

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS

GABRIEL KREBS

UTILIZAÇÃO DE INSERTOS DE CERÂMICA NO TORNEAMENTO DE DESBASTE
DA LIGA DE NÍQUEL 625 DEPOSITADA EM FORMA DE REVESTIMENTO
METÁLICO

CURITIBA
2019

GABRIEL KREBS

UTILIZAÇÃO DE INSERTOS DE CERÂMICA NO TORNEAMENTO DE DESBASTE
DA LIGA DE NÍQUEL 625 DEPOSITADA EM FORMA DE REVESTIMENTO
METÁLICO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli

CURITIBA
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Krebs, Gabriel

Utilização de insertos de cerâmica no torneamento de desbaste da liga de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico / Gabriel Krebs.-- 2019.

1 arquivo de texto (154 f.) : PDF ; 4,6 MB

Disponível também via World Wide Web. Título extraído da tela de título (visualizado em 30 set 2019).

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2019.

Bibliografia: p. 148-153

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Ligas de níquel. 3. Torneamento. 4. Ferramentas - Desgastes. 5. Cerâmica. 6. Processos de fabricação. I. Polli, Milton Luiz, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba

Diretor Prof. Marcos Flávio de Oliveira Schiefler Filho
Coordenador Prof. Dr. Marco Antônio Luersen
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

UTILIZAÇÃO DE INSERTOS DE CERÂMICA NO TORNEAMENTO DE DESBASTE DA LIGA DE NÍQUEL 625 DEPOSITADA EM FORMA DE REVESTIMENTO METÁLICO

Por

Gabriel Krebs

Esta dissertação foi apresentada em 30 de Agosto de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Milton Luiz Polli
Prof.(a) Orientador(a)

Alisson Rocha Machado
Membro titular

Paulo André Beltrão
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso —

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por ser essencial em minha vida, autor do meu destino e socorro presente na hora da angústia, e à minha família pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à minha esposa e filhos pela compreensão nos momentos mais difíceis desta pesquisa, que souberam compreender a ausência e, mesmo assim, continuaram me incentivando para que eu chegasse até o final deste trabalho.

Ao professor Dr. Milton Luiz Polli, pelos esforços expendidos, orientação, paciência e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores avaliadores, Alisson Rocha Machado e Paulo Francisco Beltrão, pela imensa contribuição na avaliação deste trabalho, com participação construtiva para, em conjunto, contribuirmos à ciência brasileira.

À Aker Solutions do Brasil, na pessoa do Sr. Rinaldo Antonio Frazon, que acreditou desde o início no potencial dos resultados e proporcionou plenas condições para que este trabalho fosse executado.

Aos colegas, Adilson Valdecir Rodrigues Lamim, Samir Ribeiro dos Santos e Marcos Herrig, pela grande ajuda com a usinagem dos corpos de prova para execução das análises.

À equipe do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela dedicação e esforços na manutenção do programa de especialização, ao qual me proporcionou condições para chegar a este momento de coleta dos esforços empregados.

RESUMO

KREBS, Gabriel. **Utilização de insertos de cerâmica no torneamento de desbaste da liga de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

A utilização das ligas de níquel é imprescindível aos fabricantes de equipamentos submarinos para indústria de Óleo e Gás, que em virtude de características corrosivas, altas temperaturas, altas pressões e as combinações destes fatores existentes em um ambiente extremamente adverso, devem possuir características de alta resistência à corrosão e excelentes propriedades mecânicas. Uma das características das ligas à base de níquel é a baixa usinabilidade, que acarreta na utilização de baixas velocidades de corte, que por consequência, encarecem todo o processo. Além disso, os altos custos para aquisição deste material fazem com que alternativas sejam adotadas, como por exemplo, a aplicação de revestimento metálico da liga de níquel 625 em peças de aço carbono. Diferentes estudos têm sido executados sobre a usinagem de inconel 718, que possui ampla utilização. Entretanto, a literatura se mostra escassa para usinagem da liga de níquel 625 especialmente quando depositada em forma de revestimento metálico. Neste trabalho é analisado o uso de insertos de cerâmica ($Al_2O_3 + SiCw$ e $SiAlON$) para usinagem em desbaste da liga de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico sobre o aço AISI 4130, através do processo TIG automático, levando-se em consideração a vida útil da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Inicialmente foram realizados experimentos para se definir a classe do inserto e determinados os parâmetros de corte adequados. Posteriormente, foram analisadas a vida da ferramenta, características superficiais e subsuperficiais da peça usinada, como microdureza, espessura de camada encruada e acabamento superficial para diferentes condições de aplicação de meios lubri-refrigerantes e diâmetro de inserto. Os resultados obtidos mostram que as características superficiais do revestimento depositado interferem diretamente na definição da classe do inserto a ser utilizado, embora não seja capaz de alterar o mecanismo de desgaste ocorrido na aresta do inserto. A utilização de meios lubri-refrigerantes mostrou-se também essencial para que a usinagem possa ser executada em condições satisfatórias.

Palavras-chave: Ligas de níquel. Torneamento. Desbaste. Insertos de Cerâmica. Desgaste em Ferramentas, Meios lubrirefrigerantes.

ABSTRACT

KREBS, Gabriel. **Use of ceramic inserts for rough turning of nickel alloy 625 deposited in the form of metallic cladding.** 2019 Dissertation (Master in Engineering) - Post graduation in Mechanical and Material Engineering Program, Federal University of Technology - Paraná, Curitiba, 2019.

The use of nickel alloys is imperative to the industries that manufacture submarine equipment for the Oil and Gas industry, which due to corrosive characteristics, high temperatures, high pressures and the combinations of these factors existent in an extremely adverse environment, must be high resistant to corrosion and have excellent mechanical properties. One of the characteristics of nickel based alloys is the poor machinability, which results in the use of low cutting speeds, thus making the whole process more expensive. In addition, the high costs related to the acquisition of this material require the adoption of alternatives, such as the application of overlay using nickel alloy 625 over carbon steel parts. Different studies have been carried out in Inconel 718 alloy machining, which has been proved to have wide use. However, the literature about machining the nickel alloy 625, especially on the overlay form, is limited. In this work the use of ceramic inserts ($Al_2O_3 + SiC$ and SiAlON) for the rough turning of overlay of nickel alloy 625 on the AISI 4130 steel, by means of the automatic TIG process, considering the tool life and the quality of the machined surface is being analyzed. Initially experiments were carried out to define the class of the insert and the appropriate cutting parameters. Later, the tool life, surface and sub-surface characteristics of the machined surface were examined, such as microhardness, work-hardening and surface finish for different conditions of coolant and insert diameter. The results obtained show that the surface characteristics of the overlay have direct interference on the grade definition of the insert to be used, although it is not able to change the wear mechanism on the tool edge. The use of coolant means has also been proved essential for the machining to be performed under satisfactory conditions..

Keywords: Nickel Alloys. Turning. Roughing. Ceramic Inserts. Tool Wear, Coolant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Peças fabricadas em ligas de níquel para indústria de óleo e gás	20
Figura 2	– Acabamento superficial proveniente do processo TIG automático.....	25
Figura 3	– Operações de usinagem realizadas em um torno	29
Figura 4	– Variáveis em um processo de torneamento	31
Figura 5	– Superfícies e arestas de uma ferramenta monocortante em barra.....	34
Figura 6	– Cunha de corte da ferramenta de torneamento.....	34
Figura 7	– Planos do sistema de referência da ferramenta.....	35
Figura 8	– Ângulos de localização das arestas de corte no sistema de referência da ferramenta	36
Figura 9	– Ângulos de saída, de cunha e de folga da ferramenta, representados no plano de trabalho.....	36
Figura 10	– Classificação das Ferramentas Cerâmicas	41
Figura 11	– Aresta Postiça	46
Figura 12	– Desgaste de Entalhe	47
Figura 13	– Desgaste de Flanco	48
Figura 14	– Desgaste de Cratera	48
Figura 15	– Deformação Plástica: (a) Impressão de borda e (b) Depressão de borda.....	49
Figura 16	– Lascamento de Aresta	50
Figura 17	– Trincas perpendiculares à aresta de corte	50
Figura 18	– Quebra na aresta de corte.....	51
Figura 19	– Desgastes da ferramenta	53
Figura 20	– Diagrama de ferramenta de corte desgastada, mostrando os principais locais e tipos de desgaste que ocorrem	54
Figura 21	– Ações para redução do desgaste de entalhe	56
Figura 22	– Zonas de cisalhamento e ângulo de cisalhamento.....	57
Figura 23	– Vista do plano ortogonal de corte.....	58
Figura 24	– Tipos de cavacos formatos em operações de usinagem: (a) descontínuo, (b) contínuo, (c) contínuo com aresta postiça e (d) serrilhado.....	59
Figura 25	– Extremidade de cavacos em forma de barbatana do Inconel 718	60

Figura 26	– Fontes de calor na formação do cavaco	61
Figura 27	– Representação esquemática do perfil de solda de revestimento	68
Figura 28	– Determinação da largura, penetração e reforço	69
Figura 29	– As variações no tamanho do desgaste do flanco em diferentes interações dos parâmetros de corte	76
Figura 30	– Suporte de torneamento com bicos fixos direcionados à aresta de corte	79
Figura 31	– Rebarbas presentes em diferentes condições de refrigeração: (a) convencional; (b) alta pressão superfície de saída; (c) alta pressão superfície de folga e (d) alta pressão em duas saídas	84
Figura 32	– Rebarbas formadas durante usinagem de Inconel 718	85
Figura 33	– Representação esquemática dos mecanismos de desgaste em um inserto redondo	85
Figura 34	– Representação das etapas executadas para execução e análise de resultados	88
Figura 35	– Fronius FPA 9000 Utilizada para revestimento dos corpos de prova	90
Figura 36	– Detalhamento dimensional para fabricação do corpo de prova	91
Figura 37	– Impressão negativa dos cordões provenientes do revestimento do corpo de prova	92
Figura 38	– Projetor de perfil Mitutoyo Modelo PH-3500 e lente de aumento	92
Figura 39	– Sequência operacional para dimensionamento dos cordões do revestimento	93
Figura 40	– Corpo de prova com cordão de revestimento depositado na posição plana	94
Figura 41	– Corpo de prova para análise da morfologia e dimensionamento do cordão do revestimento	94
Figura 42	– Corpo de prova a ser submetido a ensaios laboratoriais	96
Figura 43	– Avaliação de macroestrutura	97
Figura 44	– Preparação do material para análise de metalográfica	98
Figura 45	– Avaliação metalográfica	98
Figura 46	– Amostra e pontos para inspeção de microdureza	99
Figura 47	– Torno horizontal Mazak, modelo Aland Turn 60N	101
Figura 48	– Fixação do corpo de prova com uso de contra ponta	101
Figura 49	– Suporte fixado na torre da máquina	104

Figura 50	– Detalhamento do perfil a ser usinado em testes iniciais.....	107
Figura 51	– Detalhamento para usinagem dos canais sob o diâmetro externo do corpo de prova	110
Figura 52	– Usinagem dos Corpos de Prova para ensaios laboratoriais.....	112
Figura 53	– Pontos para medição de rugosidade nos corpos de prova	113
Figura 54	– Pontos para medição de microdureza nos corpos de prova.....	114
Figura 55	– Esquema de preparação e medição do perfil de dureza	115
Figura 56	– Falha catastrófica nos insertos $Al_2O_3 + SiC_w$ e $Al_2O_3 + ZrO_2$	117
Figura 57	– Desgastes nas arestas dos insertos SiAlON.....	120
Figura 58	– Rebarbas formadas nos perfis usinados	122
Figura 59	– Imagens dos cavacos provenientes da usinagem da Etapa 1.....	123
Figura 60	– Imagem do desgaste de entalhe com os principais elementos aderidos (a) amostra 12 e (b) amostra 14	126
Figura 61	– Desgaste ocorrido na aresta de corte dos insertos	129
Figura 62	– Visualização da camada encruada em cada uma das amostras – aumento 200X	136
Figura 63	– Imagens dos cavacos provenientes da usinagem da Etapa 2.....	144

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição dos elementos da liga de níquel 625 em função da distância da zona de fusão da solda	22
Gráfico 2 – Representação esquemática das propriedades de materiais de ferramentas de corte	40
Gráfico 3 – Mecanismos de danos na ferramenta e temperatura de corte.....	44
Gráfico 4 – Vida de ferramenta em termos de volume de cavaco removido para as diferentes condições de refrigeração.....	63
Gráfico 5 – Ligas de níquel agrupadas de acordo com propriedades mecânicas crescentes e resultante aumento da dificuldade de usinagem.....	66
Gráfico 6 – Ligas de níquel agrupadas de acordo com propriedades mecânicas crescentes e resultante aumento da dificuldade de usinagem.....	70
Gráfico 7 – Tempo de vida da ferramenta de metal duro revestido em função do limite de resistência à tração em 350 °C	72
Gráfico 8 – Tempo efetivo de corte da ferramenta de metal duro revestido em função do teor de níquel para desgaste de flanco (VB_B) igual a 0,3 mm.....	72
Gráfico 9 – Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro revestido em função do tempo.....	73
Gráfico 10 – Comportamento do desgaste de flanco ao longo do tempo para diferentes estratégias de usinagem.....	74
Gráfico 11 – Comportamento do desgaste de flanco ao longo do tempo para diferentes condições de refrigeração	75
Gráfico 12 – Mapeamento topográfico do cordão do revestimento	95
Gráfico 13 – Resultado obtido no ensaio de microdureza Vickers	100
Gráfico 14 – Desgaste de entalhe em função da velocidade de corte e avanço.....	121
Gráfico 15 – Desgaste de flanco em função da velocidade de corte e avanço	122
Gráfico 16 – Evolução do Desgaste médio de Flanco (VB_B) nas diferentes configurações de teste	130
Gráfico 17 – Evolução do Desgaste de entalhe (VB_N) nas diferentes configurações de teste	131
Gráfico 18 – Evolução do Acabamento superficial (R_a) em função do desgaste de flanco médio (VB_B)	134
Gráfico 19 – Valores de microdureza após usinagem das amostras finais	139
Gráfico 20 – Valores de microdureza abaixo da superfície após usinagem das amostras finais	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Causas e ações para minimização de avarias e desgaste em ferramentas de corte	51
----------	---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química nominal da liga de níquel 625 (%).....	23
Tabela 2 – Ligas de Níquel agrupadas de acordo com as características de usinagem.....	65
Tabela 3 – Composição Química nominal do ABNT 4130 80K usado no corpo de prova	89
Tabela 4 – Propriedades mecânicas nominais do AISI 4130 80K usado no corpo de prova	89
Tabela 5 – Dados técnicos do equipamento utilizado para revestimento.....	90
Tabela 6 – Resultado obtido na análise de composição química.....	97
Tabela 7 – Detalhamento do suporte utilizado para fixação do inserto de cerâmica.....	102
Tabela 8 – Características principais dos insertos utilizados nos pré testes.....	103
Tabela 9 – Características principais dos insertos utilizados nos pré testes.....	103
Tabela 10 – Parâmetros para usinagem da etapa 1 de testes	105
Tabela 11 – Parâmetros para usinagem da etapa 2 de testes	109
Tabela 12 – Dimensões para corte dos corpos de prova	112
Tabela 13 – Análise por EDS no desgaste de entalhe das amostras.....	125
Tabela 14 – Material aderido no desgaste de entalhe.....	132
Tabela 15 – Valores obtidos em medição de micro dureza de topo (mHV) em cada amostra.....	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ap	Profundidade de corte
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
CFC	Cúbica de face centrada
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
D	Diâmetro
EDS	<i>Energy Dispersive x-ray Spectrometer</i>
f	Avanço
F _c	Força de corte
F _f	Força de avanço
HRA	Dureza Rockwell "A"
HRC	Dureza Rockwell "B"
HSS	Aço rápido
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K _B	Largura da cratera
K _M	Distância do centro da cratera à aresta de corte
K _T	Profundidade da cratera
l _f	Percurso de corte
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
N	Rotação
Nb	Nióbio (elemento)
NBR	Norma Brasileira
ODS	Dispersão de óxidos
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
rpm	Rotações por minuto

LETRAS GREGAS

α	Alfa – Ângulo de folga da ferramenta
β	Beta – Ângulo de cunha da ferramenta
γ	Gama – Ângulo de saída da ferramenta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OPORTUNIDADE DE PESQUISA	25
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	26
1.2.1	Objetivo Geral	26
1.2.2	Objetivos Específicos	26
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	PROCESSOS DE USINAGEM	28
2.2	PROCESSO DE TORNEAMENTO	29
2.2.1	Usinabilidade	31
2.3	FERRAMENTAS PARA TORNEAMENTO.....	33
2.3.1	Insertos de Cerâmica	37
2.3.2	Desgastes e Avarias nas Ferramentas de Corte	42
2.4	MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO.....	56
2.5	MEIOS LUBRIFRIGERANTES.....	61
2.6	SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL	64
2.7	A LIGA DE NÍQUEL 625 EM FORMA DE REVESTIMENTO METÁLICO.....	68
2.8	USINAGEM DAS SUPERLIGAS	70
2.9	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	86
3	MATERIAIS E MÉTODOS	88
3.1	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA	89
3.1.1	Caracterização do Material	95
3.1.2	Equipamentos para Usinagem	101
3.1.3	Ferramentas usadas para Usinagem	102
3.2	ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS INICIAIS E CLASSE DE INSERTO	104
3.3	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE	104
3.3.1	Usinagem para definições de classe de inserto e velocidade de corte	106
3.4	ETAPA 2 – ENSAIOS PARA ANÁLISES DOS INSERTOS E IMPACTO SOBRE A SUPERFÍCIE USINADA.....	107
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	116
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES RELATIVOS À ETAPA 1	116
4.1.1	Definição da classe do inserto	116
4.1.2	Desgaste nas arestas de Corte	119
4.1.3	Cavaco gerado durante o processo de corte	123

4.1.4	Material aderido nos insertos	124
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES RELATIVOS À ETAPA 2	127
4.2.1	Desgaste da Ferramenta	127
4.2.2	Acabamento Superficial	133
4.2.3	Formação de camada encruada e Dureza Superficial	135
4.2.4	Formas do Cavaco	142
5	CONCLUSÕES	146
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	147
	REFERÊNCIAS	148
	ANEXO A	154

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das ligas de níquel tem sido alavancado em decorrência dos constantes avanços das técnicas metalúrgicas e das tecnologias de produção (SORELL, 1997). Tais ligas são consideradas como uma das mais importantes classes de materiais para a engenharia, decorrente de sua utilização em uma grande variedade de produtos e aplicações (ASM METALS HANDBOOK, 2004a). A quantidade mínima de níquel nessas ligas normalmente é de 50%, porém, existem diversas ligas classificadas como níquel mesmo contendo menos de 35% desse material (SARMIENTO et al., 2017).

A necessidade de aplicação de ligas especiais em indústrias de diferentes segmentos, como aeroespacial e petroquímica, tem se mostrado cada vez maior para que seus produtos sejam capazes de cumprir todos os requisitos de aplicação, como maior resistência à corrosão, resistência às grandes solicitações mecânicas e a capacidade de trabalhar sob altas temperaturas.

Desde o início do desenvolvimento das chamadas superligas, ainda na década de 1930, nos Estados Unidos, diferentes ligas como Cromo, materiais cerâmicos e materiais refratários têm sido largamente estudados como alternativas. Entretanto, as características das ligas de Níquel fazem com que estas desempenhem um papel extremamente importante no atendimento à combinação de solicitações, como por exemplo, sua capacidade de alta resistência mecânica quando submetidas a altas temperaturas (DONACHIE e DONACHIE, 2002; SARMIENTO et al., 2017; ASM SPECIALTY HANDBOOK, 2004a). A figura 1 mostra a imagem de peças fabricadas em ligas de níquel para indústria de Óleo e Gás, como válvula esfera e corpos de válvulas gaveta.

Figura 1 – Peças fabricadas em ligas de níquel para indústria de óleo e gás



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

Jang et al. (1996), Korkut (2004) e Tekiner e Yesilyurt (2004) descrevem que as superligas a base de níquel são caracterizadas como materiais que possuem alta resistência mecânica quando submetida a elevadas temperaturas, alta abrasividade devido aos componentes químicos que constituem essa liga, alta ductilidade e encruamento.

Com base nessas necessidades de aplicação, Thakur e Gangopadhyay (2016) ponderam o desafio durante manufatura de componentes fazendo uso dessas ligas, decorrente da alta resistência à usinagem sob altas temperaturas e ainda, à presença de carbonetos nessas ligas, características estas que obrigam as indústrias a avaliar de forma diferente e bastante criteriosa as falhas e desgastes ocorridos nas ferramentas utilizadas nas diferentes operações de fabricação.

Perante tais necessidades de otimização e desenvolvimento de novos processos para usinagem de superligas, Choudhury e El-Baradie (1998) já expunham que o desempenho das ferramentas utilizadas para usinagem desses materiais era afetado por alta dureza, resistência ao desgaste, inércia química e resistência à fratura.

Para Ezugwu e Bonney (2004), as ligas de níquel são materiais difíceis de usinar quando comparadas a aços com as mesmas propriedades à temperatura ambiente, devido ao fato de que estas mantêm alta resistência mecânica em elevadas temperaturas. Entretanto, a usinagem de ligas de níquel e base de níquel pode ser alcançada, desde que os princípios fundamentais que afetam sua

usinabilidade sejam entendidos e levados em consideração (NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992).

O fato de as superligas serem classificadas como tendo baixa usinabilidade não é surpreendente; isso devido ao fato de que as mesmas características que as tornam bons materiais quando submetidos a altas temperaturas, são os mesmos responsáveis pelo seu mau comportamento quando submetidas a um processo de usinagem (DONACHIE e DONACHIE, 2002).

Silva Filho (2007) e Silva et al. (2012) relatam em seus estudos que, em decorrência dos altos custos para fabricação de equipamentos submarinos, torna-se inviável a fabricação de peças e componentes inteiramente nestes materiais. Assim, a utilização dessas ligas por meio de revestimento metálico se torna a forma mais viável financeiramente, sem deixar de atender todos os requisitos técnicos especificados para os produtos, tendo em vista que nem todas as superfícies do equipamento utilizado por tais indústrias precisam ter as características das ligas de níquel.

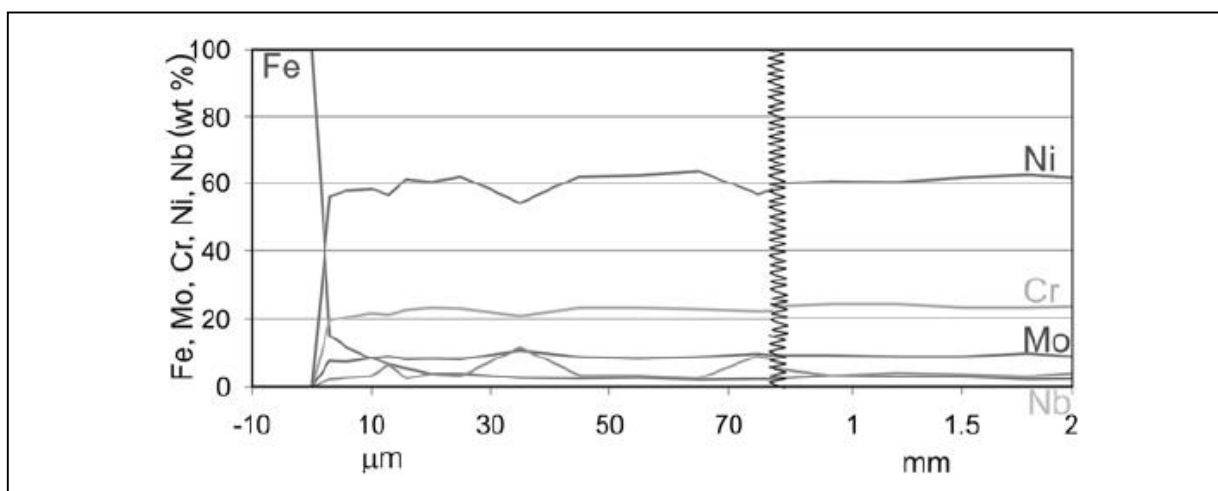
Brozek (2005) cita que a superfície proveniente do processo de revestimento, quando comparados à mesma liga fornecida em produtos semiacabados (barras, fios, forjados), possuem algumas propriedades diferentes, que seguem a princípios da tecnologia de revestimento. Tais características são:

- a) maior incerteza na superfície revestida – Imperfeições provenientes do processo de revestimento geram mudanças na zona do corte causando flutuações ou até mesmo corte interrompido, que exige mais da ferramenta a ser utilizada;
- b) a composição química apresenta diferenças quando comparadas à composição química do arame utilizado no processo de revestimento devida a perda pela queima e pela mistura ocorrida durante este processo;
- c) as propriedades do revestimento são sensíveis às condições de resfriamento da superfície – podem afetar as propriedades mecânicas propriedades e por isso há dispersão significativa na sua gama de valores.

A utilização de superligas como material de revestimento tem sido comumente depositada através do processo de soldagem TIG (GTAW) por apresentar boa qualidade de soldagem (SILVA FILHO, 2007). Este revestimento pode ainda ser executado por eletrodos revestidos, MIG/MAG, arame tubular e eletroescória (SANDES et al., 2016). Os consumíveis utilizados para revestimento da liga de níquel 625 são classificados pela *American Welding Society* como ENiCrMo-3 e ERNiCrMo-3. Eletrodos são usados para processo de soldagem a arco elétrico (SMAW), enquanto o arame pode ser usado para soldagem por arco elétrico com gás de proteção (GMAW) e solda por arco submerso (SAW) (SHOEMAKER, 2005).

O gráfico 1 mostra as distribuições dos elementos sobre a seção transversal do material base revestido com inconel 625, através do processo TIG em função da distância da zona de fusão. Independentemente da técnica utilizada para soldagem, as superposições consistiram nas seguintes zonas microestruturais: zona de fusão, zona parcialmente mista, zona parcialmente fundida e zona afetada pelo calor (ROZMUS-GÓRNIKOWSKA et al., 2014).

Gráfico 1 – Distribuição dos elementos da liga de níquel 625 em função da distância da zona de fusão da solda



Fonte: ROZMUS-GÓRNIKOWSKA et al. (2014).

A tabela 1 mostra a composição química típica da liga de níquel 625 fornecida comercialmente (SPECIAL METALS, 2013). Conforme os valores

expressos na tabela, comparando-se com os valores mostrados no gráfico 1, após o processo de soldagem o volume dos principais elementos não é comprometida.

Tabela 1 – Composição química nominal da liga de níquel 625 (%)

Níquel	58 min.
Cromo	20 - 23
Ferro	5,0 máx
Molibdênio	8,0 a 10,0
Nióbio	3,15 a 4,15
Carbono	0,10 máx
Manganês	0,50 máx
Silício	0,50 máx
Fósforo	0,015 máx
Enxofre	0,015 máx
Alumínio	0,4 máx
Titânio	0,4 máx
Cobalto	1,0 máx

Fonte: Adaptado de SPECIAL METALS (2013).

Nas superligas à base de níquel, a matriz (fase γ) é uma solução sólida de elementos de liga no níquel e sua resistência mecânica provém do endurecimento por precipitação de carbonetos e de fases intermetálicas γ na matriz. Dependendo do tipo e da morfologia, os carbonetos estabilizam a estrutura durante a deformação em temperaturas elevadas pela formação de carbonetos em contorno de grão, melhorando as propriedades à fluência. As principais variáveis microestruturais dessas ligas são a quantidade de precipitados e sua morfologia, o tamanho e a forma do grão e a distribuição de carbonetos (DONACHIE e DONACHIE, 2002).

