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	V _c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	MI	Desgaste (mm)	t (s)
55	45	GC2	Rica em O2	WC/Co 6%	VB _B	780
49	45	GC1	Normal	WC/Co 6%	VB _B	760
37	45	GC1	Normal	WC/Co	VB _B	750
41	45	GC1	Rica em O2	WC/Co	VB _B	730
57	45	GC1	Inerte	WC/Co 6%	VB _B	720
51	45	GC2	Normal	WC/Co 6%	VB _B	710
45	45	GC1	Inerte	WC/Co	VB _B	700
59	45	GC2	Inerte	WC/Co 6%	VB _B	630
53	45	GC1	Rica em O2	WC/Co 6%	VB _C	570
54	60	GC1	Rica em O2	WC/Co 6%	VB _C	570
56	60	GC2	Rica em O2	WC/Co 6%	VB _B	540
52	60	GC2	Normal	WC/Co 6%	VB _B	525
50	60	GC1	Normal	WC/Co 6%	VB _B	520
43	45	GC2	Rica em O2	WC/Co	VB _B	480
39	45	GC2	Normal	WC/Co	VB _B	461
60	60	GC2	Inerte	WC/Co 6%	VB _B	430
58	60	GC1	Inerte	WC/Co 6%	VB _B	422
47	45	GC2	Inerte	WC/Co	VB _B	382
67	45	GC2	Rica em O2	WC/Co 10%	VB _C	365
71	45	GC2	Inerte	WC/Co 10%	VB _C	301
69	45	GC1	Inerte	WC/Co 10%	VB _C	240
38	60	GC1	Normal	WC/Co	VB _B	240
70	60	GC1	Inerte	WC/Co 10%	VB _C	225
63	45	GC2	Normal	WC/Co 10%	VB _B	210
65	45	GC1	Rica em O2	WC/Co 10%	VB _C	200
68	60	GC2	Rica em O2	WC/Co 10%	VB _C	186
40	60	GC2	Normal	WC/Co	VB _B	180
42	60	GC1	Rica em O2	WC/Co	VB _B	170
46	60	GC1	Inerte	WC/Co	VB _B	160
72	60	GC2	Inerte	WC/Co 10%	VB _C	140
44	60	GC2	Rica em O2	WC/Co	VB _B	140
66	60	GC1	Rica em O2	WC/Co 10%	VB _C	132
48	60	GC2	Inerte	WC/Co	VB _B	120
61	45	GC1	Normal	WC/Co 10%	VB _C	110
64	60	GC2	Normal	WC/Co 10%	VB _C	107
62	60	GC1	Normal	WC/Co 10%	VB _C	64

Segundo os resultados dos ensaios com insertos de metal duro, pode-se notar que os maiores tempos de vida foram obtidos nas menores velocidades de corte ($v_c = 45$ m/min), na maioria dos casos. Outro fator que também teve influência positiva foi a primeira geometria de corte ensaiada, em que o ângulo de posição χ_r foi igual a 45° .

A interação desses dois fatores com o material do inserto de metal duro com 6% de cobalto na matriz de carboneto (WC/Co 6%) revestida pelo processo PVD (Physical Vapor Deposition) com TiAlN, fizeram dessas condições as que tiveram os maiores tempos de vida. O segundo material com os maiores tempos de vida foi o metal duro sem revestimento (WC/Co).

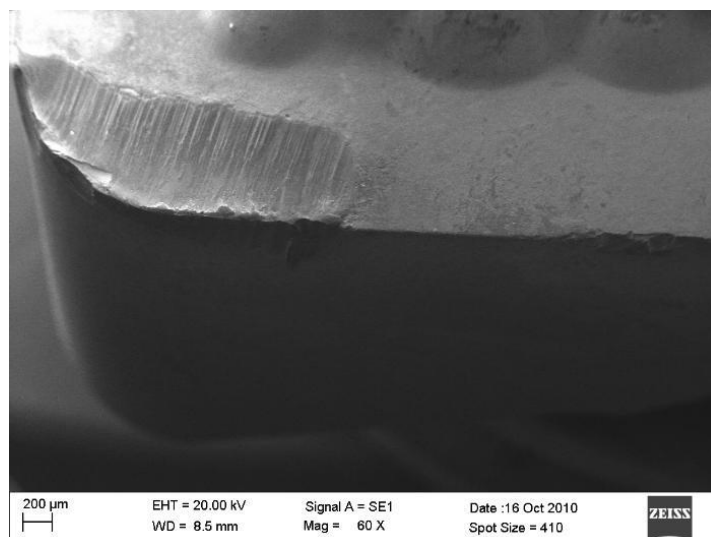


Figura 4.48 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) no inserto de metal duro WC/Co sem revestimento, após 750s (N37)

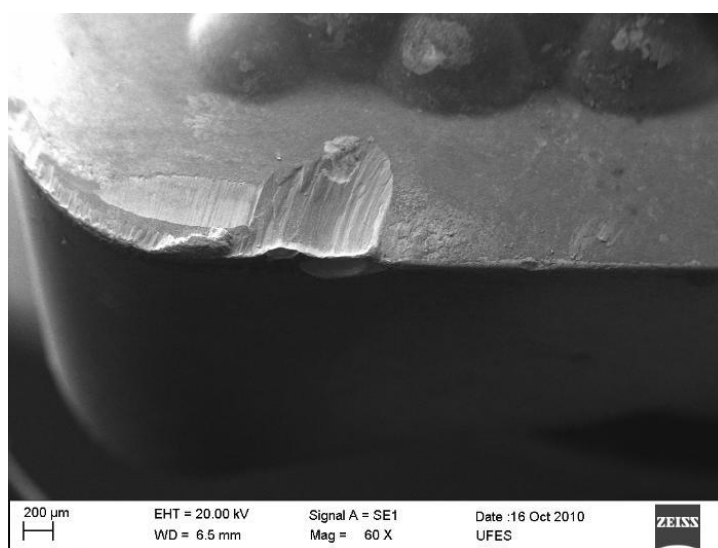


Figura 4.49 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) no inserto de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN, após 780s (N55)

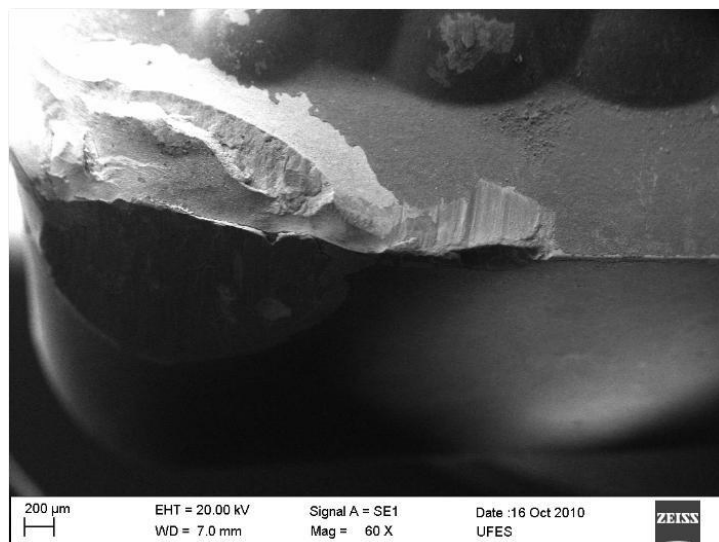


Figura 4.50 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) no inserto de metal duro WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN, após 365s (N67)

Os insertos de metal duro citados e utilizados na usinagem da liga Inconel[®] 751 foram analisados também no MEV, com utilização de EDS, sendo os resultados apresentados nas Figuras 4.51 a 4.62.

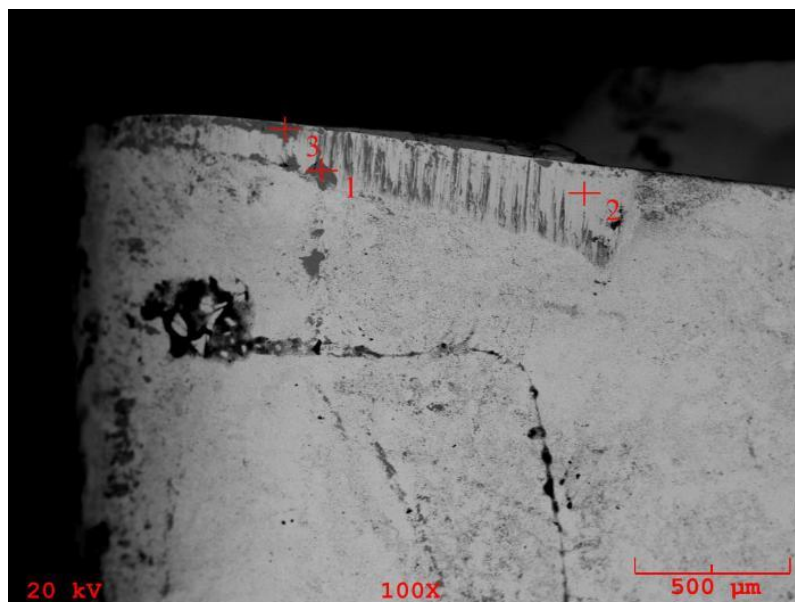


Figura 4.51 – Superfície de folga principal de um inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, após 750s na usinagem da liga Inconel[®] 751

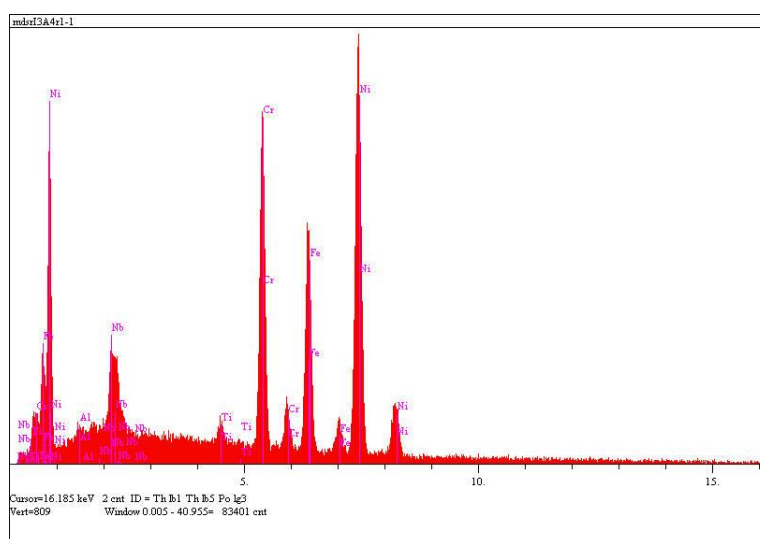


Figura 4.52 – Análise química da superfície de folga principal do inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 1

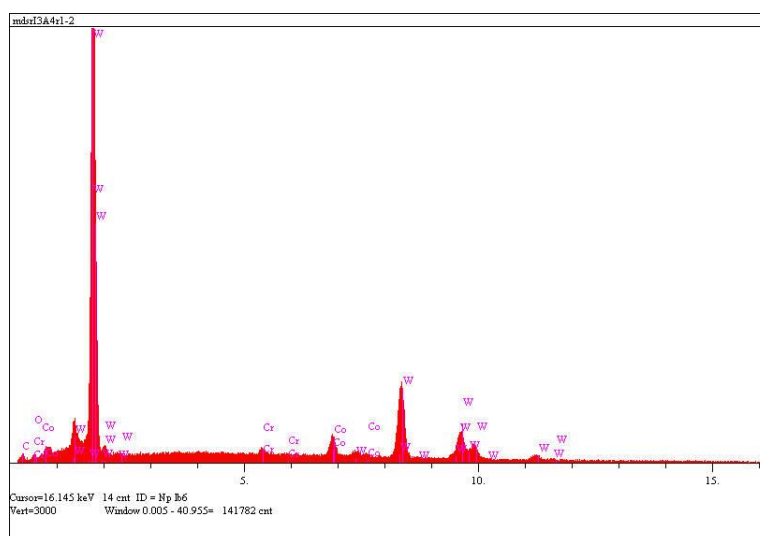


Figura 4.53 – Análise química da superfície de folga principal do inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 2

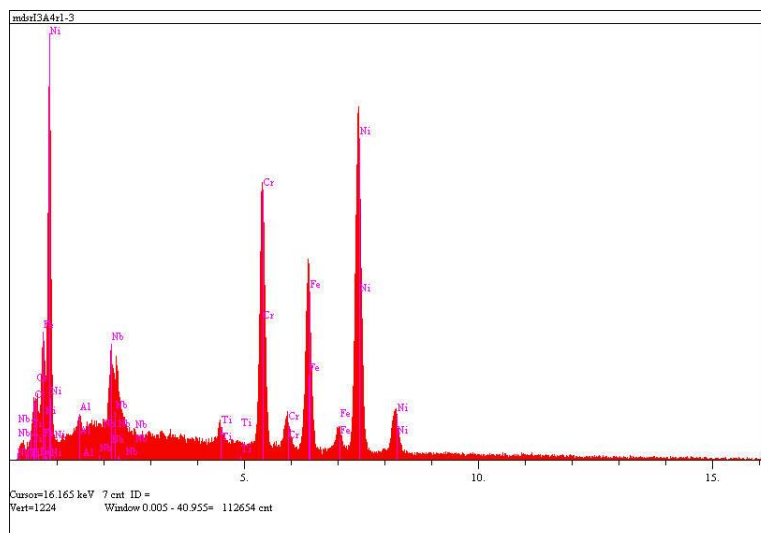


Figura 4.54– Análise química da superfície de folga principal do inserto em metal duro WC/Co sem revestimento, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3

Observa-se pelos resultados do EDS, que o ponto 2 apresenta praticamente só os elementos constituintes da ferramenta, enquanto que nos pontos 1 e 3 há material da peça aderido na ferramenta.

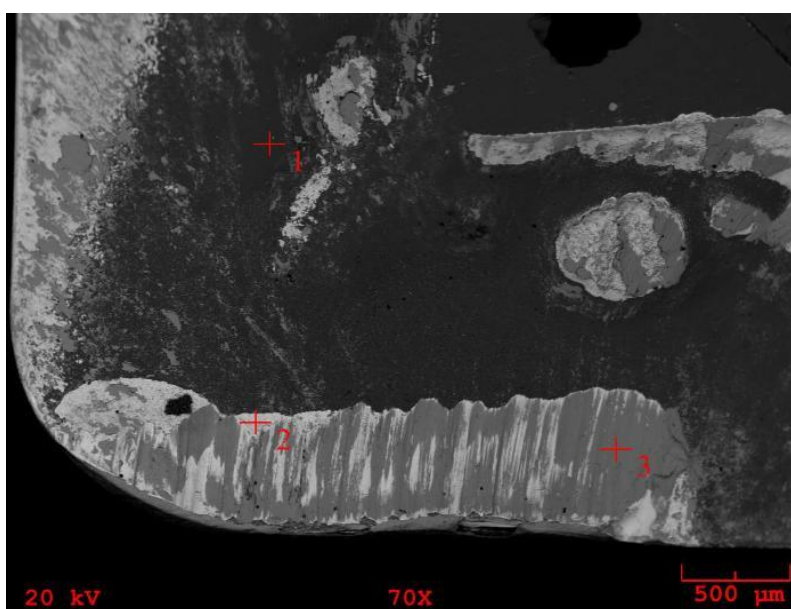


Figura 4.55 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, após 780s na usinagem da liga Inconel® 751

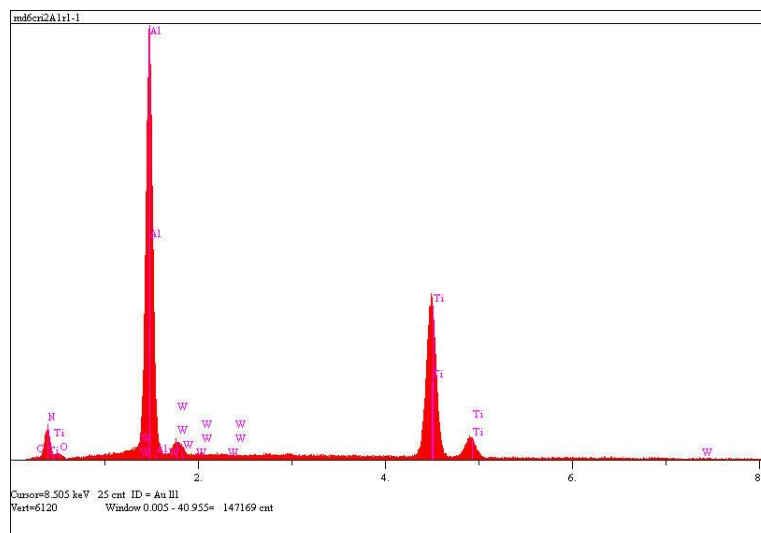


Figura 4.56 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 1

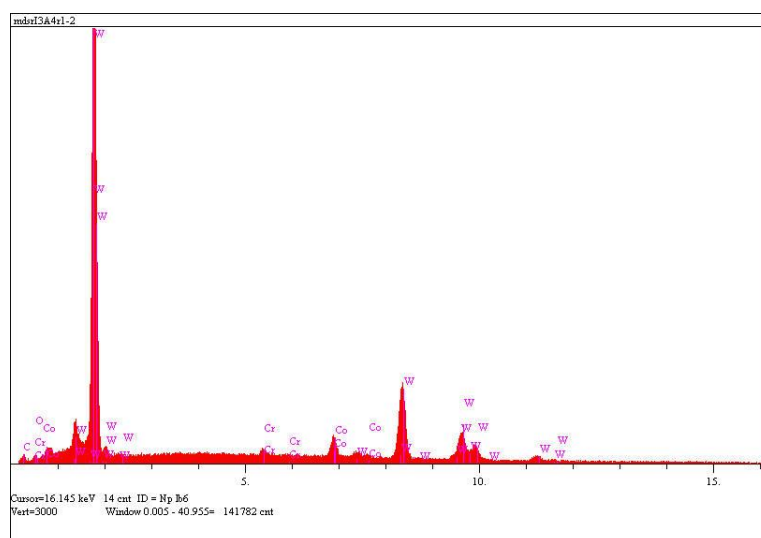


Figura 4.57 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 2

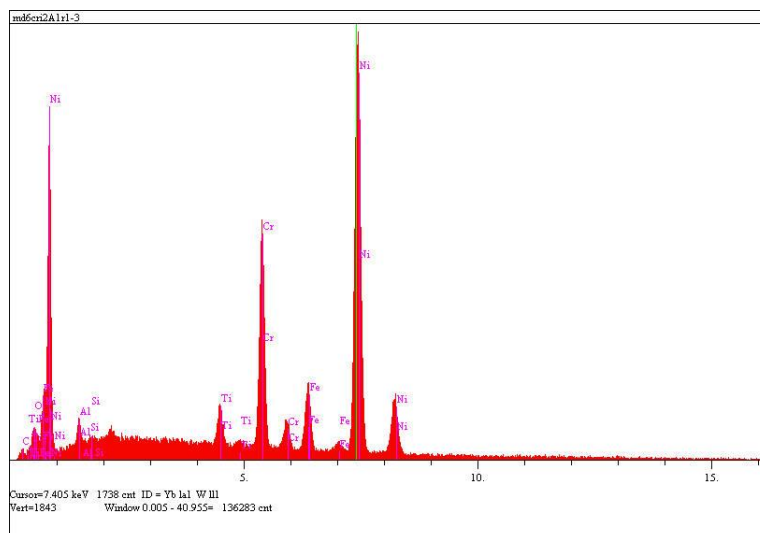


Figura 4.58 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3

Os resultados de EDS indicam que o ponto 1 se trata da superfície do revestimento de TiAlN do metal duro; enquanto o ponto 2 indica se tratar do substrato do inserto, em uma região em que o revestimento já se perdeu por desgaste; e o ponto 3 é uma região desgastada, com material da peça aderido na superfície de saída da ferramenta.

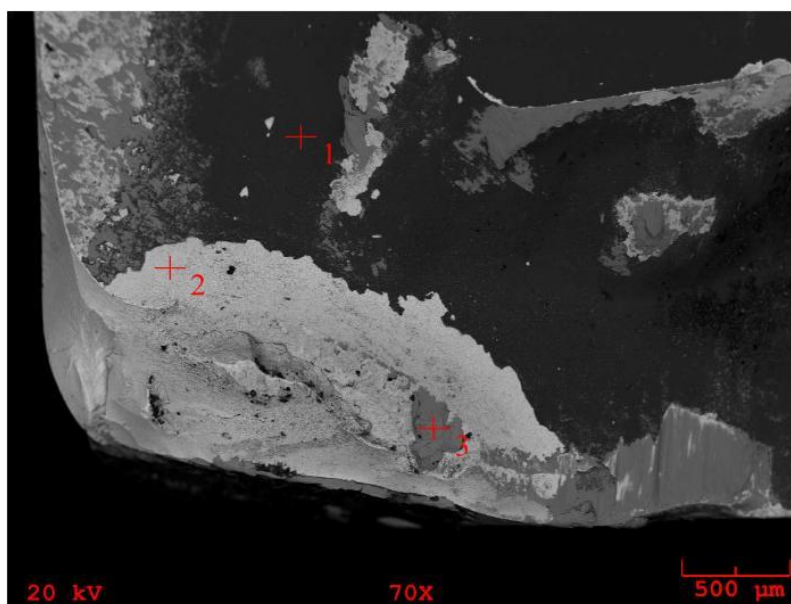


Figura 4.59 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, após 365s na usinagem da liga Inconel® 751

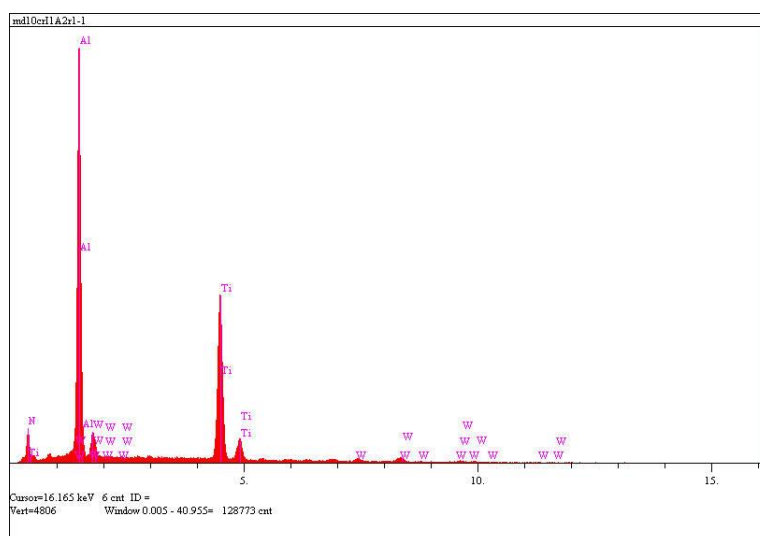


Figura 4.60 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 1

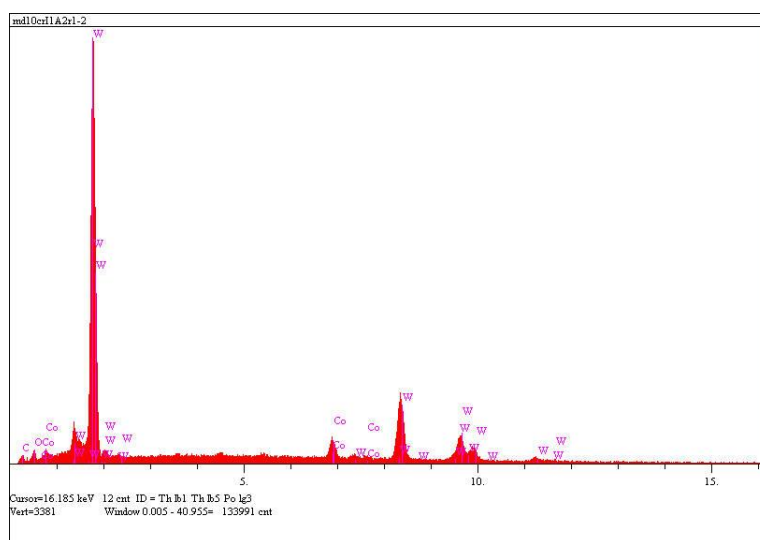


Figura 4.61 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 751 no ponto 2

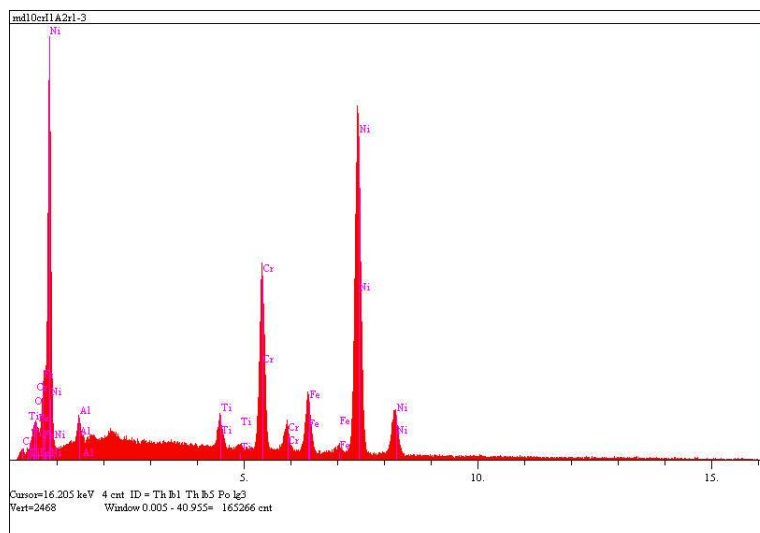


Figura 4.62 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel® 751 no ponto 3

Os resultados de EDS indicam que o ponto 1 se trata da superfície do revestimento de TiAlN; enquanto o ponto 2 é uma região desgastada, em que o substrato se aflora; e o ponto 3 é uma região com material da peça aderido na superfície desgastada da ferramenta, indicando que houve adesão.