O carboneto contido nas superligas a base de níquel causam desgaste abrasivo e a baixa condutividade térmica gera elevadas temperaturas na ponta da ferramenta. Essas ligas apresentam ainda alta afinidade química com muitos materiais utilizados para ferramentas de corte, o que provoca desgaste por difusão e adesão, além de gerar danos prematuros nas arestas de corte das ferramentas (SETTINERI et al., 2008).

As ligas de níquel são consideradas de difícil usinagem devido aos fatores que a caracterizam serem contrários às condições apontadas como essenciais para uma boa usinabilidade. Em geral, para obtenção de vidas razoáveis das ferramentas de metal duro, é necessária a utilização de baixas velocidades de corte, gerando assim, tempos de processos mais elevados.

Contraopondo essa necessidade de utilização de baixas velocidades de corte, Choudhury e El-Baradie (1998) descrevem que, com a introdução dos materiais cerâmicos para usinagem de superligas, é possível aumentar a velocidade de corte da ordem de cinco até dez vezes mais, quando comparadas aos processos tradicionais de insertos de metal duro.

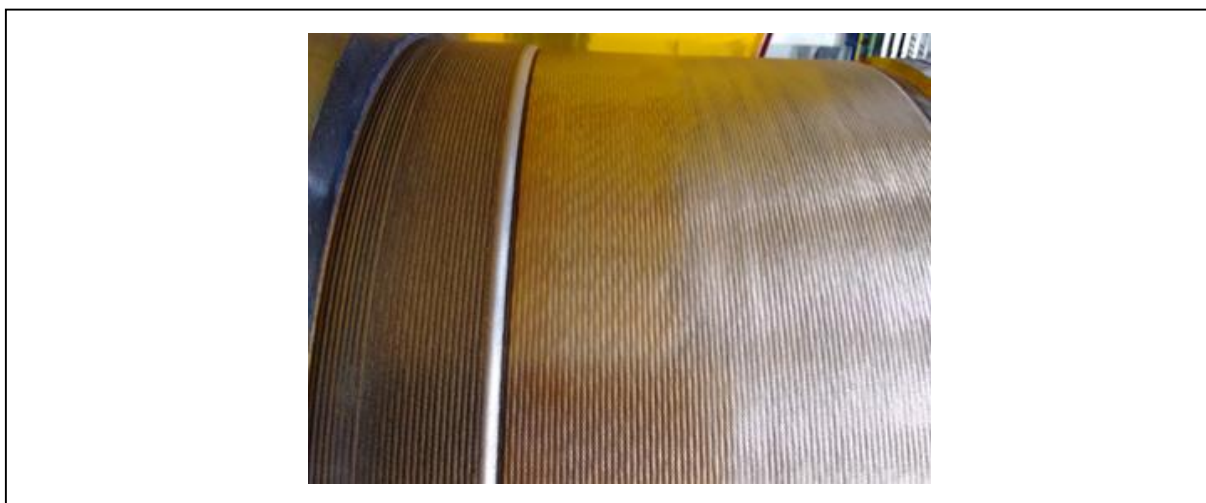
Uma abordagem feita por Richards e Aspinwall (1989) restringia a aplicação dos insertos de cerâmica para as operações intermediárias dos processos de fabricação justamente pelo fato de risco prematuro de falha de ferramenta e, por consequência, dos componentes. Essa falha prematura, segundo os autores, é decorrente das características do próprio material usinado, na qual a combinação das altas temperaturas, elevada força de corte e cavacos abrasivos transformam essa operação em um grande desafio.

Sob a relevância de pesquisas de todos os aspectos supracitados, Thakur e Gangopadhyay (2016) reforçam a importância da correta combinação de parâmetros de corte, equipamento e material da ferramenta para que a integridade da superfície dessas superligas à base de níquel seja melhorada.

A fragilidade dos insertos de cerâmica, quando submetidos a choques mecânicos, é um dos grandes desafios a ser superado durante planejamento do processo de usinagem (SANDVIK, 2010; GROOVER, 2012; HOSSEINI e KIISHAWY, 2014). Este é um fator de extrema relevância a ser observado, tendo em vista o acabamento superficial proveniente do processo de revestimento citado nos estudos de Silva Filho (2007).

A figura 2 mostra o acabamento superficial proveniente do revestimento pelo processo TIG automático.

Figura 2 – Acabamento superficial proveniente do processo TIG automático



Fonte: O autor (2019).

1.1 OPORTUNIDADE DE PESQUISA

Mesmo com o vasto volume de estudos abordando as aplicações das superligas, assim como inúmeras abordagens retratando as dificuldades encontradas perante a baixa usinabilidade dessas ligas, poucos são os estudos disponíveis que visam proporcionar a esta operação uma condição mais viável economicamente e otimizada da maioria dos principais parâmetros, incluindo a escolha de materiais e geometrias de ferramentas, dentre outras que busquem maior desempenho e diferencial competitivo.

Muitos desses estudos enfocam a liga 718. Os processos de usinagem utilizados fazem uso principalmente de ferramentas de metal duro, na qual os tipos de desgaste têm sido vastamente analisados, além de características como forças de corte e acabamento superficial. Entretanto, a usinagem com esse tipo de inserto é bastante onerosa financeiramente, tendo em vista a obrigatoriedade de utilização de baixas velocidades de corte e de avanço.

As análises que enfocam o uso de insertos de cerâmica possuem grande ênfase ao uso de insertos $Al_2O_3 + SiC_w$, em que os resultados, muitas vezes, se mostram divergentes com um processo bastante sensível a fatores, como por exemplo, pressão e tipo de meios lubrificantes utilizados.

Entretanto, ainda é bastante restrita a análise das condições superficiais da região usinada, sugerida nesta pesquisa pela usinagem sob cordões de revestimento, assim como a inserção de variáveis já exaustivamente estudados, como utilização de revestimento em insertos para redução de desgaste, meios lubrificantes com alta pressão para auxiliar na quebra do cavaco e o ângulo de posição da aresta de corte (EZUGWU 2014, MAGRI 2015).

Tendo em vista que essa é uma característica do processo de produção de equipamentos da indústria de óleo e gás (SILVA FILHO, 2007) e que ainda apresenta alto potencial de exploração, a validação de um processo com maiores velocidades de produção pode representar um grande diferencial competitivo e capaz de gerar novas discussões à academia, em busca de características construtivas de ferramentas que deem maior enfoque às superligas em suas diferentes aplicações e características.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A partir da proposição do problema de pesquisa, foram definidos os objetivos do trabalho agrupados em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste em analisar a viabilidade do uso de insertos de cerâmica para usinagem em desbaste da liga de níquel 625, depositada em forma de revestimento metálico através do processo TIG automático, levando em consideração a vida da ferramenta e a qualidade da superfície usinada.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo maior da pesquisa, os objetivos específicos formulados em torno do problema de pesquisa são:

- a) Identificar parâmetros que viabilizem a utilização de insertos de cerâmica para torneamento em desbaste da liga de níquel 625

depositada em forma de revestimento metálico.

- b) Identificar o tipo e mecanismo de desgaste predominante nos insertos de cerâmica, quando submetidos às condições de usinagem testadas nesta pesquisa.
- c) Analisar a influência das variações na lubrificação, ângulo de posição e classe de ferramenta utilizada durante processo de usinagem sobre o inserto.
- d) Identificar possíveis impactos sob a nova superfície gerada, provenientes do processo de usinagem executado com insertos de cerâmica na liga de níquel 625, depositada através do processo de revestimento metálico.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em seis capítulos. Uma introdução sobre o assunto proposto é apresentada no primeiro capítulo, o segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica e uma análise do estado da arte. O terceiro detalha o modelo experimental utilizado para atingimento dos objetivos específicos, sendo este dividido em duas etapas, na qual a primeira busca a identificação da classe de inserto a ser utilizada (Al_2O_3 reforçada com whisker ou SiAlON), definição dos parâmetros para viabilizar esta execução e a segunda etapa busca identificar a influência destes parâmetros previamente identificados nas características superficiais do material usinado. O quarto capítulo apresenta os resultados, seguido de discussões e conclusões referentes aos experimentos realizados. Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas como base à execução da presente pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contempla uma descrição conceitual sobre os processos de usinagem, com foco específico na operação de torneamento. Em seguida, são abordados alguns conceitos sobre a mecânica do processo e ferramentas de corte. O intuito desta abordagem é o alinhamento dos conceitos já exaustivamente estudados sobre esses tópicos, para que seja criada uma base conceitual no desenvolvimento de uma metodologia a ser aplicada de forma relevante ao estudo científico.

Na sequência, é abordada brevemente a liga de níquel a ser usinada e suas aplicações e condições de usinabilidade. Nesses tópicos, o intuito principal é posicionar tal liga nos processos de usinagem, de forma que seja possível o entendimento de suas características e comportamentos quando submetida a um processo de torneamento.

2.1 PROCESSOS DE USINAGEM

A importância das operações de usinagem pode ser avaliada considerando os custos envolvidos para que esta seja executada, como custos de ferramentas, custo de mão de obra e custo de investimento financeiro. Além disso, partindo-se do princípio de que são diversas as aplicações desse tipo de processo nos produtos consumidos em diferentes demandas pela sociedade, diversas são as razões para que sejam desenvolvidas abordagens racionais para execução dos processos (SHAW, 2005).

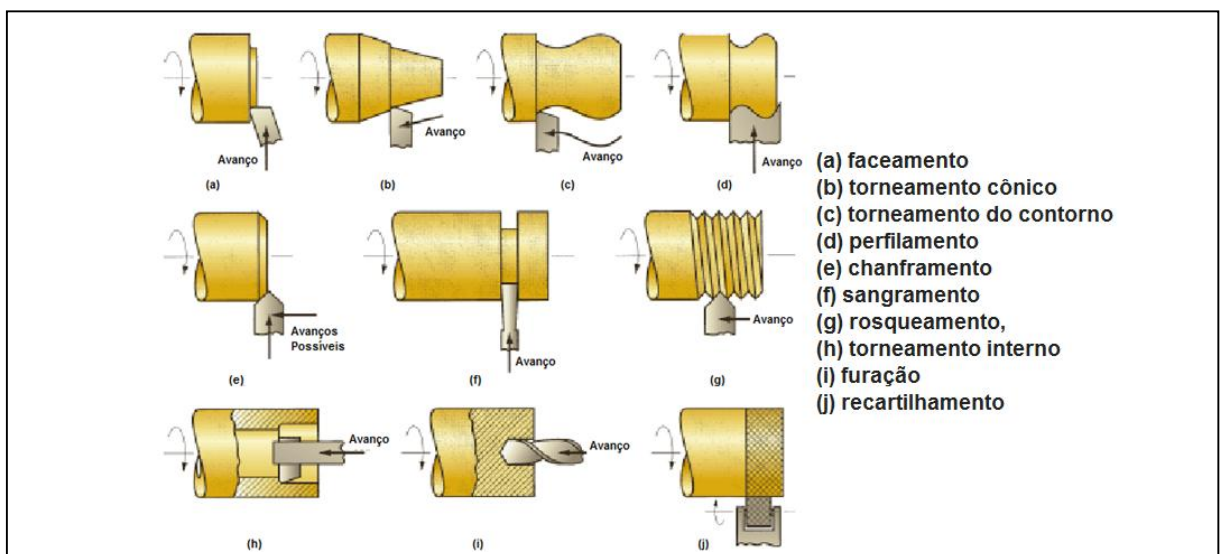
A ferramenta de corte utilizada nesses processos se move em direção à peça de trabalho, de modo que uma camada de metal seja removida sob a forma de cavacos. Os trabalhos de usinagem são principalmente de dois tipos, nomeadamente cilíndricos e planos ou prismáticos. Os trabalhos cilíndricos geralmente são executados em operações de torneamento, fresamento plano, furação e retificação cilíndrica, enquanto os trabalhos prismáticos são usinados usando plainas, fresamento, furação cilíndrica e retificação plana. Na operação de corte de metal, a posição da aresta de corte da ferramenta de corte é importante

com base na qual a operação de corte é classificada como corte ortogonal e corte oblíquo. (SINGH, 2006).

2.2 PROCESSO DE TORNEAMENTO

O torneamento é um processo de usinagem na qual uma ferramenta de ponto único remove o material da superfície de uma peça que se encontra girando em torno de um eixo. A ferramenta se movimenta no sentido longitudinal em direção paralela ao eixo de rotação para gerar uma geometria cilíndrica (GROOVER, 2012). A figura 3 ilustra alguns exemplos de geometrias formadas através do processo de torneamento. Esse processo, além de ser considerada uma operação básica, é a operação mais utilizada nos trabalhos experimentais de corte de metais (TRENT, 2000).

Figura 3 – Operações de usinagem realizadas em um torno



Fonte: Adaptado de GROOVER (2012).

As velocidades que compreendem o processo de torneamento devem ser distinguidas às Velocidades de Avanço, Velocidade de Corte e Velocidade efetiva de Corte (FERRARESI, 1977).

A Velocidade de corte (V_c) é a velocidade na qual a superfície não cortada do trabalho passa à borda de corte da ferramenta, normalmente expressa em

unidades de m/min. O avanço (f) é a distância movida pela ferramenta em uma direção axial em cada revolução do trabalho e sua unidade é normalmente expressa em mm/min. Já a profundidade de corte (a_p) é a espessura do material removido, medida na direção radial. O produto desses três resulta na taxa de remoção de metal, um parâmetro frequentemente usado na medição da eficiência de uma operação de corte.

A velocidade de corte e o avanço são os dois parâmetros mais importantes que podem ser ajustados pelo operador para obter condições de corte ótimas. A profundidade de corte geralmente é fixada pelo tamanho inicial da peça e pela dimensão especificada do produto (TRENT, 2000; FERRARESI, 1977).

A figura 4 ilustra essas variáveis durante um processo de torneamento. As equações utilizadas para cálculos das velocidades citadas como principais e as resultantes da interação entre elas seguem a seguir:

Taxa de Remoção de Material

$$V \times f \times a_p \quad [\text{cm}^3/\text{min}]$$

(1)

Velocidade de Corte

$$V_C = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

(2)

Onde:

D é o diâmetro do corpo antes do perfil a ser usinado [mm]

N é a rotação da peça [rotações por minuto]

Velocidade de Avanço

$$vf = f \times N \quad [\text{mm/min}]$$

(3)

Onde:

f é o avanço da ferramenta no sentido de corte [mm/revolução]

N é a rotação da peça [rotações por minuto]

Tempo de Corte

$$t_c = \frac{\pi \times D \times l_f}{1000 \times f \times V_c} \quad [\text{min}]$$

(4)

Onde:

t_c é o tempo de corte [minutos]

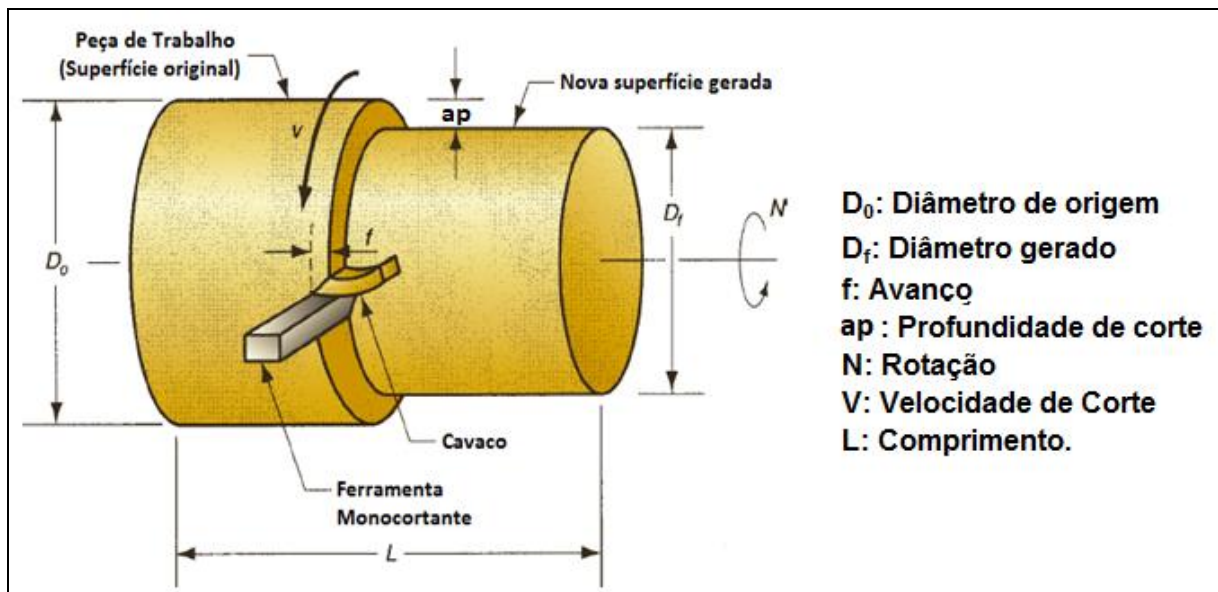
l_f é o percurso de corte [mm]

D é o diâmetro do corpo antes do perfil a ser usinado [mm]

f é o avanço da ferramenta no sentido de corte [mm/revolução]

V_c é a velocidade de corte recomendada para o material a ser usinado

Figura 4 – Variáveis em um processo de torneamento



Fonte: Adaptado de GROOVER (2012).

2.2.1 Usinabilidade

O termo usinabilidade é descrito como o conjunto de propriedades e características do material de trabalho que influenciam de maneira extremamente

significativa no resultado da operação de usinagem. O nível de facilidade com que um material pode ser usinado (usando condições adequadas de ferramentas e corte) caracteriza a usinabilidade de um material (GROOVER, 2012; CHILDS et al., 2005; SHAW, 2005).

O índice de usinabilidade é citado como uma grandeza tecnológica comparativa. Tal comparação leva em conta um conjunto de propriedades evidenciadas durante usinagem de um determinado material em relação a outro tomado como padrão (DINIZ et al., 2014; FERRARESI, 1977).

Os principais critérios para avaliar a usinabilidade de um material são:

- 1) Vida útil da ferramenta.
- 2) Acabamento superficial.
- 3) Potência necessária.
- 4) Facilidade para remoção de cavacos.
- 5) Temperatura do corte.
- 6) Produtividade

A definição do nível de usinabilidade não depende apenas do material analisado, mas também deve ser analisado o tipo de operação de usinagem, ferramentas e condições de corte (GROOVER, 2012). Assim mesmo, essa definição não deve ser tratada de forma simples, pois enquanto um material é capaz de proporcionar uma vida útil mais longa da ferramenta, outro pode proporcionar um melhor acabamento superficial, corroborando assim com FERRARESI (1977), que cita a usinabilidade como não sendo uma grandeza específica de um material, tal qual como suas propriedades mecânicas, mas sim uma propriedade resultante da combinação de fatores como: ferramenta, peça usinada e meios lubrificantes.

Assim, os possíveis parâmetros para avaliação do desempenho no teste de usinabilidade são:

- 1) Vida útil da ferramenta.
- 2) Desgaste da ferramenta.
- 3) Força de corte.
- 4) Energia na operação.
- 5) Temperatura de corte.
- 6) Taxa de remoção de material em condições padrão de teste.

7) Qualidade da peça usinada.

2.3 FERRAMENTAS PARA TORNEAMENTO

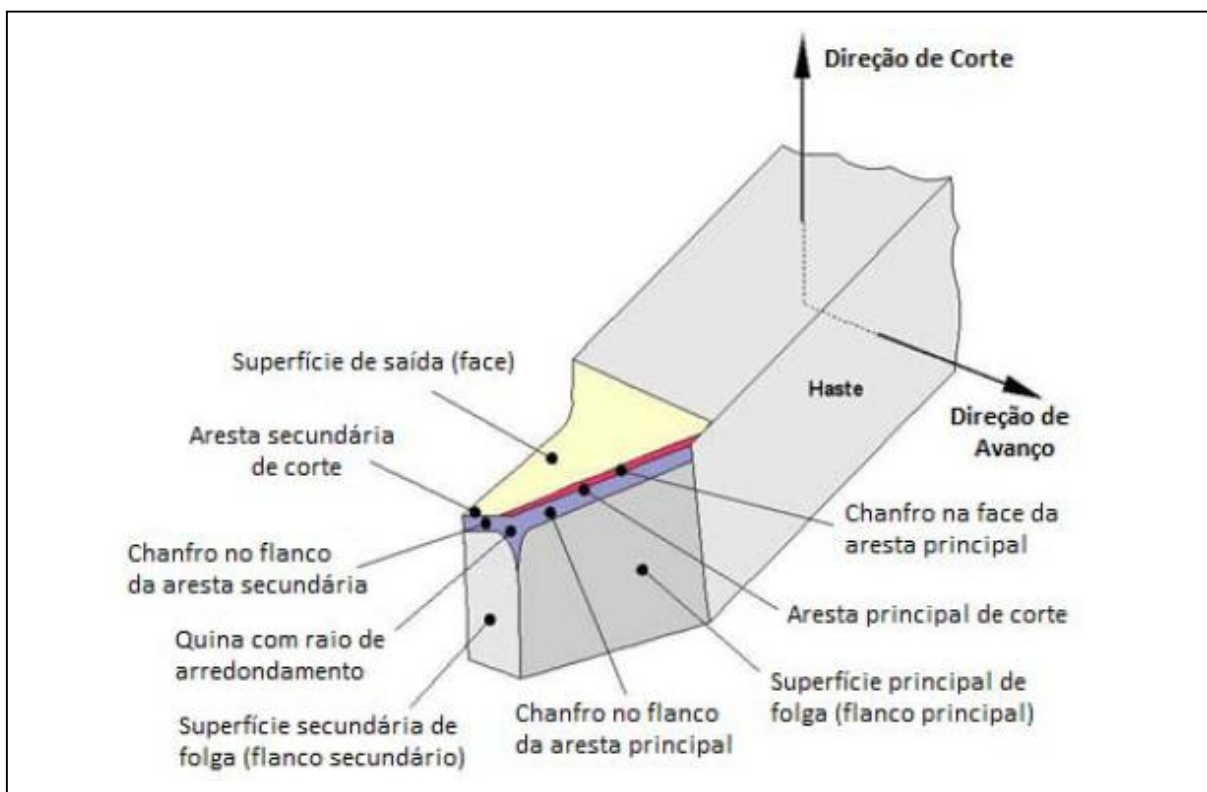
Alguns dos aspectos que influenciam a usinabilidade estão diretamente relacionados às condições mecânicas e térmicas contínuas do processo de usinagem. Alguns aspectos, como a vida das ferramentas, dependem não apenas das tensões da superfície contínua e das temperaturas geradas, mas também das interações microestruturais, mecânicas e químicas entre o cavaco e a ferramenta (GROOVER, 2012; CHILDS et al., 2004).

Para amenizar esse impacto que é percebido durante a execução dos processos, as condições de corte devem ser criteriosamente definidas para que seja evitada pelo menos a interrupção súbita do processo decorrente de falhas em ferramentas (GROOVER, 2012; CHILDS et al., 2004).

As altas forças e temperaturas durante a usinagem criam um ambiente hostil para a ferramenta. Se a força de corte for alta demais, a ferramenta fratura. Se a temperatura de corte ficar muito alta, o material da ferramenta tende a amolecer e conseqüentemente apresentar uma falha (GROOVER, 2012). Se nenhuma dessas condições for a responsável por uma falha da ferramenta, o desgaste contínuo da aresta de corte fatalmente levará a uma falha, corroborando assim, com a afirmação de que nenhuma ferramenta dura para sempre (CHILDS et al., 2004).

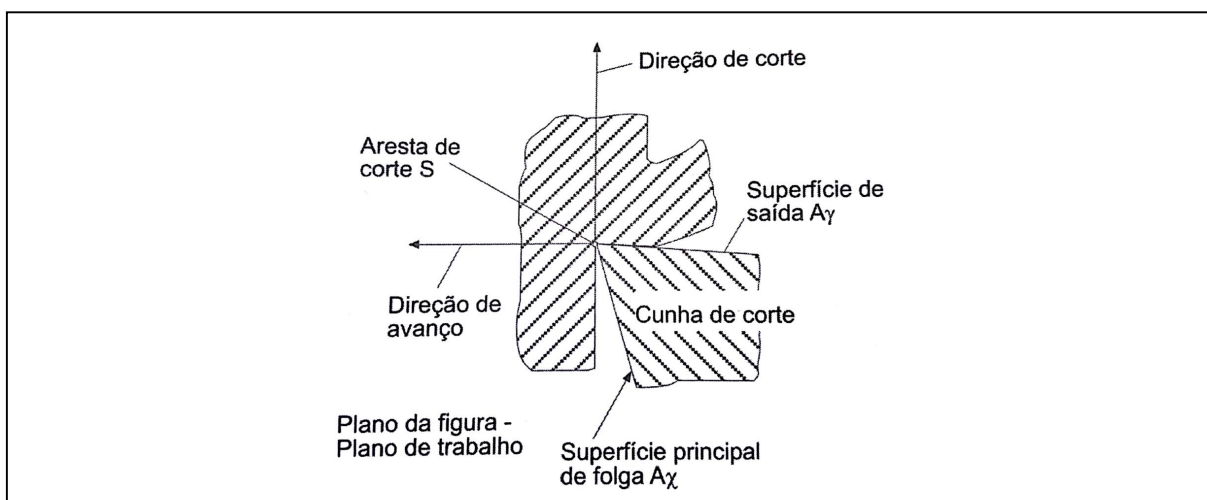
As ferramentas de corte basicamente são constituídas pelas seguintes partes construtivas: Parte de corte, Cunha de corte, Superfície de saída e Superfície principal de folga (figuras 5 e 6).

Figura 5 – Superfícies e arestas de uma ferramenta monocortante em barra.



Fonte: Adaptado de FERRARESI (1977).

Figura 6 – Cunha de corte da ferramenta de torneamento

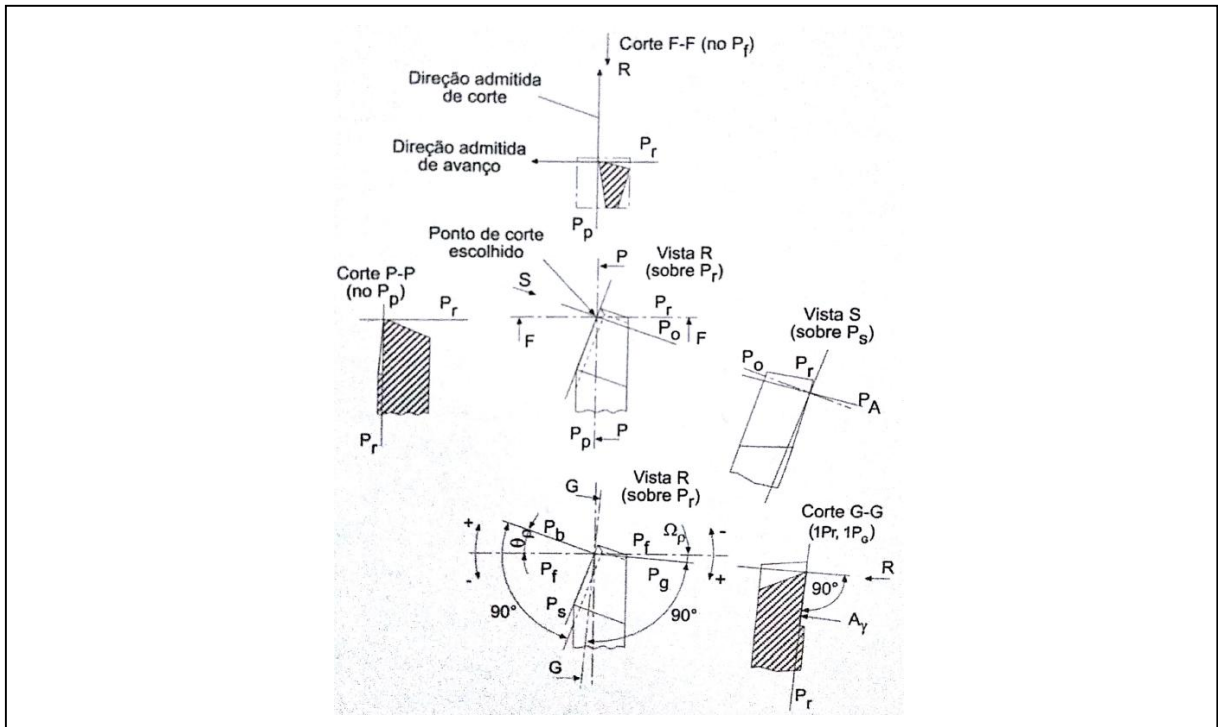


Fonte: DINIZ et al. (2014).

Para definição e descrição dos ângulos da parte de corte são necessários um sistema de referência da ferramenta (figura 7) e um sistema de referência

efetivo, onde o primeiro é utilizado na determinação da geometria da parte de corte da ferramenta durante todas as fases, desde seu projeto até sua recuperação.

Figura 7 – Planos do sistema de referência da ferramenta

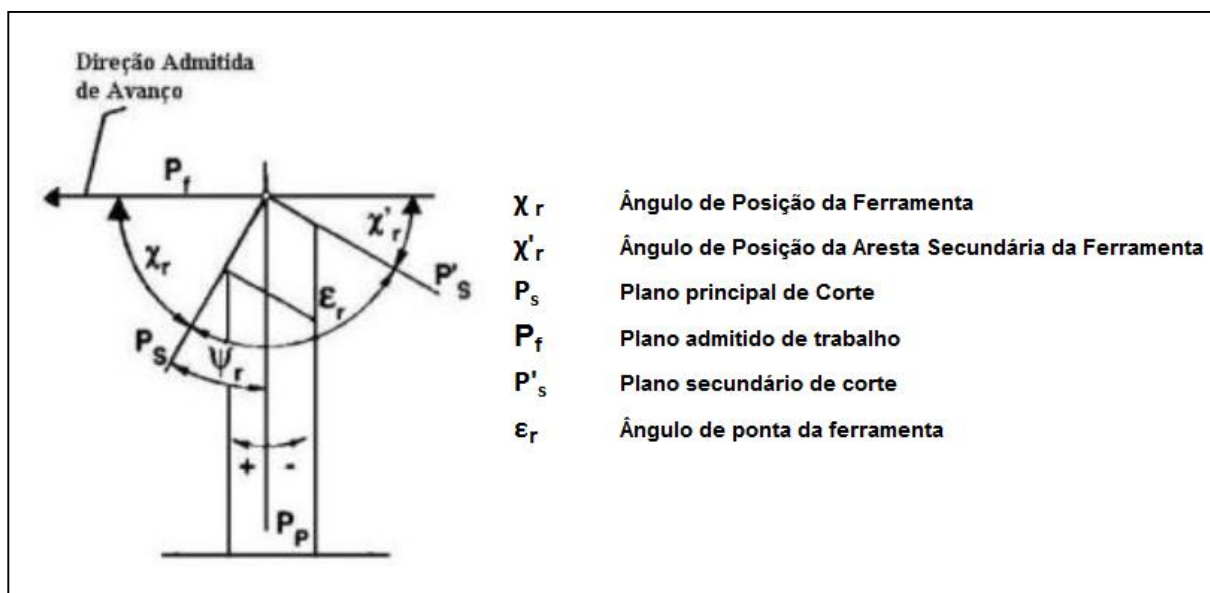


Fonte: DINIZ et al. (2014).

Já os principais ângulos da ferramenta se referem ao ponto de corte escolhido e se destinam à determinação da posição e forma da cunha de corte. Assim, são definidos os ângulos do sistema de referência da ferramenta e os ângulos do sistema de referência efetivo.

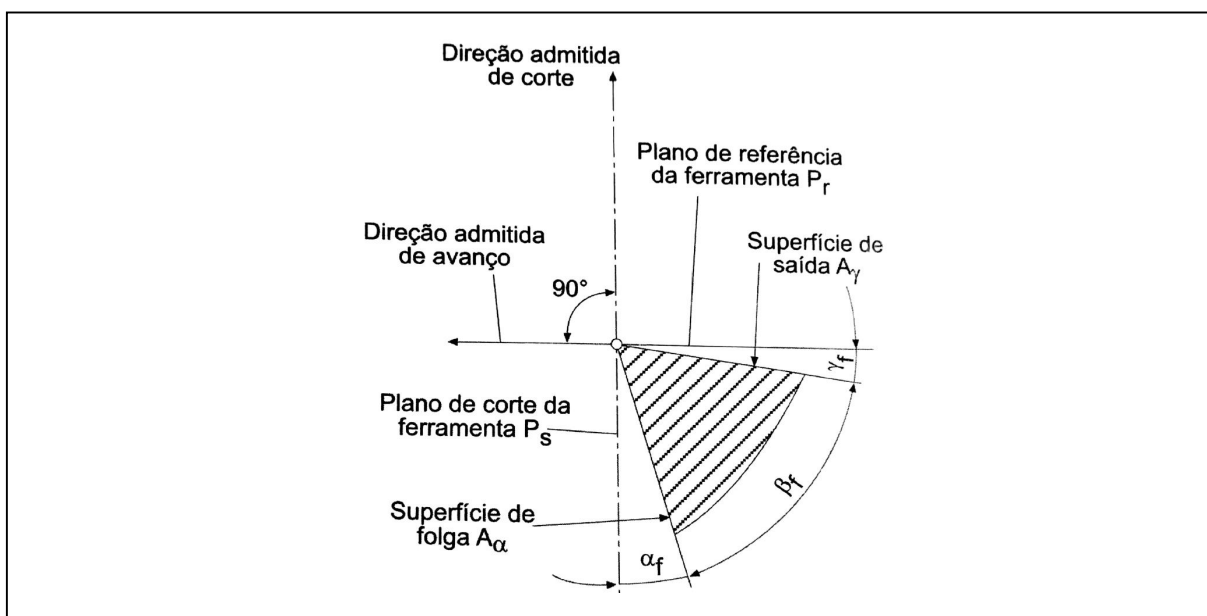
A figura 8 mostra os principais ângulos de localização das arestas no sistema de referência da ferramenta para torneamento cilíndrico e a figura 9 representa os ângulos de saída, de cunha e de folga da ferramenta representados pelo plano admitido de trabalho.

Figura 8 – Ângulos de localização das arestas de corte no sistema de referência da ferramenta



Fonte: Adaptado de DINIZ et al. (2014).

Figura 9 – Ângulos de saída, de cunha e de folga da ferramenta, representados no plano de trabalho.



Fonte: DINIZ et al. (2014).

A tecnologia aplicada para fabricação das ferramentas de corte possui dois aspectos principais: material da ferramenta e geometria da ferramenta. O primeiro está preocupado com o desenvolvimento de materiais que possam suportar as forças, as temperaturas e as medidas de desgaste no processo de usinagem. O segundo aborda a otimização da geometria da ferramenta de corte para o material da ferramenta e para uma determinada operação.

Existem três considerações importantes para definição de uma ferramenta para usinagem: estabilidade física e química quando submetida à alta temperatura, resistência ao desgaste abrasivo e resistência à fratura. Um determinado material de ferramenta geralmente não apresenta bons resultados em relação a todos esses três atributos. Em geral, como um material é feito mais refratário, torna-se mais quebradiço; ou se é mais resistente à abrasão, torna-se mais frágil. Isso é verdade não só quando se comparam diferentes tipos de material de ferramentas, como aço rápido (HSS), carboneto de tungstênio (WC) e carboneto de titânio (TiC), mas também ao comparar diferentes composições dentro de uma determinada classe (CHILDS et al., 2004).

Na busca por atender essas necessidades, diversas são as tecnologias e compósitos que vêm sendo desenvolvidos por diferentes fabricantes de ferramentas. Algumas ferramentas consideradas adequadas para usinagem de ligas de níquel como a abordada nesta pesquisa são (YOUSSEF, 2015; NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992; CHILDS et al., 2004):

- a) Insertos de Metal Duro.
- b) Insertos de Metal Duro Revestidos.
- c) Cerâmica.

2.3.1 Insertos de Cerâmica

Segundo Arora e Parbhakar (2003), o trabalho inicial sobre ferramentas cerâmicas começou nos Estados Unidos em 1935, entretanto, somente em 1945 elas foram consideradas efetivamente para uso na usinagem. Inicialmente, as ferramentas cerâmicas produziram resultados inconsistentes e insatisfatórios, justificado inicialmente pela não uniformidade das propriedades mecânicas mais baixas das ferramentas. Porém, o principal responsável por esses resultados foram

a falta de compreensão e a má aplicação por parte dos usuários. Desde então, muito trabalho foi feito e, como resultado, foram feitas melhorias consideráveis nas propriedades mecânicas das ferramentas cerâmicas como resultadas de:

- a) Processamento melhorado;
- b) O uso de aditivos;
- c) Melhor controle da microestrutura (principalmente no refinamento do tamanho do grão);
- d) Melhor controle da densidade.

O uso de ferramentas cerâmicas nas operações de usinagem tem sido impulsionado nas últimas décadas, em decorrência da evolução das máquinas ferramentas que, cada vez se mostram mais rígidas, estáveis e capazes de trabalhar com altas velocidades. Assim, mesmo materiais suscetíveis à fratura podem ser usados com riscos reduzidos à esse tipo de ocorrência. As ferramentas cerâmicas são duras e possuem capacidade de manter sua dureza quando submetidas a temperaturas elevadas geradas durante processo de usinagem (EZUGWU et al., 2003; ARORA e PARBHAKAR, 2003).

A utilização das ferramentas cerâmicas se concentra principalmente em aplicações onde é possível a emprego de alta velocidade de corte, operações de acabamento de usinagem de aços endurecidos, usinagem em peças de ferro fundido e usinagem de ligas de níquel. No entanto, eles também podem ser usados com sucesso para usinagem de materiais muito duros com dureza de até HRc 63, desde que sejam aplicadas com velocidade de corte mais baixas e dispondo de máquinas-ferramentas extremamente rígidas (WERTHEIM et al., 1998).

As ferramentas de cerâmica possuem diferentes vantagens em relação às demais (como o metal duro) onde, apesar de sua dureza elevada as tornar suscetíveis ao choque mecânico durante a usinagem, sua alta temperatura de fusão e a ausência de uma fase de aglutinante secundária permitem que não haja amolecimento em condições de alta velocidade, além de sua maior estabilidade química e resistência à oxidação (CHAKORABORTY et al., 2000; HOSSEINI, 2014).

Em uma operação de usinagem de alta velocidade, a cerâmica é capaz de resistir à fratura, enquanto a ponta do inserto de metal duro se comporta de maneira inversa. O metal duro é mais forte a baixas temperaturas (velocidades de corte

baixas) e a cerâmica é mais forte a altas temperaturas (velocidades de corte altas). As vantagens e limitações do uso de cerâmica como material de ferramenta sobre metal duro podem ser resumidas como (ARORA e PARBHAKAR, 2003; HOSSEINI, 2014):

Vantagens:

- a) Alta dureza por isso é potencialmente resistente a abrasões.
- b) Quimicamente inerte (a cerâmica óxida é quimicamente inerte no ar até o ponto de fusão, geralmente acima de 2000°C).
- c) Mantém suas propriedades sob altas temperaturas.

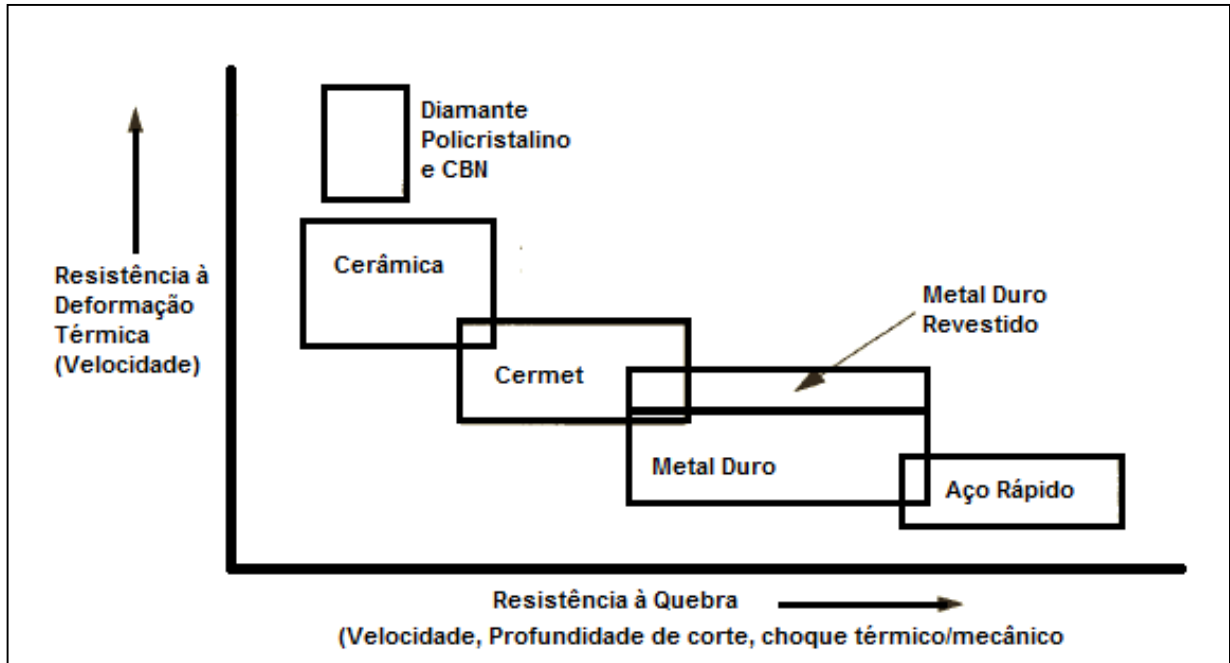
Limitações:

- a) Fragilidade e falha como resultado de choque térmico ou mecânico.
- b) Difícil de fabricar em forma complexa, especialmente se for necessária uma boa precisão dimensional.

Os parâmetros de corte são os dados de entrada responsáveis para determinar a vida de todos os tipos de ferramenta e que, para a cerâmica, é particularmente importante evitar o desgaste excessivo, o que pode causar fratura e uma vida de ferramenta imprevisível (BRANDT, 1990).

Não há nada de novo em afirmar que as operações de usinagem geram muito calor e grande carga térmica sobre a ferramenta. Durante o corte, as temperaturas de corte para ferramentas cerâmicas geralmente excedem os 1000°C. O gráfico 2 mostra uma relação entre a Resistência à Deformação Térmica provenientes do processo de usinagem *versus* a resistência à quebra, que também pode ser incentivada pelos parâmetros de entrada do processo.

Gráfico 2 – Representação esquemática das propriedades de materiais de ferramentas de corte

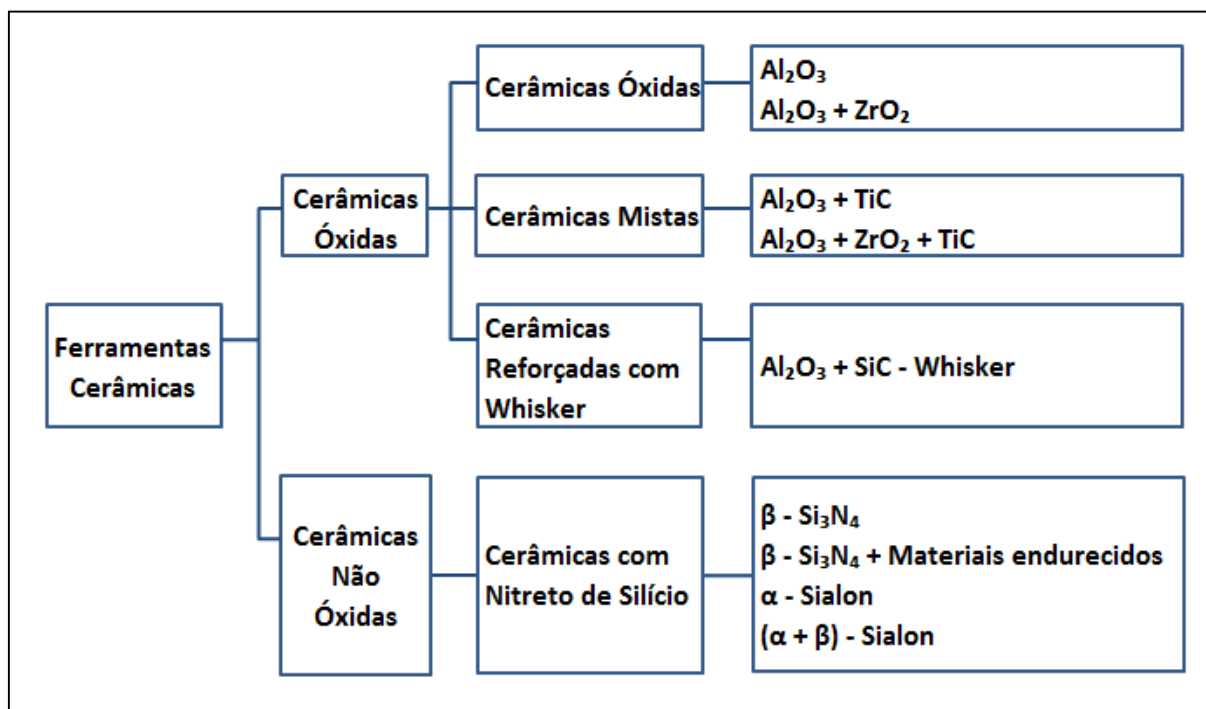


Fonte: Adaptado de MEHROTRA (1998).

A rigidez da máquina, faixa de velocidade e rigidez das ferramentas para evitar a deflexão são essenciais para a utilização de insertos de cerâmica com máxima produtividade. Devido à baixa condutividade térmica, o uso de fluidos de corte para usinagem com insertos de cerâmica geralmente não é necessário, pois estes permanecem com temperatura relativamente baixa durante o corte. A maior parte do calor gerado é removida nos cavacos. Contudo, ao usinar metais com baixa condutividade térmica, como as superligas, um fluido de corte pode ser necessário para reduzir as temperaturas na aresta de corte. Nesses casos, é necessário um fluxo contínuo de fluido. Um fluxo intermitente pode causar choque térmico, verificação de calor e falhas prematuras (ARORA e PARBHAKAR, 2003).

As ferramentas de cerâmica podem ser divididas em duas classificações principais e quatro subcategorias (HOSSEINI e KIISHAWY, 2014). Esta subdivisão pode ser vista na figura 10.

Figura 10 – Classificação das Ferramentas Cerâmicas



Fonte: Adaptado de HOSSEINI e KIISHAWY (2014).

Conforme ilustrado, as ferramentas de cerâmicas podem ser subdivididas em duas características principais: óxidas e não óxidas. A família das cerâmicas óxidas, que inclui óxido puro, óxido misto e cerâmica reforçada com *whisker*, também é conhecida como família das cerâmicas à base de alumina, como o material base em todos eles é óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3). A família de cerâmicas não óxidas inclui principalmente aquelas à base de nitreto de silício.

As ferramentas cerâmicas de Al_2O_3 possuem a característica de serem extremamente frágeis e vulneráveis à fratura; desta forma, a resistência à fratura é normalmente melhorada pela adição de óxido de zircônio (ZrO_2). O óxido de zircônio aumenta a resistência à fratura sem efeito negativo sobre a resistência ao desgaste (MEHROTRA, 1998; KLOCKE, 2011). No entanto, essa composição proporciona à ferramenta a característica de baixa resistência ao choque térmico e baixa resistência à fratura em temperaturas elevadas.

As cerâmicas mistas apresentam maior dureza à quente, maior dureza e melhor resistência ao choque térmico. Essas características são obtidas por meio da adição de carboneto de titânio (TiC) ou carbonitreto de titânio (TiCN). Em

contrapartida, a adição de carbonitreto de titânio afeta negativamente a resistência à fratura da ferramenta (JACK, 1986; KLOCKE, 2011).

O desempenho de ferramentas cerâmicas pode ser ainda melhorado através da aplicação de 20 a 40% em peso de carboneto de silício para a Alumina (Al_2O_3) como material de base, gerado as chamadas ferramentas de cerâmica reforçada com *Whisker* ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$). Os *Whiskers* de carboneto de silício atuam como reforço e aumentam a dureza das ferramentas cerâmicas, resultando uma resistência à fratura 60% maior do que as ferramentas de cerâmica de óxido misto.

Logo, os materiais *Whisker* são usados por causa da resistência combinada, dureza e estabilidade química em altas temperaturas. O mecanismo de endurecimento é baseado na resistência à fissura da interface de carboneto de silício- Al_2O_3 (WERTHEIM et al., 1998). Essas ferramentas são amplamente utilizadas para usinagem de ligas de baixa usinabilidade, como a liga Inconel 718 à base de níquel (YUE et al., 2015).

As ferramentas de cerâmicas denominadas não óxidas são compostas por nitreto de silício (Si_3N_4), nitreto de boro (BN) e nitreto de titânio (TiN). Esse grupo de ferramentas apresenta como características a dureza e fragilidade. Por isso, possuem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e deformação (GROOVER, 2012).

Os insertos fabricados em cerâmica de SiAlON são compostas por uma base de nitreto de silício (Si_3N_4) combinado com alumínio (Al) e oxigênio (O). O SiAlON possui uma excelente resistência às altas temperaturas; resistência mecânica mesmo quando submetida às altas temperaturas; boa resistência ao choque térmico e boa resistência ao desgaste. Somado a essas características, possui ainda a tenacidade proporcionada pela existência do nitreto de silício em sua composição.

2.3.2 Desgastes e Avarias nas Ferramentas de Corte

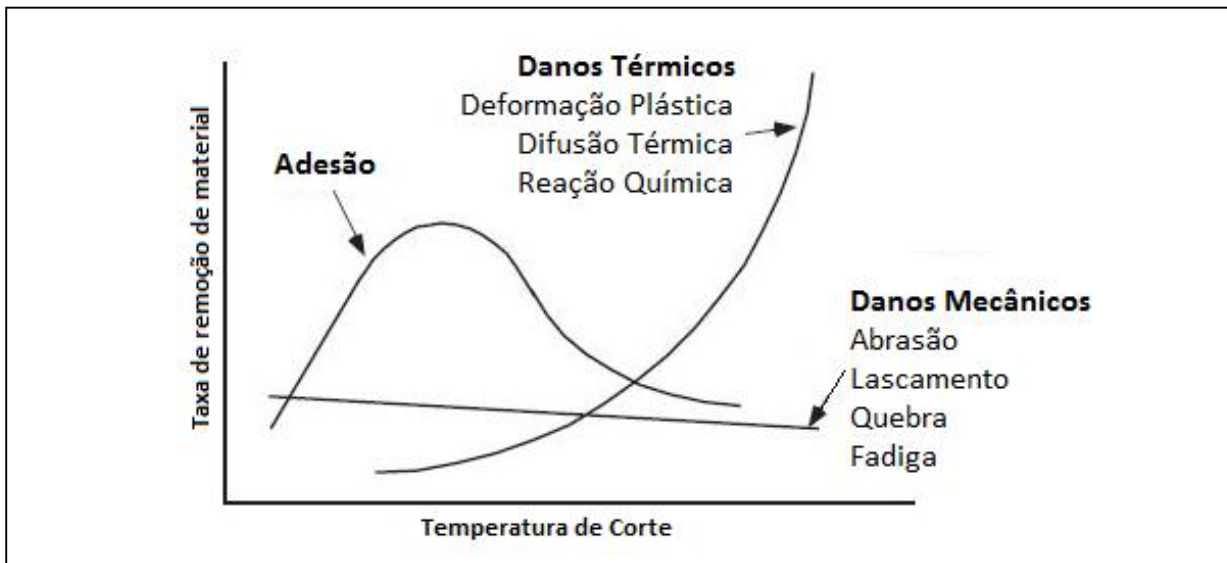
A vida da ferramenta é definida como o tempo de corte que esta pode ser usada ainda em condições ideais de corte. O funcionamento dessa ferramenta até uma falha é uma maneira de definir a sua vida útil (GROOVER, 2012).

No contexto do dano à ferramenta de corte, a literatura apresenta algumas variações na classificação nos mecanismos de desgaste. Uma dessas abordagens classifica os mecanismos qualitativamente identificados em: mecânico, térmico e aderência (CHILDS et al., 2004):

- a) Mecânico, que inclui abrasão, lascamento, fratura inicial e fadiga. É basicamente independente da temperatura.
- b) Térmicos com deformação plástica, difusão térmica e reação química como suas formas típicas, o que aumentam drasticamente com o aumento da temperatura. (Deve-se observar que a difusão térmica e a reação química não são a causa direta dos danos. Em vez disso, elas enfraquecem a superfície da ferramenta, de modo que a abrasão, o choque mecânico ou a aderência podem causar mais facilmente a desgaste da ferramenta).
- c) Aderência: ocorre com a afinidade química entre o material da peça e o material da ferramenta. Além disso, temperatura, tempo e pressão de contato devem estar situados em uma determinada faixa de valores. Para materiais que apresentam um encruamento acentuado, a adesão leva à formação do gume postiço que possui um máximo local em uma determinada faixa de temperatura.

O gráfico 3 demonstra a ocorrência dos mecanismos de falha em função da temperatura e taxa de remoção de material.

Gráfico 3 – Mecanismos de danos na ferramenta e temperatura de corte



Fonte: Adaptado de CHILDS et al. (2004).

Outras abordagens classificam estes mecanismos de forma menos agrupada, sendo eles: Abrasão, Adesão, Difusão e Oxidação (DINIZ et al., 2014; GROOVER, 2012). Tais mecanismos de desgaste causam manifestações visíveis de desgaste na ferramenta que, por sua vez, devem ser corretamente interpretados para que as ações corretivas possam ser tomadas. Os mecanismos e tipos de desgaste ou avarias que ocorrem nas ferramentas são:

- a) **Abrasão mecânica:** Mecanismo de desgaste causado por partículas duras no material usinado, capazes de remover pequenas porções da ferramenta. Pode também ocorrer pelo arrancamento de grãos da própria ferramenta arrancados pós adesão de material no flanco. Essa ação abrasiva ocorre tanto no desgaste do flanco como no desgaste da cratera. Supondo que nenhuma das condições de usinagem apresente condições adversas, as superfícies de desgaste aumentam progressivamente. Por conseguinte, esse é o processo de desgaste mais comum ao longo das superfícies de folga da maioria das ferramentas.
- b) **Adesão (Atrition):** Mecanismo responsável tanto pelo desgaste de cratera quanto pelo desgaste de flanco. Quando dois materiais entram em contato sob alta pressão e temperatura, ocorre adesão (soldagem)

entre eles. Essas condições estão presentes entre o cavaco e a face da ferramenta. À medida que o cavaco flui através da ferramenta, pequenas partículas aderem ao cavaco e acabam sendo separadas da superfície, resultando em desgaste.