Na usinagem da liga Inconel® 751, com relação à atmosfera envolvente, aquela rica em oxigênio favoreceu positivamente os tempos de vida, seguido pela atmosfera normal, sendo que a atmosfera inerte foi a que apresentou a menor vida da ferramenta. Isto pode ser um indicativo de que formações de óxidos podem ter protegido a superfície das ferramentas.

Sem considerar o desgaste de cratera, o tipo de desgaste que predominou nas condições citadas anteriormente foi o desgaste de flanco médio (VB_B).

As menores vidas foram observadas em insertos de metal duro com 10% de cobalto na matriz de carboneto (WC/Co 10%) e revestimento pelo processo PVD com TiAlN, onde o desgaste de ponta predominou. Nesse caso a maior velocidade de corte foi o parâmetro mais influente, acelerando este tipo de desgaste.

A Tabela 4.28 mostra os resultados dos ensaios realizados com insertos de metal duro durante a usinagem da liga Inconel[®] 718, também nas condições descritas no Item 3.2.

Durante os ensaios com insertos de metal duro e o Inconel[®] 718, além do desgaste de cratera, foram detectados três tipos de desgaste:

Metal duro WC/Co 6% → Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de entalhe (VB_N) – Figura 4.63;

Metal duro WC/Co 10% → Desgaste de ponta (VB_C) e desgaste de flanco médio (VB_B) – Figura 4.64.

Tabela 4.28 – Condições de corte e vidas em insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel[®] 718

Ensaio	V _C (m/min)	GC (°)	MI	Desgaste (mm)	t (s)
73	45	GC1	WC/Co 6%	VB _B	645
74	60	GC1	WC/Co 6%	VB _B	227
77	45	GC1	WC/Co 10%	VB _B	214
75	45	GC2	WC/Co 6%	VB _B	210
76	60	GC2	WC/Co 6%	VB _B	193
78	60	GC1	WC/Co 10%	VB _B	150
79	45	GC2	WC/Co 10%	VB _B	120
80	60	GC2	WC/Co 10%	VB _B	112

O metal duro WC/Co 6% apresentou o melhor desempenho na maioria dos ensaios, do que o metal duro WC/Co 10%.

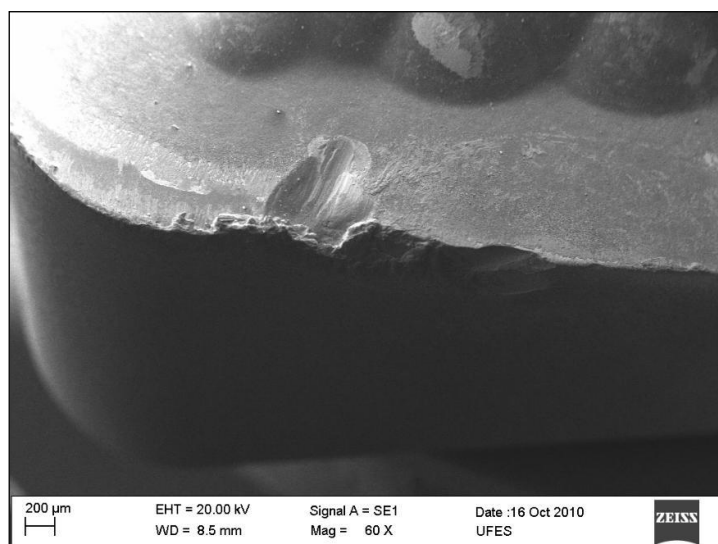


Figura 4.63 – Desgastes de cratera, de flanco médio (VB_B) e de entalhe (VB_N) no inserto de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN, após 645s na usinagem do Inconel[®] 718

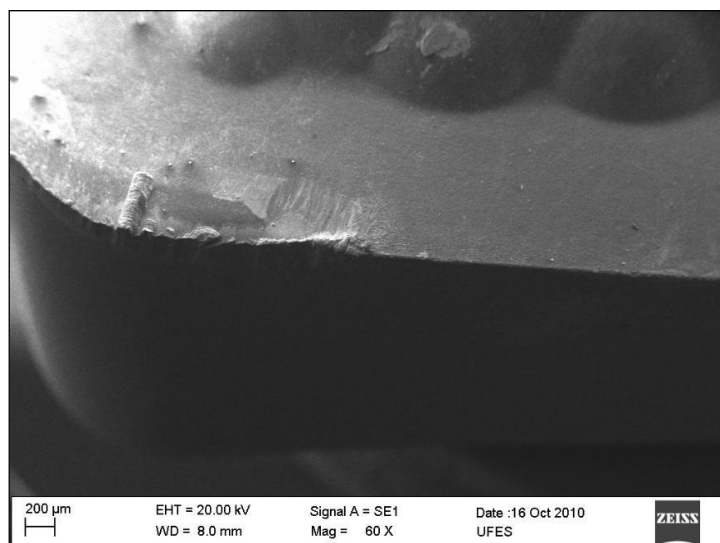


Figura 4.64 – Desgastes de cratera, de ponta (VB_C) e de flanco médio (VB_B) no inserto de metal duro WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN, após 214s na usinagem do Inconel[®] 718

As análises no MEV e de EDS dos insertos de metal duro utilizados na usinagem da liga Inconel[®] 718 seguiram os mesmos procedimentos dos insertos de metal duro para a usinagem da liga Inconel[®] 751.

As Figuras 4.65 a 4.72, apresentam os resultados para a liga Inconel[®] 718. O EDS no ponto 1 da Figura 4.51 confirmou se tratar da superfície revestida do inserto e, portanto, se poupou de apresentar o gráfico gerado pela análise EDS.

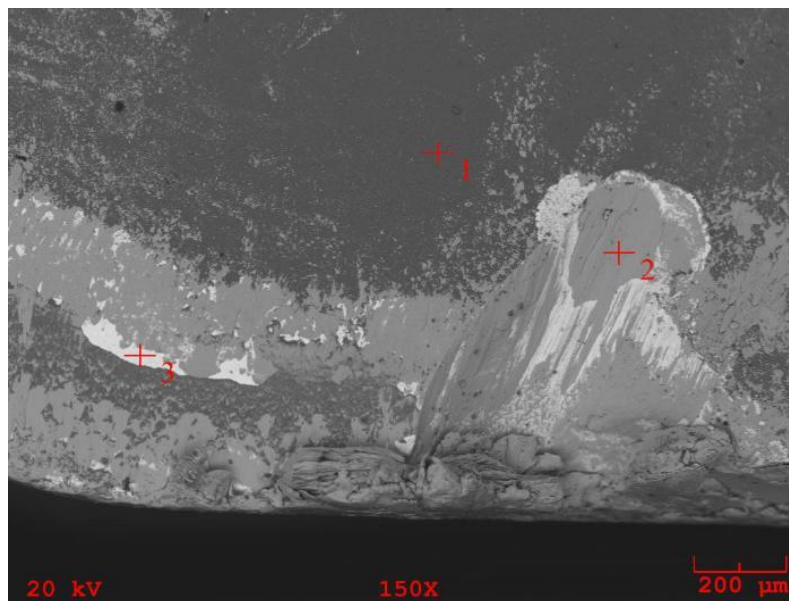


Figura 4.65 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, após 645s na usinagem da liga Inconel[®] 718

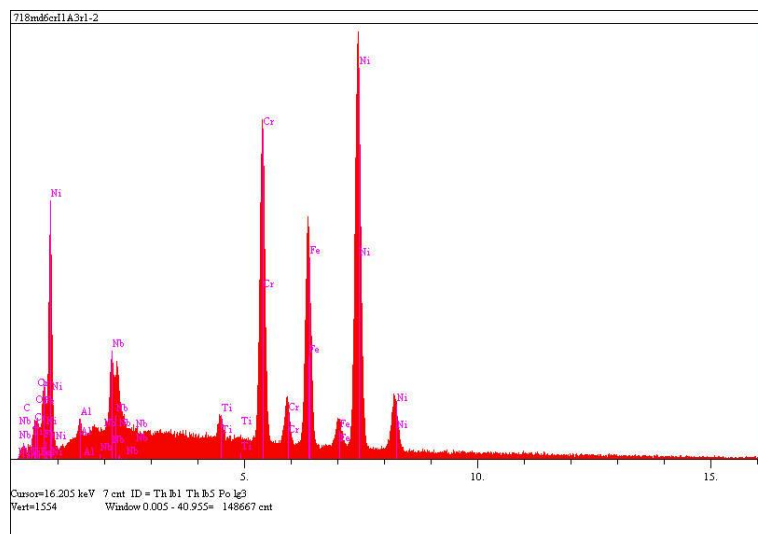


Figura 4.66 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 718 no ponto 2

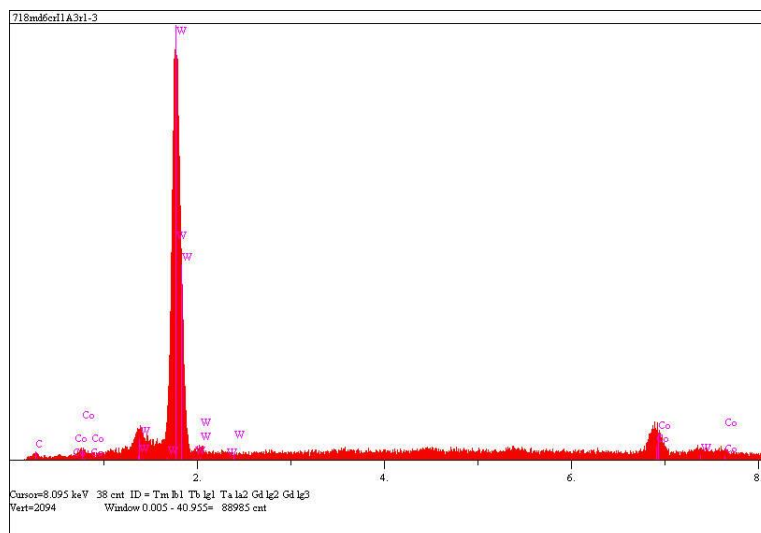


Figura 4.67 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 718 no ponto 3

O ponto 2 confirma a presença de material da peça aderido na superfície da ferramenta e o ponto 3 se trata do substrato do inserto, após perder o revestimento por desgaste.

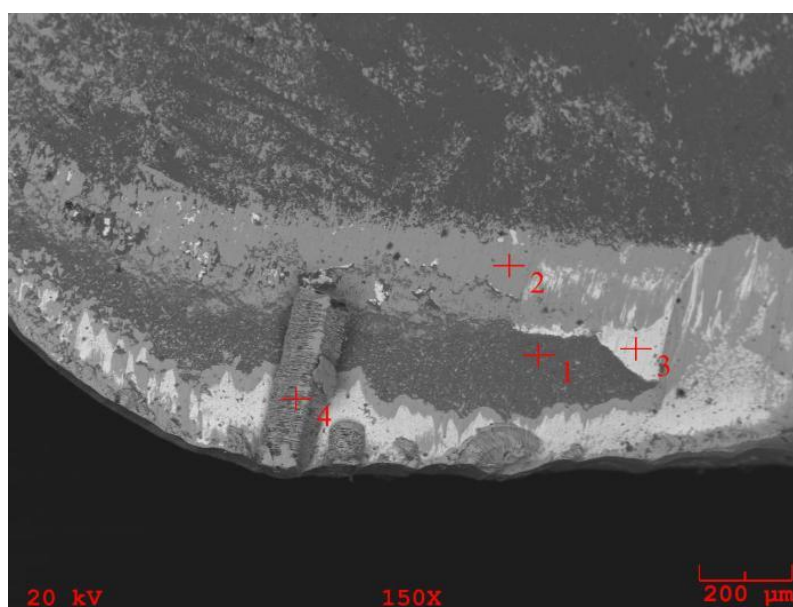


Figura 4.68 – Superfície de saída de um inserto em metal duro WC/Co 10% revestido com TiAlN, após 214s na usinagem da liga Inconel[®] 718

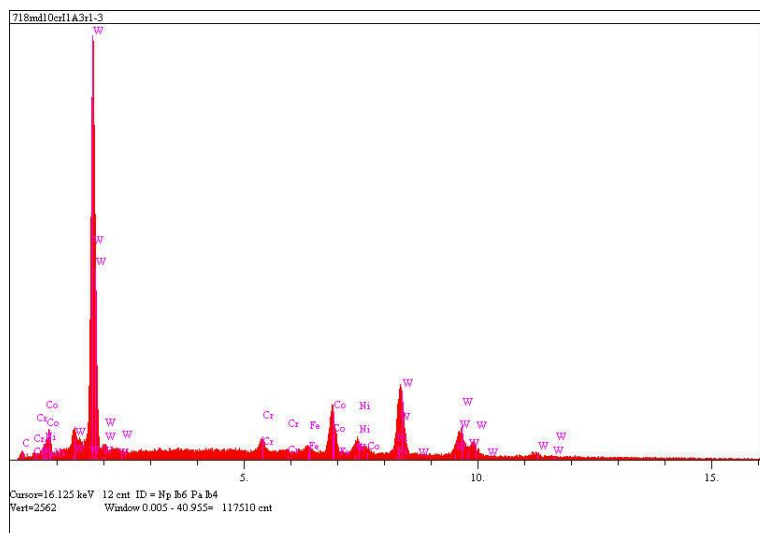


Figura 4.71 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 718 no ponto 3

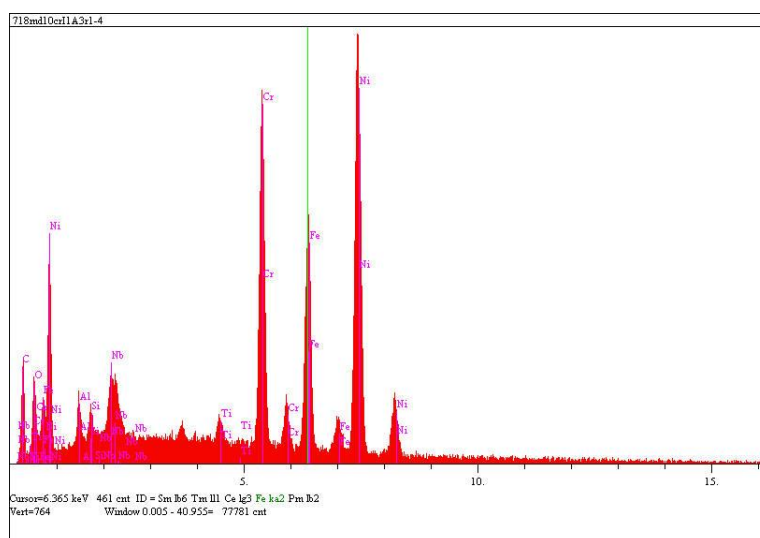


Figura 4.72 – Análise química da superfície de saída do inserto em metal duro WC/Co 6% revestido com TiAlN, na usinagem da liga Inconel[®] 718 no ponto 4

O ponto 1 confirma se tratar de uma região em que o revestimento ainda se faz presente. É interessante observar que há desgaste de cratera anterior e posterior a esta região onde se localiza o ponto 1, na superfície de saída da ferramenta, caracterizando a presença de uma ilha onde não houve desgaste.

Os pontos 2 e 4 tratam-se de regiões com aderência de material da peça e o ponto 3 é uma área em que o revestimento se desgastou, expondo o substrato da ferramenta, praticamente sem aderência de material.

Segundo Grzesik (2008) as interações químicas e adesivas entre as ligas de níquel e os metais duros são moderadas, o que pode favorecer o mecanismo difusivo, no entanto a velocidade de corte maior para esses materiais ($v_c = 60$ m/min) parece não ter sido suficiente para provocar intensa geração de calor na interface, colocando este mecanismo de desgaste em segundo plano, porém concorrente (ASM HANDBOOK V.5, 1994; ASM HANDBOOK V.16, 1989).

A influência da geometria de corte (GC) sobre o desgaste de flanco médio (VB_B) e o desgaste de ponta (VB_C) nos insertos foram mais favoráveis na primeira geometria de corte (CG1), onde houve uma aumento nas taxas de desgaste. Houve, também a inibição dos mecanismos de desgaste em velocidades de corte menores ($v_c = 45$ m/min). Na maior velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min) houve aumento desses tipos de desgaste, onde as temperaturas de corte são maiores (ASM HANDBOOK V.16, 1989; GRZESIK, 2008).

Nos ensaios com superligas a base de níquel é normal a observação da coloração rubra nas bordas dos cavacos, indicando temperaturas mais elevadas nessas regiões (LIAO et al, 1996). As temperaturas mais elevadas nas bordas tendem a favorecer os mecanismos termicamente ativados, tais como a difusão e a oxidação (SHAW, 1986), acelerando o desgaste de entalhe. Os resultados obtidos na presente investigação, entretanto, não apontaram este tipo (forma) de desgaste como dominante.

4.3.1 Evolução do Desgaste de Flanco Médio em Insertos de Metal Duro

Na usinagem do Inconel[®] 751 a menor taxa de desgaste de flanco médio foi obtida em um inserto de metal duro com 6% de Co revestido, mesmo utilizando a menor velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min) e a segunda geometria de corte GC2 ($\chi_r = 85^\circ$). O inserto de metal duro com 10% de Co revestido foi o que desenvolveu a maior taxa de desgaste de flanco médio.

Identicamente ao estudo da evolução dos desgastes nos materiais cerâmicos, aqui também se considerou a taxa de desgaste na usinagem das ligas Inconel® 751 e Inconel® 718 com insertos de metal duro. No caso do desgaste de flanco médio (VB_B), foi utilizada a taxa de desgaste de flanco médio (VB_B/t), sendo a unidade mm/s. A utilização deste índice permitiu visualizar a evolução deste tipo de desgaste assim como a influência das variáveis de entrada sobre o tempo de desenvolvimento do desgaste de flanco médio no tempo. As Tabelas 4.29 e 4.30 resumem a aplicação da taxa de desgaste de flanco médio (VB_B/t) nos insertos de metal duro para as duas ligas de níquel, respectivamente.

Tabela 4.29 – Condições de corte e taxa de desgaste de flanco médio em insertos de metal duro, na usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	MI	VB_B/t (mm/s)
55	45	GC2	Rica em O ₂	WC/Co 6%	0,00051
49	45	GC1	Normal	WC/Co 6%	0,00053
37	45	GC1	Normal	WC/Co	0,00054
41	45	GC1	Rica em O ₂	WC/Co	0,00055
57	45	GC1	Inerte	WC/Co 6%	0,00055
51	45	GC2	Normal	WC/Co 6%	0,00056
45	45	GC1	Inerte	WC/Co	0,00057
59	45	GC2	Inerte	WC/Co 6%	0,00063
56	60	GC2	Rica em O ₂	WC/Co 6%	0,00074
52	60	GC2	Normal	WC/Co 6%	0,00076
50	60	GC1	Normal	WC/Co 6%	0,00077
43	45	GC2	Rica em O ₂	WC/Co	0,00083
39	45	GC2	Normal	WC/Co	0,00087
60	60	GC2	Inerte	WC/Co 6%	0,00093
58	60	GC1	Inerte	WC/Co 6%	0,00095
47	45	GC2	Inerte	WC/Co	0,00105
71	45	GC2	Inerte	WC/Co 10%	0,00133
38	60	GC1	Normal	WC/Co	0,00167
63	45	GC2	Normal	WC/Co 10%	0,00190
40	60	GC2	Normal	WC/Co	0,00222
42	60	GC1	Rica em O ₂	WC/Co	0,00235
46	60	GC1	Inerte	WC/Co	0,00250
44	60	GC2	Rica em O ₂	WC/Co	0,00286
48	60	GC2	Inerte	WC/Co	0,00333

Tabela 4.30 – Condições de corte e taxa de desgaste de flanco médio em insertos de metal duro, na usinagem da liga Inconel[®] 718

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	MI	VB_B/t (mm/s)
73	45	GC1	WC/Co 6%	0,00062
74	60	GC1	WC/Co 6%	0,00176
77	45	GC1	WC/Co 10%	0,00187
75	45	GC2	WC/Co 6%	0,00190
76	60	GC2	WC/Co 6%	0,00207
78	60	GC1	WC/Co 10%	0,00267
79	45	GC2	WC/Co 10%	0,00333
80	60	GC2	WC/Co 10%	0,00357

Durante os ensaios com os insertos de metal duro, em 67% dos casos, o limite de desgaste atingido mais rapidamente foi o desgaste de flanco médio (VB_B), sendo o restante o desgaste de ponta (VB_C). Estes serão apresentados na sequência.