- c) **Difusão:** Mecanismo de desgaste ativado pela temperatura na zona de corte que ocorre no contato entre o cavaco e a ferramenta e consiste na transferência de átomos de um material para outro, fazendo com que a superfície da ferramenta se torne esgotada dos átomos responsáveis pela sua dureza. À medida que esse processo continua, a superfície da ferramenta se torna mais suscetível a abrasão e adesão. A difusão é considerada um mecanismo principal de desgaste da cratera.
- d) **Oxidação:** Mecanismo causado em consequência de altas temperaturas na superfície da interface ferramenta-cavaco na usinagem a altas velocidades, o que resultam em reações químicas, em particular, causado pelo cuidado inadequado do fluido de corte utilizado durante o processo, onde os elementos antioxidantes deixam de atuar corretamente. A camada oxidada, mais suave que o material da ferramenta principal, é removido, expondo novo material para sustentar o processo de reação.
- e) **Aresta postiça:** Embora existam discordâncias sobre considerar a formação de aresta postiça de corte como mecanismo de desgaste, é consenso que este ocorre mesmo sem um desgaste da ferramenta. Ocorre quando utilizado velocidades de corte baixas ou médias, evidenciando a falta de temperatura durante o processo como responsável pelo seu surgimento. O atrito entre a ferramenta e o cavaco faz com que pequenas partículas do material da peça acabem aderindo à ferramenta nas proximidades da aresta de corte, conforme mostra a figura 11.

A parte inferior do cavaco acaba por se soldar à aresta e este material encruado acaba agindo como aresta de corte. Com o crescimento gradual, esta se rompe bruscamente em certo momento. Parte da aresta é carregada com o cavaco e outra acaba por aderir à peça. Por isso, o rompimento é responsável por causar um

desgaste frontal, tendo em vista que arranca partículas da superfície de folga da ferramenta (DINIZ et al., 2014).

Figura 11 – Aresta Postiça



Fonte: SANDVIK COROMANT (2017).

Os mecanismos de desgaste, por sua vez, são responsáveis por causar o desgaste das ferramentas. A degradação da superfície de corte da ferramenta, que ocorre nas bordas expostas, é conhecida como desgaste. A capacidade de resistir a esse desgaste prolonga a vida útil da ferramenta, e esta resistência é observável experimentalmente e mensurável por comparação (OBERG, 2004).

O desgaste normal não pode ser evitado, no entanto, deve ser diferenciado da quebra ou desgaste excessivamente rápido. Antes de definir o tipo de desgaste ocorrido em uma ferramenta durante usinagem, é importante diferenciar desgaste de avaria. A perda contínua e microscópica de partículas na ferramenta é denominada desgaste e as demais são classificadas como avarias (DINIZ et al., 2014; OBERG, 2004; CHILDS et al., 2004). Dentre os tipos de desgastes e avarias citados e descritos por estes autores, se destacam:

- a) **Desgaste de entalhe:** É caracterizado por danos excessivos localizados na máxima profundidade de corte (local correspondente à superfície original da peça de trabalho), conforme mostra a figura 12, mas também pode ocorrer na borda secundária. Esse tipo de desgaste muda a forma da ponta da ferramenta e é incentivado pelo aumento da temperatura e

velocidade de corte. O encruamento e a formação de rebarbas são fatores importantes para o desgaste do entalhe.

Figura 12 – Desgaste de Entalhe



Fonte: SANDVIK COROMANT (2010).

- b) **Desgaste de flanco:** Tipo de desgaste que ocorre na superfície de folga da ferramenta (flanco adjacente à aresta de corte), causado pelo contato entre ferramenta e peça. É um dos tipos de desgaste mais comuns, tendo em vista que todo processo de usinagem produz um desgaste na ferramenta, decorrente do atrito gerado entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. O desgaste é incentivado pela existência de partículas duras no material da peça e pela temperatura gerada durante o processo. Começa na aresta de corte e se desenvolve para baixo e é medido pela largura dessa faixa, conforme aponta a figura 13.

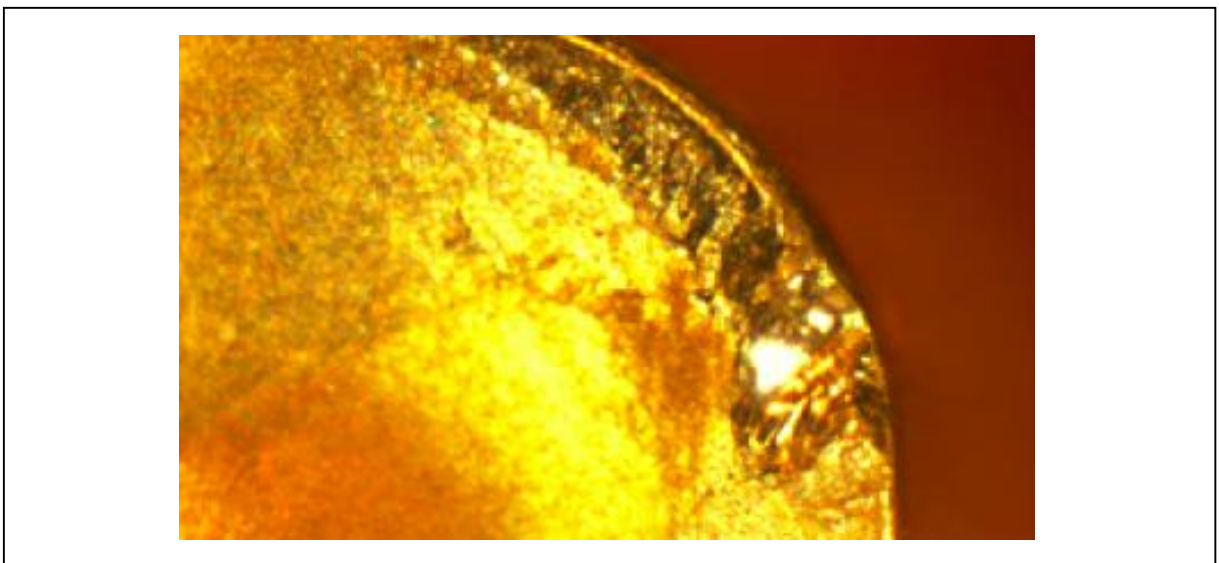
Figura 13 – Desgaste de Flanco



Fonte: SANDVIK COROMANT (2017).

- c) **Desgaste de cratera:** É caracterizado por uma cavidade na superfície de saída da ferramenta, que cresce a partir do atrito entre o cavaco que desliza por esta região, conforme mostra a figura 14, devido a forças e temperaturas elevadas que ocorrem nesta interface. Quando esse desgaste se encontra com o desgaste de flanco, resulta na quebra da ferramenta. O dimensionamento do desgaste pode ser feito por meio de sua área ou por sua profundidade.

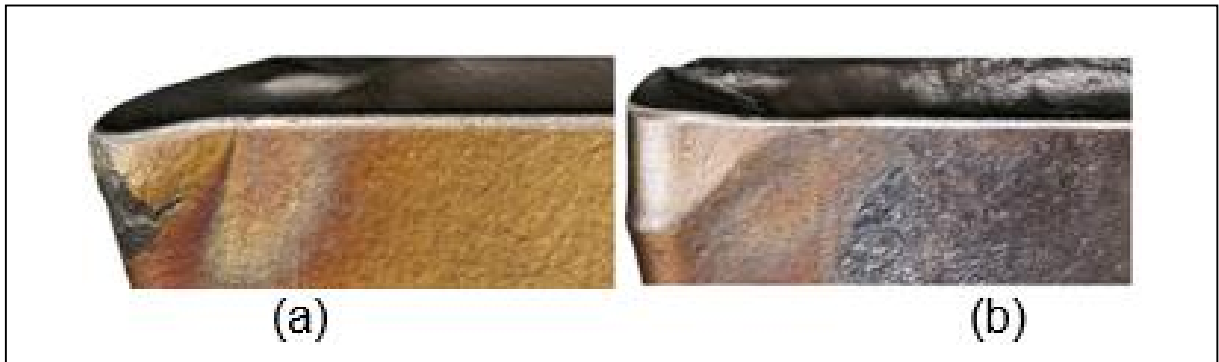
Figura 14 – Desgaste de Cratera



Fonte: SANDVIK COROMANT (2010).

- d) **Deformação plástica:** É uma avaria caracterizada pela deformação permanente na forma da aresta de corte. Essa deformação ocorre quando a resistência da ferramenta é superada pelas altas forças de corte e temperaturas que geram um estado de tensão nessa região. Pode ser caracterizado por uma deformação interna (impressão de borda) ou uma deformação descendente (depressão da borda), segundo consta a figura 15. O aumento dessa deformação pode gerar a quebra da aresta de corte, além de torná-la mais vulnerável à abrasão e contribuir grandemente para a formação do desgaste de flanco.

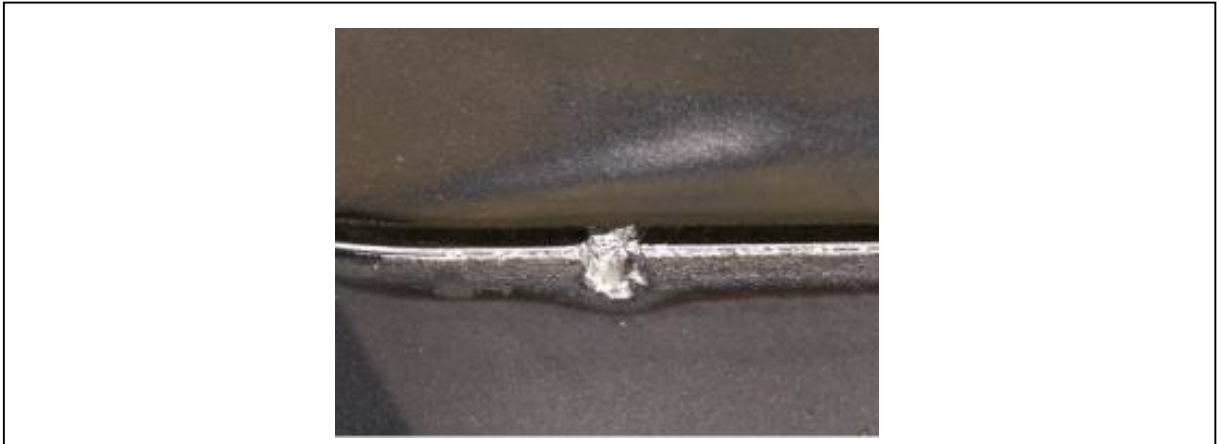
Figura 15 – Deformação Plástica: (a) Impressão de borda e (b) Depressão de borda



Fonte: SANDVIK COROMANT (2017).

- e) **Lascamento:** Assemelha-se ao desgaste de cratera, contudo, o material subitamente removido e de maiores dimensões, conforme evidencia a figura 16. Uma característica desse desgaste é que o inserto ainda pode ser utilizado e, muitas vezes, uma aresta postiça acaba por preencher a cavidade gerada. Porém, tais ocorrências são responsáveis pela redução da vida útil da ferramenta. O aumento do lascamento da aresta resulta na quebra do inserto. Condições instáveis de usinagem são as maiores responsáveis por esse tipo de avaria.

Figura 16 – Lascamento de Aresta



Fonte: SANDVIK COROMANT (2017).

- f) **Trincas:** São avarias provocadas pela variação de temperatura e/ou carregamento durante operação. Algumas trincas são restritas ao revestimento, enquanto outras se estendem para dentro do substrato. Quando perpendiculares à aresta de corte, (figura 17), normalmente são de origem térmica. Já quando paralelas à aresta de corte são de origem mecânica. Os maiores responsáveis por esse tipo de ocorrência são a variação de temperatura, esforços mecânicos, uso inadequado do fluido de corte e variação da espessura de corte.

Figura 17 – Trincas perpendiculares à aresta de corte



Fonte: SANDVIK COROMANT (2017).

- g) **Quebra:** Muitas vezes é uma avaria decorrente do crescimento dos desgastes ou avarias já citados; entretanto, existem fatores que podem

gerar essa falha de maneira abrupta, como escolha de classes incorretas de ferramentas, erros na definição do processo e parada do corte de maneira repentina, que acabam por submeter a ferramenta a uma carga maior do que ela pode resistir. Uma quebra na aresta de corte é mostrada na figura 18.

Figura 18 – Quebra na aresta de corte



Fonte: SANDVIK COROMANT (2017).

O quadro 1 sumariza as principais causas dos diversos desgastes e avarias que podem ocorrer nas ferramentas, assim como possíveis ações a serem tomadas para que as mesmas sejam reduzidas ou mitigadas (DINIZ et al., 2014).

Quadro 1 – Causas e ações para minimização de avarias e desgaste em ferramentas de corte

Tipo de desgaste e/ou avaria	Possíveis Causas	Ações para Minimização
Desgaste de Flanco	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de Corte Muito Alta ou Muito Baixa (se a causa for a presença de APC) - Resistência ao Desgaste Insuficiente da Ferramenta - Abrasão - Aresta Postiça de Corte 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução da Velocidade de Corte - Seleção de classe da ferramenta mais resistente ao desgaste - Aumento da Velocidade de corte se o desgaste da ferramenta for causado pela APC

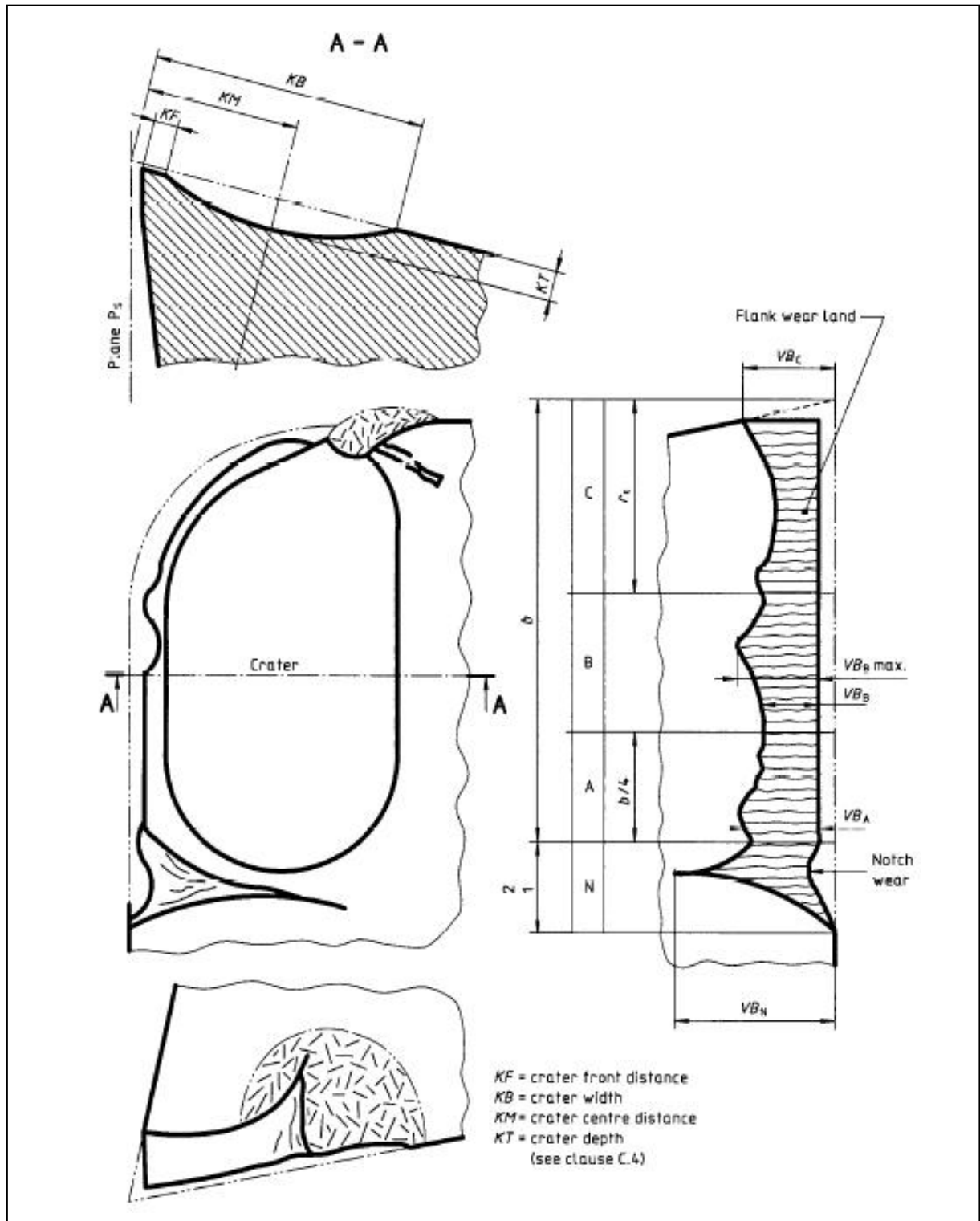
Desgaste de Entalhe	- Oxidação	- Seleção de fluido de corte com agentes oxidantes - Redução da Velocidade de Corte
Desgaste de Cratera	- Difusão	- Seleção de classe de ferramenta que possua cobertura de óxido de alumínio
Deformação Plástica	- Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte	- Seleção de classe de ferramenta com maior dureza a quente - Redução da Velocidade de Corte
Trincas de Origem Mecânica	- Variação excessiva de esforço na aresta de corte	- Seleção de uma classe de ferramenta mais tenaz - Redução do Avanço - Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça - Aumento da estabilidade
Trincas de Origem Térmica	- Excessiva variação de temperatura	- Seleção da classe da ferramenta mais tenaz - Aplicação de fluido de corte com abundância ou não aplicação
Lascamento	- Classe da ferramenta muito frágil - Geometria da ferramenta muito fraca - Choques da ferramenta com a peça	- Seleção da classe de ferramenta mais tenaz - Aumento do ângulo de ponta, raio de ponta e/ou do ângulo de cunha (chanframento de aresta) - Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça

Fonte: DINIZ et al., (2014).

A ISO 3685 (1993) padroniza a medição dos desgastes no plano ortogonal da ferramenta, distinguindo os ocorridos na superfície de saída e de folga da ferramenta, conforme mostra a figura 19.

- a) **Na superfície de saída têm-se:** Profundidade da cratera (KT), largura da cratera (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM).
- b) **Na superfície de folga têm-se:** Largura do desgaste de flanco (VB), que é um valor médio do Desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco (V_{BMAX}).
- c) **Na superfície de folga mede-se:** o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes (V_{BN} e V_{BC}).

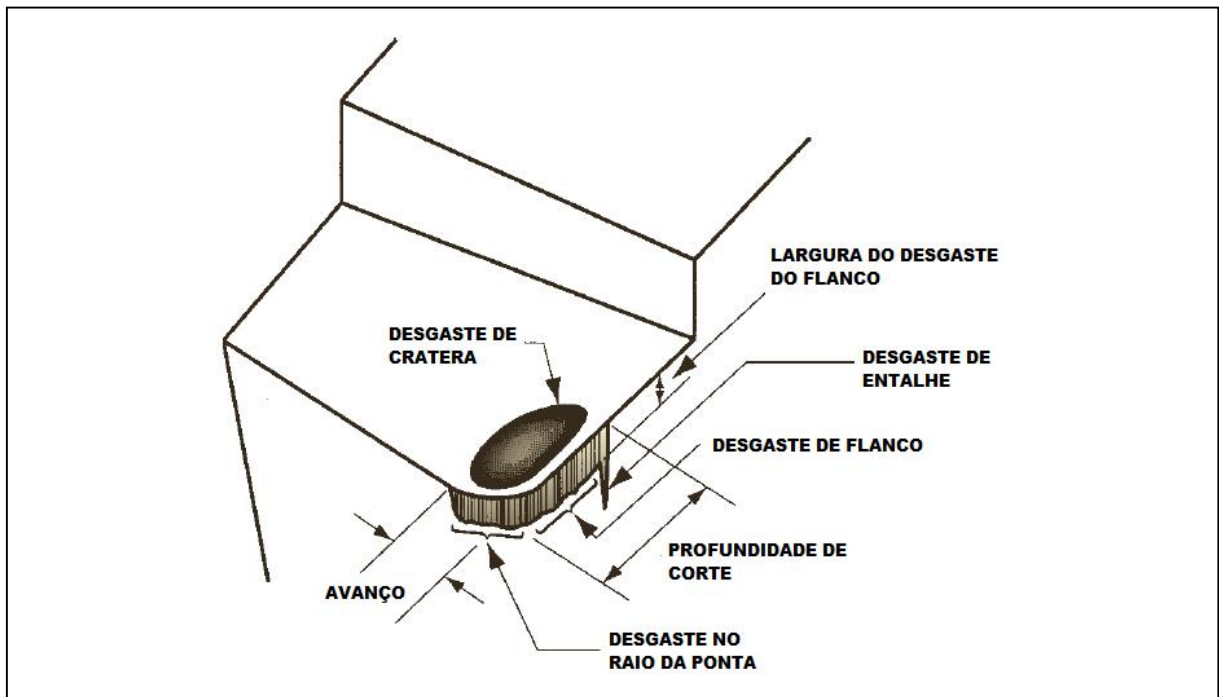
Figura 19 – Desgastes da ferramenta



Fonte: ISO 3685 (1993).

A figura 20 mostra os principais locais e tipos de desgaste ocorridos em uma ferramenta submetida a operação de torneamento.

Figura 20 – Diagrama de ferramenta de corte desgastada, mostrando os principais locais e tipos de desgaste que ocorrem



Fonte: Adaptado de GROOVER (2012).

Com base na ISO 3685 (1993), aplicam-se as seguintes definições de desgaste para avaliação em insertos monocortantes:

- a) **Desgaste da ferramenta:** A mudança de forma da ferramenta de sua forma original, durante o corte, resultante da perda gradual de material da ferramenta ou deformação.
- b) **Medida de desgaste da ferramenta:** Uma dimensão a ser medida para indicar a quantidade de desgaste da ferramenta.
- c) **Critério de vida da ferramenta:** Um valor limiar predeterminado de uma medida de desgaste da ferramenta ou a ocorrência de um fenômeno.
- d) **Vida útil da ferramenta:** O tempo de corte necessário para atingir um critério de vida útil da ferramenta.

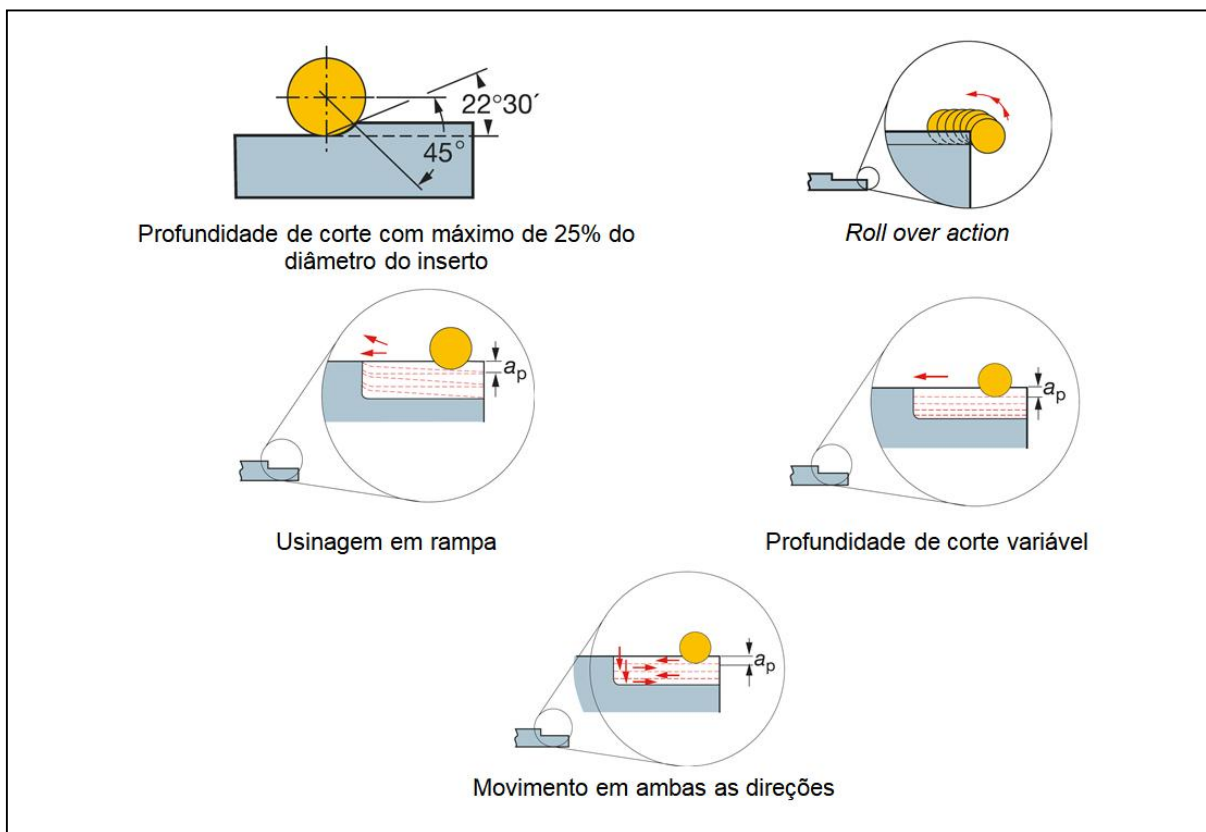
Diferentes autores, como Narutaki et al., (1993), Kitagawa et al. (1996), Altin et al. (2007), Xiao et al. (2010) e Therezani (2012) relatam, em seus estudos, que o desgaste predominante nos insertos de cerâmica durante usinagem de ligas de níquel é o entalhe, ocorrido principalmente na região da profundidade de corte.

Com o objetivo de reduzir esta ocorrência, Sandvik (2010) sugere algumas ações que tendem a contribuir positivamente na redução desse desgaste:

- a) Uso de insertos redondos sempre que possível, com limite de profundidade de corte de até 25% do diâmetro do inserto.
- b) Uso de ângulo de posição de 45° quando a profundidade de corte exceder 25% do diâmetro do inserto.
- c) “*Roll over action*” na programação para eliminar a necessidade de chanframento prévio no vértice de início da usinagem.
- d) A usinagem em rampa possibilita que o desgaste seja distribuído ao longo da aresta de corte. A profundidade de corte deve variar entre 15% e 25% do diâmetro do inserto (não pode chegar a zero).
- e) Múltiplos passes com profundidade de corte variável.
- f) Usinagem em ambas as direções (direita e esquerda).