Conforme mostrado na Tabela 4.29 as menores taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t) foram conseguidas em velocidades de corte menores ($v_c = 45$ m/min), sendo esse o fator mais influente durante todos os ensaios. A primeira geometria de corte GC1 ($\chi_r = 45^\circ$) foi o segundo parâmetro avaliado que mais influenciou na diminuição da taxa de desgaste de flanco médio. As atmosferas ricas em O_2 e normal foram na sequência os fatores que estiveram presentes nas menores taxas desse tipo de desgaste.

Na avaliação do desgaste de flanco médio os insertos de metal duro com 6% de Co revestidos foram os materiais com as menores taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t). Os insertos de metal duro sem revestimento foram os que tiveram na sequência as maiores taxas de desgaste de flanco médio, pois os insertos de metal duro com 10% de Co revestidos tiveram sua vida limitada pelo desgaste de ponta (VB_C), havendo poucos casos de desgaste de flanco médio entre esses.

A interação dos parâmetros v_c menor ($v_c = 45$ m/min), segunda geometria de corte GC2 ($\chi_r = 85^\circ$) e material do inserto de metal duro sem revestimento determinou as maiores taxas de desgaste de flanco médio entre todos os insertos avaliados. Nesse caso também pode-se observar que as atmosferas rica em O_2 e inerte se alternaram nesses resultados.

De modo geral quando o desgaste de flanco médio foi o tipo de desgaste dominante na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro com e sem revestimento, a interação das variáveis de entrada que promoveram a diminuição das taxas de desgaste de flanco médio e também as maiores vidas dos insertos foram compostas pela diminuição da velocidade de corte, associada a primeira geometria onde $\chi_r = 45^\circ$. O material do inserto com 6% e Co na matriz de carboneto e revestida com TiAlN fizeram com que as taxas de desgaste de flanco médio diminuíssem ainda mais.

4.3.2 Evolução do Desgaste de Ponta em Insertos de Metal Duro

Em relação ao total de ensaios realizados com insertos de metal duro, o limite de desgaste de ponta (VB_C) foi alcançado mais rapidamente em 33% dos ensaios para o Inconel[®] 751. Nos ensaios com o Inconel[®] 718 não houve predominância do desgaste de ponta (VB_C) em nenhum dos ensaios.

O desgaste de ponta nos ensaios com insertos de metal duro, o parâmetro de entrada material do inserto (MI) metal duro com 10% de Co revestido foi o fator que mais influenciou esse tipo de desgaste.

A interação da maior velocidade corte ($v_c = 60$ m/min) com a geometria GC1 aceleraram o desgaste de ponta, nos ensaios onde este foi predominante.

A atmosfera rica em O_2 aparece em mais de 50% dos casos onde houve maior evolução de desgaste de ponta em insertos de metal duro.

A taxa de desgaste de ponta (VB_C/t) aplicado aos ensaios com insertos de metal duro, onde predominou esse tipo de desgaste, apresentado na Tabela 4.31 revela que as menores taxas de desgaste de ponta foram influenciadas pela utilização da menor velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min), enquanto a maior velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min) teve efeito contrário.

Tabela 4.31 – Condições de corte e taxa de desgaste de ponta em insertos de metal duro, na usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	MI	VB_c/t (mm/s)
53	45	GC1	Rica em O_2	WC/Co 6%	0,00105
54	60	GC1	Rica em O_2	WC/Co 6%	0,00105
67	45	GC2	Rica em O_2	WC/Co 10%	0,00164
69	45	GC1	Inerte	WC/Co 10%	0,00250
70	60	GC1	Inerte	WC/Co 10%	0,00267
65	45	GC1	Rica em O_2	WC/Co 10%	0,00300
68	60	GC2	Rica em O_2	WC/Co 10%	0,00323
72	60	GC2	Inerte	WC/Co 10%	0,00429
66	60	GC1	Rica em O_2	WC/Co 10%	0,00455
61	45	GC1	Normal	WC/Co 10%	0,00545
64	60	GC2	Normal	WC/Co 10%	0,00561
62	60	GC1	Normal	WC/Co 10%	0,00938

A geometria de corte GC1 aparece na maior parte dos ensaios onde o desgaste de ponta predominou, no entanto a análise da taxa de desgaste de ponta (VB_c/t) não parece ter sido influenciada diretamente por esse fator.

A avaliação da influencia das atmosferas envolventes na evolução do desgaste de ponta, demonstra que a atmosfera rica em O_2 fez com que a taxa de desgaste de ponta (VB_c/t) diminuísse pelo aumento de vida dos insertos. Possivelmente, a formação de óxidos protegeu a superfície contra o desgaste.

O material do inserto (MI) com as menores taxas de desgaste de ponta foi o metal duro com 6% de Co revestido. O metal duro sem revestimento não apresentou nenhum ensaio onde a evolução do desgaste de ponta tenha determinado o fim de vida da ferramenta.

4.3.3 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Metal Duro (WC/Co) sem Revestimento

Os insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento apresentaram vidas intermediárias entre os metais duros com 6% de Co revestidos (WC/Co 6%) e os metais duros com 10% de Co revestidos (WC/Co 10%). O tipo de desgaste dominante para esses insertos foi o desgaste de flanco médio (VB_B).

Apesar do desgaste predominante ter sido o desgaste de flanco médio (VB_B), também houve evolução menos significativa de desgaste de ponta (VB_c). No entanto não foi detectado desgaste de entalhe significativo nos

insertos de metal duro sem revestimento. As condições de corte utilizadas no ensaio com a ferramenta apresentada na Figura 4.73 foram:

$v_c = 60$ m/min;

GC1;

AE = Normal.

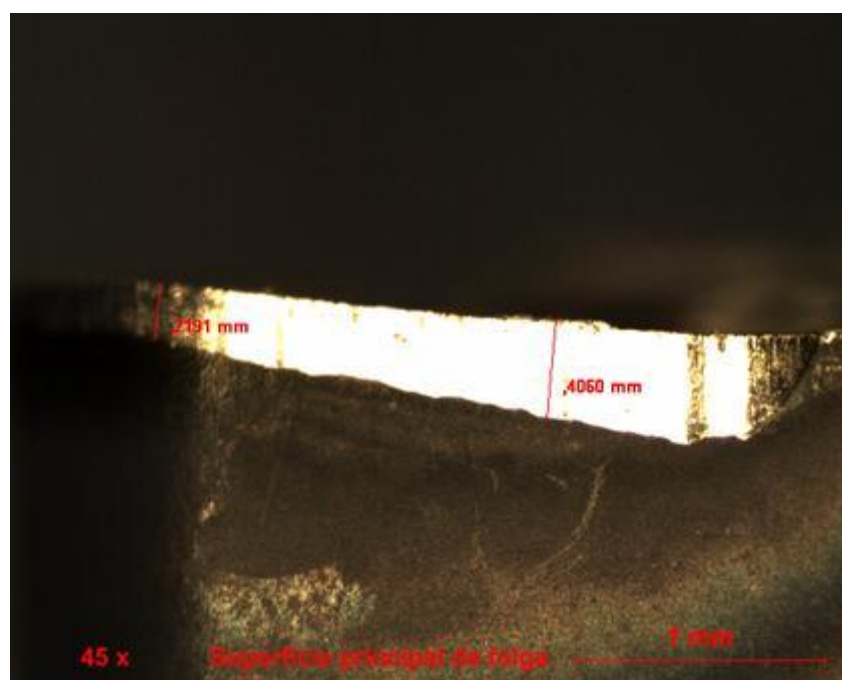


Figura 4.73 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro sem revestimento

Pode-se notar, na Figura 4.73, um desgaste uniforme na superfície principal de folga do inserto. O desgaste de ponta (VB_C) no caso atingiu 36% do limite estipulado para o fim de vida da ferramenta para esse tipo de desgaste enquanto o desgaste dominante foi o desgaste de flanco médio VB_B , que teve tendência crescente na direção do aumento da profundidade de corte (a_p), influenciado pelo aumento da velocidade de corte (v_c). Nos ensaios onde houve a utilização da primeira geometria de corte GC1 ($\chi_r = 45^\circ$) essa característica de desgaste ficou bem evidenciada. A taxa de desgaste de flanco médio (VB_B/t) também foi intermediária para essas condições de corte nos insertos de metal duro sem revestimento.

Na Figura 4.74 é apresentada a ferramenta utilizada no ensaio onde foram utilizadas as seguintes condições de corte:

$v_c = 45 \text{ m/min}$;

GC2;

AE = Normal.

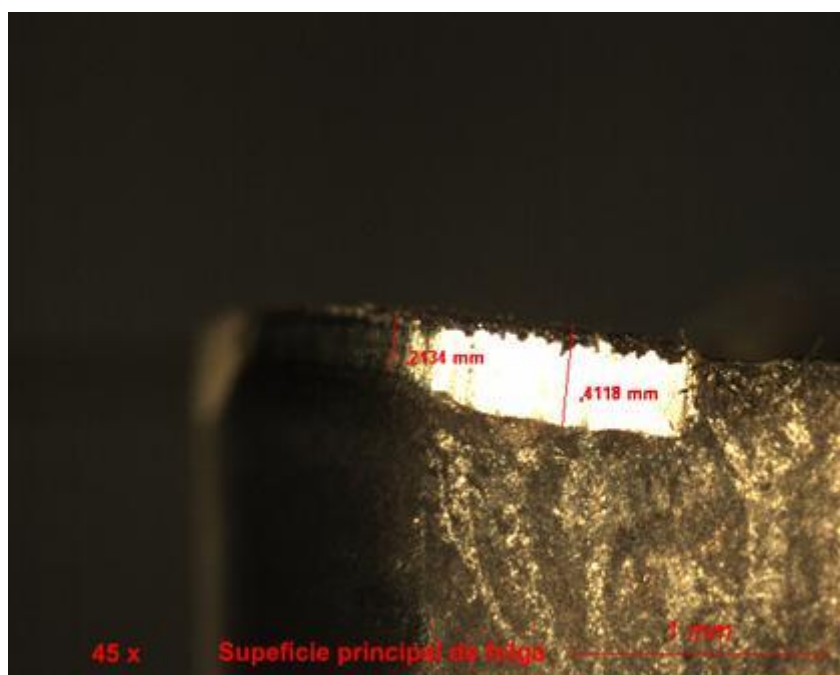


Figura 4.74 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro sem revestimento

O efeito da utilização da segunda geometria de corte GC2, mesmo com a menor velocidade de corte ($v_c = 45 \text{ m/min}$) fez com que a taxa de desgaste de flanco médio ficasse num valor intermediário para os insertos de metal duro sem revestimento que tiveram maior evolução desse tipo de desgaste. A segunda geometria de corte teve o efeito de acelerar o desgaste de flanco médio nos insertos de metal duro sem revestimento.

A análise dos resultados dos ensaios de evolução do desgaste na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro sem revestimento,

mostrou que os mesmos tiveram vidas intermediárias entre os demais tipos de insertos de metal duro. A viabilidade da utilização destes é justificada pelo custo inferior aos demais insertos do mesmo tipo de material com revestimento.

No parâmetro velocidade de corte (v_c) a indicação para insertos de metal duro sem revestimento é inferior ao dos demais insertos, mas durante os ensaios revelou-se que tiveram boa resistência ao desenvolvimento do desgaste de flanco médio (VB_B) mesmo em velocidades superiores. O desgaste de ponta (VB_C) que se evidenciou também foi influenciado pelas velocidades de corte superiores, embora não tenha sido o tipo de desgaste dominante.

A influência do ângulo de posição sobre os insertos de metal duro não revestidos foi favorável a geometria de corte GC1, onde o menor valor $\chi_r = 45^\circ$ foi benéfico a vida da maioria dos insertos. As taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t) tiveram tendência decrescente com a utilização da primeira geometria de corte. A geometria de corte GC2 teve influencia contrária, diminuindo a vida dos insertos e aumentando a taxa de desgaste.

Nos ensaios onde foi aplicada atmosfera rica em O_2 a tendência foi de incremento na evolução dos desgastes de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) quando utilizada esse tipo de atmosfera. As atmosferas normal e inerte tiveram influencia intermediária nos ensaios.

Os fatores que mais influenciaram no aumento dos níveis de desgaste de flanco médio (VB_B) e de desgaste de ponta (VB_C) nos insertos de metal duro sem revestimento foram:

- Aumento da velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min);

- Utilização da geometria de corte GC2;

- Utilização de atmosfera envolvente (AE) rica em O_2 .

4.3.4 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Metal Duro (WC/Co 6%) com Revestimento (PVD TiAlN)

Os insertos de metal duro com 6% de Co na matriz (WC/Co 6%) com revestimento TiAlN foram os que apresentaram as maiores vidas entre os metais duros ensaiados. Para esses insertos o tipo de desgaste dominante foi o desgaste de flanco médio (VB_B) seguido pelo desgaste de ponta (VB_C), conforme mostram as Figuras 4.75 e 4.76.

Pode-se constatar que o desgaste de flanco médio (VB_B) nos insertos de metal duro com 6% de Co revestidos não foi o único a evoluir nesse tipo de material, verificou-se que o desgaste de ponta (VB_C) também esteve presente conforme pode ser visto a seguir. Não foi constatada presença de desgaste de entalhe (VB_N) nos ensaios realizados com essas ferramentas.

Na Figura 4.75 foram utilizadas as seguintes condições de corte:

$v_c = 45$ m/min;

GC1;

AE = Normal.

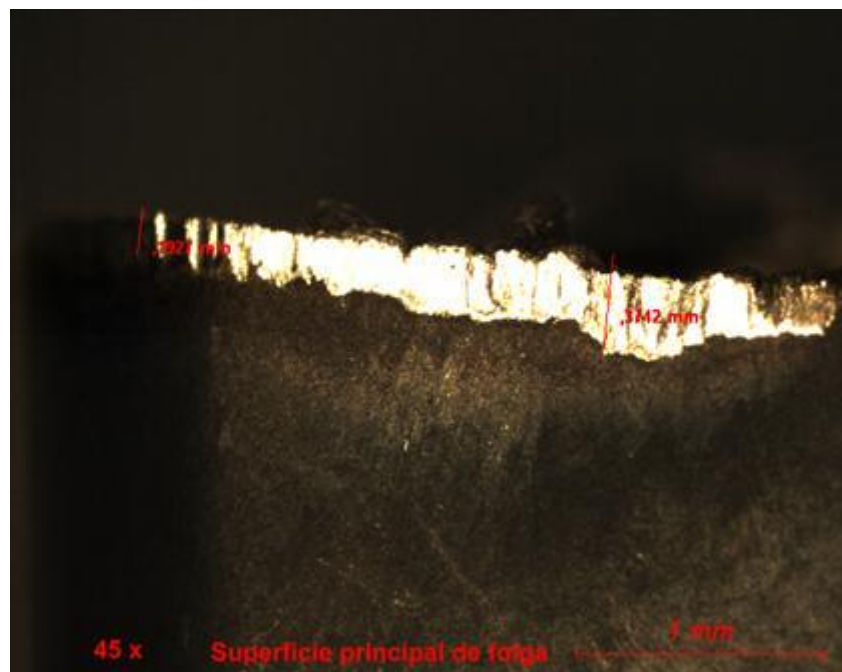


Figura 4.75 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) com revestimento TiAlN

A influência da primeira geometria de corte GC1 ($\chi_r = 45^\circ$) fez com que a vida dos insertos tivesse um incremento. Esse incremento foi aumentado com a interação da menor velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min). Em contrapartida nos ensaios dos metais duros com 6% Co revestidos a atmosfera normal esteve associada ao aumento da taxa de desgaste de flanco médio (VB_B/t).

Na Figura 4.76 a seguir foram utilizadas as seguintes condições de corte:

$v_c = 45$ m/min;

GC2;

AE = Normal.

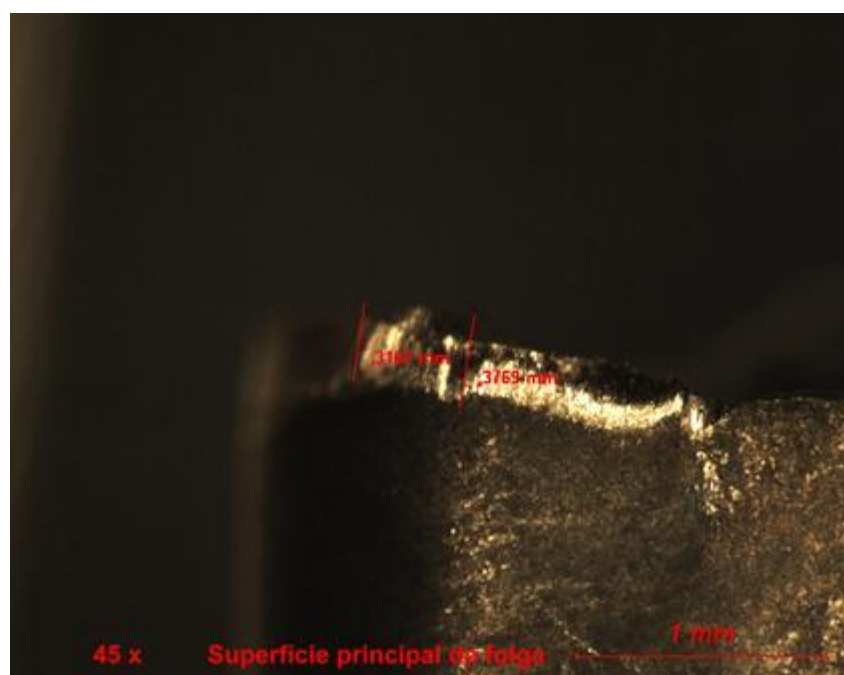


Figura 4.76 – Desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de ponta (VB_C) em inserto de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) com revestimento TiAlN

Pode-se notar na Figura 4.76 que o desgaste de ponta (VB_C) atingiu 52% do limite admitido para esse tipo de desgaste, mas o que determinou a vida do inserto no ensaio foi o desgaste de flanco médio (VB_B).

O efeito da utilização da segunda geometria de corte GC2 ($\chi_r = 85^\circ$), mesmo quando associada a menor velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min) implicou no aumento da taxa de desgaste de flanco médio (VB_B/t).

A atmosfera envolvente (AE) normal também favoreceu a evolução dos desgastes nos insertos de metal duro com 6% de Co revestidos, quando comparados a utilização de atmosfera rica em O_2 .

Para esses insertos tanto os valores absolutos dos desgastes de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C), quanto os referentes às taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t) e de ponta (VB_C/t) estiveram entre as menores nos ensaios realizados.

O aumento da velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min) mostrou ser o fator que mais incrementou os desgastes de flanco médio (VB_B) e os desgastes de ponta (VB_C) durante os ensaios com os insertos de metal duro com 6% de Co revestidos.

A utilização da geometria de corte GC2 afetou negativamente a vida dos insertos, fazendo aumentar a taxa de desgaste de flanco médio (VB_B/t) e também a taxa de desgaste de ponta (VB_C/t) nos ensaios.

Ao contrario do efeito sobre os metais duros sem revestimento, a atmosfera rica em O_2 proporcionou o aumento da vida dos insertos de metal duro com 6% de Co revestidos. A interação desse tipo de atmosfera com a menor velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min) e a geometria de corte GC1, fez com que essa combinação desses fatores proporcionasse os menores níveis de desgaste entre todos os insertos de metal duro.

Os variáveis que tiveram maior influencia no aumento dos desgastes dos insertos de metal duro com 6% de Co revestidos foram:

- Velocidade de corte maior ($v_c = 60$ m/min);

- Utilização da segunda geometria de corte GC2 ($\chi_r = 85^\circ$);

- Aplicação de atmosferas envolventes normal e inerte.

4.3.5 Considerações sobre Desgastes em Insertos de Metal Duro (WC/Co 10%) com Revestimento (PVD TiAlN)

No caso dos insertos de metal duro com 10% de Co na matriz de carboneto (WC/Co 10%) com revestimento TiAlN, foram os que apresentaram as menores vidas entre os metais duros ensaiados. Para esses insertos o tipo de desgaste dominante foi o desgaste de ponta (VB_C) seguido pelo desgaste de flanco médio (VB_B), conforme mostram as Figuras 4.77 e 4.78.

Para esse tipo de material o desgaste de flanco médio (VB_B) também teve evolução, mas de forma menos acentuada. Para esses insertos o desgaste de cratera (K_T) não foi considerável e o desgaste de entalhe (VB_N) esteve ausente.

As condições de corte utilizadas na Figura 4.77 foram:

$v_c = 45$ m/min;

GC2;

AE = Rica em O_2 .

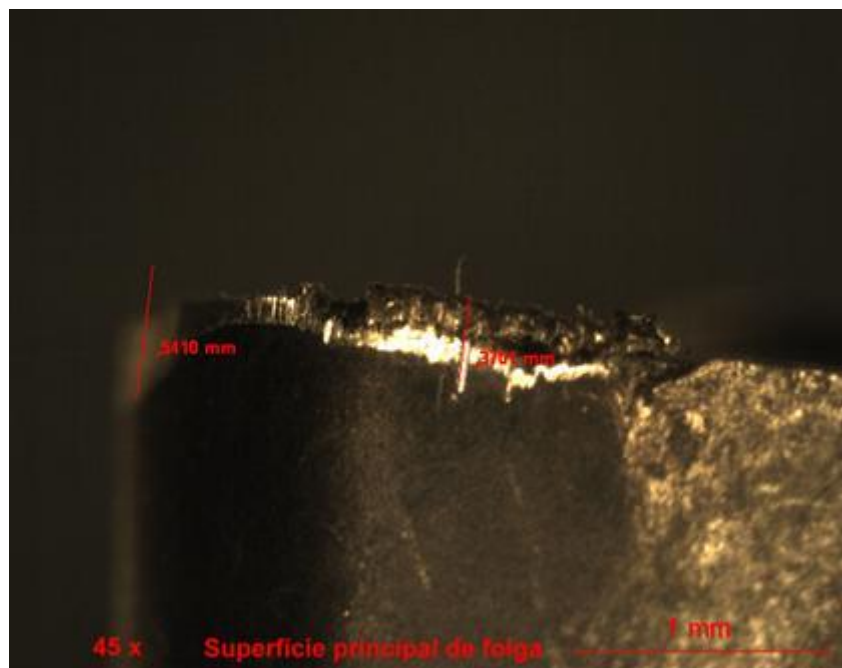


Figura 4.77 – Desgaste de ponta (VB_C) e desgaste de flanco médio (VB_B) em inserto de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) com revestimento TiAlN

Conforme pode ser visto na Figura 4.77, o desgaste que teve maior evolução foi o desgaste de ponta (VB_C), apesar do desgaste de flanco médio (VB_B) ter atingido 92% do seu limite máximo admitido. As maiores vidas para os insertos de metal duro com 10% de Co revestidos foram obtidas utilizando a menor velocidade de corte ($v_c = 45$ m/min), o que foi o caso na Figura 4.63. No entanto a segunda geometria de corte GC2 foi aquela em que o desgaste de ponta (VB_C) foi menos acentuado, assim como as taxas de desgaste. A influência da atmosfera rica em O_2 sobre o desgaste nos insertos de metal duro com 10% de Co revestidos foi no sentido de acelerar o desgaste de ponta (VB_C), implicando no aumento da taxa de desgaste de ponta (VB_C/t).

Na Figura 4.78 foram utilizadas as seguintes condições de corte:

$v_c = 45$ m/min;

GC1;

AE = Rica em O_2 .

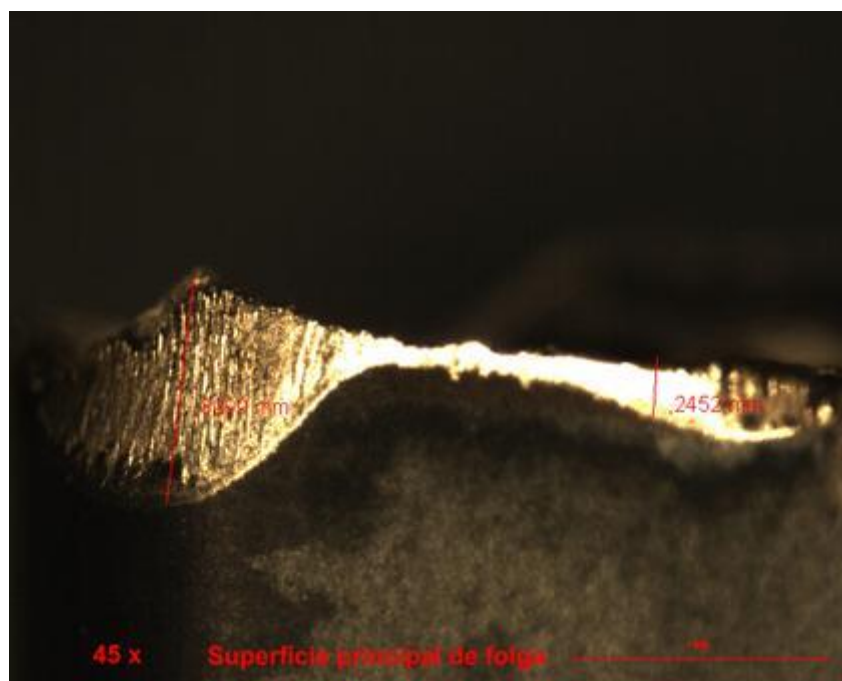


Figura 4.78 – Desgaste de ponta (VB_C) e desgaste de flanco médio (VB_B) em inserto de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) com revestimento TiAlN

Nota-se pela Figura 4.78 a influencia da primeira geometria de corte GC1 ($\chi_R = 45^\circ$) diminuindo o tempo de vida do inserto. A ação da mesma em qualquer velocidade de corte e qualquer atmosfera testada, foi sempre no sentido de aumentar a taxa de desgaste de ponta (VB_C/t). Outro fenômeno bastante observado durante os ensaios com insertos de metal duro com 10% de Co revestidos, foi a quantidade maior de material aderido a ferramenta durante todos os testes.

A avaliação geral da usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro com 10% de Co revestidos, é de que este tipo de material de inserto (MI) não se torna indicado para o tipo de processo em estudo, tendo sido superado até mesmo pelos insertos de metal duro sem revestimento, que além de tudo possuem o menor custo entre todos os insertos ensaiados.

Os desgastes de ponta (VB_C) observados, assim como as altas taxas de desgaste de ponta (VB_C/t) foram fortemente influenciados pela maior velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min). Os desgastes de flanco médio quando ocorreram tiveram incremento na evolução em velocidades de corte menores ($v_c = 45$ m/min).

A geometria de corte GC1 favoreceu o desenvolvimento do desgaste de ponta (VB_C) nos insertos de metal duro com 10% de Co revestidos. Ao contrario dessa situação a geometria de corte GC2 foi o parâmetro onde o desgaste de flanco médio (VB_B) teve maior evolução.

A atmosfera mais freqüente onde predominou o desgaste de ponta foi a atmosfera envolvente (AE) rica em O_2 com 50% dos casos, mas os maiores desgastes de ponta (VB_C) e as maiores taxas de desgaste de ponta (VB_C/t) ocorreram quando foi utilizada a atmosfera normal.

A situação onde o desgaste de ponta (VB_C) foi mais crítico é a seguinte:

- Utilização da maior velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min);

- Aplicação da primeira geometria de corte GC1;

- Usinagem em atmosfera envolvente (AE) normal.

4.3.6 Influência das Variáveis de Entrada sobre os Tempos de Vida em Insertos de Metal Duro

A influência das variáveis de entrada no Inconel® 751: Velocidade de corte (v_c), geometria de corte (GC), material do inserto (MI) e atmosfera envolvente (AE) sobre o tempo de vida da ferramenta (t) nos insertos de metal duro foi realizada utilizando-se a análise de variância – ANOVA (MONTGOMERY, 2001).

Os materiais dos insertos (MI) e as atmosferas envolventes (AE) foram comparados dois a dois, variando-se a velocidade de corte (v_c) e a geometria da ferramenta (GC). O valor de p máximo admitido foi de 0,20 e o coeficiente de correlação $R^2 > 0.90$ para todas as comparações. O erro padrão máximo foi de 37,58s.

As Tabelas 4.32 a 4.40 apresentam a influência das variáveis sobre os tempos de vida (t) dos insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel® 751.

Tabela 4.32 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O_2

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-297,50	-7,83	0,000050
GC	-61,75	-1,64	0,139052
AE	46,12	1,44	0,207226
MI	228,00	6,06	0,000301

Tabela 4.33 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte

Variável	Efeito (s)	t	p
V_c	-314,50	-15,12	0,000023
GC	-104,25	-5,01	0,004063
AE	-72,75	-3,49	0,017329
MI	215,50	10,36	0,000144

Tabela 4.34 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O₂

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-305,00	-6,88	0,000072
GC	-67,50	-1,52	0,161796
AE	46,12	1,44	0,207226
MI	222,50	5,02	0,000715

Tabela 4.35 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O₂

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-260,87	-8,00	0,000012
GC	-161,87	-4,96	0,000565
AE	61,87	1,43	0,153483
MI	-222,12	-6,81	0,000047

Tabela 4.36 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-239,75	-6,70	0,000276
GC	-73,50	-2,05	0,078867
AE	66,12	1,43	0,197226
MI	-199,50	-5,57	0,000834

Tabela 4.37 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O₂

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-265,62	-6,95	0,000221
GC	-55,37	-1,44	0,190507
AE	-46,12	-1,68	0,202213
MI	-136,62	-3,57	0,009024

Tabela 4.38 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Rica em O₂

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-132,62	-4,82	0,002923
GC	-62,12	-2,26	0,064501
AE	42,12	1,53	0,176216
MI	-450,125	-16,37	0,000300

Tabela 4.39 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Normal x Inerte

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-156,00	-8,62	0,000012
GC	-91,00	-5,03	0,000706
AE	-74,75	-4,13	0,020542
MI	-415,00	-5,03	0,000007

Tabela 4.40 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 751 em atmosfera Inerte x Rica em O₂

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-145,00	-4,77	0,001004
GC	-36,62	-1,20	0,208600
AE	63,12	2,07	0,067439
MI	-359,12	-11,82	0,000001

As variáveis que mais influenciaram a vida da ferramenta foram a velocidade de corte (v_c) e principalmente o material do inserto (MI). Tiveram menor influência a geometria de corte (GC) e a atmosfera envolvente (AE).

As interações químicas entre os metais duros e as ligas de níquel são fracas em baixas velocidades de corte, não favorecendo os mecanismos de desgaste por difusão. Entretanto, em velocidades de corte mais elevadas a geração de calor é mais intensa e a difusão passa a ser considerada para esses insertos, acelerando o desgaste destes (CHILDS et al, 2001; ASM HANDBOOK V.16, 1989; LIAO et al, 1996).

A influência da geometria de corte (GC) no desgaste de flanco médio (VB_B) e no desgaste de ponta (VB_C) sobre os insertos foi menos favorável quando utilizada a primeira geometria (GC1), onde as taxas de desgaste foram maiores.

A velocidades de corte menores houve predomínio de *attrition*, enquanto em velocidades mais elevadas a abrasão foi verificada (MACHADO, 1990).

Em geral os revestimentos por PVD a base de TiAlN em metais duros tendem a melhorar a resistência ao desgaste quando comparados a metais duros não revestidos, devido à redução dos mecanismos abrasivos (GRZESIK, 2008; SHAW, 1986).

A influência das variáveis de entrada sobre o Inconel[®] 718: Velocidade de corte (v_c), geometria de corte (GC) e material do inserto (MI) sobre o tempo de vida da ferramenta (t) também foi realizada utilizando-se a análise de variância – ANOVA (MONTGOMERY, 2001).

À comparação entre os materiais dos insertos (MI) foram seguidas das variações da velocidade de corte (v_c) e da geometria da ferramenta (GC). O valor de p máximo admitido foi de 0,20 e o coeficiente de correlação $R^2 > 0.90$ para todas as comparações. O erro padrão máximo foi de 31,84s.

A Tabela 4.41 apresenta a influência das variáveis sobre os tempos de vida (t) dos insertos.

Tabela 4.41 – Efeito das variáveis de entrada sobre os tempos de vida (em segundos) de insertos de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN x WC/Co 10% com revestimento PVD TiAlN na usinagem da liga Inconel® 718

Variável	Efeito (s)	t	p
V _c	-119,37	-3,74	0,013320
GC	-80,87	-2,53	0,051941
MI	-89,62	-2,81	0,037373

Pode ser observado que na ANOVA, a velocidade de corte imprimiu uma redução na vida das ferramentas quando passou de 45 para 60 m/min. Este resultado está de acordo com a literatura (MACHADO et al, 2009; TRENT; WRIGHT, 2000), onde a maior geração de calor na maior velocidade de corte acelera os mecanismos de desgaste e diminui a vida das ferramentas.

A troca da geometria GC1 para GC2 aumentou a vida das ferramentas. Assim, a geometria com ângulo de posição (ϕ_r) de 45°, de saída (γ_o) -8°, de folga (ϕ_o) 8° e de inclinação (ϕ_s) 0° se mostrou mais adequada para a operação de torneamento da liga Inconel® 718, superando a geometria onde estes ângulos foram de 85°, -6°, 6° e -6° respectivamente. A geometria GC2 foi muito vulnerável a microlascamento.

O material do inserto de metal duro WC/Co 6% com revestimento PVD TiAlN foi o que apresentou melhores resultados, superando o concorrente em todas as comparações. A literatura indica que os dois tipos de metal duro revestidos são apropriados para a usinagem de ligas de níquel, apresentando bons resultados quando o desgaste de entalhe predomina. Os resultados indicam que além do entalhe, os desgastes de flanco e de ponta também estiveram presentes e assim a ferramenta com maior teor de cobalto não conseguiu ter o melhor desempenho.

As Tabelas 4.42, 4.43 e 4.44 apresentam uma síntese dos tipos de desgaste dominantes e os prováveis mecanismos envolvidos nos ensaios realizados com insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel[®] 751.

Tabela 4.42 – Tipos e prováveis mecanismos de desgaste em insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento durante a usinagem da liga Inconel[®] 751

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
37	V _C = 45 m/min GC1 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
38	V _C = 60 m/min GC1 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão Difusão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
39	V _C = 45 m/min GC2 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
40	V _C = 60 m/min GC2 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão Difusão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
41	V _C = 45 m/min GC1 AE = Rica em O ₂	Flanco médio	Abrasão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
42	V _C = 60 m/min GC1 AE = Rica em O ₂	Flanco médio	Abrasão Difusão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
43	V _C = 45 m/min GC2 AE = Rica em O ₂	Flanco médio	Abrasão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
44	V _C = 60 m/min GC2 AE = Rica em O ₂	Flanco médio	Abrasão Difusão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
45	V _C = 45 m/min GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
46.	V _C = 60 m/min GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão Difusão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
47.	V _C = 45 m/min GC2 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
48.	V _C = 60 m/min GC2 ^o AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão Difusão	Adesão moderada mat. peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta

Tabela 4.43 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
49	$V_C = 45$ m/min GC1 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
50	$V_C = 60$ m/min GC1 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
51	$V_C = 45$ m/min GC2 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
52	$V_C = 60$ m/min GC2 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
53	$V_C = 45$ m/min GC1 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
54	$V_C = 60$ m/min GC1 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
55	$V_C = 45$ m/min GC2 AE = Rica em O_2	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
56	$V_C = 60$ m/min GC2 AE = Rica em O_2	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
57	$V_C = 45$ m/min GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
58.	$V_C = 60$ m/min GC1 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
59.	$V_C = 45$ m/min GC2 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
60.	$V_C = 60$ m/min GC2 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta

Tabela 4.44 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel® 751

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
61	$V_C = 45$ m/min GC1 AE = Normal	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
62	$V_C = 60$ m/min GC1 AE = Normal	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
63	$V_C = 45$ m/min GC2 AE = Normal	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
64	$V_C = 60$ m/min GC2 AE = Normal	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
65	$V_C = 45$ m/min GC1 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
66	$V_C = 60$ m/min GC1 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
67	$V_C = 45$ m/min GC2 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
68	$V_C = 60$ m/min GC2 AE = Rica em O_2	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
69	$V_C = 45$ m/min GC1 AE = Inerte	Ponta	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
70	$V_C = 60$ m/min GC1 AE = Inerte	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
71	$V_C = 45$ m/min GC2 AE = Inerte	Flanco médio	Abrasão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta
72	$V_C = 60$ m/min GC2 AE = Inerte	Ponta	Abrasão Difusão	↑ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↓ Dureza ferramenta

A síntese dos tipos de desgaste dominantes e os respectivos mecanismos envolvidos nos ensaios realizados a seco com insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel[®] 718, são apresentados nas Tabelas 4.45 e 4.46.

Tabela 4.45 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel[®] 718

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
73	$V_c = 45$ m/min GC1	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
74	$V_c = 60$ m/min GC1	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
75	$V_c = 45$ m/min GC2	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
76	$V_c = 60$ m/min GC2	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta

Tabela 4.46 – Tipos e mecanismos de desgaste em insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN durante a usinagem da liga Inconel[®] 718

Ensaio	Condições de Corte	Tipo Desgaste	Mecanismo Desgaste	Características
77	$V_c = 45$ m/min GC1	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
78	$V_c = 60$ m/min GC1	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
79	$V_c = 45$ m/min GC2	Flanco médio	Abrasão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta
80	$V_c = 60$ m/min GC2	Flanco médio	Abrasão Difusão	↓ Adesão material peça ↓ Afinidade química ↑ Dureza ferramenta

Os insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento foram os que apresentaram desempenho intermediário entre os metais duros com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN e os metais duros com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN. O tipo de desgaste dominante foi o desgaste de flanco médio (VB_B). As taxas de desgaste observadas também foram intermediárias em relação aos demais insertos de metal duro ensaiados. Apesar de não ser o tipo dominante o desgaste de ponta (VB_C) também se fez presente, enquanto o desgaste de entalhe (VB_N) não teve participação, demonstrando ter esse tipo de material de inserto grande resistência ao desgaste de entalhe durante a usinagem das ligas de níquel (KENNAMETAL, 2008).

Childs e outros (2001) classificam as interações química e adesiva entre as ligas Ni-Cr e os metais duros (WC/Co) como fraca, o que não favorece o mecanismo difusivo, embora em velocidades de corte superiores para esses materiais ($v_c = 60$ m/min) a geração de calor seja intensa, podendo haver difusão entre os materiais. A adesão de material da peça no inserto, observada durante os ensaios, foi moderada contrariando em parte o que afirmam os citados autores. Assim, mecanismos como *attrition* podem ser favorecidos por essa condição.

A dureza indicada para os metais duros (WC/Co) sem revestimento ensaiados, corresponde a das ferramentas ISO K10 (KENNAMETAL, 2007). A boa relação tenacidade-dureza apresentada pelos insertos, faz com que sejam indicados na usinagem de ligas de níquel. Segundo Machado e Da Silva (2004) o metal duro das classes ISO K10-K40 foi considerado por algum tempo como o melhor material para o corte das ligas de níquel. Apesar da dureza elevada do material do inserto, o desgaste de flanco médio (VB_B) foi o que determinou o fim de vida da ferramenta em todos os ensaios, sendo a abrasão o mecanismo com maior incidência.

A influência da geometria de corte (GC) sobre os desgastes de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) nos insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento foi favorável a geometria GC1, onde verificou-se a redução das taxas de desgaste e conseqüentemente a inibição dos mecanismos de abrasão em velocidades de corte menores ($v_c = 45$ m/min) e de difusão quando em velocidades de corte superiores ($v_c = 60$ m/min) onde as temperaturas foram

maiores. A geometria de corte GC2 teve influência contrária, aumentando as taxas de desgaste e consequentemente acentuando os efeitos dos mecanismos de abrasão e de difusão.

As constatações feitas por Shaw (1986) durante o processo de usinagem de ligas de níquel referentes a temperatura, através da observação da cor do cavaco durante a usinagem, em que as bordas dos mesmos possuíam coloração rubra, também foram verificadas nos ensaios com metais duros (WC/Co) sem revestimento. A maior temperatura na borda tenderia a favorecer os mecanismos termicamente ativados descritos por Vieregge (1997 apud KÖNIG e KLOCKE 1997), tais como difusão e oxidação, no entanto o desgaste de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) observados tiveram evolução uniforme nas superfícies de folga e na ponta dos insertos.

A influência da atmosfera rica em O_2 , na usinagem com metais duros (WC/Co) sem revestimento, foi no sentido do incremento das taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t) e de ponta (VB_C/t), sendo os mecanismos mais prováveis o *attrition*, a abrasão e também a difusão em velocidades de corte superiores ($v_c = 60$ m/min). Os efeitos das atmosferas normal e inerte foram intermediários sobre as taxas de desgaste observadas.

Os insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN tiveram as maiores vidas entre os metais duros ensaiados. O tipo de desgaste dominante para esse material foi o desgaste de flanco médio (VB_B), seguido em menor escala pelo desgaste de ponta (VB_C). As taxas de desgaste, em todos os casos, também foram as menores quando comparadas com metais duros (WC/Co) sem revestimento e com os metais duros com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN. Os resultados dos ensaios mostraram ter sido a associação desse tipo de material e revestimento os de melhor desempenho na usinagem da liga Inconel® 751 (KENNAMETAL, 2008).

As interações química e adesiva entre os metais duros (WC/Co) e as ligas Ni-Cr resistentes a altas temperaturas é classificada como fraca por Childs *et al.* (2001), dificultando os mecanismos baseados na adesão do material da peça na ferramenta como *attrition*, e em velocidades maiores ($v_c = 60$ m/min) difusão pelo efeito da maior temperatura na região de corte. A adesão verificada durante os ensaios com os insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN também foi baixa, conforme citado

pelos autores. Nesse caso especificamente, há que considerar os efeitos do revestimento sobre a adesão do material da peça, reduzindo os efeitos desse mecanismo de desgaste.

Grzesik (2008) mostra que a aplicação de revestimento a base de TiAlN em ferramentas aumenta sobremaneira a dureza das mesmas, principalmente quando comparadas a ferramentas baseadas em carboneto não revestido, conseqüentemente os efeitos dos mecanismos abrasivos ficam minimizados, o que pode explicar os maiores tempos de vida observados para os metais duros com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN e a resistência aos desgastes de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) apresentadas. Conforme Kennametal (2007) a resistência ao desgaste indicada para esse tipo de inserto corresponde a de uma ferramenta ISO K10, aliando tenacidade moderada.

O segundo fator mais influente na redução da vida dos insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN foi o aumento do ângulo de posição com o uso da geometria de corte GC2, o que gerou aumento das taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t) e de ponta (VB_C/t). A geometria de corte GC1 teve influência contrária, diminuindo as taxas de desgaste e conseqüentemente reduzindo os efeitos dos mecanismos de abrasão e de difusão. As observações de Thangaraj e Weinmann (1992) sobre a influência dos mecanismos de desgaste envolvidos durante a usinagem de ligas de níquel com cerâmicas, também parece ser aplicáveis ao caso dos insertos de metal duro na usinagem dessas ligas.

A coloração da cor do cavaco no momento de sua geração é anotada por Shaw (1986), foi idêntica a descrita anteriormente para os metais duros (WC/Co) sem revestimento. As bordas dos cavacos apresentaram coloração rubra, ao contrario da região central dos mesmos, mas assim como nos insertos sem revestimento os desgastes de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) observados tiveram evolução uniforme nas superfícies de folga e na ponta dos insertos, indicando que os mecanismos termicamente ativados não tiveram efetividade sobre os tipos de desgaste desenvolvidos, nas regiões coincidentes com as bordas dos cavacos, nos metais duros com 6% de Co (WC/Co 6%).

No caso dos metais duros com 6% de Co (WC/Co 6%) a influência da atmosfera rica em O_2 proporcionou o aumento da vida dos insertos. A interação desse tipo de atmosfera com velocidades de corte inferiores ($v_c = 45$ m/min) e a geometria de corte GC1 fizeram com que as taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t) e de ponta (VB_C/t) atingissem os menores níveis entre todos os ensaios realizados com insertos de metal duro na usinagem da liga Inconel[®] 751, minimizando os efeitos do mecanismo abrasivo principalmente. O que sugere que a formação de óxidos atuou no sentido de proteger a superfície da ferramenta.

Os insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN apresentaram as maiores taxas de desgaste entre os metais duros ensaiados, sendo o desgaste de ponta (VB_C) o tipo dominante, seguido em menor escala pelo desgaste de flanco médio (VB_B) – Tabela 4.24. As taxas de desgaste, em todos os casos, também foram as maiores entre todos os metais duros. Os resultados obtidos durante os ensaios indicaram que este material do inserto não é o melhor para a operação de corte contínuo em ligas de níquel, o que pode ter sido influenciado pelo aumento do teor de cobalto da fase β da matriz, conforme demonstrado por Grzesik (2008). A maior quantidade de Co aumenta a tenacidade do inserto, mas reduz sua dureza.

As considerações de Childs e outros (2001) sobre o mecanismo de adesão entre insertos de carboneto (WC/Co) e as ligas resistentes a altas temperaturas a base de Ni-Cr tidas como fracas, não foram verificadas durante os ensaios de usinagem com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN. Assim o mecanismo de abrasão parece ter sido o mais influente nos desgastes de ponta (VB_C) verificados.

O revestimento de TiAlN utilizado nos insertos, que proporciona o aumento da resistência ao desgaste, minimizando os efeitos abrasivos Grzesik (2008), também não justificou a maior evolução dos desgastes de ponta (VB_C) reduzindo muito a vida dos insertos durante os ensaios. Conforme Kennametal (2007) a resistência ao desgaste indicada para esse tipo de inserto corresponde a de uma ferramenta ISO K20, priorizando a tenacidade, o que a torna mais apta a operações de corte interrompido.

A influência da geometria de corte (GC) sobre a evolução dos desgastes na usinagem com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN e os mecanismos de desgaste a eles associados, teve um comportamento diferente dos outros metais duros. A geometria de corte GC1 acentuou a taxa de desgaste de ponta (VB_C/t) em todas as condições ensaiadas, o que pode ser explicado pela condição do material do inserto do que por outros fatores. A abrasão em velocidades de corte menores ($v_c = 45$ m/min) e a possível difusão nas velocidades de corte superiores ($v_c = 60$ m/min) podem ter influido na evolução dos desgastes encontrados.