A figura 21 exemplifica estas ações sugeridas pelo autor:

Figura 21 – Ações para redução do desgaste de entalhe



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

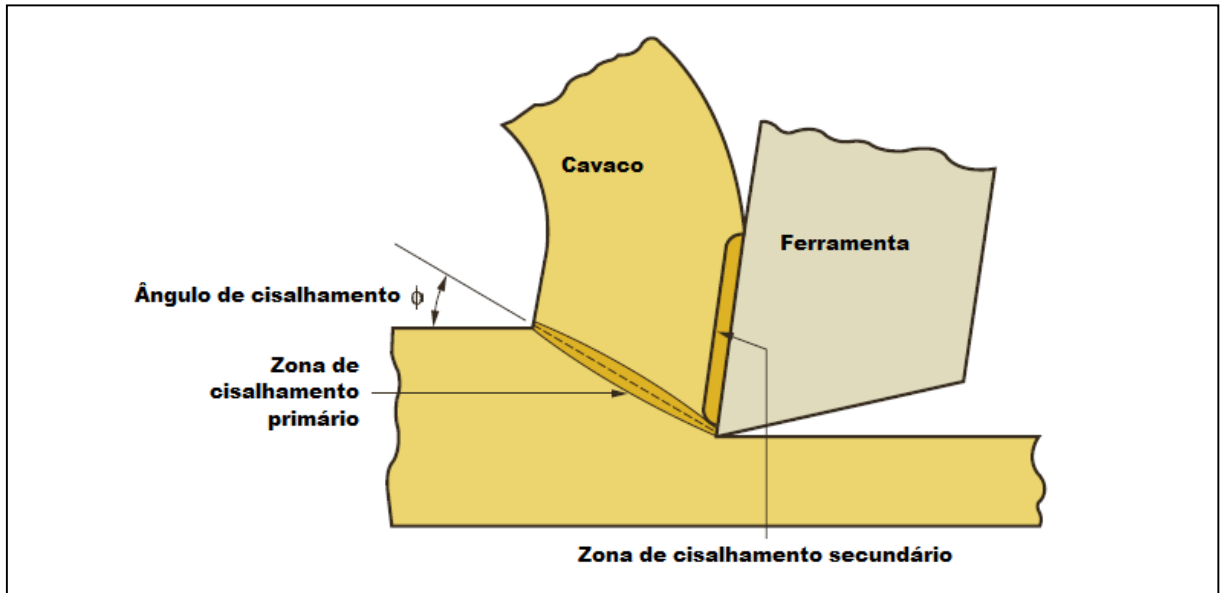
2.4 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO

O processo de corte dos metais é basicamente um cisalhamento do material localizado no local de contato deste com a aresta da ferramenta de corte. O movimento relativo entre a ferramenta e o material induz à deformação (chamada de deformação primária), provocando a formação do cavaco. O cavaco formado passa sobre a superfície de saída da ferramenta e recebe deformação adicional (chamada de deformação secundária) (ASM METALS HANDBOOK 2004; GROOVER, 2012).

A formação do cavaco possui participação direta nas variáveis do processo de usinagem, como desgaste de ferramenta, esforços de corte, temperatura durante a usinagem e penetração do fluido de corte. O cisalhamento do material durante o processo de usinagem ocorre no chamado plano de cisalhamento e o ângulo formado entre esse plano e a direção de corte é denominado ângulo de

cisalhamento (ϕ) (DINIZ et al., 2014). A figura 22 mostra as zonas de cisalhamento, assim como o ângulo de cisalhamento.

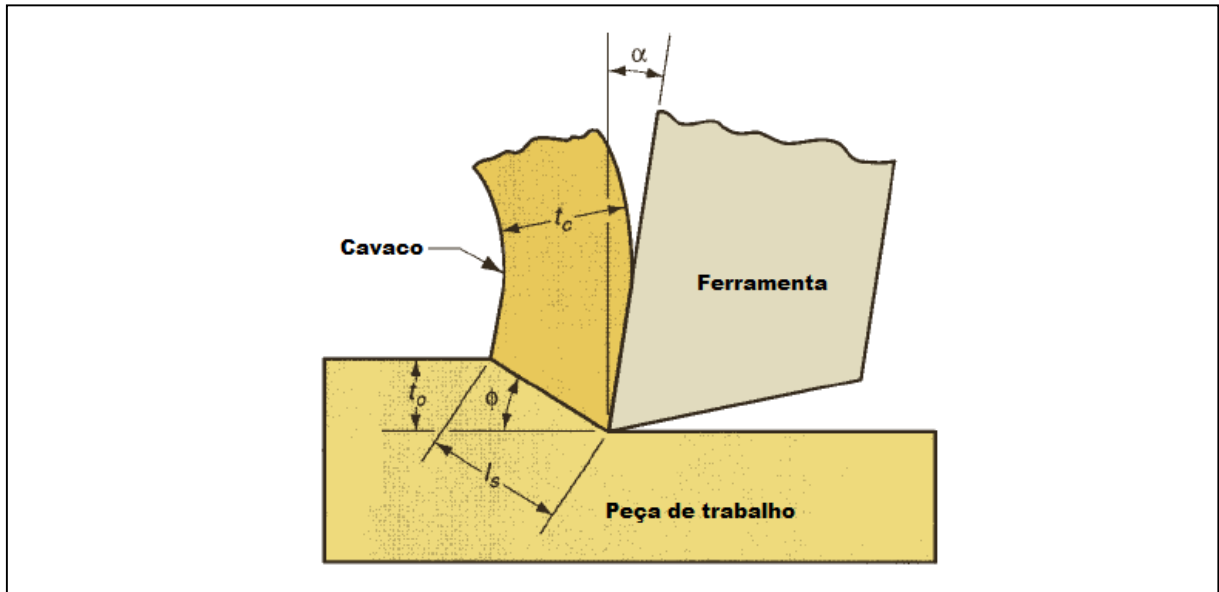
Figura 22 – Zonas de cisalhamento e ângulo de cisalhamento



Fonte: Adaptado de GROOVER (2012).

O ângulo de saída da ferramenta possui influência direta na formação do cavaco, tendo em vista que este é responsável pela formação do ângulo de cisalhamento. Quanto menor esse ângulo, maior a deformação do cavaco e menor o ângulo de cisalhamento. Conseqüentemente, maior será a razão entre a espessura do cavaco depois de formado (t_c) e a espessura do cavaco antes de formado (t_0). Para tal relação t_c / t_0 é dado o nome de grau de recalque, evidenciada na figura 23.

Figura 23 – Vista do plano ortogonal de corte



Fonte: Adaptado de GROOVER (2012).

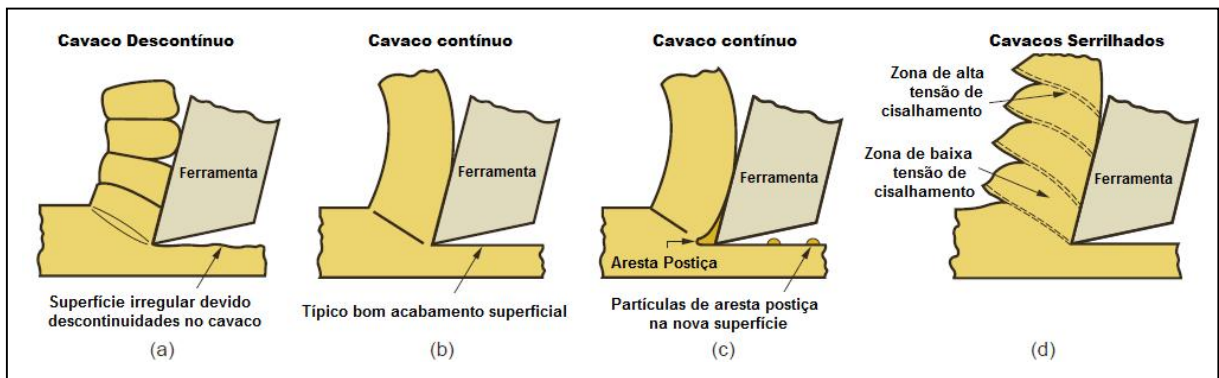
As etapas de formação de cavaco em condições normais de usinagem são: Recalque Inicial, Deformação e Ruptura, Deslizamento das Lamelas e Saída do Cavaco (FERRARESI, 1970; MACHADO et al., 2009; DINIZ et al., 2014), e são detalhadas conforme segue:

- a) **Recalque Inicial:** Decorrente da penetração da cunha da ferramenta no material da peça, uma porção deste (ainda unido à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.
- b) **Deformação e Ruptura:** Uma deformação elástica seguida de deformação plástica ocorre sobre o material recalcado, o aumento das tensões dá início ao deslizamento do material sobre a superfície de saída da ferramenta.
- c) **Deslizamento das Lamelas:** Com a continuidade do processo mecânico de corte haverá uma ruptura parcial ou completa do cavaco na região de cisalhamento. O tipo de formação desse cavaco (contínuo ou descontínuo) dependerá das características do material e dos parâmetros de usinagem, como avanço e velocidade de corte.
- d) **Saída do Cavaco:** Devido ao movimento relativo entre ferramenta e peça, este provoca o escorregamento da porção de material deformada

e rompida (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta, gerando um processo cíclico até que a operação seja interrompida.

Quatro tipos básicos de cavaco podem ser distinguidos durante o processo de corte, ao qual são mostrados na figura 24 e detalhados na sequência (GROOVER, 2012).

Figura 24 – Tipos de cavacos formados em operações de usinagem: (a) descontínuo, (b) contínuo, (c) contínuo com aresta postiça e (d) serrilhado.



Fonte: Adaptado de GROOVER (2012).

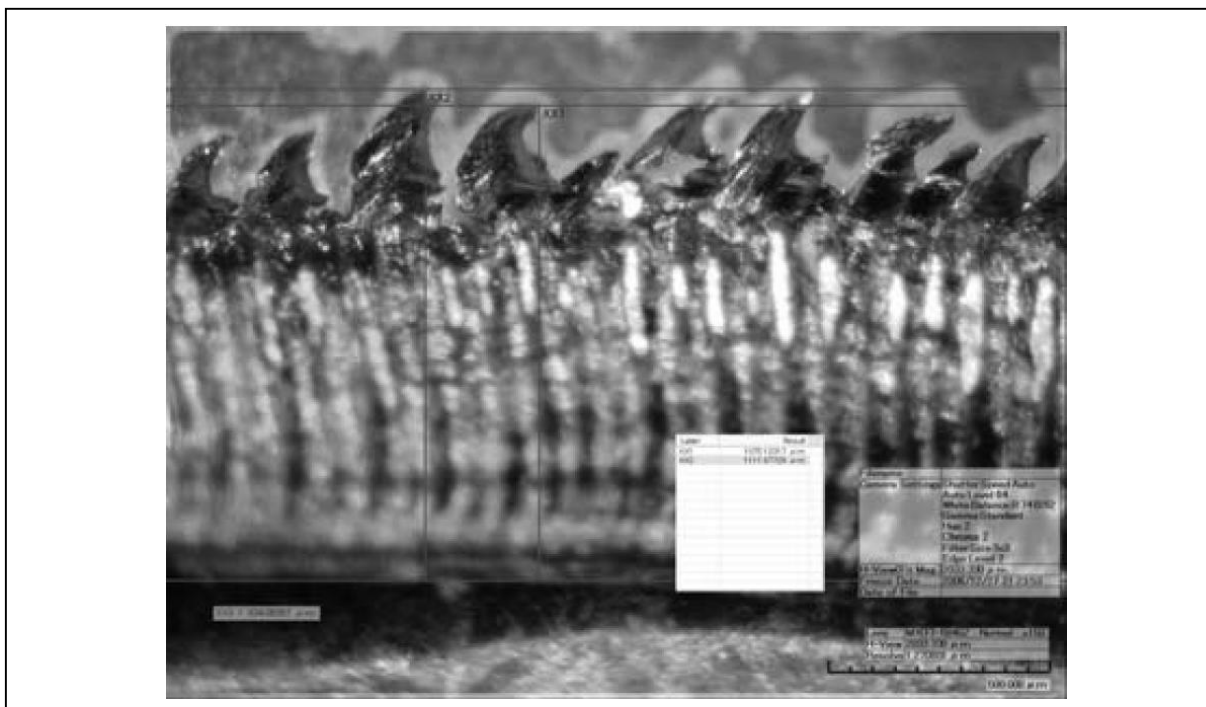
- Cavaco Descontínuo:** Proveniente da usinagem utilizando baixas velocidades de corte em materiais relativamente frágeis (por exemplo, ferros fundidos). Tende a conferir uma textura irregular à superfície usinada. O alto atrito com ferramentas, o alto avanço e a profundidade de corte promovem a formação desse tipo de cavaco.
- Cavaco Contínuo:** Proveniente da usinagem utilizando altas velocidades e baixas profundidades de corte em materiais dúcteis. Geralmente resulta em um bom acabamento superficial e é estimulada por um baixo coeficiente de atrito.
- Cavaco Contínuo com Aresta Postiça:** Proveniente da usinagem utilizando baixas e médias velocidades de corte em materiais dúcteis. O atrito entre a ferramenta e o cavaco gera aresta postiça de corte. Grande parte desta aresta postiça é levada com o cavaco. As porções de aresta postiça que não são carregadas com o cavaco e que já tenham sido

removidas da aresta da ferramenta ficam incrustadas na superfície de trabalho recém-criada.

- d) **Cavacos Serrilhados:** Também denominado "cisalhamento-localizado", este tipo de cavaco é semi-contínuo no sentido de possuir uma aparência de dentes de serra, que é produzida por uma formação de cavacos cíclicos e que alternam entre as zonas de alta e baixa tensão. Esse tipo de cavaco está associado a materiais de baixa usinabilidade, tais como ligas de titânio, superligas a base de níquel e aços inoxidáveis austeníticos, quando utilizadas altas velocidades de corte. No entanto, também é encontrado durante usinagem de aços quando são utilizadas altas velocidades.

A figura 25 mostra um cavaco típico de usinagem das ligas de níquel do tipo serrilhado.

Figura 25 – Extremidade de cavacos em forma de barbatana do Inconel 718



Fonte: XIAO et al. (2010).

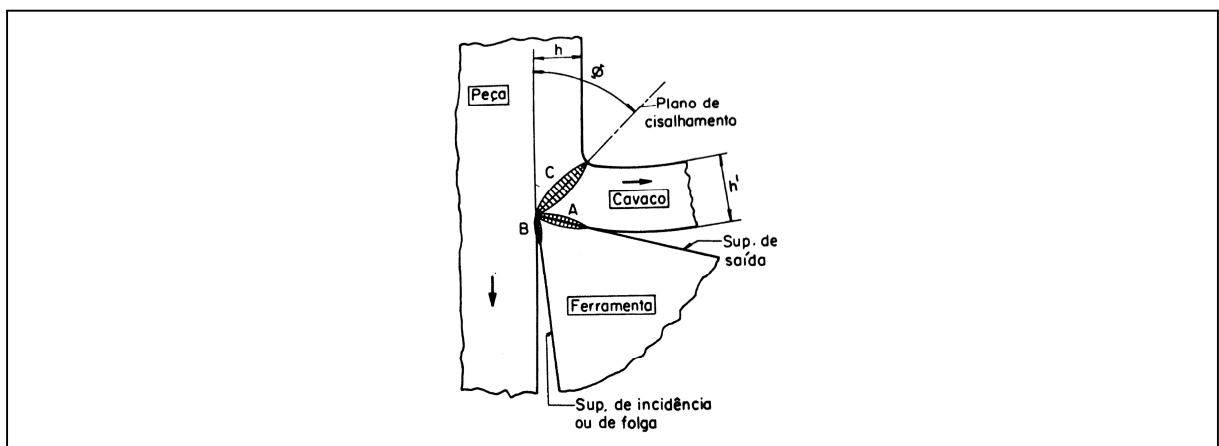
2.5 MEIOS LUBRIFRIGERANTES

Um fluido de corte é qualquer líquido ou gás que é aplicado diretamente à operação de usinagem para melhorar o desempenho de corte (GROOVER 2012). Além de remover o calor e reduzir o atrito gerado durante o corte, os fluidos possuem ainda outras funções, como reduzir a temperatura da peça, reduzir as forças de corte e, conseqüentemente, a potência necessária para execução da atividade, proporcionando maior estabilidade dimensional da peça e melhoria do acabamento superficial.

Durante o processo de formação do cavaco, três são as regiões onde ocorre formação de calor: região do cisalhamento (deformação plástica do material), região de interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (deslizamento do material gera atrito nesta região) e região de contato entre a ferramenta e a superfície da peça que fora usinada (avanço da ferramenta sobre a peça gera o atrito) conforme aponta a figura 26. O direcionamento do óleo lubrificante sobre cada uma dessas três regiões é capaz de reduzir as fontes de calor geradas por pelo menos duas razões distintas (FERRARESI, 1977).

Nas regiões de interface do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e região de contato entre a ferramenta e a superfície da peça usinada, a aplicação do óleo lubrificante reduz o coeficiente de atrito. Já na região do cisalhamento, o fluido de corte faz com que o cavaco se afaste mais rapidamente da superfície de saída da ferramenta, diminuindo assim, o tempo de transmissão de calor.

Figura 26 – Fontes de calor na formação do cavaco



Fonte: FERRARESI (1977).

Machado et al. (2009) disserta sobre problemas em relação à aplicação de óleo lubrificante sobre a região de cisalhamento (também denominada sobre-cabeça) e na região de contato do cavaco com a superfície de saída da ferramenta.

Segundo os autores, a região de contato do cavaco com a superfície de saída da ferramenta se mostra inadequada quando existem cavacos emaranhados, pois estes impedem o acesso do fluido à região de interesse, porém, seria um dos mais utilizados decorrentes da rigidez de muitos sistemas de aplicação (mais antigos). Já a aplicação sobre o plano de cisalhamento, os autores relatam que esta possui desvantagem ao ser aplicada no sentido contrário ao do movimento do cavaco, sendo então recomendada em aplicações sob alta pressão. Contudo, essa recomendação é inconsistente, tendo em vista que os autores também citam que ela apresenta resultados distintos para materiais distintos (diferentes resultados em ligas de níquel e ligas de titânio).

Os fluidos de corte são frequentemente utilizados em operações de corte de metais para reduzir as forças de corte, fornecendo lubrificação e reduzindo as temperaturas da ferramenta, da peça e da máquina. Isso aumenta a vida da ferramenta e melhora o acabamento superficial e é necessária a identificação do fluido de corte correto para ter uma operação de corte eficiente. Durante as operações de torneamento de ligas de níquel, onde a remoção da temperatura é essencial, a escolha de um fluido de corte baseada no resfriamento ou lubrificação é a principal consideração. Líquidos solúveis à base de água são utilizados em altas taxas de remoção de metal (THELLAPUTTA et al., 2017).

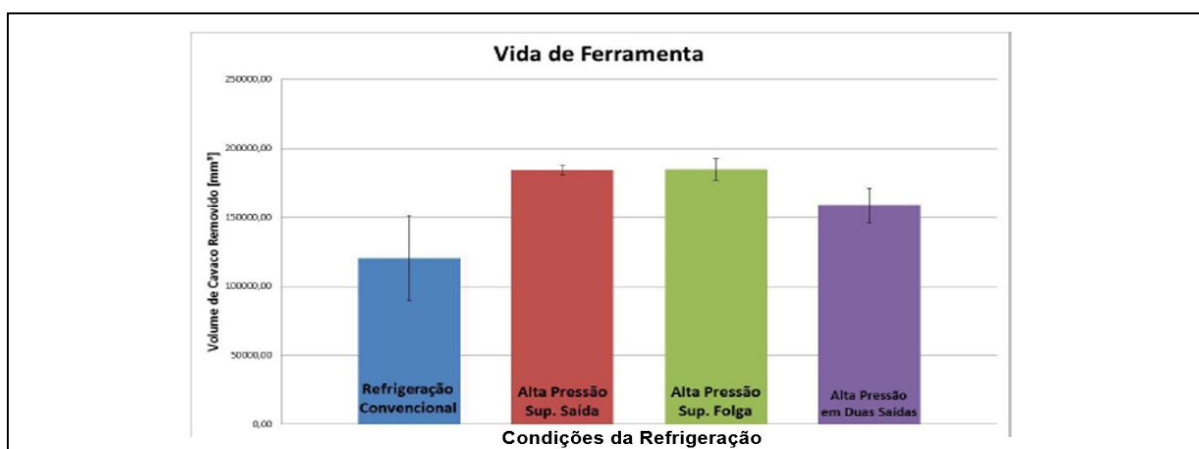
Existem duas categorias gerais de fluidos de corte: os refrigerantes e os lubrificantes. Os refrigerantes são fluidos projetados para reduzir os efeitos do calor na operação de usinagem, carregando consigo o calor que é gerado e reduzindo, assim, a temperatura da ferramenta e da peça de trabalho. Eles têm um efeito limitado sobre a quantidade de energia térmica gerada no corte e são mais eficazes em operações onde aplicadas velocidades de corte relativamente altas, nas quais a geração de calor e altas temperaturas são problemáticas e afetam a usinabilidade do material (GROOVER, 2012).

Os fluidos de corte do tipo lubrificante são mais eficazes quando aplicados em operações com velocidades de corte mais baixas. Quando aplicados em operações com velocidades de corte mais altas, tendem a perder a sua eficácia, pois

o óleo vaporiza antes mesmo de que possa lubrificar a região de interesse. Além disso, o movimento do cavaco também pode impedir que o fluido atinja a interface cavaco-ferramenta. Nessas operações, a formação de aresta postiça é retardada. Embora o objetivo principal de um lubrificante seja reduzir o atrito, também reduz a temperatura na operação através de vários mecanismos. Primeiro, o calor específico e a condutividade térmica do lubrificante ajudam a remover o calor da operação reduzindo as temperaturas. Em segundo lugar, com a redução do atrito, o calor gerado também é reduzido.

A utilização de fluido com grande vazão (25 l/min) durante usinagem da liga de níquel 625, utilizando inserto de meta duro revestido, proporciona maior capacidade de refrigeração e é capaz de evitar a formação do desgaste de entalhe, promovendo assim, aumento da vida da ferramenta (aproximadamente 50%). Exceto com a divisão da vazão em duas superfícies distintas da ferramenta (folga e saída), a aplicação de fluido com maior vazão produz resultados semelhantes de aumento da vida útil. Ainda, o fluido em alta pressão, mesmo dividido nas duas superfícies, apresenta resultados superiores àqueles obtidos com uso de refrigeração com vazão convencional (4 l/min) (MAGRI, 2015). Os valores encontrados para a vida da ferramenta de metal duro durante usinagem da liga de níquel 625 em diferentes condições de refrigeração são mostrados no gráfico 4.

Gráfico 4 – Vida de ferramenta em termos de volume de cavaco removido para as diferentes condições de refrigeração



Fonte: MAGRI (2015).

2.6 SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL

Após a Segunda Guerra Mundial, surgiu o termo “superliga” usado para descrever um grupo específico de ligas desenvolvidas para uso em turbo compressor e motores de turbinas de aeronave, que demandavam alto desempenho em temperaturas elevadas (SINGH, 2016). Dentre as características principais dessa liga se destacam: excelente resistência mecânica, resistência à deformação térmica, boa estabilidade da superfície e resistência à corrosão ou à oxidação.

As chamadas superligas contêm 38–76% de Ni e até 28% de cada um dos elementos Cr, Co e Mo podem ser divididas em três classes distintas. A solução sólida reforçada, endurecível por precipitação e dispersão de óxidos (ODS) contêm pouco ou nenhum Al, Ti ou Nb. As ligas endurecíveis por precipitação contêm alta porcentagem de Al e Ti, e algumas contêm Nb. Já as ligas ODS contêm uma pequena quantidade de partículas finas de óxido (0,5 a 1% de Y_2O_3) e são produzidas por técnicas de metalurgia do pó (REED, 2006; YOUSSEF, 2015).

O grupo das superligas a base de níquel reforçado por soluções sólidas são preferidas, quando a característica observada se refere a condições de manufatura, devido à facilidade de soldabilidade e usinabilidade. Cobalto, ferro, cromo, molibdênio, tungstênio, vanádio, titânio e alumínio são todos endurecedores de solução sólida em níquel. As ligas endurecidas por precipitação têm valores de resistência à ruptura consideravelmente alta em comparação com as ligas reforçadas por solução sólida. O mesmo ocorre em relação ao Limite de escoamento. Para as aplicações mais exigentes de temperatura elevada, as superligas resistentes à precipitação são preferidas (YOUSSEF, 2015).

As ligas de níquel são classificadas em diferentes categorias de acordo com seu comportamento quando submetido às operações de usinagem, conforme mostrado na tabela 2 (NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992).