A observação do cavaco durante o processo de corte da liga foi idêntico ao já descrito para os outros tipos de metais duros, onde as bordas dos cavacos apresentavam cor rubra nas bordas e tom acinzentado no centro Shaw (1986). Esse comportamento quando associado a utilização da geometria de corte GC1 pode explicar a maior evolução do desgaste de ponta (VB_C) desencadeado por qualquer mecanismo, inclusive com possibilidade de difusão, caso haja condições de aderência, ao invés de escorregamento, pois a borda do cavaco nessa condição coincide com a ponta da ferramenta.

A avaliação do efeito das atmosferas envolventes nos ensaios com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN, foi de que a atmosfera rica em O_2 favoreceu a maior evolução do desgaste de ponta (VB_C) em todas as condições de corte para essa atmosfera, o que pode sugerir efeito da oxidação durante a evolução dos desgastes, seguido de *attrition* e abrasão. No entanto, esses podem ter sido os mecanismos envolvidos, pois nas outras atmosferas a incidência do desgaste de ponta também foi elevado.

4.3.7 Rugosidade Superficial na Usinagem com Insertos de Metal Duro

Os parâmetros de rugosidade superficial aplicados para o acompanhamento da evolução dos desgastes em insertos de metal duro na usinagem das ligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718, foram os mesmos utilizados para os insertos cerâmicos, ou seja:

Rugosidade média (R_a);

Rugosidade média quadrática ou desvio médio quadrático (R_q);

Rugosidade total (R_t).

Durante a fase de pré-testes esses foram os parâmetros que apresentaram as melhores respostas nas medidas de rugosidade superficial. As unidades utilizadas encontram-se em μm e representam o valor médio de rugosidade para cada parâmetro analisado. Os procedimentos para as medidas de rugosidade foram descritos no Sub-item 3.1.1.

Os valores médios das rugosidades observadas durante os ensaios com o Inconel[®] 751, por tipo de material de ferramenta, são mostrados nas Tabelas 4.47, 4.48 e 4.49.

Tabela 4.47 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
37	45	GC1	Normal	1,33	1,60	7,30
38	60	GC1	Normal	2,10	2,56	12,97
39	45	GC2	Normal	1,67	2,01	9,75
40	60	GC2	Normal	1,39	1,94	10,44
41	45	GC1	Rica em O_2	4,76	6,19	36,62
42	60	GC1	Rica em O_2	1,99	2,37	11,34
43	45	GC2	Rica em O_2	10,24	12,50	65,20
44	60	GC2	Rica em O_2	1,28	1,56	8,67
45	45	GC1	Inerte	1,24	1,50	9,14
46	60	GC1	Inerte	1,48	1,78	9,17
47	45	GC2	Inerte	1,30	1,53	10,63
48	60	GC2	Inerte	1,17	1,38	9,78

Tabela 4.48 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
49	45	GC1	Normal	1,33	1,65	10,55
50	60	GC1	Normal	2,61	3,24	17,13
51	45	GC2	Normal	1,29	1,63	12,08
52	60	GC2	Normal	2,51	3,32	26,35
53	45	GC1	Rica em O_2	2,11	2,51	13,58
54	60	GC1	Rica em O_2	1,19	1,44	8,40
55	45	GC2	Rica em O_2	2,19	2,72	21,14
56	60	GC2	Rica em O_2	3,22	3,70	14,16
57	45	GC1	Inerte	1,57	1,90	9,30
58	60	GC1	Inerte	1,76	2,25	12,15
59	45	GC2	Inerte	1,09	1,27	9,47
60	60	GC2	Inerte	1,81	2,22	8,93

Tabela 4.49 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V_c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
61	45	GC1	Normal	3,78	4,66	35,41
62	60	GC1	Normal	2,87	3,14	19,27
63	45	GC2	Normal	1,13	1,30	9,70
64	60	GC2	Normal	1,17	1,48	12,78
65	45	GC1	Rica em O_2	1,15	1,38	7,68
66	60	GC1	Rica em O_2	5,99	6,76	44,05
67	45	GC2	Rica em O_2	1,02	1,39	11,01
68	60	GC2	Rica em O_2	1,51	1,90	9,25
69	45	GC1	Inerte	1,05	1,29	7,21
70	60	GC1	Inerte	1,75	2,25	17,90
71	45	GC2	Inerte	0,67	0,88	6,24
72	60	GC2	Inerte	1,17	1,42	7,03

As Tabelas 4.50 e 4.51 apresentam os valores médios observados das rugosidades durante os ensaios com o Inconel® 718. Foram usados somente metais duros revestidos em atmosfera normal (a seco).

Tabela 4.50 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V_C (m/min)	GC (χ_r°)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
73	45	GC1	2,18	2,58	11,65
74	60	GC1	1,87	1,96	10,18
75	45	GC2	1,85	2,26	9,48
76	60	GC2	3,62	3,94	16,35

Tabela 4.51 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 718 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V_C (m/min)	GC (χ_r°)	R_a (μm)	R_q (μm)	R_t (μm)
77	45	GC1	1,17	1,44	19,03
78	60	GC1	2,38	2,62	18,52
79	45	GC2	1,35	1,82	7,75
80	60	GC2	2,7	2,95	14,25

Os gráficos das médias das rugosidades superficiais para o Inconel[®] 751, por tipo de metal duro são mostrados nas Figuras 4.79, 4.80 e 4.81:

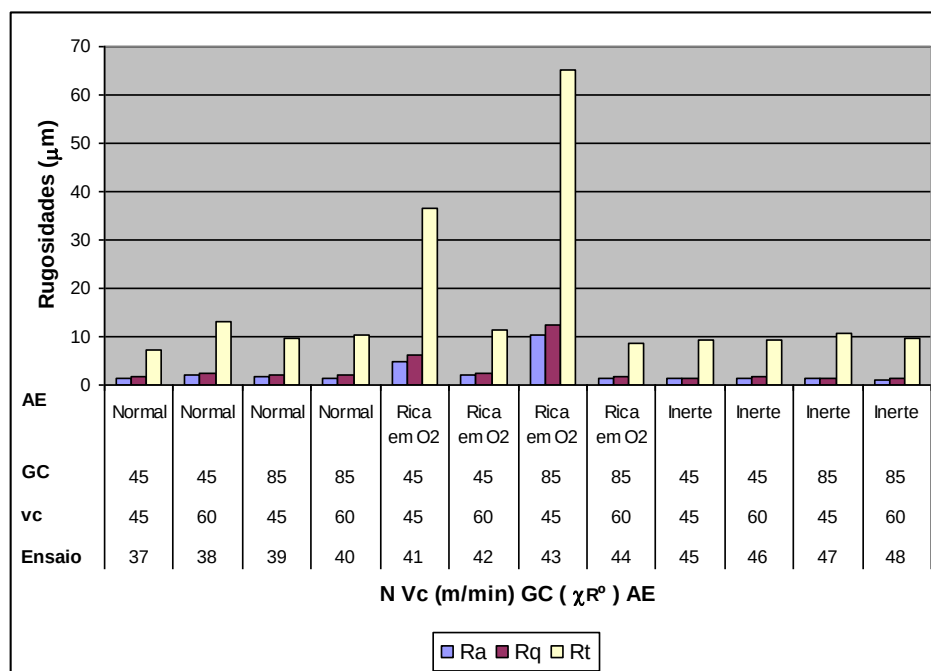


Figura 4.79 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento

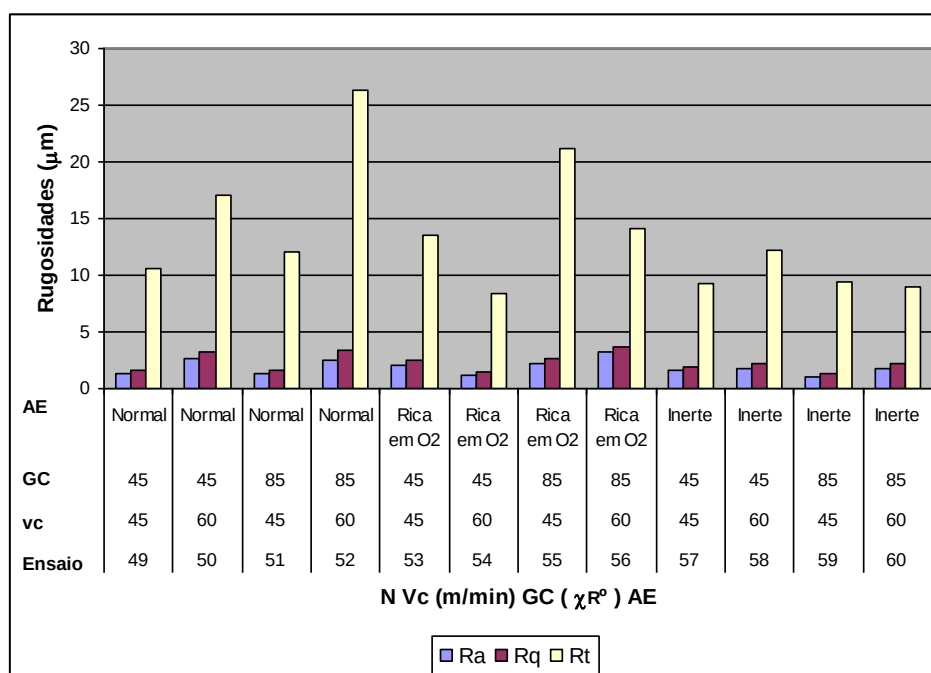


Figura 4.80 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

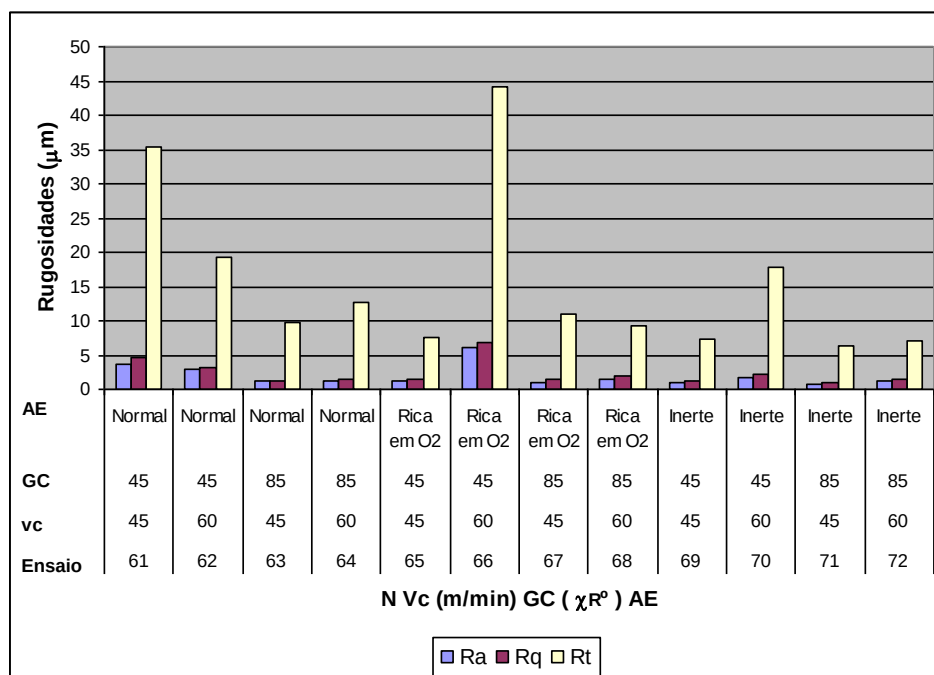


Figura 4.81 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN

Os gráficos das médias das rugosidades superficiais para o Inconel[®] 718 são apresentadas nas Figuras 4.82 e 4.83.

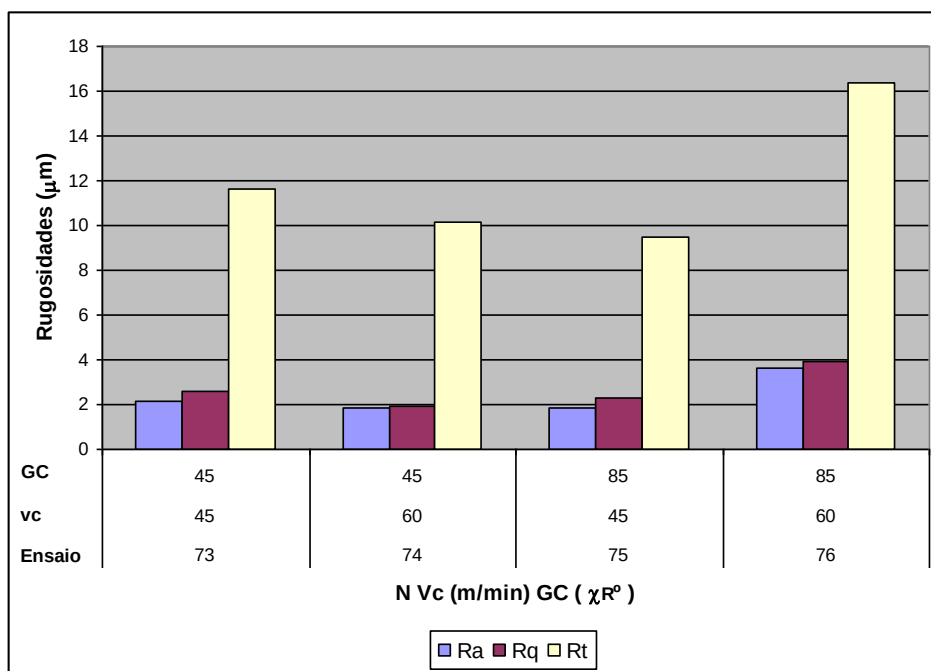


Figura 4.82 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

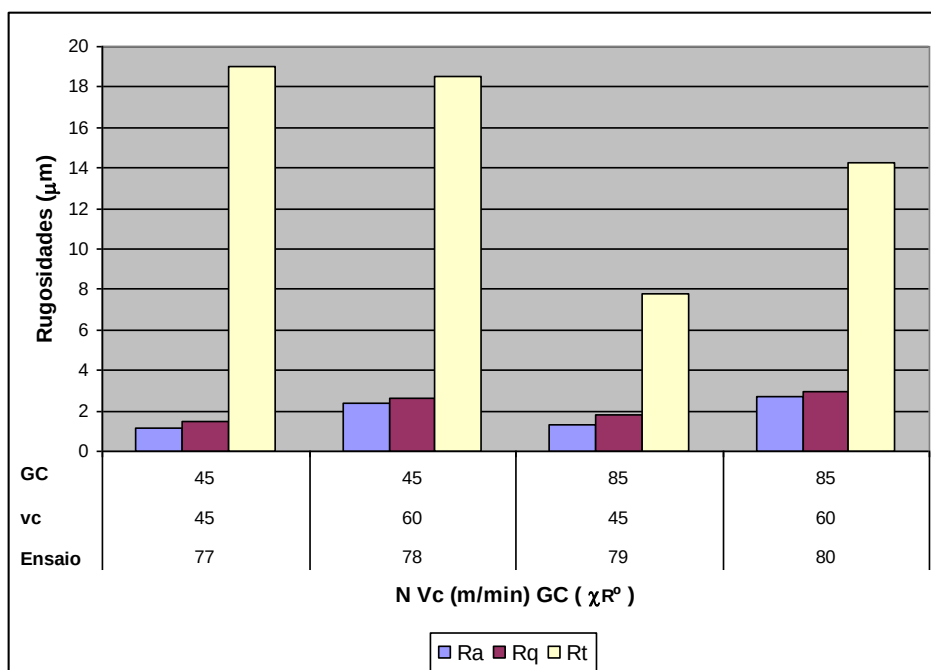


Figura 4.83 – Parâmetros médios de rugosidade superficial R_a , R_q e R_t na usinagem da liga Inconel[®] 718 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN

É importante ter ciência de que os valores de rugosidades apresentados nas tabelas e gráficos anteriores são as médias dos valores obtidos durante toda a vida da ferramenta. Assim, obviamente o tamanho e a forma dos desgastes terão influências nos resultados.

Na avaliação da rugosidade superficial dos insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento os valores da rugosidade média (R_a) ficaram entre os menores em comparação com os outros materiais. Considerando que esse material de inserto (MI) obteve vidas intermediárias entre os demais. A rugosidade ou desvio médio quadrático (R_q) acompanhou o mesmo desempenho, assim como os valores de rugosidade total (R_t).

Observou-se aumento dos valores de R_a , R_q e R_t nos ensaios onde houve aplicação da atmosfera envolvente (AE) rica em O_2 , coincidentemente nas situações onde ocorreu evolução acelerada dos desgastes de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C) durante os ensaios para esses insertos.

Para os metais duros com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos os valores de R_a , R_q e R_t foram em média um pouco superiores aos dos insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento, mas inferiores as rugosidades encontradas para os insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%).

Pode ser observado que utilizando a atmosfera inerte os valores de R_a , R_q e R_t tenderam a diminuir, mesmo tendo aumento dos tempos de vida e diminuição das taxas de desgaste de flanco médio (VB_B/t) e de ponta (VB_C/t).

Para os insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos foram encontradas as menores vidas e as maiores taxas de desgaste de ponta (VB_C/t) entre todos os insertos de metal duro ensaiados.

A interação da maior velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min) com a geometria GC1 demonstraram terem aumentado os valores de R_a , R_q e R_t independentemente da atmosfera envolvente (AE) aplicada. Essa foi a interação mais crítica para o aumento da evolução do desgaste de ponta (VB_C) nesses insertos.

Da mesma forma que para os ensaios com insertos de cerâmica, o parâmetro rugosidade total (R_t) demonstrou aptidão para identificar a aceleração dos desgastes no fim de vida das ferramentas. No caso dos metais duros com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos esse parâmetro foi bastante

eficiente na detecção do aumento da taxa de desgaste de ponta (VB_C/t) antes que ocorresse falha catastrófica da ferramenta.

Os parâmetros rugosidade média (R_a) e o desvio médio quadrático (R_q) tiveram melhor desempenho no acompanhamento da evolução dos desgastes durante as medidas de vida, sem entretanto fornecerem indícios seguros do fim de vida.

Em geral as ferramentas que obtiveram vidas maiores, com menores taxas de desgaste, tiveram valores médios de rugosidade superiores, como foi o caso dos metais duros com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos.

Os valores maiores de rugosidade encontrados para os insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%), mesmo tendo esses as menores vidas, foi devido ao tipo de desgaste que evoluiu mais rapidamente que foi o desgaste de ponta (VB_C), influenciado principalmente pela primeira geometria de corte GC1 ($\chi_r = 45^\circ$) e pelo aumento da velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min).

4.3.8 Forças de Corte na Usinagem com Insertos de Metal Duro

As componentes da força de usinagem que foram medidas no acompanhamento da evolução dos desgastes em insertos de metal duro nas ligas Inconel[®] 751 e Inconel[®] 718 foram as mesmas utilizadas nos insertos cerâmicos, assim:

Força de avanço (F_x);

Força passiva (F_y);

Força de corte (F_z).

As unidades utilizadas para as medidas de força foram expressas em Newton (N) e representam o valor médio para cada parâmetro analisado. Os procedimentos para as medidas foram descritos no Sub-item 3.1.1

Os valores médios observados durante os ensaios com o Inconel[®] 751, por tipo de metal duro utilizado nos insertos, são mostrados nas Tabelas 4.52, 4.53 e 4.54.

Tabela 4.52 – Forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento

Ensaio	V _c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	Fx (avanço)	Fy (passiva)	Fz (corte)
37	45	GC1	Normal	532	481	1116
38	60	GC1	Normal	566	527	1241
39	45	GC2	Normal	555	279	1192
40	60	GC2	Normal	483	225	1084
41	45	GC1	Rica em O ₂	623	584	1315
42	60	GC1	Rica em O ₂	592	552	1293
43	45	GC2	Rica em O ₂	557	278	1184
44	60	GC2	Rica em O ₂	557	253	1214
45	45	GC1	Inerte	560	520	1457
46	60	GC1	Inerte	603	617	1605
47	45	GC2	Inerte	606	303	1566
48	60	GC2	Inerte	514	248	1423

Tabela 4.53 – Forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V _c (m/min)	GC (χ_r°)	AE	Fx (avanço)	Fy (passiva)	Fz (corte)
49	45	GC1	Normal	575	581	1223
50	60	GC1	Normal	556	522	1231
51	45	GC2	Normal	482	263	1077
52	60	GC2	Normal	464	263	1088
53	45	GC1	Rica em O ₂	594	573	1268
54	60	GC1	Rica em O ₂	601	552	1263
55	45	GC2	Rica em O ₂	545	261	1186
56	60	GC2	Rica em O ₂	620	287	1350
57	45	GC1	Inerte	606	579	1317
58	60	GC1	Inerte	534	503	1411
59	45	GC2	Inerte	538	262	1445
60	60	GC2	Inerte	634	300	1468

Tabela 4.54 – Forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V _C (m/min)	GC (χ_r°)	AE	Fx (avanço)	Fy (passiva)	Fz (corte)
61	45	GC1	Normal	621	562	1044
62	60	GC1	Normal	748	466	1093
63	45	GC2	Normal	473	256	1072
64	60	GC2	Normal	474	263	1075
65	45	GC1	Rica em O ₂	612	572	1294
66	60	GC1	Rica em O ₂	639	632	1319
67	45	GC2	Rica em O ₂	536	247	1167
68	60	GC2	Rica em O ₂	598	297	1240
69	45	GC1	Inerte	540	511	1475
70	60	GC1	Inerte	499	484	1392
71	45	GC2	Inerte	502	246	1185
72	60	GC2	Inerte	500	255	1133

As Tabelas 4.55 e 4.56 apresentam os valores médios observados durante os ensaios de forças com o Inconel® 718. Foram usados somente metais duros revestidos na usinagem em atmosfera normal (a seco).

Tabela 4.55 – Forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V _C (m/min)	GC (χ_r°)	Fx (avanço)	Fy (passiva)	Fz (corte)
73	45	GC1	558	504	1211
74	60	GC1	501	481	1134
75	45	GC2	563	261	1217
76	60	GC2	514	254	1151

Tabela 4.56 – Forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

Ensaio	V _C (m/min)	GC (χ_r°)	Fx (avanço)	Fy (passiva)	Fz (corte)
77	45	GC1	563	514	1197
78	60	GC1	496	494	1130
79	45	GC2	584	241	1240
80	60	GC2	546	237	1168

Os gráficos dos ensaios das forças de usinagem, por tipo de metal duro com o Inconel[®] 751, são mostrados nas Figuras 4.84, 4.85 e 4.86.

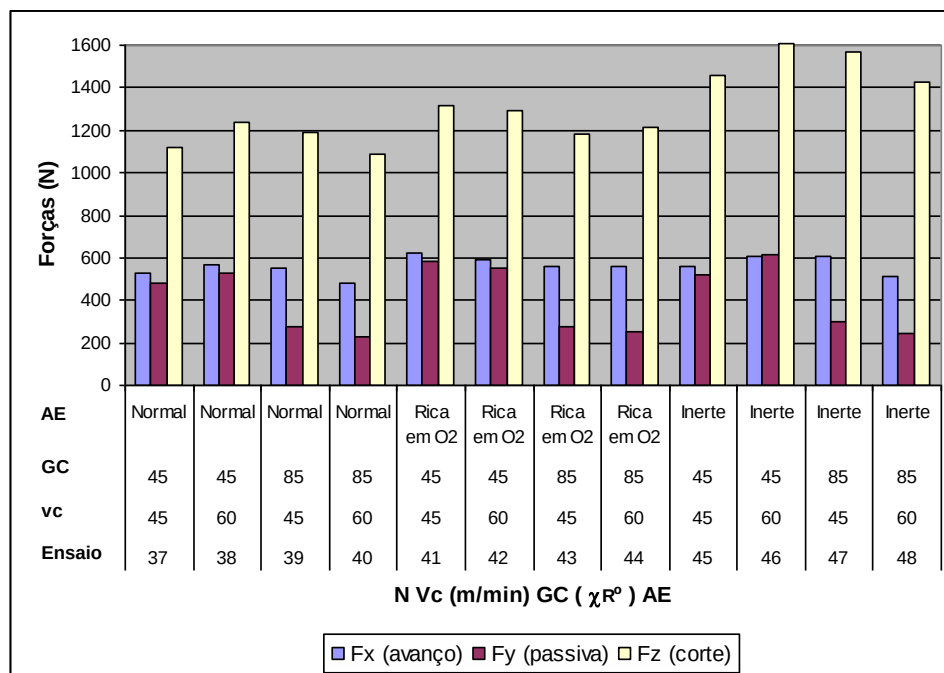


Figura 4.84 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro (WC/Co) sem revestimento

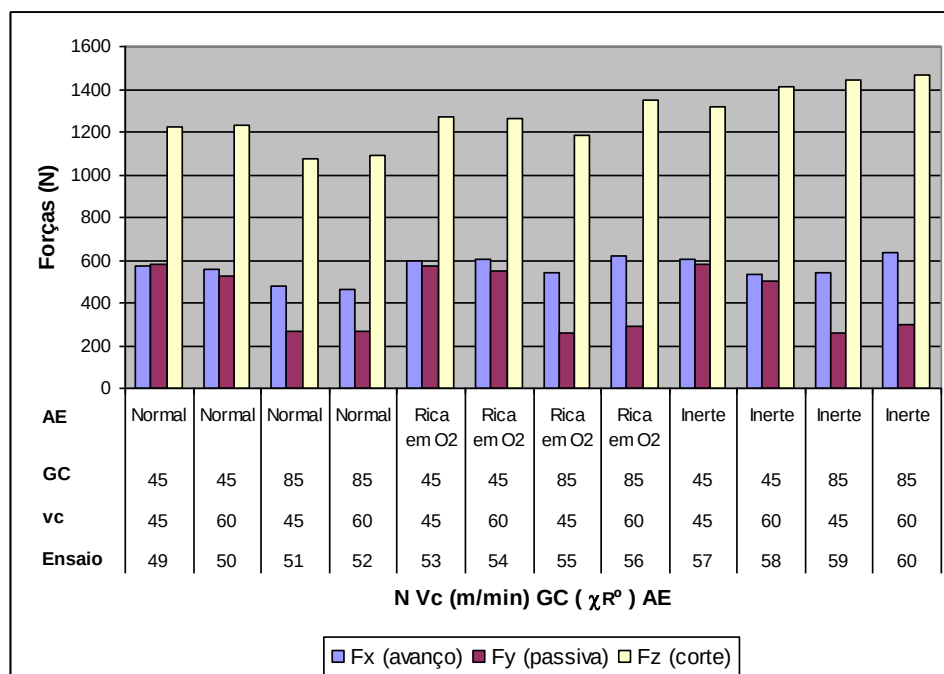


Figura 4.85 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

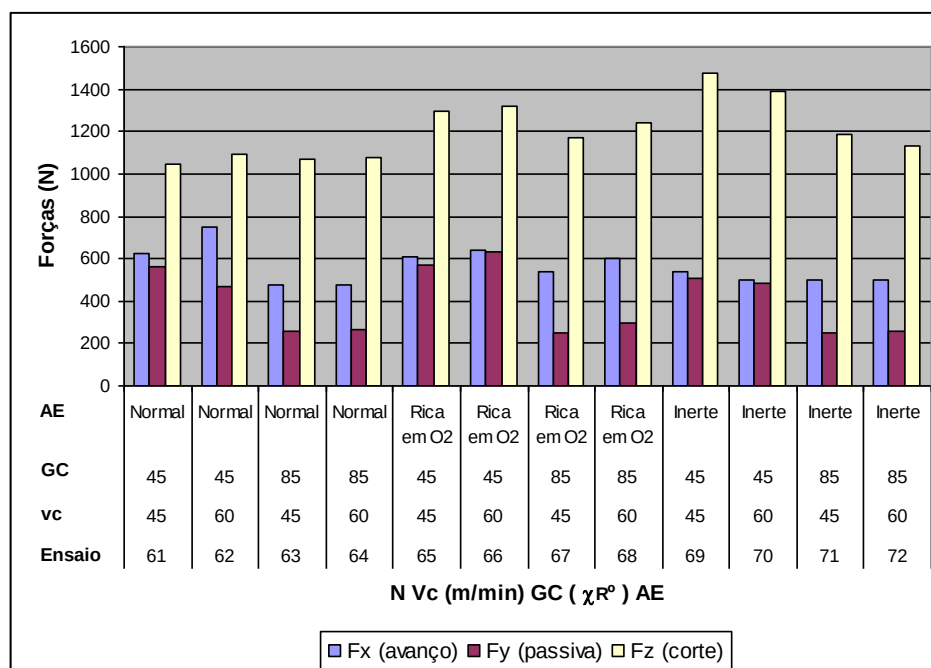


Figura 4.86 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN

A representação gráfica dos ensaios das forças de usinagem com o Inconel[®] 718, são apresentadas nas Figuras 4.87 e 4.88, a seguir.

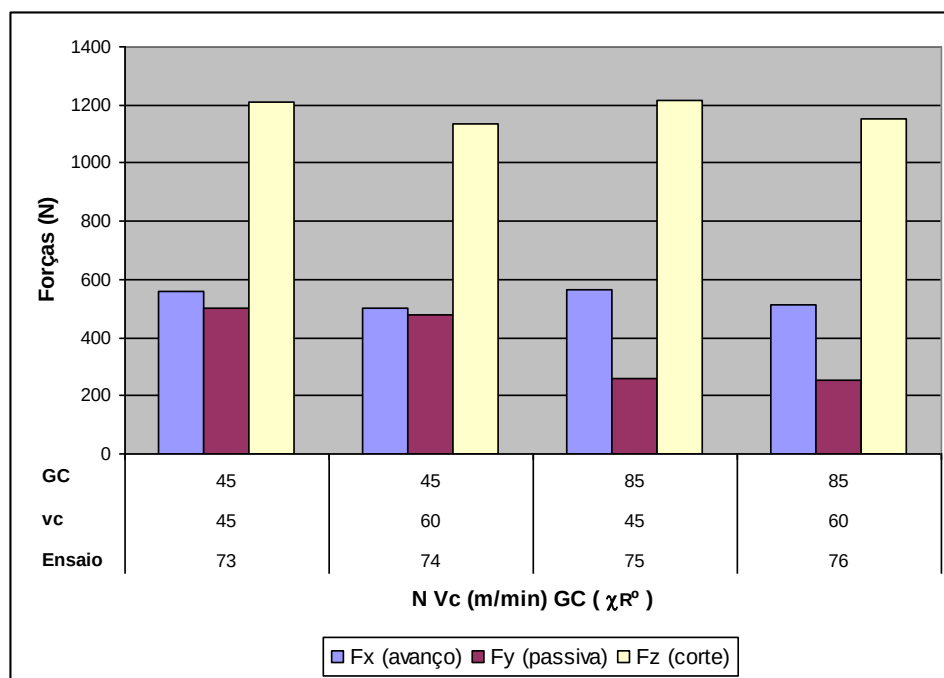


Figura 4.87 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 718 com insertos de metal duro com 6% de Co (WC/Co 6%) revestidos com TiAlN

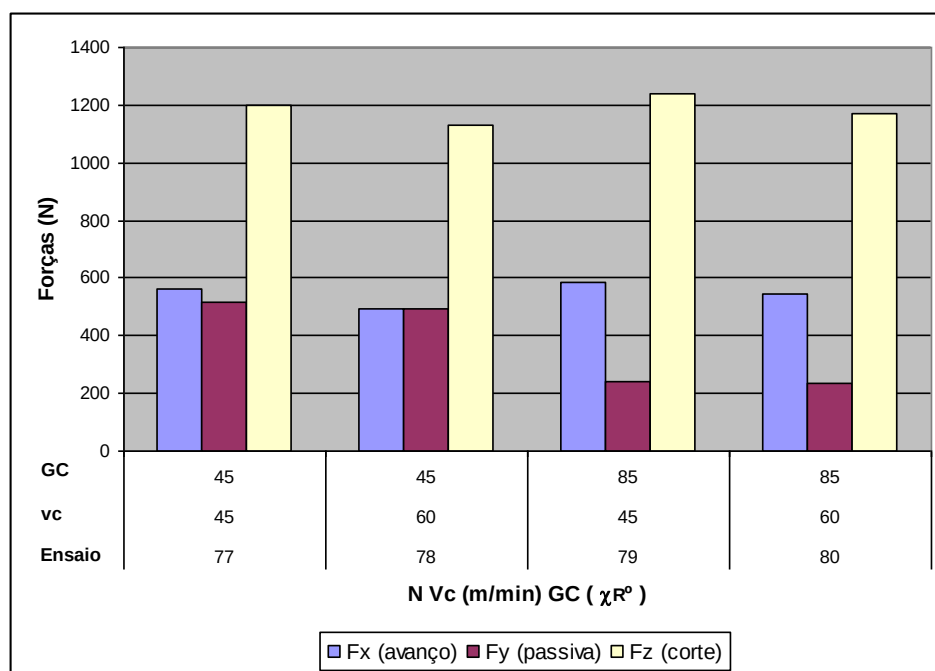


Figura 4.88 – Gráfico das forças Fx (avanço), Fy (passiva) e Fz (corte) na usinagem da liga Inconel® 718 com insertos de metal duro com 10% de Co (WC/Co 10%) revestidos com TiAlN

Os valores médios das componentes de força de usinagem para os insertos de metal duro são muito semelhantes para todos os insertos. Os materiais ensaiados nesse caso, apesar de terem diferido nos resultados de tempo de vida, propiciaram acabamentos superficiais melhores do que no caso das cerâmicas. Esse fato também pode ser explicado devido à evolução de mais de um tipo de desgaste simultaneamente, com influência de diversos mecanismos atuantes (LO CASTO *et al.*, 1999; ZOU *et al.*, 2009).

No caso da usinagem da liga Inconel[®] 751 os resultados apresentaram uma variação maior, em função da maior quantidade de condições de teste realizadas. A pequena quantidade de material disponível no caso do Inconel[®] 718 induziu um menor número de ensaios e assim consequentemente uma menor variação dos resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se afirmar que:

As variáveis investigadas velocidade de corte (v_c), geometria de corte (GC) e atmosfera envolvente (AE) influenciaram em todos os tipos de desgaste, bem como no tempo de vida das ferramentas ensaiadas, tanto nos materiais cerâmicos quanto nos metais duros.

Na usinagem da liga Inconel[®] 751 com insertos cerâmicos foram verificados três tipos de desgaste: de entalhe (VB_N), de flanco médio (VB_B) e de ponta (VB_C).

As menores vidas foram encontradas em atmosfera normal, enquanto a atmosfera rica em oxigênio e em baixas velocidades de corte ($v_c = 150$ m/min) aceleraram o desgaste de entalhe (VB_N), para os insertos cerâmicos.

A interação entre as variáveis geometria GC1 e velocidade de corte ($v_c = 300$ m/min) favoreceu o desenvolvimento do desgaste de ponta (VB_C), para todos os materiais cerâmicos.

A cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$) foi resistente ao desgaste de entalhe (VB_N), tendo as maiores vidas em todas as condições. O desgaste dominante neste caso foi o de flanco médio (VB_B), seguido pelo desgaste de ponta (VB_C).

A ferramenta de cerâmica reforçada com whisker ($Al_2O_3 + SiC$) foi a que teve os menores tempos de vida. O desgaste dominante foi o de entalhe (VB_N), principalmente em baixas velocidades de corte ($v_c = 150$ m/min) com a utilização da geometria GC2.

Os mecanismos de desgaste encontrados foram, devido às condições de escorregamento, *attrition* (aderência e arrastamento) e abrasão.

A melhor rugosidade média (R_a) entre os materiais cerâmicos foi obtida com a cerâmica whisker ($Al_2O_3 + SiC$), enquanto a maior rugosidade total (R_t) foi observada na cerâmica SiAlON ($Si_3N_4 + Al_2O_3$), influenciada pelo maior tempo de vida médio.

A avaliação das forças de usinagem mostrou que a geometria de corte GC1, onde o comprimento da aresta de corte era maior, favoreceu o aumento da força passiva e também a vida dos insertos.

Nos insertos de metal duro foram verificados os desgastes de flanco médio e desgaste de ponta, sendo o que mais evoluiu foi o desgaste de flanco médio (VB_B), seguido pelo desgaste de ponta (VB_C), tanto na usinagem da liga Inconel[®] 751 como da liga Inconel[®] 718.

As menores vidas foram encontradas em atmosfera inerte, embora a atmosfera rica em oxigênio e altas velocidades de corte ($v_c = 60$ m/min) também aceleraram o desgaste de flanco médio (VB_B), para os insertos de metal duro.

A interação entre as variáveis geometria de corte GC1 e maior velocidade de corte ($v_c = 60$ m/min) favoreceu o desenvolvimento do desgaste de ponta (VB_C).

O inserto com maior vida foi o metal duro com 6% de Co na matriz e revestimento de TiAlN, reduzindo o desenvolvimento dos desgastes observados nos outros insertos. O desgaste dominante neste caso foi o de flanco médio (VB_B), seguido pelo desgaste de ponta (VB_C).

O metal duro que proporcionou vidas intermediárias foi o que não possuía revestimento. O desgaste dominante foi o de flanco médio (VB_B), em velocidades de corte mais altas ($v_c = 60$ m/min) com a utilização da geometria GC2.

O inserto com 10% de Co na matriz apresentou evolução acentuada de desgaste de ponta. A atmosfera rica em oxigênio favoreceu esse tipo de desgaste.

Attrition (aderência e arrastamento) em conjunto com abrasão e difusão, devido às altas temperaturas geradas durante o corte da liga, foram os mecanismos de desgaste observados.

O metal duro sem revestimento foi o que propiciou a menor rugosidade média (R_a) e o metal duro com 6% de Co na matriz as maiores rugosidades média (R_a) e total (R_t).

As componentes de força de usinagem para os insertos cerâmicos e de metal duro sofreram influência da evolução e dos vários tipos de desgaste simultâneos, por causa dos diversos mecanismos.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Investigar a influência da concentração de óleo solúvel como meio lubrefrigerante na usinagem de superligas a base de níquel com ferramentas de metal duro com e sem revestimento;

Utilizar um sistema de alta pressão para controle do cavaco na usinagem de ligas de níquel com ferramentas de metal duro e estudar a evolução do desgaste;

Estudar a viabilidade de lubrificantes sólidos, tais como grafite em pó e bissulfeto de molibdênio, aplicados sob pressão nas superfícies de saída e de folga das ferramentas durante a usinagem de superligas de níquel;

Estudar a preparação da aresta de corte em ferramentas cerâmicas para usinagem de ligas de níquel;

Investigar a viabilidade da usinagem a baixíssimas temperaturas, utilizando nitrogênio líquido, das ligas de níquel;

Estudar o efeito da variação do avanço e da profundidade de corte sobre o acabamento superficial de peças fabricadas em superligas de níquel;

Avaliar a viabilidade da texturização de ferramentas para usinagem de superligas de níquel.

Estudar a integridade superficial das ligas de níquel utilizando as ferramentas empregadas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6405-1985. **Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1985. 18p.
- ANTONY, J. **Design of experiments for engineers and scientists**. Elsevier, Oxford, 2003. 156p.
- ASM METALS HANDBOOK. **Properties and selection - Nonferrous alloys and special-purpose materials**. 10th Edition, Volume 2. ASM International, USA, 2004. 3470p.
- _____. **Surface engineering**. 10th Edition, Volume 5. ASM International, USA, 2004. 2535p.
- _____. **Machining**. 10th Edition, Volume 16. ASM International, USA, 2004. 929p.
- ASM SPECIALTY HANDBOOK. **Heat-resistant materials**. ASM International, USA, 1997. 585p.
- ASTAKHOV, V.P. **Tribology of metal cutting**. Elsevier, Oxford, 2006. 454p.
- ATKINS, T. **The science and engineering of cutting**. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2009. 414p.
- ÁVILA, R.F. **Desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com TiN, TiCN e TiAlN (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido**. Belo Horizonte MG. Tese (Doutorado em Engenharia)
- Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003. 186p.
- BRANDES, E.A. & BROOK, G.B. **Smithells metals reference book**. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992. 1794p.
- BRUNS, R.E.; SCARMINIO, I.S. & BARROS NETO, B. **Statistical design - Chemometrics**. Elsevier, Amsterdam, 2006. 423p.
- CALADO, V. & MONTGOMERY, D.C. **Planejamento de experimentos usando o STATISTICA**. E-papers, Rio de Janeiro, 2003. 260p.
- CHILDS, T.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T. & YAMANE, Y. **Metal machining - Theory and applications**. Arnold, London, 2001. 416p.

- CHOUDHURY, I.A. & EL-BARADIE, M.A. **Machinability of nickel-base super alloys: a general review**. Journal of Materials Processing Technology 77 (1998) 278-284. Elsevier, 1998.
- _____. **Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology**. Journal of Materials Processing Technology 95 (1999) 30-39. Elsevier, 1999.
- DEAN, A. & VOSS, D. **Design and analysis of experiments**. Springer, New York, 1999. 764p.
- DEARNLEY, P.A. & TRENT, E.M. **Wear mechanisms of coated carbides tools**. Metal Technology, Volume 9, 1982, pp. 60-75.
- EZUGWU, E.O. **High speed machining of aero-engine alloys**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, January-March 2004, Vol. XXVI, No. 1. ABCM 2004.
- _____. **Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1353-1367. Elsevier, 2005. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.
- EZUGWU, E.O.; BONNEY, J.; FADARE, D.A. & SALES, W.F. **Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures**. Journal of Materials Processing Technology, Volumes 162-163, 15 May 2005, pp. 609-614. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.144
- _____. **Wear of coated carbide tools when machining nickel (Inconel 718) and titanium base (Ti-6Al-4V) alloys**. Tribology Transactions Vol. 43 (2000), 2, 263-268.
- EZUGWU, E.O.; WANG, Z.M. & MACHADO, A.R. **The machinability of nickel-based alloys: a review**. Journal of Materials Processing Technology 86 (1999) 1-16. Elsevier, 1999.
- GATTO, A. & IULIANO, L. **Advanced coated ceramic tools for machining superalloys**. International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 37, N°. 5, pp. 591-605, 1997. Elsevier, 1997.
- GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials**. Elsevier, Amsterdam, 2008. 478p.

- _____. **Machining performance of perlitic-ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008. doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.10.003.
- _____. **Wear development on wiper Al₂O₃-TiC mixed ceramic tools in hard machining of high strength steel.** Wear, Volume 266, Issue 1, 2009, pp.1021-1028.
- ISO 3685. **Tool life testing with single point turning tools.** International Organization for Standardization, Switzerland, 2000. 52 p.
- ISO 513. **Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges - Designation of the main groups and groups of application.** International Organization for Standardization, Switzerland, 2004. 3 p.
- KENNAMETAL. **Grade system for cutting materials.** 2006. 5p.
- _____. **Lathe tooling.** 2008. 549p.
- _____. **High temperature alloy turning guide.** 2007. 96p.
- JUN, Z.; JIANXIN, D.; JIANHUA, Z. & XING, A. **Failure mechanisms of a whisker-reinforced ceramic tool when machining nickel-based alloys.** Wear 208 (1997) 220-225. Elsevier, 1997.
- KLOCKE, F. & KRIEG T. **Coated tools for metal cutting – features and applications.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 48, Issue 1, 1999, pp.515–525.
- KÖNIG,W. & GERSCHWILLER, K. **Machining nickel-based superalloys.** Manufacturing Engineering, n°.3, pp.102-108, 1999.
- KÖNIG, W. & KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren – Drehen, fräsen und bohren.** Springer, Berlin, 1997. 471p.
- LIAO, Y.S. & SHIUE, R.H. **Carbide tool wear mechanisms in turning of Inconel 718 superalloy.** Wear, Volume 193, Issue 1, April 1996, pp. 16-24.
- LO CASTO, S.; LO VALVO, E.; LUCCHINI, E.; MASCHIO, S.; PIACENTINI, M. & RUISI, V.F. **Ceramic materials wear mechanisms when cutting nickel-based alloys.** Wear 225-229 (1999) 227-233. Elsevier, 1999.
- MACHADO, A.R. **Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a high pressure coolant system.** Coventry UK. PhD Thesis. University of Warwick, 1990. 288p.

- MACHADO, A.R. & DA SILVA, M.B. **Usinagem dos metais**. 8ª. Edição. Editora UFU, 2004. 257 p.
- MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T. & DA SILVA, M.B. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, São Paulo, 2009. 371 p.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 5th Edition. John Wiley, New York, 2001. 700p.
- RICHARDS, N. & ASPINWALL, D. **Use of ceramic tools for machining nickel based alloys**. International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 29, Issue 4, 1989, pp 575-588. Elsevier, 1989. DOI: 10.1016/0890-6955(89)90072-2.
- SPECIAL METALS. **Inconel alloy 751**. Special Metals Corporation, Publication Number SMC-083, 2004. 4p.
- SHAW, M.C. **Metal cutting principles**. Oxford Press, New York, 1986. 594 p.
- THANGARAJ, A.R. & WEINMANN, K.J. **On the wear mechanisms and cutting performance of silicon carbide whisker-reinforced alumina**. Journal of Engineering for Industry, Volume 114, August 1992, pp. 301-308.
- TRENT, E.M. **Metal cutting**. 3rd Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991, 273p.
- TRENT, E.M. & WRIGHT, P.K. **Metal cutting**. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, London, 2000. 446 p.
- WAYNE, S.F. & BULJAN, S.T. **Wear of ceramic tools in Ni-based superalloy machining**. Tribology Transactions, Volume 33, Issue 4, 1990, pp. 618-626.
- WEINERT, K. & MEISTER, D. **Usinagem e desgaste da ferramenta**. Máquinas & Metais, set., pp. 26-41. Aranda, 1998.
- ZOU, B.; CHEN, M.;HUANG, C. & AN, Q. **Study on surface damages caused by turning NiCr20TiAl nickel-based alloy**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issue 17, 19 August 2009, p.5802-5809. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.06.017
- ADDHOUM, H. & BROUSSAUD, D. **Interaction of ceramic cutting tools with nickel-based alloys**. Materials Science and Engineering: A, Volume 109, March 1989, pp.379-387. doi:10.1016/0921-5093(89)90618-7.
- ALAUDDIN, M.; EL BARADIE, M.A. & HASHMI, S.J. **Tool life testing in the end milling of Inconel 718**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 55, Issues 3-4, December 1995, pp. 321-330.