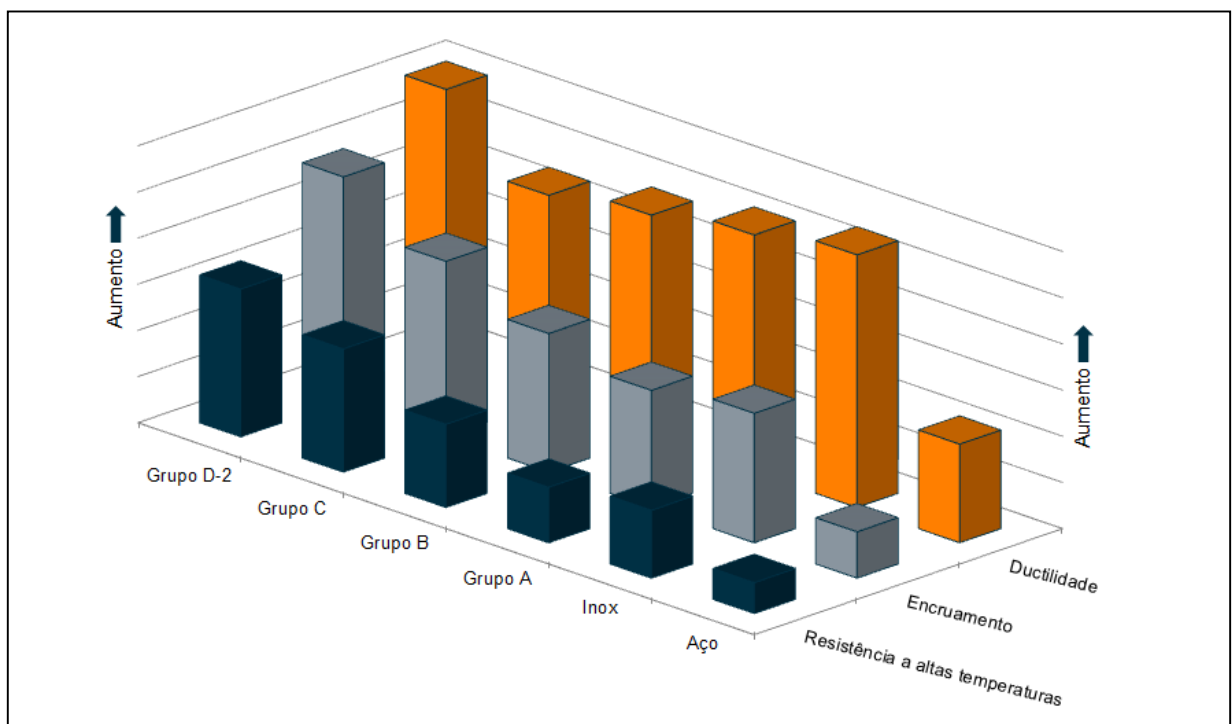
Tabela 2 – Ligas de Níquel agrupadas de acordo com as características de usinagem

Grupo	Características do Grupo	Liga	UNS #	Ni	Cu	Fe	Cr	Mo	Co	Al	Ti	Nb	Other	
A	Ligas contendo essencialmente níquel para produto químico alcalino cáustico e aplicações elétricas. Menor resistência ao encruamento entre as ligas de níquel. Exibe comportamento gomoso na condição recozida; endurecevel somente pelo trabalho a frio, que fornece a melhor condição para a usinagem.	Liga 200	N02200	99.6									C 0.08	
		Liga 201	N02201	99.6										C 0.01
		Liga 205	N02201	99.6										Mg 0.04, C 0.04
		Liga 212		97.0										Mn 2.0, C 0.05
		Liga 222		99.5										Mg 0.075
B	Ligas de níquel-cobre e níquel-ferro para ácido sulfúrico e corrosão e aplicações elétricas. Ter maior resistência ao encruamento do que as ligas do Grupo A. A maioria das ligas não pode ser endurecida por tratamento térmico e a melhor usinagem é obtida em condições de tração a frio ou a frio e alívio de tensão.	Liga 400	N04400	66.5	31.5									
		Liga 401	N04401	42.5	55.5	0.3								Mn 1.6
		Liga 450	C71500	30.0	68.0	0.7								Mn 0.7
		Liga 36	K93600	36.0		64.0								
		Liga K	K94610	29.5		53.0				17.0				
	Liga MS 250		19.0		76.0			3.0			1.4			
C	Principalmente ligas de níquel-cromo e níquel-ferro-cromo para aplicações de corrosão ácida e de alta temperatura. Similar nas propriedades mecânicas aos aços inoxidáveis austeníticos, exceto para maior resistência a altas temperaturas. Essas ligas são melhor usinadas nas condições de tração a frio ou de tração a frio e alívio de tensão	Liga 600	N06600	76.0		8.0	15.5							
		Liga 690	N06690	61.0		9.0	29.0							
		Liga 601	N06601	60.5		14.0	23.0				1.4			
		Liga 825	N08825	42.0	2.2	30.0	21.5	3.0				1.0		
		Liga DS		37.0		41.0	18.0							
		Liga 330	N08330	35.5		44.0	18.5							
		Liga 20	N08020	35.0	3.5	37.0	20.0	2.5					0.6	
		Liga 800	N08800	32.5		46.0	21.0							
		Liga 800HT	N08811	32.5		46.0	21.0							
		Liga 802	N08802	32.5		46.0	21.0							
		Liga 270	N02270	99.98										
		Liga K-500 (unaged)	N05500	65.5	29.5	1.0					2.7	0.6		
	Liga 75	N06075	80.0		19.5									
	Liga 86		64.0		25.0	10.0							Ce 0.03	
D-1	Este grupo consiste em um número limitado de ligas endurecidas por envelhecimento na condição de solução recozida. Essas ligas são usinadas com relativa facilidade.	Liga 301	N03301	94.0						4.4	0.6			
		Liga 925	N09925	42.0	2.2	32.0	21.0	3.0		0.3	2.1			
		Liga 902	N09902	42.5		49.0	5.3			0.5	2.4			
D-2	Este grupo consiste de ligas do Grupo D-1 na condição endurecida por envelhecimento, e outras ligas endurecíveis envelhecimento, tanto na solução recozida e endurecida, quanto em algumas ligas altamente fortalecidas por solução. Eles contêm soluções para aumentar a resistência e precipitados abrasivos que dificultam a usinagem. Essas ligas devem ser desbastadas na condição de recozimento e acabadas após o envelhecimento. Uma contração de tamanho de até cerca de 0,07% ocorre com o envelhecimento, o que deve ser contemplado na usinagem de desbaste.	Liga 301 (envelhecido)	N05500	94.0						4.4	0.6			
		Liga K-500 (envelhecido)	N05500	65.5	29.5	1.0					2.7	0.6		
		Liga 902 (envelhecido)	N09902	42.5		49.0	5.3				0.5	2.4		
		Liga 81		67.0		30.0					0.9	1.8		
		Liga G-3	N06985	44.0	2.0	19.5	22.0	7.0	2.5				0.3	W .05
		Liga HX	N06002	47.5		18.5	21.8	9.0	1.5					
		Liga 625	N06625	61.0		2.5	21.5	9.0						3.6
		Liga 925 (envelhecido)	N09925	42.0	2.2	32.0	21.0	3.0			0.3	2.1		
		Liga 716	N07716	57.5		19.2	8.2					1.4	3.4	
		Liga 725	N07725	57.0		9.0	20.8	8.2				1.4	3.4	
		Liga MA 754	N07754	77.5		1.0	20.0				0.3	0.5		Y 0.0.6
		Liga 80A	N07080	76.0			19.5				1.4	2.4		
		Liga 718	N07718	54.0		18.5	18.0	3.0					5.1	
		Liga PE11		39.0		34.0	18.0	5.2			0.6	2.3		
		Liga 706	N09706	42.0		36.5	16.0					1.8	3.1	
		Liga PE16		43.5			16.5	3.3			1.2	1.2		
		Liga C-276	N10276	57.0		5.5	15.5	16.0	1.2					W 3.8, Mn 0.5
		Liga 751	N07751	73.0		7.0	15.5				1.1	2.5	1.0	
		Liga X-750	N07750	73.0		7.0	15.5				0.7	2.5	1.0	
		Liga 901	N09901	42.5		34.0	12.5	5.8				2.9		
		Liga 617	N06617	52.0		1.5	22.0	9.0	12.5		1.2			
Liga 263	N07263	51.0		36.0	20.0	5.8	20.0		0.5	2.2				
Liga 105		54.0			15.0	5.0	20.0		4.7	1.3				
Liga 90	N07090	60.0			19.0		15.5		1.5	2.5				
Liga PK50		58.0			19.5	4.25	13.5		1.4	3.0				
Liga 115		60.0			14.2	3.2	13.2		4.9	3.8				
Liga B-2	N10665	66.0		1.0	0.5	27.5			0.1	0.1				
Liga 903	N19903	38.0		41.5			15.0		0.9	1.4	3.0			
Liga 907	N19907	38.4		42.0			13.0		0.0	1.5	4.7			
Liga 909	N19909	38.4		42.0			13.0		0.0	1.5	4.7			
E	Uma liga especial projetada para ser usinagem livre para alta produção de parafusos em máquinas automáticas.	Liga R-405		66.5	31.5	1.2							Mn 1.1, S 0.04	

Fonte: NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE (1992).

A importância relativa à ductilidade, encruamento e resistência a altas temperaturas afeta diretamente a usinabilidade, no entanto, muda de categoria para categoria de acordo com as propriedades mecânicas de cada material. Essa alteração é ilustrada no gráfico 5, em que as ligas de Níquel têm esses fatores comparados com aço inoxidável e aço carbono. Conforme pode ser visto, à medida em que se move do aço carbono o aço inoxidável e depois para as ligas de níquel, a ductilidade, o encruamento e a resistência a altas temperaturas aumentam gradualmente, o que resulta em uma usinagem mais difícil e, correspondentemente, condições alteradas de usinagem (NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992).

Gráfico 5 – Ligas de níquel agrupadas de acordo com propriedades mecânicas crescentes e resultante aumento da dificuldade de usinagem



Fonte: Adaptado de NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE (1992).

De acordo com Rodrigues e Hassui (2007), os elementos que compõem as superligas a base de níquel possuem as seguintes funções:

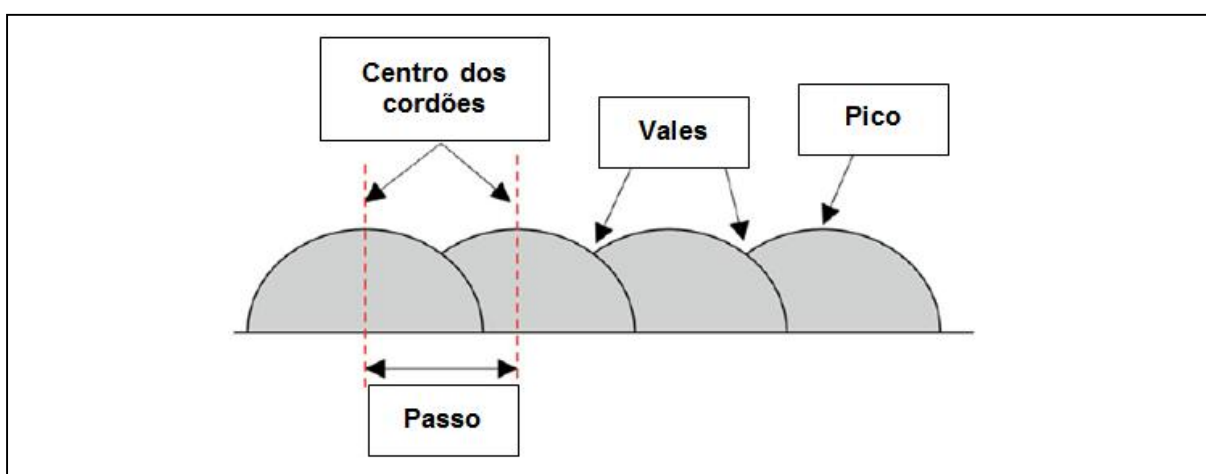
- a) **Cromo (Cr):** Responsável pelo aumento da resistência à corrosão e à oxidação, além da redução da usinabilidade devido a sua forte presença na formação de carbonetos.

- b) **Ferro (Fe):** A presença desse elemento tende a reduzir a resistência à oxidação devido à baixa escala de aderência de oxido (elemento desoxidante).
- c) **Molibdênio (Mo):** Responsável pelo aumento da resistência mecânica e a corrosão em altas temperaturas. Forma carbonetos resistentes à abrasão.
- d) **Nióbio (Nb):** Responsável por moderar o endurecimento da liga quando associado ao alumínio e ao titânio.
- e) **Tântalo (Ta):** Responsável por aumentar a resistência da liga. Possui efeito prejudicial na usinabilidade, pois propicia a formação de carbonetos.
- f) **Carbono (C):** É um elemento intersticial de aumento de resistência do níquel e possui grande influência na formação de carbonetos.
- g) **Manganês (Mn):** Responsável pela redução da plasticidade de forma moderada. Aumenta a capacidade de endurecimento do material.
- h) **Silício (Si):** Responsável pelo aumento da fluidez e favorecimento da fratura a quente da liga.
- i) **Fósforo (P):** É um elemento indesejável para a liga por conta da sua capacidade de fragilização em temperaturas médias.
- j) **Enxofre (S):** Mesma característica obtida com o fósforo.
- k) **Alumínio (Al):** Responsável pelo maior potencial de endurecimento da liga. Sua presença fragiliza o material. Responsável pela formação de precipitados junto do titânio, bem como o Al_2O_3 , que possui alta resistência à corrosão em temperaturas elevadas.
- l) **Titânio (Ti):** Responsável por moderar a capacidade de endurecimento da liga, quando substitui em volume o alumínio. Presente na formação de carbonetos.
- m) **Cobalto (Co):** Responsável por aumentar a resistência em altas temperaturas. Diminui a usinabilidade. Reduz a solubilidade do alumínio e do titânio na matriz CFC austenítica. Possui ainda maior solubilidade para o carbono do que o níquel. Para uma quantidade equivalente de carbono, menos carbonetos estarão presentes na matriz γ .

2.7 A LIGA DE NÍQUEL 625 EM FORMA DE REVESTIMENTO METÁLICO

Conforme explicado por Farayibi et al. (2015), o processo de revestimento metálico é caracterizado por um perfil de picos associado ao processo de execução. Tal característica de pico é uma consequência dos sucessivos cordões e também do passo utilizado no processo. Essas características são mostradas na figura 27.

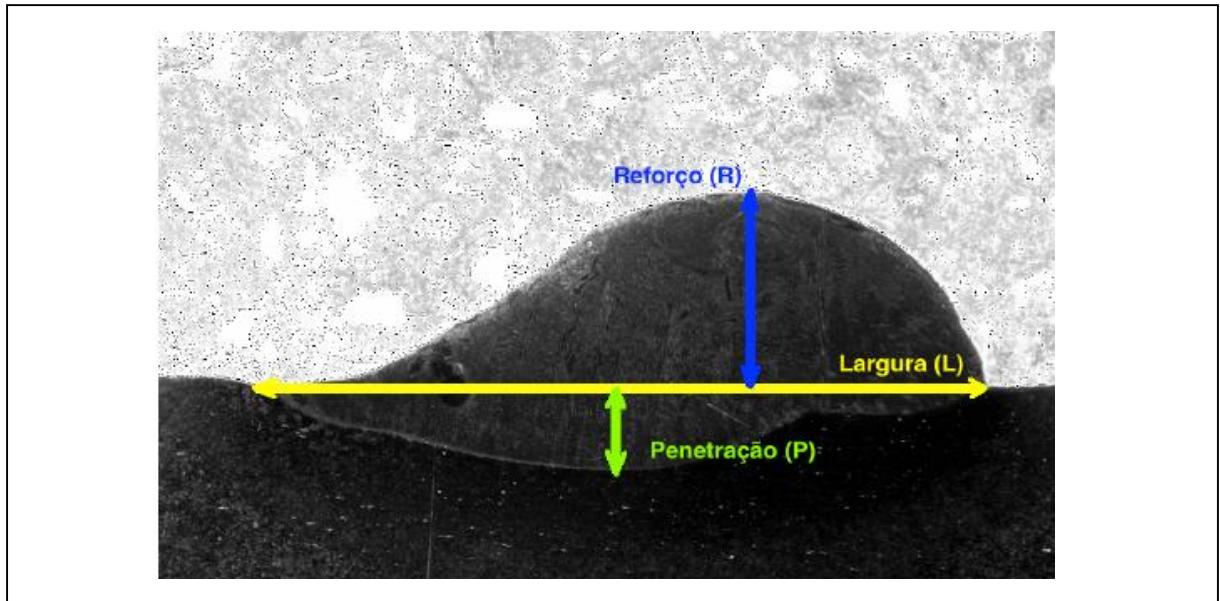
Figura 27 – Representação esquemática do perfil de solda de revestimento



Fonte: Adaptado de FARAYIBI et al. (2015).

A morfologia dos filetes que compõe esse revestimento possui características que devem ser controladas durante o seu processamento, de modo que não sejam capazes de interferir no processo de torneamento com a existência de corte interrompido. Uma morfologia inadequada seria capaz de gerar a quebra abrupta do inserto, decorrente dos choques mecânicos existentes nesse processo. Dessa forma, as variáveis existentes durante o processo de revestimento devem ser rigorosamente controladas para que as diferenças entre picos e vales gerados durante o processo de deposição atendam tal requisito. As componentes desse filete estão dispostas na figura 28.

Figura 28 – Determinação da largura, penetração e reforço



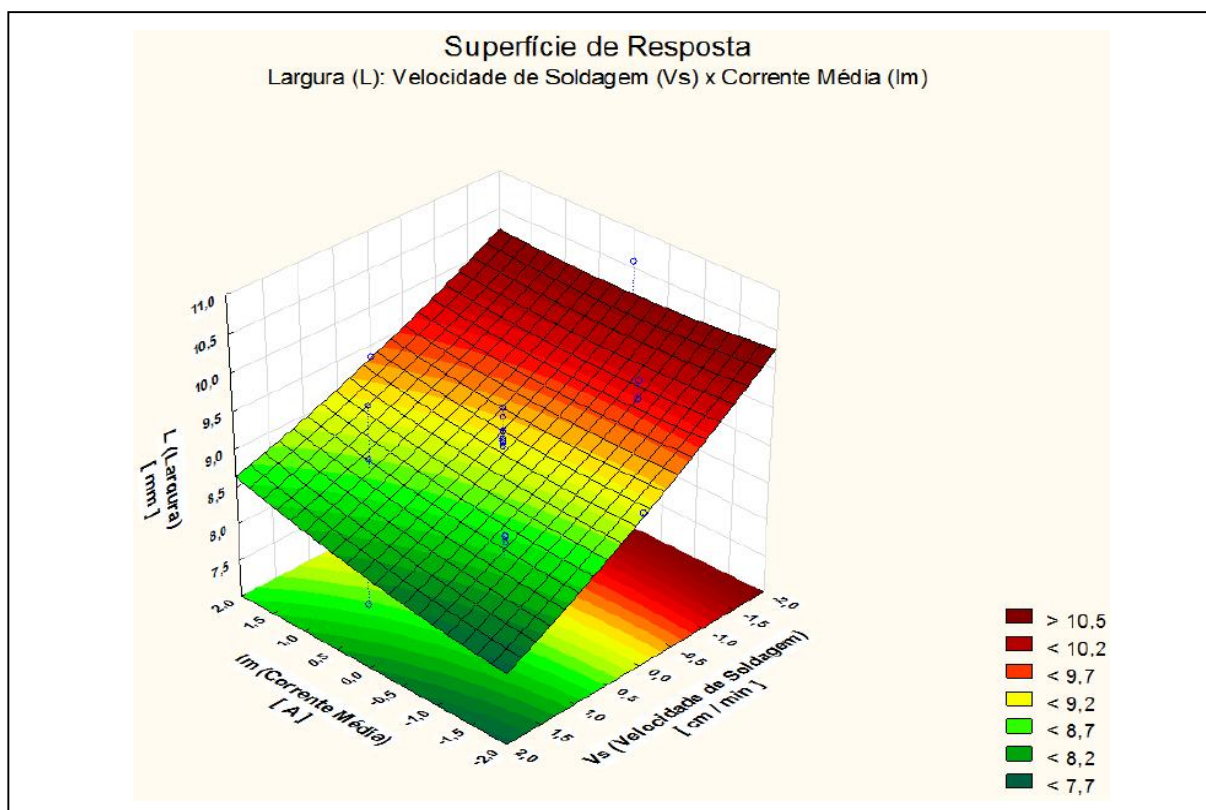
Fonte: DEITOS FILHO (2016).

A morfologia dos cordões foi estudada por Deitos Filho (2016), na qual os resultados obtidos revelam que as variáveis que influenciam a altura de reforço são:

- a) Velocidade de soldagem (V_s) e velocidade de alimentação (V_a). Não há interações entre variáveis que influenciam a altura de reforço.
- b) A mínima altura de reforço é alcançada utilizando-se do valor mínimo de velocidade de alimentação (V_a) e velocidade de soldagem.
- c) O único fator que influencia a largura do cordão é a velocidade de soldagem (V_s).
- d) Não há interações entre variáveis que influenciam a largura do cordão.

A interação entre as variáveis estudadas pelo autor é mostrada no gráfico 6.

Gráfico 6 – Ligas de níquel agrupadas de acordo com propriedades mecânicas crescentes e resultante aumento da dificuldade de usinagem



Fonte: DEITOS FILHO (2016).

Conforme pode ser verificado no gráfico, a utilização de menores velocidades de soldagem e menores correntes média foram responsáveis pela formação de menores larguras de cordão do revestimento.

2.8 USINAGEM DAS SUPERLIGAS

Os requisitos para qualquer material de ferramenta de corte utilizado para a usinagem de ligas à base de níquel devem incluir: boa resistência ao desgaste; elevada resistência e tenacidade; alta dureza a quente; boa resistência ao choque térmico; e estabilidade química adequada a temperaturas elevadas (EZUGWU et al., 1999).

As ligas à base de níquel e à base de cobalto possuem várias características em comum que acarretam em altos custos durante o processo de usinagem. Os fatores que afetam as propriedades mecânicas/usinagem de superligas são:

- a) Alta a resistência mecânica em altas temperaturas.
- b) Alta resistência ao cisalhamento.
- c) Microestrutura com carbonetos duros que tornam as superligas abrasivas.
- d) Encruamento durante o corte de metal.
- e) Baixa difusividade térmica, o que leva a borda da ferramenta a altas temperaturas de corte.
- f) Formação de cavaco resistente e contínuo durante o corte de metal.

Alguns fatores importantes que caracterizam as ligas de níquel devem ser compreendidos para que a usinagem possa ser bem sucedida. Todos têm uma estrutura austenítica que transmite propriedades de alta ductilidade e encruamento. As ligas de níquel endurecidas por solução sólida também contêm partículas abrasivas de titânio e alumínio. Sua condutividade térmica é muito menor que a do aço e muitos outros materiais que contribuem à baixa usinabilidade (NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992).

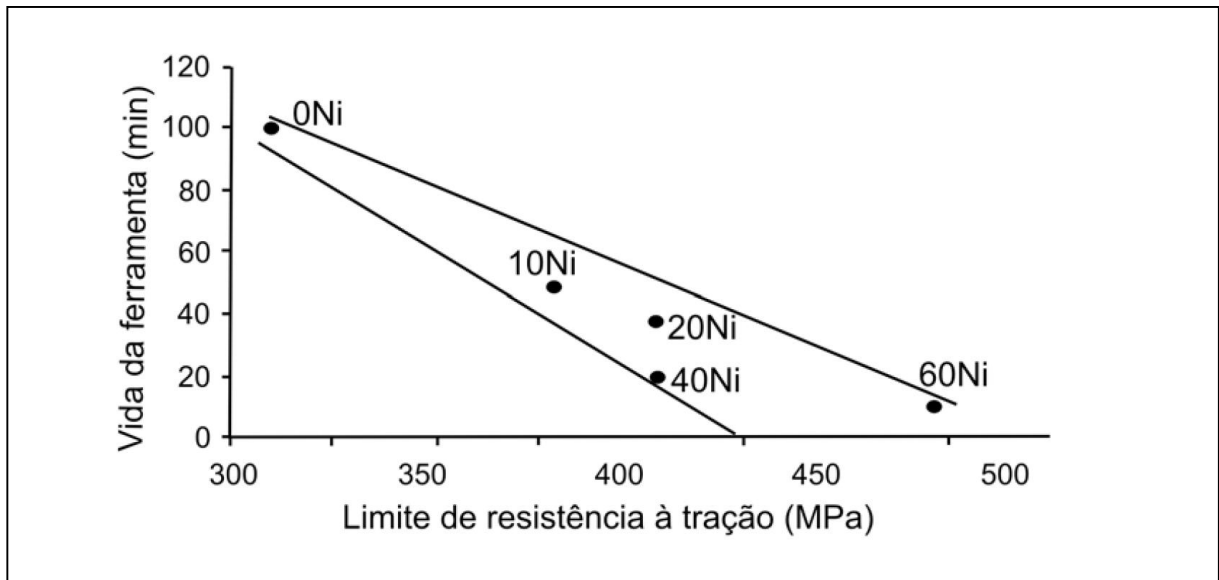
As superligas a base de níquel colocam extrema pressão mecânica e térmica na aresta de corte, forçando a redução das velocidades de corte e avanço. Usinagem de superligas de base de níquel gera aresta postiça, encruamento, desgaste por difusão e entalhe, além de gerar um desgaste abrasivo bastante agressivo na ponta do inserto. A velocidade de corte é um parâmetro com extrema relevância que afeta a vida da ferramenta, em que, aumentando a velocidade de corte, conseqüentemente aumenta a sua temperatura, o que pode diminuir a vida da ferramenta (THELLAPUTTA et al., 2017; EZUGWU et al., 2005).

O teor de níquel é responsável diretamente por aumentar o desgaste da ferramenta, o que acaba por afetar sua usinabilidade. Durante o processo ocorre o aumento da temperatura na região de cisalhamento primária. A vida da ferramenta é reduzida em decorrência do aumento do limite de resistência à quente provocado pela adição desse material.

Os gráficos 7 e 8 ilustram o comportamento da vida da ferramenta de metal duro revestido em relação ao aumento do limite de resistência, decorrente do aumento do teor de níquel. Já o gráfico 9 ilustra a evolução do desgaste de flanco

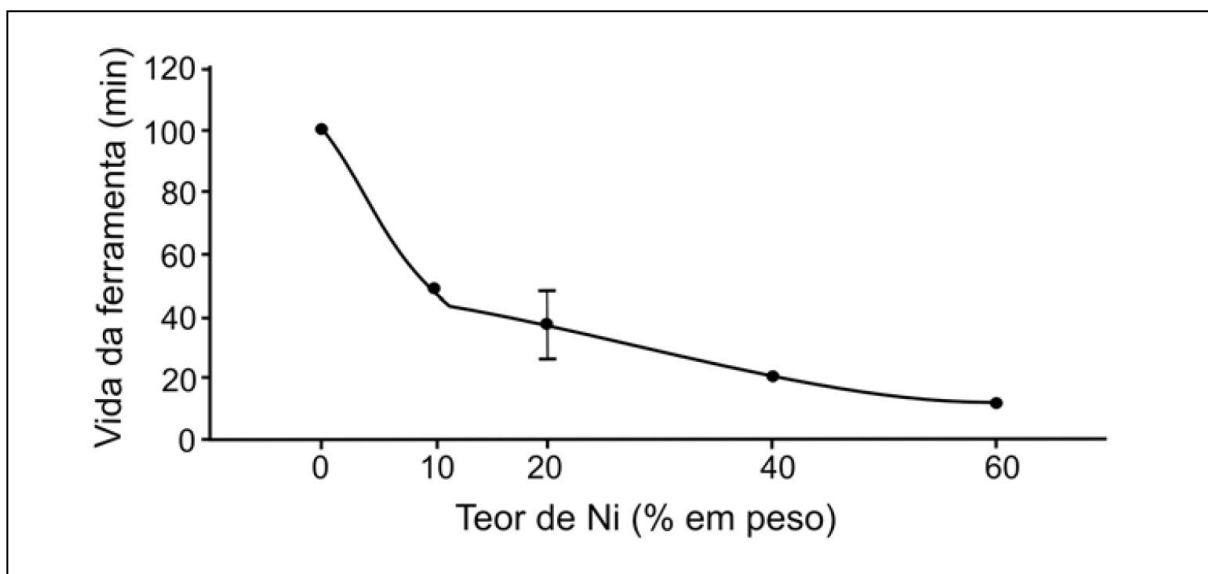
observado em função do tempo para diferentes teores de níquel utilizando a mesma ferramenta (MARQUES, 2007).

Gráfico 7 – Tempo de vida da ferramenta de metal duro revestido em função do limite de resistência à tração em 350 °C



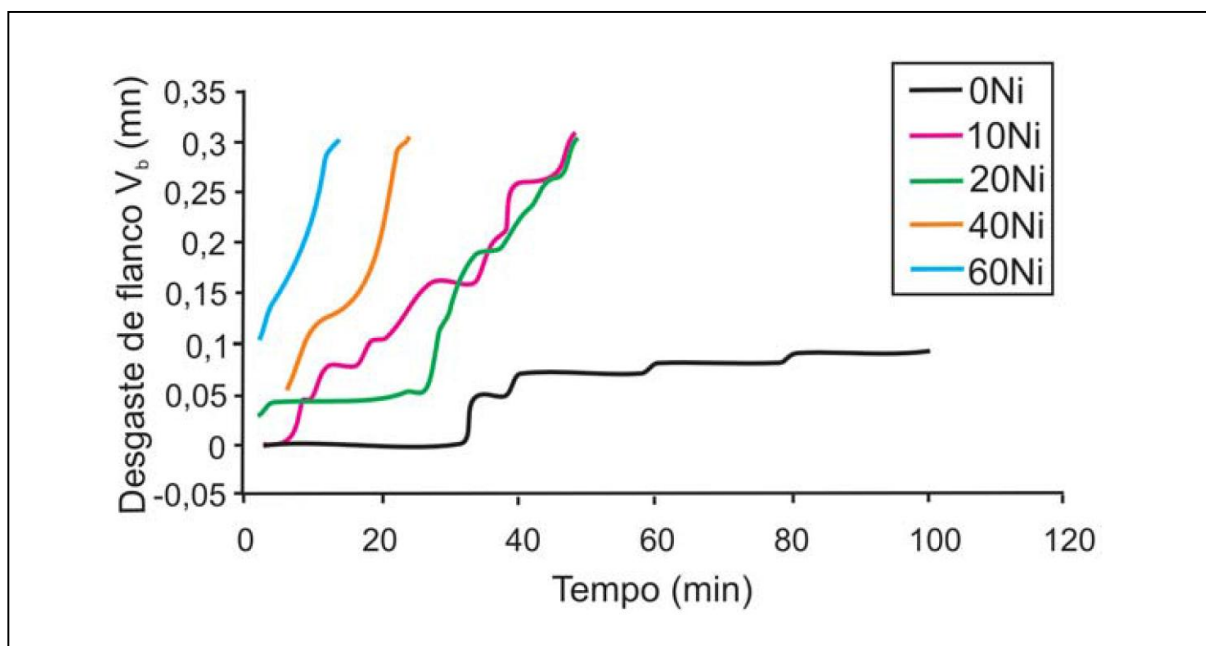
Fonte: MARQUES (2007).

Gráfico 8 – Tempo efetivo de corte da ferramenta de metal duro revestido em função do teor de níquel para desgaste de flanco (VB_B) igual a 0,3 mm



Fonte: MARQUES et al. (2007).

Gráfico 9 – Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro revestido em função do tempo

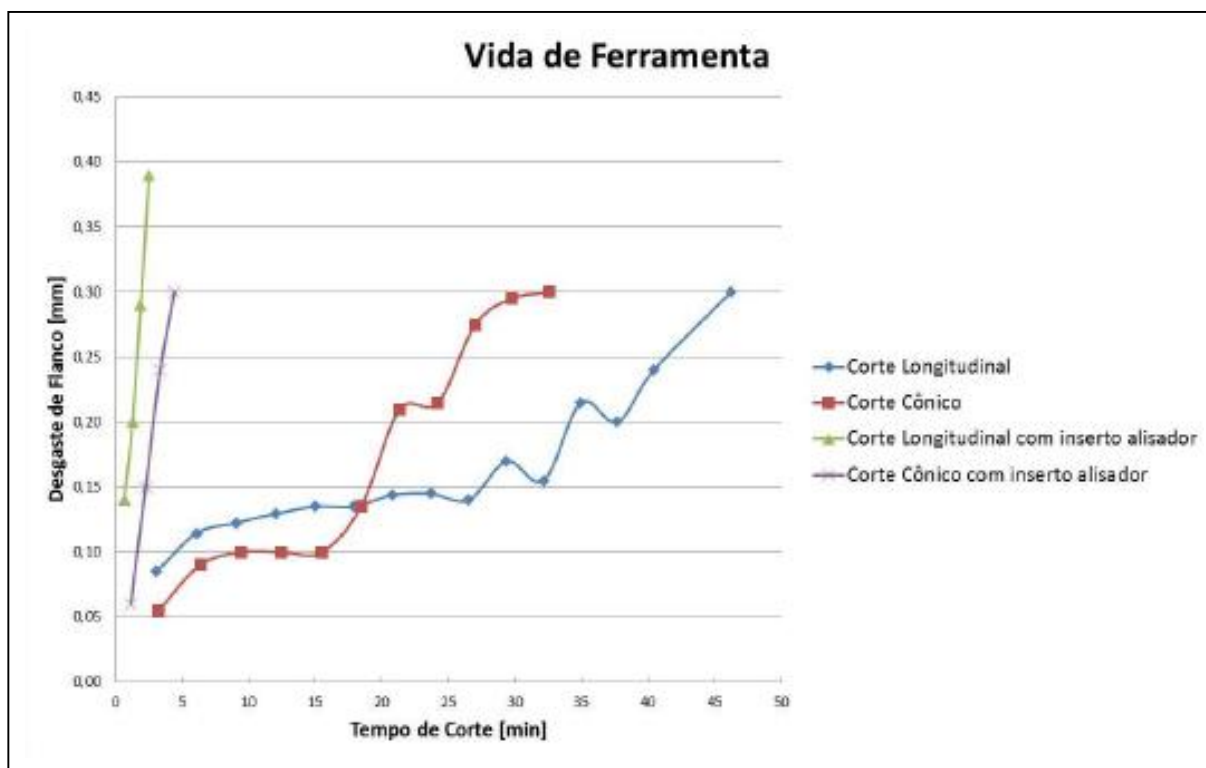


Fonte: MARQUES (2007).

Diferentes estratégias são utilizadas para usinagem de superligas. A utilização de insertos alisadores para proporcionar melhores acabamentos superficiais e a utilização de estratégia de corte cônico para proporcionar maior vida útil aos insertos foram testadas por Magri (2015) durante a usinagem da liga de níquel 625 em operação de torneamento. Nesses testes, os insertos utilizados foram de metal duro revestidos e, segundo o autor, a utilização de insertos alisadores apresentou elevado desgaste de flanco em ambas estratégias de corte (cônica e longitudinal).

Já o uso dos insertos sem a característica de alisador apresentou menor desgaste de flanco (em relação ao tempo de usinagem). Porém, a estratégia de corte cônico não foi capaz de proporcionar redução do desgaste de flanco. O gráfico 10 demonstra a evolução desse desgaste em relação ao tempo de corte.

Gráfico 10 – Comportamento do desgaste de flanco ao longo do tempo para diferentes estratégias de usinagem



Fonte: MAGRI (2015).

O mesmo desgaste de flanco foi analisado fazendo uso de diferentes pressões de óleo lubrificante com diferentes direcionamentos, na qual esta foi capaz de proporcionar maior vida útil às ferramentas; contudo, apresentando pouca diferença quanto ao direcionamento desta refrigeração (gráfico 11).

Com a utilização de refrigeração convencional, o principal tipo de desgaste observado foi de entalhe causado pelo "serrilhamento" que a rebarba provoca na camada de cobertura da ferramenta na altura da profundidade de corte. Já com a utilização de refrigeração em alta pressão, a maior eficiência da refrigeração proporcionou maior resistência ao "serrilhamento" causado pela rebarba encruada, sendo capaz de evitar o desgaste de entalhe. Nesse caso, o principal tipo de desgaste foi o de flanco e o mecanismo de desgaste foi o "attrition" (MAGRI, 2015).

Gráfico 11 – Comportamento do desgaste de flanco ao longo do tempo para diferentes condições de refrigeração

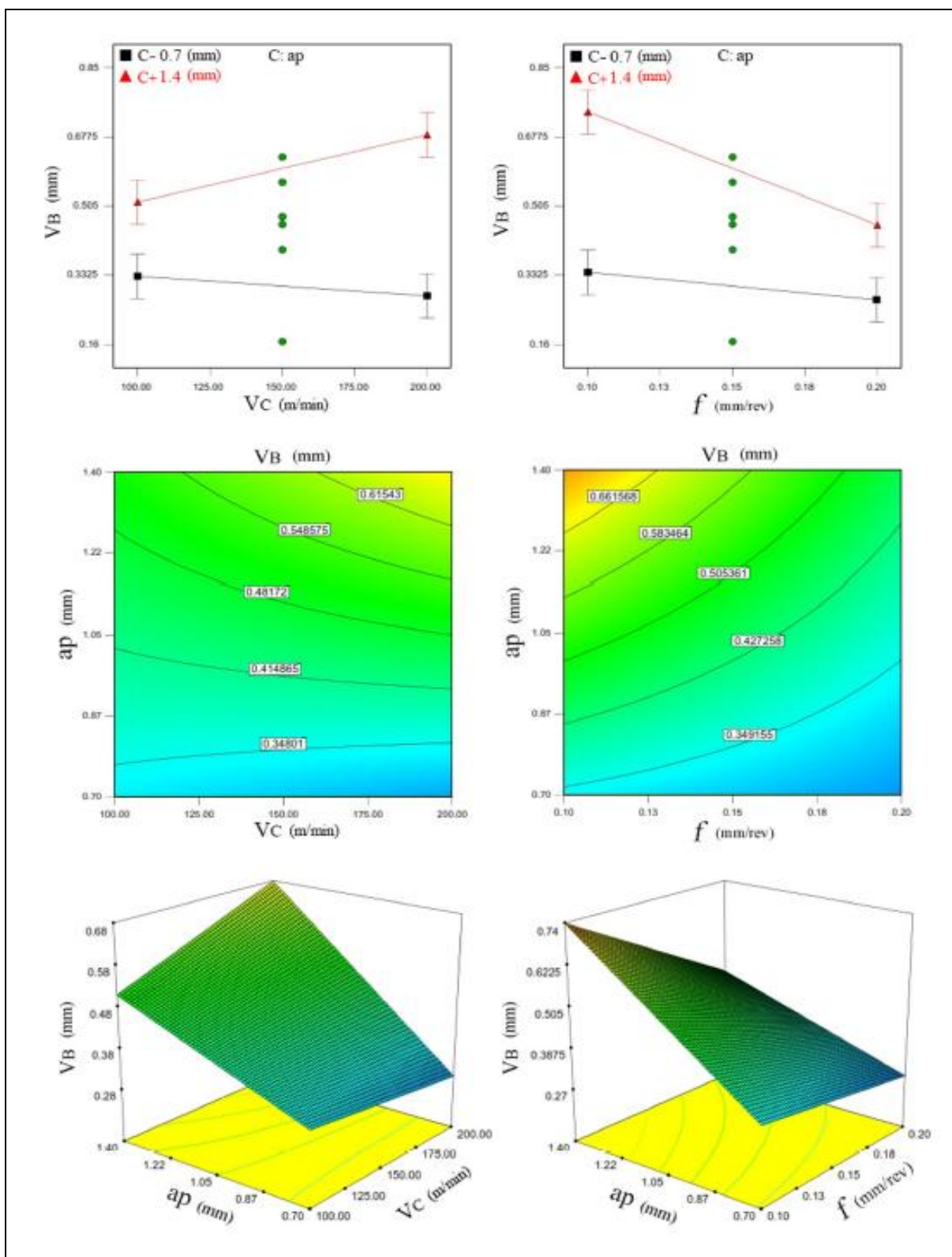


Fonte: MAGRI (2015).

O mesmo desgaste de flanco durante usinagem da liga de níquel 625 foi analisado em insertos de cerâmica Al_2O_3 reforçado com *whisker*. JAHANBAKHS et al. (2016) analisaram a influência de variação dos parâmetros, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte na evolução desse desgaste (figura 29).

A propagação do desgaste do flanco diminui com o aumento do avanço, enquanto o aumento da profundidade de corte é responsável por intensificar esse desgaste, principalmente com o aumento da velocidade de corte. Segundo os autores, o lascamento na altura da profundidade de corte foi o principal mecanismo que influenciou no desgaste das ferramentas nas condições testadas nesta pesquisa.

Figura 29 – As variações no tamanho do desgaste do flanco em diferentes interações dos parâmetros de corte



Fonte: JAHANBAKSH et al. (2016).

Uma usinagem bem sucedida de ligas de níquel depende de que o encruamento da superfície seja evitado. Tal encruamento ocorre quando o material se deforma plasticamente em contato com a ponta da ferramenta. Essa camada endurecida se torna de difícil remoção nos passes subsequentes ou nas operações seguintes. As técnicas que minimizam tal encruamento incluem o uso de arestas de corte afiadas, utilização de ângulos positivos e máquinas com potência e *setup* rígido o suficiente para evitar ao máximo a vibração durante o processo. Os valores de avanço e a profundidade de corte devem ser estabelecidos de modo que, no seguinte passo, a camada previamente encruada possa ser plenamente removida (NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992; TRENT, 2000).

A matriz austenítica das superligas faz com que elas endureçam rapidamente durante usinagem. As bordas abrasivas do cavaco dificultam o escoamento e manipulação, além de que sua característica de alta ductilidade tende à formação de aresta postiça, já que formam cavacos longos que empastam sobre a superfície de saída da ferramenta. Portanto, são características que levam ao desgaste acelerado do flanco, cratera e entalhe, justificando assim sua baixa usinabilidade (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

Marques (2007) afirma que o aumento do teor de Níquel é o responsável pela má usinabilidade quando o parâmetro de avaliação é a vida útil da ferramenta, sendo a adesão e o arrancamento de partículas da ferramenta (substrato) e cobertura o principal meio de desgaste quando utilizado ferramentas de metal duro revestido.

Como as superligas apresentam alta resistência ao corte e encruamento em elevadas temperaturas, maior quantidade de calor é gerado na zona de cisalhamento e, em decorrência disso, um desgaste maior da ferramenta ocorre quando comparado aos mesmos parâmetros aplicados à maioria dos outros metais. Além disso, o fato de maior força ser necessária durante usinagem (cerca de duas vezes a força para torneamento de aço carbono de liga média), a geometria da ferramenta e a estabilidade e/ou rigidez do porta-ferramentas também são preocupações importantes para que seja atingida uma boa usinabilidade (DONACHIE e DONACHIE, 2002).

Baseando-se no fato de o desgaste de entalhe geralmente ocorrer a altura da profundidade corte, Zhuang et al. (2014) procederam com estudos de usinagem

do Inconel 718 utilizando insertos de cerâmica, ao qual afirmam, em seus resultados, que tal desgaste é gerado pela camada endurecida pelo trabalho resultante do processo de corte anterior (região encruada). Ainda, os autores citam que o controle da camada é responsável por proporcionar à ferramenta uma vida útil prolongada, tendo em vista que esse desgaste passa a ser melhor controlado.

Os estudos de Magri (2015) revelaram alguns resultados em busca da boa usinabilidade do Inconel 625 utilizando insertos de metal duro, conforme requisitos para esta avaliação já expostos por Diniz et al. (2014), Ferraresi (1977) e Groover (2012) que seguem:

- a) O corte cônico é capaz de evitar o desgaste de entalhe em insertos de metal duro, mas não é capaz de prolongar a vida útil da ferramenta;
- b) Melhores acabamentos superficiais podem ser atingidos com a utilização de inserto alisador no início da vida da ferramenta;
- c) O aumento da vida útil da ferramenta pode ser atingido com a utilização de refrigeração do processo com fluido em alta pressão;
- d) O direcionamento da refrigeração em alta pressão sobre a superfície de folga melhora a rugosidade superficial;
- e) A utilização de refrigeração em alta pressão sobre a superfície de folga da ferramenta é capaz de evitar o desgaste de entalhe;
- f) A maior eficiência da refrigeração em alta pressão promove maior resistência à camada de cobertura da ferramenta, o que permitiu evitar o desgaste de entalhe.

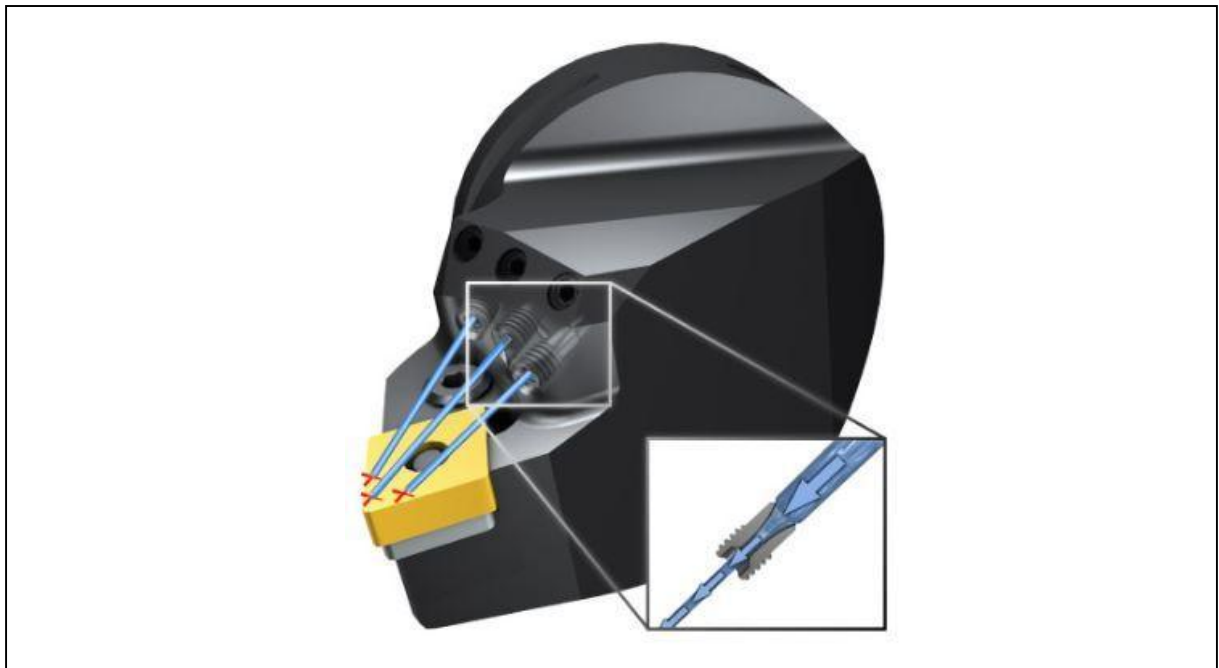
O uso de óleo lubrificante desempenha um papel importante na usinagem de superligas, sendo que a remoção da temperatura é essencial (THELLAPUTTA et al., 2017). Esses fluidos também são usados para usinagem com cerâmica, mas algumas cerâmicas não podem suportar choque térmico e requerem corte a seco. Normalmente, uma alta viscosidade proporciona a melhor vida da ferramenta, mas um fluido mais leve ajudará a fornecer escoamento de cavacos em pequenos furos profundos (NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992).

A baixa condutividade térmica das superligas a base de Níquel é uma das responsáveis por sua baixa usinabilidade (EZUGWU et al., 1999; EZUGWU et al., 2005). Em decorrência dessa característica, uma temperatura muito alta é gerada na

zona de corte. Estudos realizados por Narutaki et al. (1993) e Kitagawa et al. (1996) evidenciaram que, durante usinagem de Inconel 718 com insertos de cerâmica resfriado pelo sistema e pressão convencional, a temperatura na aresta de corte dos insertos de cerâmica pode atingir 1.300°C. Essa temperatura gera o desgaste por difusão e pode causar choques térmicos, fadiga e se tornam mais suscetíveis à abrasão. As vantagens mais significativas do uso de fluido de corte sob alta pressão são a quebra de cavacos e temperatura reduzida na zona de corte, o que proporcionam maior vida útil às ferramentas.

Ezugwu et al., (2005) descrevem que técnicas de resfriamento e lubrificação de alta pressão são eficientes recursos aplicados para atingimento do máximo desempenho das ferramentas de corte durante usinagem de superligas de base de níquel, minimizando a temperatura gerada na interface gerada entre a peça e a ferramenta. A figura 30 mostra o funcionamento de uma ferramenta com conceito de fornecimento de óleo lubrificante em alta pressão.

Figura 30 – Suporte de torneamento com bicos fixos direcionados à aresta de corte



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2010).

Ezugwu e Bonney (2004) encontraram em seus estudos um aumento de vida útil de até 740% dos insertos de metal duro revestidos com uso de óleo lubrificante em alta pressão (203 bar) durante usinagem da superliga 718. A

constatação é que a temperatura foi reduzida com uso de refrigerante sob altas pressões diretamente na interface de corte, minimizando os mecanismos de desgaste relacionados ao aumento da temperatura.

Como diferentes resultados foram encontrados em diferentes velocidades de corte (submetidos à mesma pressão de óleo lubrificante), os autores concluem que o desempenho da ferramenta tende a depender principalmente dos fenômenos de desgaste mecânico ocorridos durante o corte, gerados pela velocidade de corte aplicada. Também foi evidenciada uma redução das forças de corte, sugerindo que o jato de alta pressão penetra na sua interface, gerando um resfriamento eficiente, bem como a lubrificação. A redução do comprimento de contato da ferramenta-cavaco também reduz o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, reduz as forças de corte.

Courbon et al. (2009) constataram em seus experimentos executados em operação de torneamento também do Inconel 718 com insertos de metal duro, que o uso de refrigeração sob alta pressão demonstrou ser uma solução de lubrificação alternativa eficiente e que proporciona melhor quebra de cavaco, redução de forças de corte quando comparadas ao método de refrigeração convencional e grande melhora quando comparada ao corte a seco. Os resultados evidenciaram que essa técnica é capaz também de melhorar o acabamento superficial.

Mesmo sem considerar as combinações do diâmetro do bico com a pressão do óleo lubrificante, foi evidenciado que a utilização de um bocal com diâmetro de 0,6 mm e uma pressão de 78 MPa proporcionou melhora no acabamento superficial. Isso pode estar relacionado com a redução da formação de aresta postiça, que também foi evidenciada nessa configuração. Como sabido, o fenômeno é uma das causas responsáveis por prejudicar a rugosidade da superfície usinada.

Em estudos sobre a utilização de fluidos com alta pressão (11, 15 e 20,3 Mpa) em operação de acabamento em torneamento do Inconel 718 com $Al_2SO_3 + SiC_w$, Ezugwu et al. (2005) também evidenciaram que a aplicação de fluidos com alta pressão de até 15 MPa tende a aumentar a vida útil da ferramenta. No entanto, com a pressão de 20,3 MPa foi evidenciado surgimento acelerado de desgaste tipo entalhe. Esse desgaste pode ser consequência da erosão gerada pelo contato da aresta de corte da ferramenta com o óleo lubrificante de alta pressão.

Assim como ocorre nos insertos de metal duro (EZUGWU e BONNEY, 2004), as forças de corte e a rugosidade superficial encontrada durante a usinagem com os insertos de cerâmica também foram reduzidas quando comparadas com o uso de óleo lubrificante em condições convencionais. Porém, a rugosidade não possui relação com a pressão do óleo lubrificante, mas sim com o raio do inserto utilizado para usinagem (6 mm).

Em operações de desbaste em torneamento do Inconel 718 utilizando insertos de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$, Ezugwu e Bonney (2008) encontraram redução na vida útil da ferramenta conforme foi aumentada a pressão do óleo lubrificante utilizado durante a operação. Öjmertz e Oskarson (1999) corroboram com essas afirmações, embora tenham sido utilizadas pressões de óleo lubrificante superiores. Os valores de forças de corte, evolução do desgaste da ferramenta e rugosidade superficial evoluíram da mesma maneira em ambos os estudos, culminando na conclusão de que insertos $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ refrigerados com óleo lubrificante em altas pressões não são aplicadas para o Inconel 718.

Contrariando tais resultados, os estudos feitos por Vagnorius e Sørby (2011), durante a operação de faceamento em torno do Inconel 718, encontraram bons resultados com a utilização de insertos SiAlON. Os resultados sugerem que o aumento da vida útil da ferramenta pode ser obtida aplicando um resfriamento de alta pressão (20 MPa), quando o desgaste analisado é o de flanco. A dissipação de calor é mais rápida com maior velocidade do fluxo do fluido utilizando alta pressão, além da redução do comprimento do contato cavaco-ferramenta decorrente também da pressão aplicada. A combinação desses dois fatores leva a um resfriamento mais eficiente da aresta de corte, reduzindo assim, a intensidade dos processos de desgaste.

Em contrapartida, o resfriamento rápido pode gerar trincas térmicas, seguidas por micro lascas. Logo, esse efeito pode ocorrer, sobretudo, na região de profundidade de corte, onde o fluido possui contato direto com a zona de corte aquecida; o que poderia explicar o aumento observado (embora não muito significativo) no desgaste do entalhe. Ainda, os autores observaram que o desgaste de entalhe se mostrou mais intenso com a utilização de alta pressão de lubrificação (20 MPa), quando comparado com os resultados obtidos com o uso de pressão convencional.

Os resultados de Lima et al. (2011), ao analisar o desgaste dos insertos de cerâmica do Inconel 751 (superliga também do grupo D-2) em operação de torneamento, mostraram que os insertos de cerâmica SiAlON, $Al_2O_3 + SiCw$ e $Al_2O_3 + TiC$ o desgaste de entalhe (VB_N) foi o tipo de desgaste dominante, seguido pelo desgaste de flanco médio (VB_B) e pelo desgaste de ponta (VB_C). Segundo os autores, os insertos de cerâmica SiAlON não apresentaram desgaste de entalhe (VB_N), apresentando as maiores vidas das ferramentas em todos os testes. Para esse tipo de material o desgaste dominante foi o desgaste de flanco médio (VB_B), seguido pelo desgaste de ponta (VB_C). Já os mecanismos de desgaste predominante nesses insertos foram adesão, abrasão e difusão, devido às altas temperaturas geradas durante o corte.

Jianxin et al. (2005) relatam em seus resultados o uso de V_c abaixo de 80 m/min durante usinagem do Inconel 718 com insertos $Al_2O_3 + SiCw$, em torneamento e sem uso de fluido para lubrificação, na qual os desgastes de flanco médio (VB_B) e cratera foram inferiores quando comparados aos resultados encontrados com V_c mais altas (até 150m/min). Por conseguinte, as ferramentas apresentaram maior incidência ao desgaste de cratera (K_B e K_T) em altas velocidades.

Para usinagem do Inconel 625 Jahanbakhsh et al. (2016), em operação de torneamento sem uso de refrigeração, aplicaram insertos $Al_2O_3 + SiCw$ em diferentes velocidades de corte, ao qual evidenciaram que o desgaste de flanco diminui com o aumento do avanço. Já o aumento da profundidade de corte provocou efeito contrário, ou seja, o aumento desse tipo de desgaste. Na altura da profundidade de corte, os autores relatam o surgimento de eventuais lascamentos. Neste estudo, não há relatos sobre o desgaste de entalhe, característicos das ligas de níquel.

Também durante a operação de usinagem do Inconel 718 com insertos SiAlON com V_c , variando de 87 até 493 m/min e sem refrigeração, Xiao et al. (2010) realizaram estudos para verificar o impacto das rebarbas formadas na altura do *ap* sobre a caracterização dos desgastes ocorridos nas ferramentas. Segundo os autores, ainda sem a completa remoção das rebarbas existentes, já foi possível encontrar desgaste de entalhe na região do flanco do inserto. Os testes foram complementados com a usinagem do perfil cilíndrico com e sem a rebarba existente

(uma ferramenta foi inserida no processo somente para remoção da rebarba durante as etapas do processo). O desgaste de entalhe observado permaneceu fora da zona de corte, evidenciando a influência da rebarba em forma de dente de serra e do cavaco em forma de barbatana. Mas, sob carga de impacto periódica, o desgaste do entalhe é acelerado devido à microquebra.

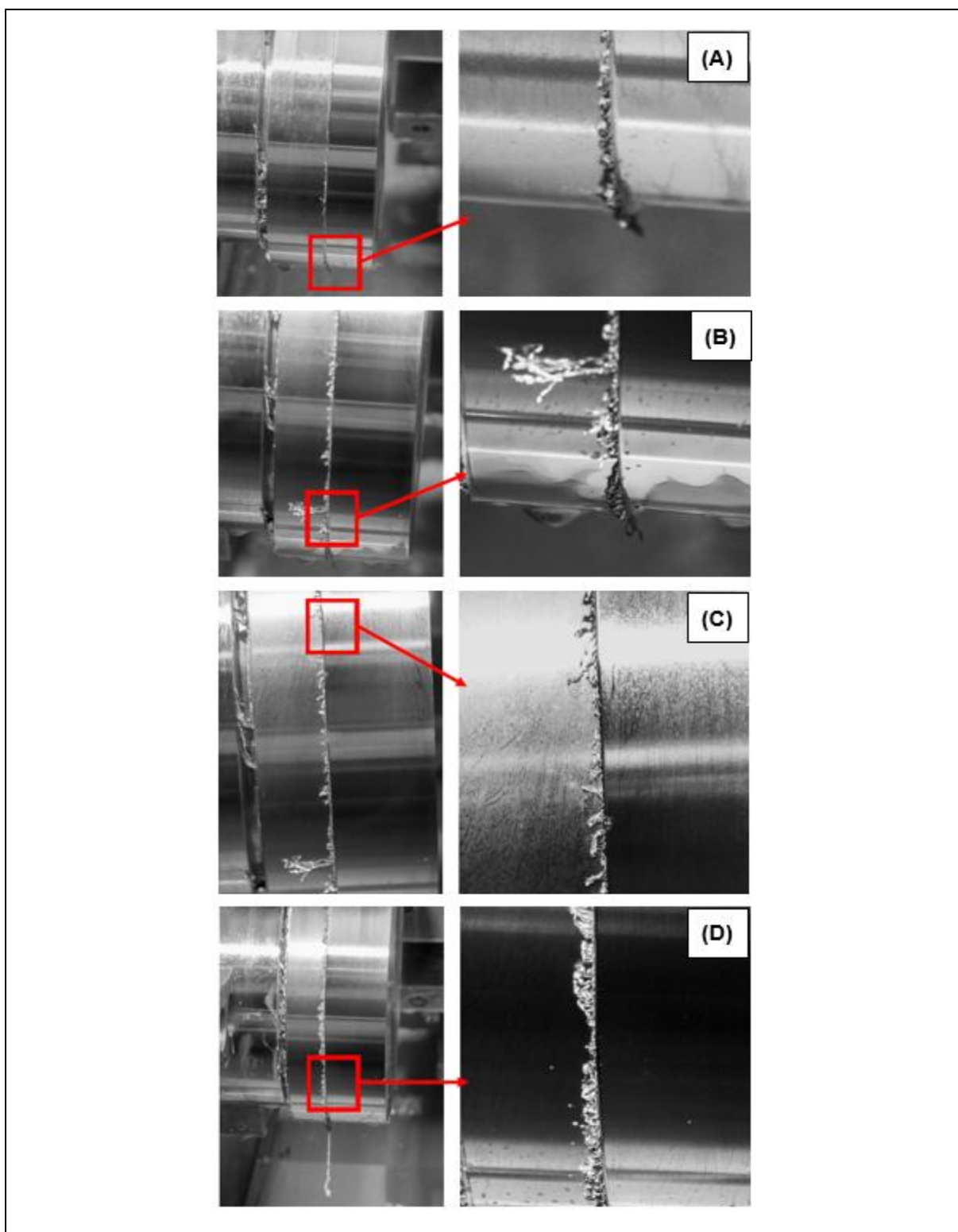
Jack (1986) aborda essa mesma ocorrência como sendo decorrente de cavacos altamente segmentados gerados durante a usinagem, o que significa que a borda do cavaco está em contato alternado com a ferramenta e gera tensões flutuantes.