- ALTIN, A.; NALBANT, M. & TASKESSEN, A. **The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools**. Materials & Design, Volume 28, Issue 9, 2007, pp. 2518-2522. doi:10.1016/j.matdes.2006.09.004.
- ANDERSON, M.; PATWA, R. & SHIN, Y.C. **Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issue 14, November 2006, pp.1879-1891. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.11.005.
- ARUNACHALAM, R.M.; MANNAN, M.A. & SPOWAGE, A.C. **Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 879-887. Elsevier, 2004. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.02.031.
- _____. **Friction, lubrication and wear technology**. 10th Edition, Volume 18. ASM International, USA, 1993. 1029p.
- BALAZINSKI, M.; SONGMÉNÉ, V. & KOPS, L. **Improvement of tool life through variable feed milling of Inconel 600**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 44, Issue 1, 1995, pp.55-58. doi:10.1016/S0007-8506(07)62274-4.
- BARSOUM, M.W. **Fundamentals of ceramics**. IOP, London, 2003. 622p.
- BEISS, P. & KUTSCH, U. **Machinability of sintered stainless steel 439LHC**. Power Metallurgy, Volume 39, Issue1, 1996, pp.66-70.
- BOOTHROYD, G. & KNIGHT, W.A. **Fundamentals of machining and machine tools**. CRC Press, Boca Raton, 2006. 614p.
- BOYCE, M.P. **Gas turbine engineering handbook**. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002. 816p.
- BRADBURY, S.R.; LEWIS, D.B. & SARWAR, M. **Analysis of the wear and failure mechanisms that develop in high speed steel circular saw blades when machining nickel-based alloys**. Wear, Volume 197, Issues 1-2, September 1996, pp.74-81. doi:10.1016/0043-1648(95)06834-1.
- BRADY, G.S.; CLAUSER, H.R. & VACCARI, J.A. **Materials handbook**. 15th Edition. McGraw-Hill, New York, 2006. 1115p.
- BRAGHINI JÚNIOR, A., SILVA, L. R., BEZERRA, A. A., COELHO, R. T. **Desgaste de ferramentas de torneamento usando HSC e MQL**. Revista Máquinas e Metais, v.37, n.423, p.284 - 295, 2001.

- BRAGHINI JÚNIOR, A., SILVA, L. R., BEZERRA, A. A., COELHO, R. T. **Investigação do torneamento de ferro fundido com alta velocidade de corte usando mínima quantidade de fluido.** I Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Curitiba - PR, 2001.
- BRION, J.M. et al. **Mechanisms of built-up layer formation on turning tools: Influence of tool and workpiece.** Wear, Volume 154, Issue 1, September 1992, pp.225-239.
- BURAKOWSKI, T. & WIERZCHON, T. **Surface engineering of metals - Principles, equipment and technologies.** CRC Press, Boca Raton, 1999. 592p.
- CALLISTER JR., W.D. **Fundamentals of materials science and engineering.** 5th Edition. John Wiley, New York, 2001. 1619p.
- CHALLEN, B. & BARANESCU, R. **Diesel engine - Reference book.** 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999. 675p.
- CHANDRASEKARAN, H. & JOHANSSON, J.O. **Chip flow and notch wear mechanisms during the machining of high austenitic stainless steels.** CIRP Annals, Volume 43, Issue 1, January 1994, pp. 101-105.
- CLARKE, A.R. & EBERHARDT, C.N. **Microscopy techniques for materials science.** CRC Press, Boca Raton, 2000. 485p.
- COELHO, R.T.; SILVA, L.R.; BRAGHINI JR. & BEZERRA, A.A. **Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning INCONEL 718 at high cutting speeds.** Journal of Materials Processing Technology, Volume 148, Issue 1, 1 May 2004, pp.147-153. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.02.001.
- COOK, N.H. **Tool wear and tool life.** Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry, 1973, pp. 931-938.
- COURBON, C.;KRAMAR, D.;KRAJNIK, P.;PUSAVEC, F.;RECH, J. & KOPAC, J. **Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 49, Issue 14, November 2009, pp.1114-1125. doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.07.010.

- COSTES, J.P.; GUILLET, Y.; POULACHON, G. & DESSOLY, M. **Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 1081-1087. Elsevier, 2006. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.031.
- DANGSHENG, X. **Lubrication behavior of Ni-Cr based alloys containing MoS₂ at high temperature**. Wear, Volume 251, Issue 1, 2001, pp.1094-1099.
- DAVIS, J.R. **Metals handbook - Desk edition**. 2nd Edition. ASM International, USA, 1998. 2571p.
- DEVILLEZ, A.; SCHNEIDER, F.; DOMINIAK S.; DUDZINSKI, D. & LARROUQUERE, D. **Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools**. Wear 262 (2007) 931-942. Elsevier, 2006. DOI: 10.1016/j.wear.2006.10.009.
- DING, X.; LIEW, W.Y.H.; LIU, X.D. **Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools**. Wear 259 (2005) 1225-1234. Elsevier, 2005. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.094.
- DONACHIE JR., M.J. **Titanium - A technical guide**. ASM, Metals Park, 1988. 485p.
- DUCROS, C.; BENEVENT, V. & SANCHETTE, F. **Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools**. Surface and Coatings Technology, Volume 163-164, January 2003, pp. 681-688.
- DUDZINSKI, D.; DEVILLEZ, A.; MOUFKI, A.; LARROUQUÈRE, D.; ZERROUKI, V. & VIGNEAU, J. **A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 439-456. Elsevier, 2003. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00159-7.
- EL MANSORI & NOUARI, M. **Dry machinability of nickel-based weld-harfacings layers for hot tooling**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Elsevier, 2007. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.12.007.
- EL-WARDANY, T.I.; MOHAMMED, E. & ELBESTAWI, M.A. **Cutting temperature of ceramic tools in high speed machining of difficult-to-cut materials**. International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 36, N°. 5, pp. 611-634, 1996. Elsevier, 1996.

- _____. **Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique.** Journal of Materials Processing Technology (2006). Elsevier, 2006. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.112.
- EZUGWU, E.O.; BONNEY, J. & OLAJIRE, K.A. **The effect of coolant concentration on the machinability of nickel-base, nimonic C-263, alloy.** Tribology Letters, Vol. 16, No. 4, May 2004. Plenum, 2004.
- EZUGWU, E.O.; BONNEY, J. & YAMANE, Y. **An overview of the machinability of aeroengine alloys.** Journal of Materials Processing Technology 134 (2003) 233-253. Elsevier, 2002.
- EZUGWU, E.O.; BONNEY, J.; DA SILVA, R.B. & MACHADO, A.R. **Evaluation of the performance of different nano-ceramic tool grades when machining nickel-base, Inconel 718, alloy.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, January-March 2004, Vol. XXVI, No. 1. ABCM 2004.
- EZUGWU, E.O.; FADARE, D.A.; BONNEY, J.; SILVA, R.B. & SALES, W.F. **Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of INCONEL 718 alloy using an artificial neural network.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1375-1385. Elsevier, 2005. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.02.004.
- EZUGWU, E.O.; OLAJIRE, K.A. & JAWAID, A. **Wear performance of multilayer-coated carbide tools.** Science and Technology, 5(1) 115-129 (2001). Marcel Dekker, 2001.
- EZUGWU, E.O.; OLAJIRE, K.A. & WANG, Z.M. **Wear analysis of coated carbide tools when machining nickel base, Inconel 718 alloy.** in: SUDARSHAN, T.S. & JEANDIN, M. Surface modification technologies XIV, pp. 279-286. ASM International, Ohio, 2001.
- _____. **Wear evaluation of a self-propelled rotary tool when machining titanium alloy IMI 318.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 216, No. 6, 2002. IMechE, 2002. DOI 10.1243/095440502320193012.
- EZUGWU, E.O. & OKEKE, C.I. **Behavior of coated carbide tools in high speed machining of a nickel base alloy.** Tribology Transactions Vol. 45 (2002), 1, 122-126.

- EZUGWU, E.O.; SILVA, R.B.; BONNEY, J. & MACHADO, A.R. **Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1009-1014. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.027.
- EZUGWU, E.O.; WANG, Z.M. **Titanium alloys and their machinability - a review**. Journal of Materials Processing Technology 68 (1997) 262-274. Elsevier, 1997.
- FANG, X.D. & ZANG, D. **An investigation of adhering layer formation during tool wear progression in turning of free-cutting stainless steel**. Wear, Volume 197, Issue 1, 1996, pp.225-239.
- FROST, H.J. & ASHBY, M.F. **Deformation – Mechanism maps. The plasticity and creep of metals and ceramics**. Pergamon, Oxford, 1982. 348p.
- GARRET, T.K.; NEWTON, K. & STEEDS, W. **The motor vehicle**. 13th Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001. 1188p.
- _____. **Chip formation analysis in high speed machining of a nickel base superalloy with silicon carbide whisker-reinforced alumina**. International Journal Machine Tools Manufacturing, Volume 34, Issue 8, 1994, pp. 1147-1161.
- GEKONDE, H. & SUBRAMANIAN, S.V. **Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms**. Surface and Coatings Technology, Volume 149, Issue 1, 2002, pp.151-160.
- GLAESER, W.A. **Materials for tribology**. Elsevier, Amsterdam, 1992. 275p.
- GROOVER, M.P. **Fundamentals of modern manufacturing - Materials, processes and systems**. 3rd Edition. John Wiley, New Jersey, 2007. 520p.
- HALDAR, A.; SUWAS, S. & BHATTACHARJEE, D. **Microstructure and texture in steels and other materials**. Springer, London, 2009. 508p.
- HAMANN, J.C. et al. **Machinability improvement of steels at high cutting speeds – Study of tool/work material interaction**. Annals of the CIRP, Volume 45, 1996, pp.87-92.
- HELISTÖ et al. **Interface phenomena between oxide layers and cemented carbide tools**. Wear, Volume 139, 1990, pp.225-234.
- HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, New York, 1988. 481p.
- HIGGINS, R.A. **Engineering metallurgy - Applied physical metallurgy**. 6th Edition. Arnold, London, 1999. 581p.

- HUTCHINGS, I.M. **Tribology – Friction and wear of engineering materials**. CRC Press, Boca Raton, 1992. 273p.
- HOFFMANN, M.J. **Relationship between microstructure and mechanical properties of silicon nitride ceramics**. Pure and Applied Chemistry, Volume 67, 1995, pp.939-946.
- HUENECKE, K. **Jet engines - Fundamentals of theory design and operations**. Motorbooks, Osceola, 2003. 250p.
- JAWAID, A.; KOKSAL, S. & SHARIF, S. **Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 116, Issue 1, October 2001, pp. 2-9.
- JIANXIN, D.; LILI, L.; JIANHUA, L.; JINLONG, Z. & XUEFENG, Y. **Failure mechanisms of TiB₂ particle and SiC whisker reinforced Al₂O₃ ceramic cutting tools when machining nickel-based alloys**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, Issues 12-13, October 2005, pp.1393-1401. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.01.033.
- KALPAKJIAN, S. & SCHMID, S. **Manufacturing engineering and technology**. 5th Edition. Pearson, Upper Saddle River, 2006. 1295p.
- KALPAKJIAN, S. & SCHMID, S. **Manufacturing processes for engineering materials**. 5th Edition. Pearson, Upper Saddle River, 2008. 1018p.
- KESSNER, M.E. & PRADO, M.T.P. **Fundamentals of creep in metals and alloys**. Elsevier, Oxford, 2004. 289p.
- KHAMSEHZADEH, H. **Behaviour of ceramic cutting tools when machining superalloys**. Coventry UK. PhD Thesis. University of Warwick, 1991. 192p.
- KITAGAWA, T.; KUBO, A. & MAEKAWA, K. **Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn**. Wear 202 (1997) 142-148. Elsevier, 1997.
- LEWIS, M.H. **Oxidation mechanisms in SiAlON ceramics**. Journal of Materials Science Letters, Volume 15, 1980, pp.443-448.
- LIAO, Y.S.; LIN, H.M & WANG, J.H. **Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 201, Issues 1-3, 26 May 2008, pp.460-465. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.176.

- LÜTJERING, G. & WILLIAMS, J.C. **Titanium**. 2nd Edition. Springer, Berlin, 2007. 449p.
- LEWIS, D.B.; BRADBURY, S.R. & SARWAR, M. **Analysis of the wear and failure mechanisms that develop in high speed steel circular saw blades when machining nickel-based alloys**. Wear 197 (1996) 74-81. Elsevier, 1996.
- LI, L.; HE, N.; WANG, M. & WANG, Z.G. **High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 129, Issues 1-3, 11 October 2002, pp.127-130. doi:10.1016/S0924-0136(02)00590-3.
- MARINOV, V. **Experimental study on the abrasive wear in metal cutting**. Wear, Volume 197, Issue 1, pp. 242-247.
- MATTINGLY, J.D. & OHAIN, H. **Elements of propulsion - Gas turbines and rockets**. AIAA, Reston, 2006. 851p.
- MÜLLER, G. **Ceramics – Processing, reliability, tribology and wear**. Willey, Weinheim, 2000. 492p.
- NALBANT, M.; ALTIN, A. & GÖKKAYA, H. **The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys**. Materials and Design 28 (2007) 1334-1338. Elsevier, 2006. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.12.008.
- NATURAL, N. & YAMAHA, Y. **High speed machining of Inconel 718 with ceramic tools**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 42, Issue 1, 1993, pp.103-106.
- OLOVSJÖ, S.; WRETLAND, A. & SJÖBERG, G. **The effect of grain size and hardness of wrought alloy 718 on the wear of cemented carbide tools**. Wear (2008), doi:10.1016/j.wear.2010.01.017.
- OPITZ, H. **Tool wear and tool life**. International Research in Production Engineering. ASME, New York, 1963, pp.107-113.
- PAUL, M.A.; HODKINSON, N.C. & ASPINWALL, D.K. **Arc sawing of nickel based superalloys in aqueous electrolytes**. Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999) 274-280. Elsevier, 1999.

- PAWADEA, R.S.; JOSHIA, S.S. & BRAHMANKARB, P.K. **Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high-speed turned Inconel 718**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Elsevier, 2007. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2007.08.004.
- PFEILER, W. **Alloy physics - A comprehensive reference**. Wiley, Weinheim, 2007. 1003p.
- PORTER, D.A. & EASTERLING, K.E. **Phase transformations in metals and alloys**. 2nd Edition. Chapman & Hall, London, 1992. 227p.
- PRENGEL, H.G. **A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools**. Surface and Coatings Technology, Volume 139, Issue 1, May 2001, pp. 25-34.
- RAHMAN, M.; SEAH, W.K.H. & TEO, T.T. **The machinability of Inconel 718**. Journal of Materials Processing Technology 63 (1997) 199-204. Elsevier, 1997.
- RUPPI, S.; GRELIUS, B.H. & HUHTIRANTA, M. **Wear characteristics of TiC, Ti(C,N), TiN and Al₂O₃ coatings in the turning of conventional and Ca-treated steels**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 16, Issues 4–6, 1998, pp.353-368.
- SHARMAN, A.; DEWES, R.C. & ASPINWALL, D.K. **Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 118, Issues 1-3, December 2001, pp. 29-35.
- SILVA, A.M.; PINHEIRO, M.S.F. & FRANÇA, M.N. **Guia para normalização de trabalhos técnico-científicos: Projetos de pesquisa, trabalhos acadêmicos, dissertações e teses**. 5ª. Edição. Edufu, Uberlândia, 2009. 140p.
- SILVA, L. R., BEZERRA, A. A., BRAGHINI JÚNIOR, A., COELHO, R. T. **The influence of the edge geometry in high-speed turning of nickel-based superalloy aspalloy**. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, Uberlândia - MG, 2001.
- SILVA, L. R., COELHO, R. T., BEZERRA, A. A. **Usinagem a alta velocidade de superligas a base de níquel - revisão bibliográfica**. I Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, Natal - RN, 2000.

- SILVA, L. R., COELHO, R. T., BEZERRA, A. A., BRAGHINI JÚNIOR, A. **Influências da mínima quantidade de lubrificante no torneamento do inconel 718 usando alta velocidade de corte.** II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Uberlândia - MG, 2003.
- SILVA, L. R., COELHO, R. T., BEZERRA, A. A., BRAGHINI JÚNIOR, A., MENDONÇA, W. G. **Análise da integridade superficial no torneamento da superliga inconel 718 usando alta velocidade de corte.** USINAGEM 2002 Feira e Congresso, São Paulo - SP, 2002.
- SILVA, L. R., COELHO, R. T., BRAGHINI JÚNIOR, A., BEZERRA, A. A., MENDONÇA, W. G. **Estudo da geometria de corte para torneamento de inconel.** Revista Máquinas e Metais, v.37, n.427, p.32 - 55, 2001.
- SILVA, L. R., COELHO, R. T., BRAGHINI JÚNIOR, A., BEZERRA, A. A. **Influência da geometria da aresta na usinagem de superliga à base de níquel.** Revista Máquinas e Metais, v.38, n.436, p.76 - 101, 2002.
- STEPHENSON, D.A. & AGAPIOU, J.S. **Metal cutting theory and practice.** Marcel Dekker, New York, 1997. 257p.
- SU, Y.; HE, N.; LI, .; IQBAL, A.; XIAO, M.H.; XU, S. & QIU, B.G. **Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 927-933. Elsevier, 2006. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.07.005.
- SUN, F.L. **Adhering wear mechanisms of cemented carbide cutter in the intervallic cutting of stainless steel.** Wear, Volume 214, Issue 1, January 1998, pp. 79-82.
- TENNENHOUSE, G.J. & RUNKLE, F.D. **The effects of oxygen on the wear of tungsten-carbide-based materials.** Wear, Volume 118, 1987, pp. 365-375.
- THAKUR, D.G.; RAMAMOORTHY, B. & VIJAYARAGHAVAN, L. **Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning.** Materials & Design, Volume 30, Issue 5, May 2009, pp.1718-1725. doi:10.1016/j.matdes.2008.07.011.
- VIGNEAU, J.; BORDEL, P. & GESLOT, R. **Reliability of Ceramic Cutting Tools.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 37, Issue 1, 1988, pp.101-104. doi:10.1016/S0007-8506(07)61595-9.
- VILLARES METALS. **Specialty alloys.** Villares Metals, 2008. 8p.

- WALSH, R.A. & CORMIER, D.R. **Machining metalworking handbook**. 3rd Edition. McGraw-Hill, New York, 2006. 976p.
- WANG, Z.Y.; RAJURKAR, K.P.; FAN, J.; LEI, S.; SHIN, Y.C. & PETRESCU, G. **Hybrid machining of Inconel 718**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 1391-1396. Elsevier, 2003. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00134-2.
- WOJNAR, L. **Image analysis - Applications in materials engineering**. CRC Press, Boca Raton, 1999. 232p.
- XIAO, H. **Wear behaviour and wear mechanism of ceramic tools in machining hardened alloy steel**. Wear, Volume 139, Issue 2, August 1990, pp.439-451.
- ZHU, D.; ZHANG X. & DING, H. **Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001.

ANEXO I

SUPORTES**Suporte 1 – CSRNR2525M12-MN4 (Catálogo 4010 P – A180)**

1. **C** – Sistema de fixação da pastilha = Fixação pelo topo
2. **S** – Formato da pastilha = Quadrada
3. **R** – Formato do suporte = 75°
4. **N** – Ângulo de folga da pastilha = 0°
5. **R** – Versão = ferramenta direita
6. **25** – Altura da haste em mm
7. **25** – Largura da haste em mm
8. **M** - Comprimento da ferramenta = 150 mm
9. **12** – Tamanho da pastilha = 12.70 mm
10. **MN4** – Sistema de fixação dos insertos
11. **Observações** – Ângulo de saída = - 6° ∴ ângulo de inclinação = - 6°

Suporte 2 – CSXNR2525M12-MN4 (Catálogo 4010 P – A182)

1. **C** – Sistema de fixação da pastilha = Fixação pelo topo
2. **S** – Formato da pastilha = Quadrada
3. **X** – Formato do suporte = 85°
4. **N** – Ângulo de folga da pastilha = 0°
5. **R** – Versão = ferramenta direita
6. **25** – Altura da haste em mm
7. **25** – Largura da haste em mm
8. **M** - Comprimento da ferramenta = 150 mm
9. **12** – Tamanho da pastilha = 12.70 mm
10. **MN4** – Sistema de fixação dos insertos
11. **Observações** – Ângulo de saída = - 6° ∴ ângulo de inclinação = - 6°

Suporte 3 – CSSNR2525M12-MN7 (Catálogo 4010 P – A181)

1. **C** – Sistema de fixação da pastilha = Fixação pelo topo
2. **S** – Formato da pastilha = Quadrada
3. **S** – Formato do suporte = 45°
4. **N** – Ângulo de folga da pastilha = 0°
5. **R** – Versão = ferramenta direita
6. **25** – Altura da haste em mm
7. **25** – Largura da haste em mm
8. **M** - Comprimento da ferramenta = 150 mm
9. **12** – Tamanho da pastilha = 12.70 mm
10. **MN7** – Sistema de fixação dos insertos
11. **Observações** – Ângulo de saída = - 8° ∴ ângulo de inclinação = 0°

INSERTOS**Insertos 1, 2 e 3 (K313, KC5510 e KC5525) – SNMG120412MS (Catálogo 4010 P – A35 e A66)**

1. **S** – Formato = Quadrada
2. **N** – Ângulo de folga = 0°
3. **M** – Classe de tolerância
4. **G** – Características
5. **12** – Tamanho = 12.70 mm
6. **04** – Espessura da pastilha = 4.76 mm
7. **12** – Raio da ponta = 1.2 mm
8. **MS** – Condição da aresta de corte ou características do controle de cavaco = Médio fino (Semi-acabamento)

Insertos 4 e 6 (KY1540 e KY4300) – SNGN120716T01020 (Catálogo 4010 P – A98 e A99)

1. **S** – Formato = Quadrada
2. **N** – Ângulo de folga = 0°
3. **G** – Classe de tolerância
4. **N** – Características
5. **12** – Tamanho = 12.70 mm
6. **07** – Espessura da pastilha = 7.94 mm
7. **16** – Raio da ponta = 1.6 mm
8. **T01020** – Condição da aresta de corte ou características do controle de cavaco = Chanfro T 0,10 mm a 20°

Inserto 5 (KY1615) – SNGN120716T02020 (Catálogo 4010 P – A98 e A99)

1. **S** – Formato = Quadrada
2. **N** – Ângulo de folga = 0°
3. **G** – Classe de tolerância
4. **N** – Características
5. **12** – Tamanho = 12.70 mm
6. **07** – Espessura da pastilha = 7.94 mm
7. **16** – Raio da ponta = 1.6 mm
8. **T02020** – Condição da aresta de corte ou características do controle de cavaco = Chanfro T 0,20 mm a 20°

CLASSES**1. Metal duro (WC/Co) sem revestimento – K313 (Insero 1)**

Composição: Substrato duro e pouco ligado. Granulação fina de WC/Co.

Aplicação: Boa relação dureza/tenacidade. Recomendada para ligas de titânio, ferros fundidos, aços inoxidáveis, metais não-ferrosos e ligas resistentes a altas temperaturas. Boa resistência ao desgaste de entalhe.

Classificação ISO: M10-20; **K05-20**; N10-20; **S10-20**.

2. Metal duro (WC/Co 6%) com revestimento (PVD TiAlN) – KC5510 (Insero 2)

Composição: Granulação fina de WC adicionado com 6% de Co e cobertura PVD TiAlN.

Aplicação: Boa combinação tenacidade/resistência à deformação. A cobertura TiAlN permite o aumento das velocidades de corte. Classe desenvolvida especificamente para usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas, com bom desempenho na usinagem de aços inoxidáveis também.

Classificação ISO: P10-20; M10-20; **K10-20**; N10-20; **S10-20**; H10.

3. Metal duro (WC/Co 10%) com revestimento (PVD TiAlN) – KC5525 (Insero 3)

Composição: Granulação fina de WC adicionados com 10% de Co e cobertura PVD TiAlN.

Aplicação: Boa combinação tenacidade/resistência à deformação, a maior porcentagem de Co melhora o desempenho nos cortes interrompidos. A cobertura TiAlN permite o aumento das velocidades de corte. Classe desenvolvida especificamente para usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas, com bom desempenho na usinagem de aços inoxidáveis também.

Classificação ISO: P20-30; M20-30; **K20-30**; N20-30; **S20-30**.

4. Cerâmica a base de Si₃N₄ com adição de Al₂O₃ (SiAlON) – KY1540 (Insero 4)

Composição: Cerâmica com base Si₃N₄.

Aplicação: Recomendada para usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas. Excelente resistência ao desgaste, boa tenacidade e resistência ao choque térmico. Maior resistência ao desgaste de entalhe do que cerâmicas reforçadas com Whisker.

Classificação ISO: **S10-20**

5. Cerâmica a base de Al_2O_3 com adição de TiC (Preta ou mista) – KY1615 (Inserto 5)

Composição: Cerâmica com base Alumina adicionada com TiC.

Aplicação: Boa relação resistência ao desgaste e tenacidade. Recomendada para usinagem de aços ligados, aços ferramenta e aços inoxidáveis com dureza até 60 HRC.

Classificação ISO: **K05-10**

6. Cerâmica a base de Al_2O_3 com adição de SiC (Whisker) – KY4300 (Inserto 6)

Composição: Cerâmica com base Alumina reforçada com adição de SiC.

Aplicação: Possui excelente tenacidade pela adição de SiC na forma de Whisker à matriz de Alumina. Recomendada para a usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas.

Classificação ISO: **S15-25**

7. Metal duro (WC/Co) com revestimento (CVD TiCN + Al_2O_3 + TiN) – KC9125 (Inserto 7)

Composição: Matriz em WC enriquecida com Co e cobertura CVD TiCN + Al_2O_3 + TiN.

Aplicação: Recomendado para torneamento pesado e semi-acabamento de aços e ferros fundidos.

Classificação ISO: P20-30; **K25-35**.

8. Metal duro (WC/Co) com revestimento (CVD TiCN + Al_2O_3) – KCP25 (Inserto 8)

Composição: Matriz em WC enriquecida com Co e cobertura CVD TiCN + Al_2O_3 .

Aplicação: Recomendado para torneamento de aços em geral e aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos.

Classificação ISO: **P20-30**; K25-35.

CONDIÇÕES DE CORTE RECOMENDADAS**Velocidade de corte (m/min) – (Catálogo 4010 P – A17 – A19)**

1. **Inserto 1 (K313)** = 15 | 60 (Condições iniciais = 40 m/min)
2. **Inserto 2 (KC5510)** = 30 | 150 (Condições iniciais = 70 m/min)
3. **Inserto 3 (KC5525)** = 30 | 75 (Condições iniciais = 40 m/min)
4. **Inserto 4 (KY1540)** = 140 | 320 (Condições iniciais = 215 m/min)
5. **Inserto 5 (KY1615)** = 50 | 140 (Condições iniciais = 100 m/min)
6. **Inserto 6 (KY4300)** = 105 | 290 (Condições iniciais = 200 m/min)
7. **Inserto 7 (KC9125)** = 70 | 180 (Condições iniciais = 110 m/min p/aços ligados)
8. **Inserto 8 (KCP25)** = 60 | 180 (Condições iniciais = 105 m/min p/aços ligados)

Avanço (mm/rev) para profundidade de corte de 2 mm (Catálogo 4010 P – A17 – A19)

1. **Inserto 1 (K313)** = 0,1 | 0,4
2. **Inserto 2 (KC5510)** = 0,1 | 0,4
3. **Inserto 3 (KC5525)** = 0,1 | 0,4
4. **Inserto 4 (KY1540)** = 0,1 | 0,4
5. **Inserto 5 (KY1615)** = 0,1 | 0,4
6. **Inserto 6 (KY4300)** = 0,1 | 0,4
7. **Inserto 7 (KC9125)** = 0,1 | 0,4
8. **Inserto 8 (KCP25)** = 0,1 | 0,4

ANEXO II

N	01_751_SiAlON x Preta_Normal x O2										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BN (mm)	10 √BB (mm)	11 √BC (mm)
1	-1	-1	-1	-1						0,40	
2	1	-1	-1	-1						0,40	
3	-1	1	-1	-1					1,00		
4	1	1	-1	-1							0,60
5	-1	-1	1	-1						0,40	
6	1	-1	1	-1						0,40	
7	-1	1	1	-1							0,60
8	1	1	1	-1						0,40	
13	-1	-1	-1	1							0,60
14	1	-1	-1	1							0,60
15	-1	1	-1	1					1,00		
16	1	1	-1	1						0,40	
17	-1	-1	1	1						0,40	
18	1	-1	1	1							0,60
19	-1	1	1	1					1,00		
20	1	1	1	1					1,00		

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{SiAlON} \\ 1 = \text{Preta} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	02_751_SiAlON x Preta_Normal x Inerte										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 VBN (mm)	10 /BB (mm)	11 /BC (mm)
1	-1	-1	-1	-1						0,40	
2	1	-1	-1	-1						0,40	
3	-1	1	-1	-1					1,00		
4	1	1	-1	-1							0,60
9	-1	-1	1	-1						0,40	
10	1	-1	1	-1						0,40	
11	-1	1	1	-1					1,00		
12	1	1	1	-1							0,60
13	-1	-1	-1	1							0,60
14	1	-1	-1	1							0,60
15	-1	1	-1	1					1,00		
16	1	1	-1	1						0,40	
21	-1	-1	1	1						0,40	
22	1	-1	1	1						0,40	
23	-1	1	1	1					1,00		
24	1	1	1	1					1,00		

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Inerte} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{SiAlON} \\ 1 = \text{Preta} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	03_751_SiAlON x Preta_Inerte x O2										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 /BN (mm)	10 /VB (mm)	11 /BC (mm)
9	-1	-1	-1	-1						0,40	
10	1	-1	-1	-1						0,40	
11	-1	1	-1	-1					1,00		
12	1	1	-1	-1							0,60
5	-1	-1	1	-1						0,40	
6	1	-1	1	-1						0,40	
7	-1	1	1	-1							0,60
8	1	1	1	-1						0,40	
21	-1	-1	-1	1						0,40	
22	1	-1	-1	1						0,40	
23	-1	1	-1	1					1,00		
24	1	1	-1	1					1,00		
17	-1	-1	1	1						0,40	
18	1	-1	1	1							0,60
19	-1	1	1	1					1,00		
20	1	1	1	1					1,00		

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$
GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$
AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Inerte} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$
MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{SiAlON} \\ 1 = \text{Preta} \end{cases}$
t = Tempo de vida em segundos

N	04_751_SiAlON x Whisker_Normal x O2										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 VBN (mm)	10 /BB (mm)	11 /BC (mm)
1	-1	-1	-1	-1						0,40	
2	1	-1	-1	-1						0,40	
3	-1	1	-1	-1					1,00		
4	1	1	-1	-1							0,60
5	-1	-1	1	-1						0,40	
6	1	-1	1	-1						0,40	
7	-1	1	1	-1							0,60
8	1	1	1	-1						0,40	
25	-1	-1	-1	1					1,00		
26	1	-1	-1	1							0,60
27	-1	1	-1	1					1,00		
28	1	1	-1	1					1,00		
29	-1	-1	1	1							0,60
30	1	-1	1	1							0,60
31	-1	1	1	1						0,40	
32	1	1	1	1					1,00		

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{SiAlON} \\ 1 = \text{Whisker} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	05_751_SiAlON x Whisker_Normal x Inerte										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 /BN (mm)	10 /BB (mm)	11 /BC (mm)
1	-1	-1	-1	-1						0,40	
2	1	-1	-1	-1						0,40	
3	-1	1	-1	-1					1,00		
4	1	1	-1	-1							0,60
9	-1	-1	1	-1						0,40	
10	1	-1	1	-1						0,40	
11	-1	1	1	-1					1,00		
12	1	1	1	-1							0,60
25	-1	-1	-1	1					1,00		
26	1	-1	-1	1							0,60
27	-1	1	-1	1					1,00		
28	1	1	-1	1					1,00		
33	-1	-1	1	1							0,60
34	1	-1	1	1							0,60
35	-1	1	1	1					1,00		
36	1	1	1	1							0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Inerte} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{SiAlON} \\ 1 = \text{Whisker} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	06_751_SiAlON x Whisker_Inerte x O2										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 VBN (mm)	10 /BB (mm)	11 /BC (mm)
9	-1	-1	-1	-1						0,40	
10	1	-1	-1	-1						0,40	
11	-1	1	-1	-1					1,00		
12	1	1	-1	-1							0,60
5	-1	-1	1	-1						0,40	
6	1	-1	1	-1						0,40	
7	-1	1	1	-1							0,60
8	1	1	1	-1						0,40	
33	-1	-1	-1	1							0,60
34	1	-1	-1	1							0,60
35	-1	1	-1	1					1,00		
36	1	1	-1	1							0,60
29	-1	-1	1	1							0,60
30	1	-1	1	1							0,60
31	-1	1	1	1						0,40	
32	1	1	1	1					1,00		

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Inerte} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{SiAlON} \\ 1 = \text{Whisker} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	07_751_Preta x Whisker_Normal x O2										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 /BN (mm)	10 /BB (mm)	11 /BC (mm)
13	-1	-1	-1	-1							0,60
14	1	-1	-1	-1							0,60
15	-1	1	-1	-1					1,00		
16	1	1	-1	-1						0,40	
17	-1	-1	1	-1						0,40	
18	1	-1	1	-1							0,60
19	-1	1	1	-1					1,00		
20	1	1	1	-1					1,00		
25	-1	-1	-1	1					1,00		
26	1	-1	-1	1							0,60
27	-1	1	-1	1					1,00		
28	1	1	-1	1					1,00		
29	-1	-1	1	1							0,60
30	1	-1	1	1							0,60
31	-1	1	1	1						0,40	
32	1	1	1	1					1,00		

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Preta} \\ 1 = \text{Whisker} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	08_751_Preta x Whisker_Normal x Inerte										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 VBN (mm)	10 /BB (mm)	11 /BC (mm)
13	-1	-1	-1	-1							0,60
14	1	-1	-1	-1							0,60
15	-1	1	-1	-1					1,00		
16	1	1	-1	-1						0,40	
21	-1	-1	1	-1						0,40	
22	1	-1	1	-1						0,40	
23	-1	1	1	-1					1,00		
24	1	1	1	-1					1,00		
25	-1	-1	-1	1					1,00		
26	1	-1	-1	1							0,60
27	-1	1	-1	1					1,00		
28	1	1	-1	1					1,00		
33	-1	-1	1	1							0,60
34	1	-1	1	1							0,60
35	-1	1	1	1					1,00		
36	1	1	1	1							0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$
GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$
AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Inerte} \end{cases}$
MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Preta} \\ 1 = \text{Whisker} \end{cases}$
t = Tempo de vida em segundos

N	09_751_Preta x Whisker_Inerte x O2										
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 VBN (mm)	10 /BB (mm)	11 /BC (mm)
21	-1	-1	-1	-1						0,40	
22	1	-1	-1	-1						0,40	
23	-1	1	-1	-1					1,00		
24	1	1	-1	-1					1,00		
17	-1	-1	1	-1						0,40	
18	1	-1	1	-1							0,60
19	-1	1	1	-1					1,00		
20	1	1	1	-1					1,00		
33	-1	-1	-1	1							0,60
34	1	-1	-1	1							0,60
35	-1	1	-1	1					1,00		
36	1	1	-1	1							0,60
29	-1	-1	1	1							0,60
30	1	-1	1	1							0,60
31	-1	1	1	1						0,40	
32	1	1	1	1					1,00		

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 150 \text{ m/min} \\ 1 = 300 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Inerte} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Preta} \\ 1 = \text{Whisker} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	01_751_MD_SR x MD(6%)_CR_Normal x O2									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
37	-1	-1	-1	-1					0,40	
38	1	-1	-1	-1					0,40	
39	-1	1	-1	-1					0,40	
40	1	1	-1	-1					0,40	
41	-1	-1	1	-1					0,40	
42	1	-1	1	-1					0,40	
43	-1	1	1	-1					0,40	
44	1	1	1	-1					0,40	
49	-1	-1	-1	1					0,40	
50	1	-1	-1	1					0,40	
51	-1	1	-1	1					0,40	
52	1	1	-1	1					0,40	
53	-1	-1	1	1						0,60
54	1	-1	1	1						0,60
55	-1	1	1	1					0,40	
56	1	1	1	1					0,40	

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 45 \text{ m/min} \\ 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Metal duro (WC/Co) sem revestimento} \\ 1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	02_751_MD_SR x MD(6%)_CR_Normal x Inerte									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
37	-1	-1	-1	-1					0,40	
38	1	-1	-1	-1					0,40	
39	-1	1	-1	-1					0,40	
40	1	1	-1	-1					0,40	
45	-1	-1	1	-1					0,40	
46	1	-1	1	-1					0,40	
47	-1	1	1	-1					0,40	
48	1	1	1	-1					0,40	
49	-1	-1	-1	1					0,40	
50	1	-1	-1	1					0,40	
51	-1	1	-1	1					0,40	
52	1	1	-1	1					0,40	
57	-1	-1	1	1					0,40	
58	1	-1	1	1					0,40	
59	-1	1	1	1					0,40	
60	1	1	1	1					0,40	

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 45 \text{ m/min} \\ 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Inerte} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Metal duro (WC/Co) sem revestimento} \\ 1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	03_751_MD_SR x MD(6%)_CR_Inerte x O2									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
45	-1	-1	-1	-1					0,40	
46	1	-1	-1	-1					0,40	
47	-1	1	-1	-1					0,40	
48	1	1	-1	-1					0,40	
41	-1	-1	1	-1					0,40	
42	1	-1	1	-1					0,40	
43	-1	1	1	-1					0,40	
44	1	1	1	-1					0,40	
57	-1	-1	-1	1					0,40	
58	1	-1	-1	1					0,40	
59	-1	1	-1	1					0,40	
60	1	1	-1	1					0,40	
53	-1	-1	1	1						0,60
54	1	-1	1	1						0,60
55	-1	1	1	1					0,40	
56	1	1	1	1					0,40	

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = 45 \text{ m/min} \\ \rightarrow 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = \chi_R = 45^\circ \\ \rightarrow 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Inerte} \\ \rightarrow 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Metal duro (WC/Co) sem revestimento} \\ \rightarrow 1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	04_751_MD_SR x MD(10%)_CR_Normal x O2									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
37	-1	-1	-1	-1					0,40	
38	1	-1	-1	-1					0,40	
39	-1	1	-1	-1					0,40	
40	1	1	-1	-1					0,40	
41	-1	-1	1	-1					0,40	
42	1	-1	1	-1					0,40	
43	-1	1	1	-1					0,40	
44	1	1	1	-1					0,40	
61	-1	-1	-1	1						0,60
62	1	-1	-1	1						0,60
63	-1	1	-1	1					0,40	
64	1	1	-1	1						0,60
65	-1	-1	1	1						0,60
66	1	-1	1	1						0,60
67	-1	1	1	1						0,60
68	1	1	1	1						0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 45 \text{ m/min} \\ 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Metal duro (WC/Co) sem revestimento} \\ 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	05_751_MD_SR x MD(10%)_CR_Normal x Inerte									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
37	-1	-1	-1	-1					0,40	
38	1	-1	-1	-1					0,40	
39	-1	1	-1	-1					0,40	
40	1	1	-1	-1					0,40	
45	-1	-1	1	-1					0,40	
46	1	-1	1	-1					0,40	
47	-1	1	1	-1					0,40	
48	1	1	1	-1					0,40	
61	-1	-1	-1	1						0,60
62	1	-1	-1	1						0,60
63	-1	1	-1	1					0,40	
64	1	1	-1	1						0,60
69	-1	-1	1	1						0,60
70	1	-1	1	1						0,60
71	-1	1	1	1					0,40	
72	1	1	1	1						0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = 45 \text{ m/min} \\ \rightarrow 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = \chi_R = 45^\circ \\ \rightarrow 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Normal} \\ \rightarrow 1 = \text{Inerte} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Metal duro (WC/Co) sem revestimento} \\ \rightarrow 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	06_751_MD_SR x MD(10%)_CR_Inerte x O2									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
45	-1	-1	-1	-1					0,40	
46	1	-1	-1	-1					0,40	
47	-1	1	-1	-1					0,40	
48	1	1	-1	-1					0,40	
41	-1	-1	1	-1					0,40	
42	1	-1	1	-1					0,40	
43	-1	1	1	-1					0,40	
44	1	1	1	-1					0,40	
69	-1	-1	-1	1						0,60
70	1	-1	-1	1						0,60
71	-1	1	-1	1					0,40	
72	1	1	-1	1						0,60
65	-1	-1	1	1						0,60
66	1	-1	1	1						0,60
67	-1	1	1	1						0,60
68	1	1	1	1						0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 45 \text{ m/min} \\ 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Inerte} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Metal duro (WC/Co) sem revestimento} \\ 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	07_751_MD(6%)_CR x MD(10%)_CR_Normal x O2									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
49	-1	-1	-1	-1					0,40	
50	1	-1	-1	-1					0,40	
51	-1	1	-1	-1					0,40	
52	1	1	-1	-1					0,40	
53	-1	-1	1	-1						0,60
54	1	-1	1	-1						0,60
55	-1	1	1	-1					0,40	
56	1	1	1	-1					0,40	
61	-1	-1	-1	1						0,60
62	1	-1	-1	1						0,60
63	-1	1	-1	1					0,40	
64	1	1	-1	1						0,60
65	-1	-1	1	1						0,60
66	1	-1	1	1						0,60
67	-1	1	1	1						0,60
68	1	1	1	1						0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 45 \text{ m/min} \\ 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%) com revestimento} \\ 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	08_751_MD(6%)_CR x MD(10%)_CR_Normal x Inerte									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (µm)	7 Rq (µm)	8 Rt (µm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
49	-1	-1	-1	-1					0,40	
50	1	-1	-1	-1					0,40	
51	-1	1	-1	-1					0,40	
52	1	1	-1	-1					0,40	
57	-1	-1	1	-1					0,40	
58	1	-1	1	-1					0,40	
59	-1	1	1	-1					0,40	
60	1	1	1	-1					0,40	
61	-1	-1	-1	1						0,60
62	1	-1	-1	1						0,60
63	-1	1	-1	1					0,40	
64	1	1	-1	1						0,60
69	-1	-1	1	1						0,60
70	1	-1	1	1						0,60
71	-1	1	1	1					0,40	
72	1	1	1	1						0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} -1 = 45 \text{ m/min} \\ 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} -1 = \chi_R = 45^\circ \\ 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} -1 = \text{Normal} \\ 1 = \text{Inerte} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} -1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%)} \text{ com revestimento} \\ 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%)} \text{ com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	09_751_MD(6%)_CR x MD(10%)_CR_Inerte x O2									
	1 Vc (m/min)	2 GC (°)	3 AE (%)	4 MI	5 t (s)	6 Ra (μm)	7 Rq (μm)	8 Rt (μm)	9 √BB (mm)	10 √BC (mm)
57	-1	-1	-1	-1					0,40	
58	1	-1	-1	-1					0,40	
59	-1	1	-1	-1					0,40	
60	1	1	-1	-1					0,40	
53	-1	-1	1	-1						0,60
54	1	-1	1	-1						0,60
55	-1	1	1	-1					0,40	
56	1	1	1	-1					0,40	
69	-1	-1	-1	1						0,60
70	1	-1	-1	1						0,60
71	-1	1	-1	1					0,40	
72	1	1	-1	1						0,60
65	-1	-1	1	1						0,60
66	1	-1	1	1						0,60
67	-1	1	1	1						0,60
68	1	1	1	1						0,60

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = 45 \text{ m/min} \\ \rightarrow 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = \chi_R = 45^\circ \\ \rightarrow 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

AE = Atmosfera envolvente $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Inerte} \\ \rightarrow 1 = \text{Rica em oxigênio} \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%) com revestimento} \\ \rightarrow 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	718_MD(6%)_CR x MD(10%)_CR_Normal									
	1 Vc	2 GC	3 MI	4 t	5 Ra	6 Rq	7 Rt	8 VBN	9 VBB	10 VBC
73	-1	-1	-1						0,40	
74	1	-1	-1						0,40	
75	-1	1	-1						0,40	
76	1	1	-1						0,40	
77	-1	-1	1						0,40	
78	1	-1	1						0,40	
79	-1	1	1						0,40	
80	1	1	1						0,40	

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = 45 \text{ m/min} \\ \rightarrow 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = \chi_R = 45^\circ \\ \rightarrow 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%)} \text{ com revestimento} \\ \rightarrow 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%)} \text{ com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	718_MD(6%)_CR x MD(10%)_CR_Normal									
	1 Vc	2 GC	3 MI	4 t	5 Ra	6 Rq	7 Rt	8 VBN	9 VBB	10 VBC
73	-1	-1	-1						0,40	
74	1	-1	-1						0,40	
75	-1	1	-1						0,40	
76	1	1	-1						0,40	
77	-1	-1	1						0,40	
78	1	-1	1						0,40	
79	-1	1	1						0,40	
80	1	1	1						0,40	

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = 45 \text{ m/min} \\ \rightarrow 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = \chi_R = 45^\circ \\ \rightarrow 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%) com revestimento} \\ \rightarrow 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos

N	718_MD(6%)_CR x MD(10%)_CR_Normal									
	1 Vc	2 GC	3 MI	4 t	5 Ra	6 Rq	7 Rt	8 VBN	9 VBB	10 VBC
73	-1	-1	-1						0,40	
74	1	-1	-1						0,40	
75	-1	1	-1						0,40	
76	1	1	-1						0,40	
77	-1	-1	1						0,40	
78	1	-1	1						0,40	
79	-1	1	1						0,40	
80	1	1	1						0,40	

LEGENDA

Vc = Velocidade de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = 45 \text{ m/min} \\ \rightarrow 1 = 60 \text{ m/min} \end{cases}$

GC = Geometria de corte $\begin{cases} \rightarrow -1 = \chi_R = 45^\circ \\ \rightarrow 1 = \chi_R = 85^\circ \end{cases}$

MI = Material do inserto $\begin{cases} \rightarrow -1 = \text{Metal duro (WC/Co 6\%) com revestimento} \\ \rightarrow 1 = \text{Metal duro (WC/Co 10\%) com revestimento} \end{cases}$

t = Tempo de vida em segundos