As rebarbas formadas durante o processo de usinagem são responsáveis por gerar implicações, como: danos à geometria da peça, segurança do operador, manuseio e armazenagem, temperatura de usinagem, vida útil da ferramenta e alterações nas forças de corte (DINIZ et al., 2014). Essa força de corte gerada durante o processo, associada à ductilidade das ligas de níquel, é responsável pela formação da região encruada, gerando assim, uma rebarba bastante dura na altura da profundidade de corte, que por sua vez, é considerada uma das principais causas do desgaste de entalhe ocorrida na região da ferramenta e que permanece em contato com essa rebarba (ZHUANG et al., 2014).

Para analisar a influência da formação de rebarbas no desgaste das ferramentas durante a usinagem de Inconel 625, Magri (2015) pesquisou a influência da pressão da refrigeração em diferentes direcionamentos na superfície da ferramenta de metal duro revestido.

Com a utilização o fluido em pressão convencional, a rebarba gerada nos testes apresentava alta dureza decorrente do encruamento do material, o que gerou uma ação de “serrilhamento” sobre a camada de cobertura da ferramenta. Esse processo provocou a remoção precoce da camada de cobertura na região da profundidade de corte e conseqüente redução da vida da ferramenta. Com a utilização de alta pressão de fluido, a temperatura da ferramenta era reduzida devido à alta capacidade de refrigeração e, assim, a dureza da camada de cobertura não era drasticamente reduzida, fazendo com que ela fosse capaz de resistir ao “serrilhamento” causado pela rebarba. Com isso, além de otimizar a vida útil da ferramenta, foi possível evitar a existência do desgaste de entalhe. As rebarbas formadas nesses testes são mostradas na Figura 31.

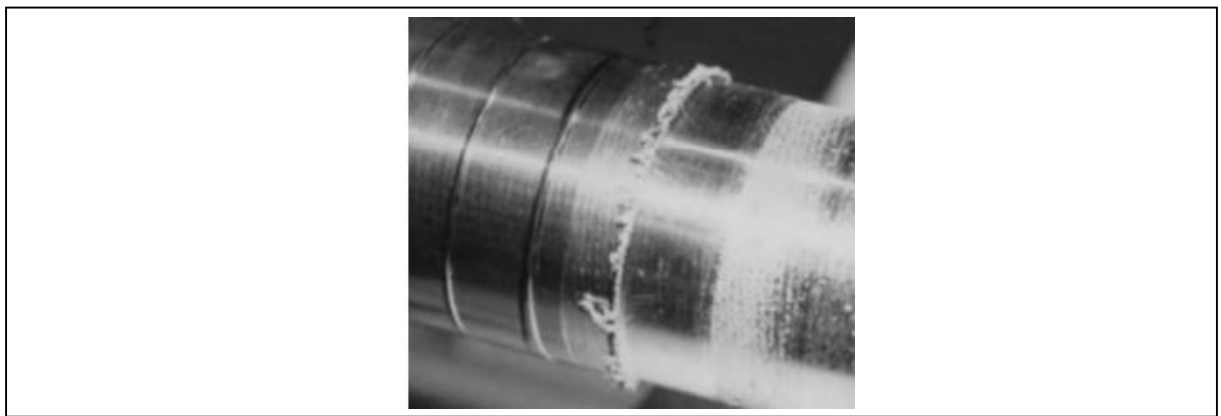
Figura 31 – Rebarbas presentes em diferentes condições de refrigeração: (a) convencional; (b) alta pressão superfície de saída; (c) alta pressão superfície de folga e (d) alta pressão em duas saídas



Fonte: MAGRI (2015).

Para Xiao e al. (2010), a afirmação de que o desgaste de entalhe se localiza na região da profundidade da aresta de corte negligencia a posição precisa desse desgaste. Durante a usinagem de Inconel 718 com ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN, os autores evidenciam que o desgaste não ocorre exatamente na região da profundidade de corte, mas sim na região de atuação das rebarbas e arestas que entram em contato com a superfície da ferramenta. As rebarbas provenientes desse processo podem ser vistas na figura 32.

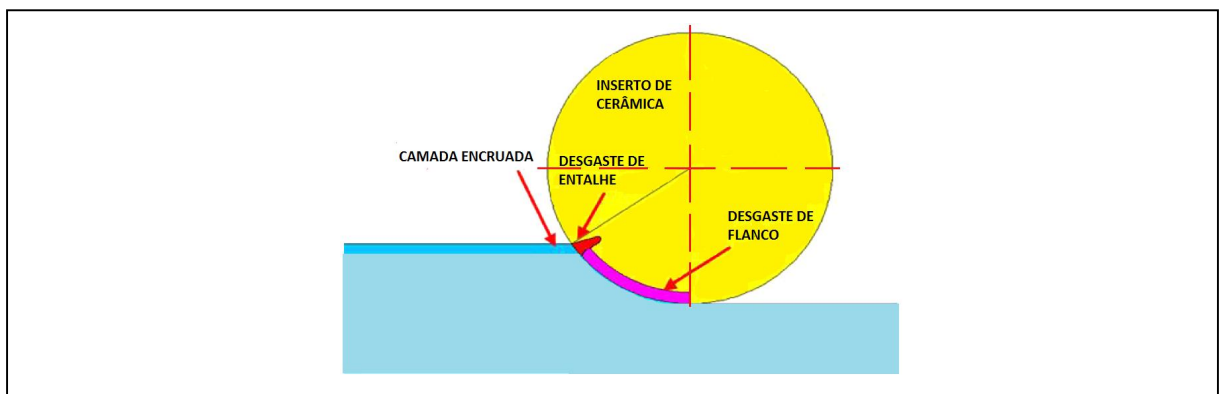
Figura 32 – Rebarbas formadas durante usinagem de Inconel 718



Fonte: Adaptado de XIAO et al. (2010).

Uma representação esquemática da região encruada, assim como os locais com incidência de desgaste de flanco ocorridos em um inserto redondo durante torneamento cilíndrico externo, é mostrada na figura 33.

Figura 33 – Representação esquemática dos mecanismos de desgaste em um inserto redondo



Fonte: Adaptado de ZHUANG (2014).

Os resultados obtidos por Lima (2012) relatam que o inserto SiAlON apresentou os melhores resultados de resistência ao desgaste de entalhe (VB_N) durante usinagem de Inconel 718 e 751. O desgaste dominante observado foi o de flanco médio (VB_B), seguido pelo desgaste de ponta (VB_C). O inserto $Al_2O_3 + SiC_w$ foi o que apresentou os menores valores de vida útil, no qual o desgaste predominante foi o de entalhe (VB_N), principalmente em baixas velocidades de corte ($V_c = 150$ m/min).

No mesmo estudo, com utilização de insertos de metal duro, foi evidenciado 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. O inserto com maior vida útil foi o metal duro com 6% de Co e revestido com TiAlN, sendo evidenciada a redução de todas as formas de desgaste quando comparados aos insertos sem revestimento. Nesse caso, o desgaste dominante foi o de flanco médio (VB_B), seguido pelo desgaste de ponta (VB_C).

2.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É possível encontrar em diferentes bases de dados um grande volume de pesquisas para usinagem de superligas de níquel; porém, a grande maioria enfoca a usinagem (torneamento e fresamento) da liga 718. Mesmo estas pesquisas seguindo uma vasta aplicação de técnicas, que margeiam itens como refrigeração (sólida e líquida), utilização de diferentes geometrias de insertos, insertos de cerâmica de diferentes classes e utilização de parâmetros bastante distintos, não há um consenso entre os pesquisadores sobre quais técnicas são mais indicadas em cada uma das operações e a quais classes de superligas elas se aplicam.

São encontrados resultados em que os pesquisadores ressaltam em satisfatórios em baixas velocidades de corte e outros que relatam bons resultados com velocidades de corte bastante superiores. Também são encontrados resultados que relatam como promissora a utilização de fluido de alta pressão (VAGNORIUS e SØRBY, 2011) e outros relatando que a utilização de alta pressão fora prejudicial à vida útil do inserto de cerâmica $Al_2O_3 + SiC_w$ (EZUGWU e BONNEY, 2008).

Outros estudos indicam que a utilização de fluido com alta pressão na usinagem com insertos de metal duro apresentam resultados com aumento da vida útil (EZUGWU e BONNEY, 2004). Já estudos de Magri (2015), Kitagawa et al., 1996 e Xiao et al. (2010) descrevem sobre o impacto das rebarbas na formação do desgaste de entalhe, enquanto Jahanbakhsh et al. (2016) não fazem citação sobre a formação desse tipo de desgaste também com uso de insertos de cerâmica $Al_2O_3 + SiC_w$.

Especificamente para usinagem de superligas na condição de revestimento, não foram encontrados resultados de pesquisas que abordem o torneamento utilizando insertos de cerâmica.

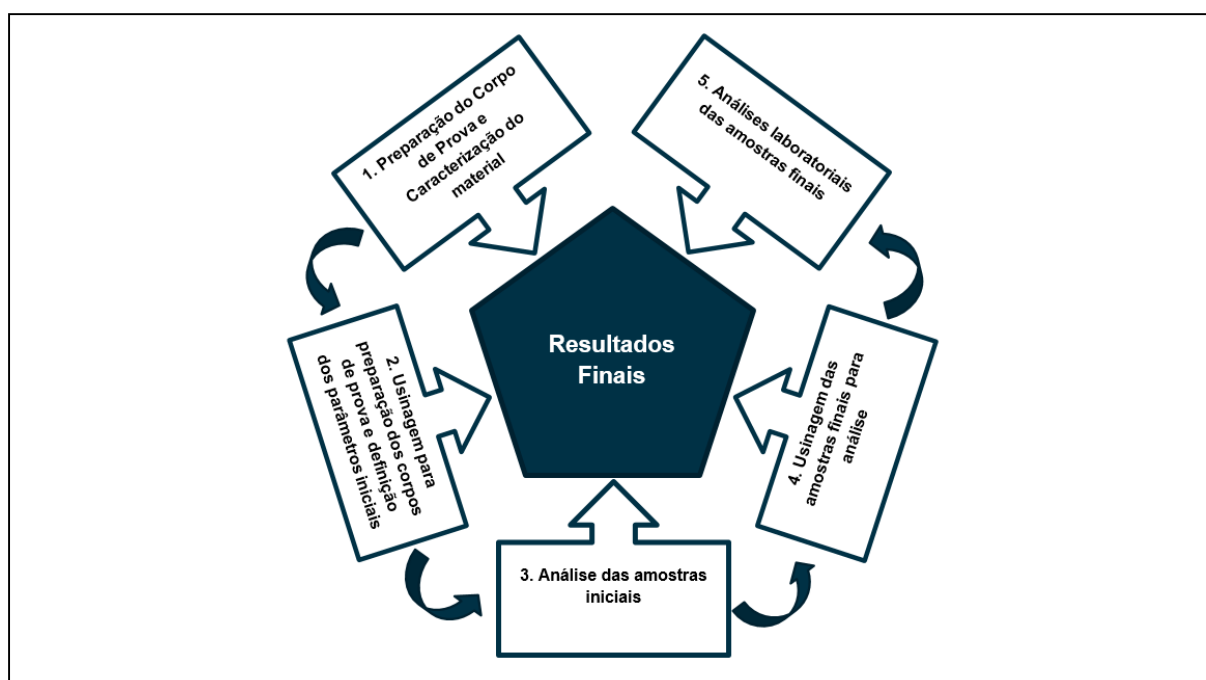
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi dividido em duas etapas, na qual a primeira objetivou definir a classe de inserto de cerâmica a ser utilizada, assim como velocidade de corte e avanço (pré testes). Essa definição foi baseada no desempenho das diferentes classes dos insertos utilizados, mensurando o desgaste ocorrido na aresta de corte.

Na segunda etapa, além do desgaste ocorrido na aresta dos insertos em diferentes tempos de contato, foi realizada uma abordagem quantitativa para analisar os impactos que o processo de usinagem, nas condições abordadas nesta pesquisa, são capazes de gerar sobre a superfície usinada, observando características como microdureza e encruamento na superfície gerada pelo processo de torneamento.

A figura 34 representa de forma sumarizada a sequência das etapas executadas para que fosse possível chegar aos resultados finais e devidas análises, a fim de cumprir os objetivos propostos.

Figura 34 – Representação das etapas executadas para execução e análise de resultados



Fonte: O autor (2019).

3.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

A primeira etapa do processo consistiu na usinagem do material de base a ser revestido. Este corpo foi usinado no material ABNT 4130, temperado e revenido, com limite de escoamento de 80 ksi. A composição química e propriedades mecânicas nominais são mostradas nas tabelas 3 e 4 respectivamente.

Tabela 3 – Composição Química nominal do ABNT 4130 80K usado no corpo de prova

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
%	0,28 – 0,33	0,40 – 0,60	0,025	0,025	0,15 – 0,35	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25	0,10

Fonte: O autor (2019).

Tabela 4 – Propriedades mecânicas nominais do AISI 4130 80K usado no corpo de prova

LE (MPa)	L.R.T. (MPa)	AI (%)	RA (%)	R.I. (J)*	Dureza (HB)
552	690	18	35	27	210 – 237

*Energia absorvida em ensaio de impacto Charpy a -18°C

Fonte: O autor (2019).

O arame da liga de níquel 625 utilizado no processo de revestimento é especificado conforme ASME SFA-5.14 e classificação ERNiCrMo-3 com Ø1,14mm. Esta soldagem foi executada conforme critérios estabelecidos pelas normas que seguem:

- a) **N-133** – Soldagem
- b) **N-1438** – Terminologia Soldagem
- c) **N-1738** – Descontinuidades em Juntas Soldadas, Fundidos, Forjados e Laminados.
- d) **NBR-14842** – Critérios para a qualificação e certificação de inspetores de soldagem

O certificado da liga de níquel 625 utilizado neste processo é mostrado no Anexo A. Já o revestimento das peças foi depositado em um sistema de soldagem c/ FPA 9000 CC (*Compact Cladding*) da marca Fronius, conforme mostra a figura 35.

Os dados técnicos do equipamento de soldagem são detalhados na tabela 5.

Figura 35 – Fronius FPA 9000 Utilizada para revestimento dos corpos de prova



Fonte: Cortesia AKER SOLUTIONS (2019).

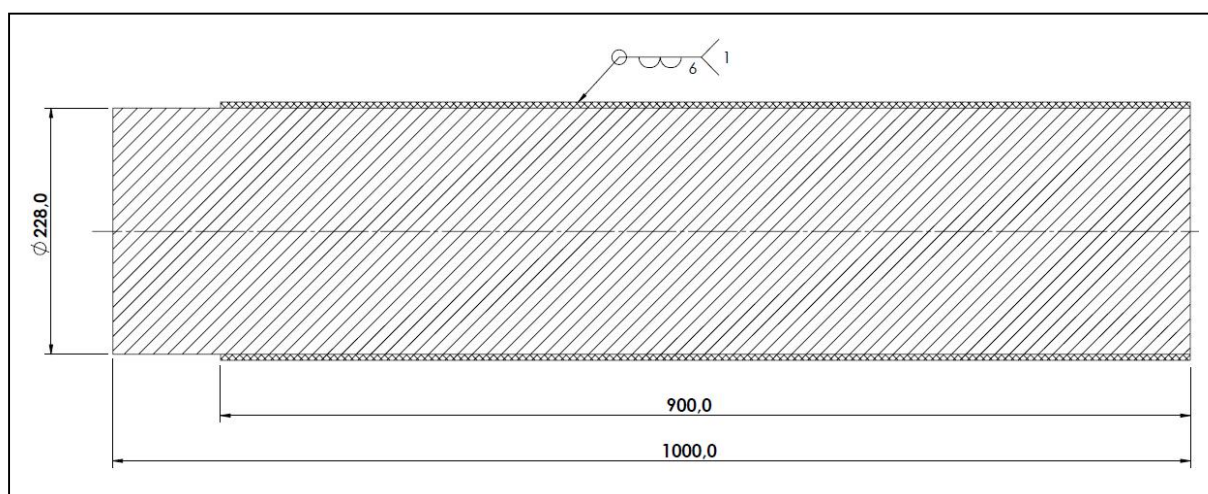
Tabela 5 – Dados técnicos do equipamento utilizado para revestimento

Dados Técnicos	FPA 9000	Dados Técnicos	Controle Remoto
Tensão de Rede	230V / 50-60 HZ	Temperatura de Operação	0 - 50°C
Fusível	16A	Classe de Proteção	24V
Controlador de Servomotor	DC 4 Q +/- 0-10 V	Fusível	IP 65
Dimensões (c x l x a)	600 x 600 x 1820 mm	Dimensões (c x l x a)	280 x 180 x 100 m
Peso Líquido do Armário Elétrico	150 Kg	Peso Líquido	150 Kg
Cabo de Alimentação FPA 9000	5m com plug		

Fonte: FRONIUS (2019).

Os corpos de prova foram pré-usinados e revestidos conforme dimensões mostradas na figura 36. As inspeções executadas compreendem a verificação dos requisitos já explanados anteriormente. Para atendimento à demanda total de testes, foram revestidos 3 corpos com 1000mm de comprimento cada, sendo em todos utilizados os mesmos parâmetros para execução do revestimento com a Liga de níquel 625.

Figura 36 – Detalhamento dimensional para fabricação do corpo de prova

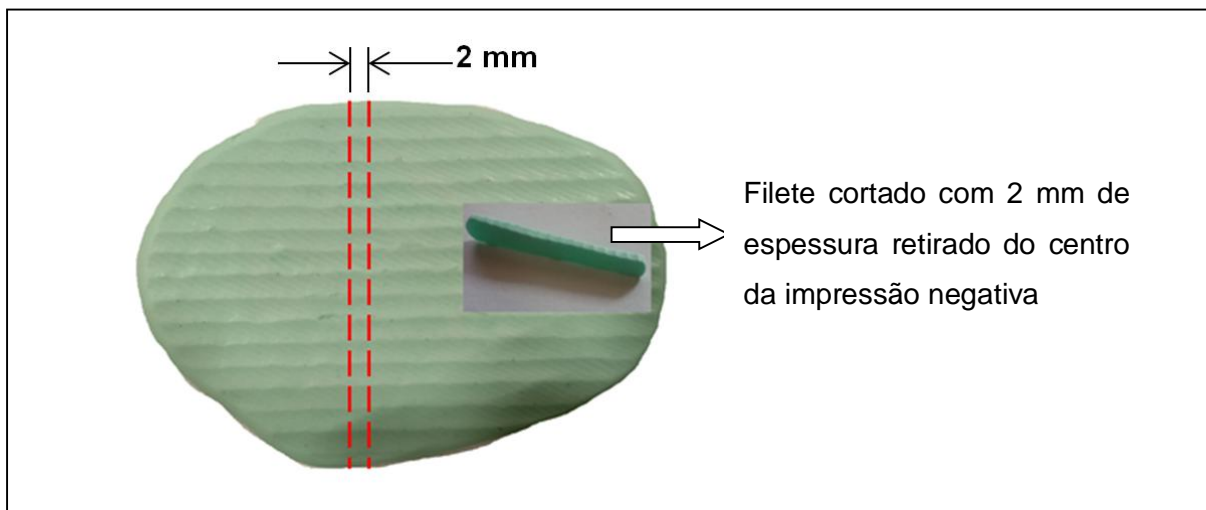


Fonte: O autor (2019).

Após conclusão da etapa de revestimento e inspeções pertinentes, foi analisada a morfologia e as dimensões entre picos e vales dos cordões provenientes do processo de revestimento. Essa análise teve o intuito de mensurar uma possível diferença na profundidade de corte ao longo do perfil a ser usinado, assim como verificar a possibilidade de ocorrência de corte interrompido durante a etapa do processo.

Para tal, foi gerada uma impressão negativa dos cordões, utilizando silicone de condensação da marca *Coltene* com catalisador universal da mesma marca. O produto proveniente dessa massa, modelada através de compressão manual da mistura (massa + catalisador) contra o perfil revestido é mostrado na figura 37. Após a moldagem, foi retirada uma amostra com espessura aproximada de 2 mm para inspeção dimensional dessa impressão.

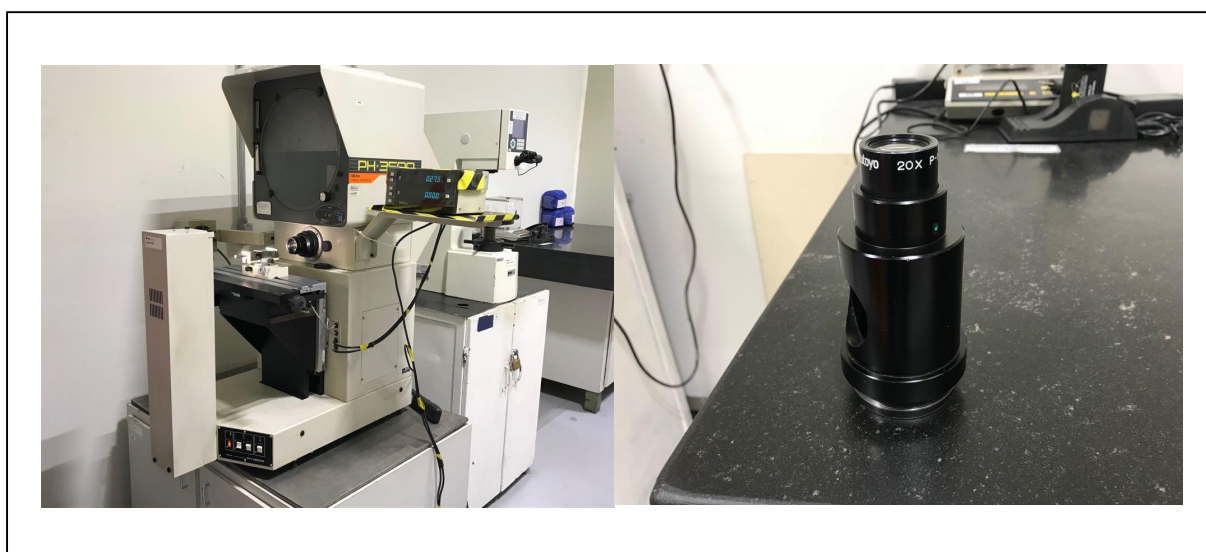
Figura 37 – Impressão negativa dos cordões provenientes do revestimento do corpo de prova



Fonte: O autor (2019).

Esta amostra retirada foi então submetida à inspeção dimensional através de um projetor de perfil Mitutoyo modelo PH-3500 com lente de aumento de 20 vezes (figura 38).

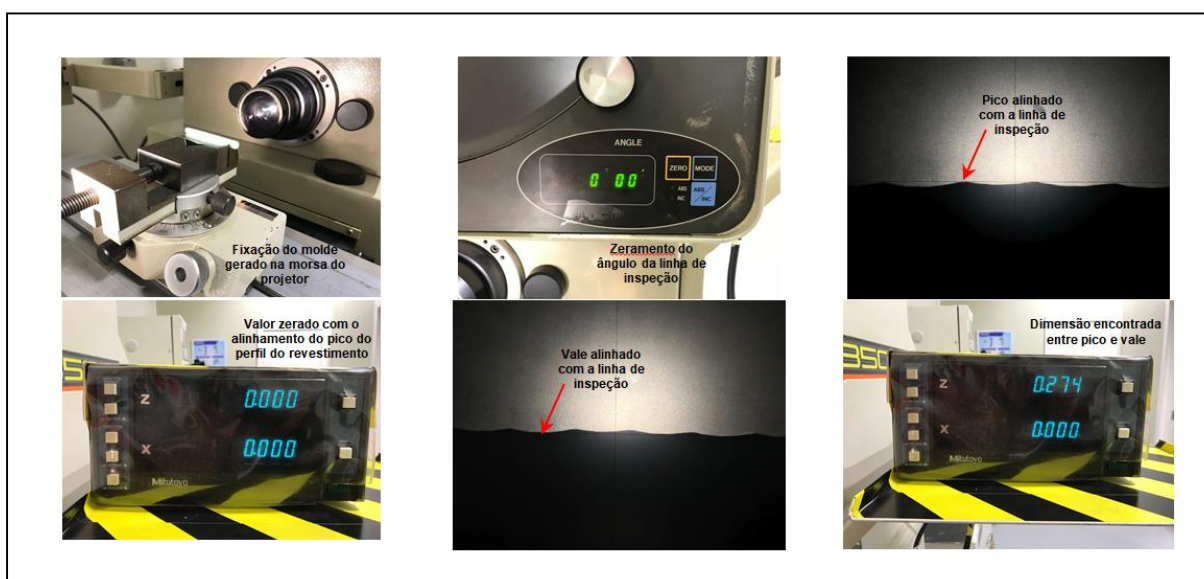
Figura 38 – Projetor de perfil Mitutoyo Modelo PH-3500 e lente de aumento



Fonte: O autor (2019).

Conforme pode ser verificado na figura 39, a distância entre picos e vales máxima encontrada foi de 0,274mm. A repetibilidade dessa dimensão é assegurada pelos parâmetros operacionais, que são qualificados e sua aplicação monitorada através das inspeções existentes durante o processo.

Figura 39 – Sequência operacional para dimensionamento dos cordões do revestimento



Fonte: O autor (2019).

Fazendo uso dos mesmos parâmetros no processo e utilizando o mesmo material de base, foi executada deposição de um cordão de revestimento na posição plana, de modo que fosse possível verificar a morfologia do cordão e dimensionar as variações da altura na superfície. Os parâmetros utilizados foram os mesmos do corpo de prova a ser usinado, para assegurar que o cordão do revestimento tivesse as mesmas características. O cordão depositado e as análises executadas são mostrados na figura 40.

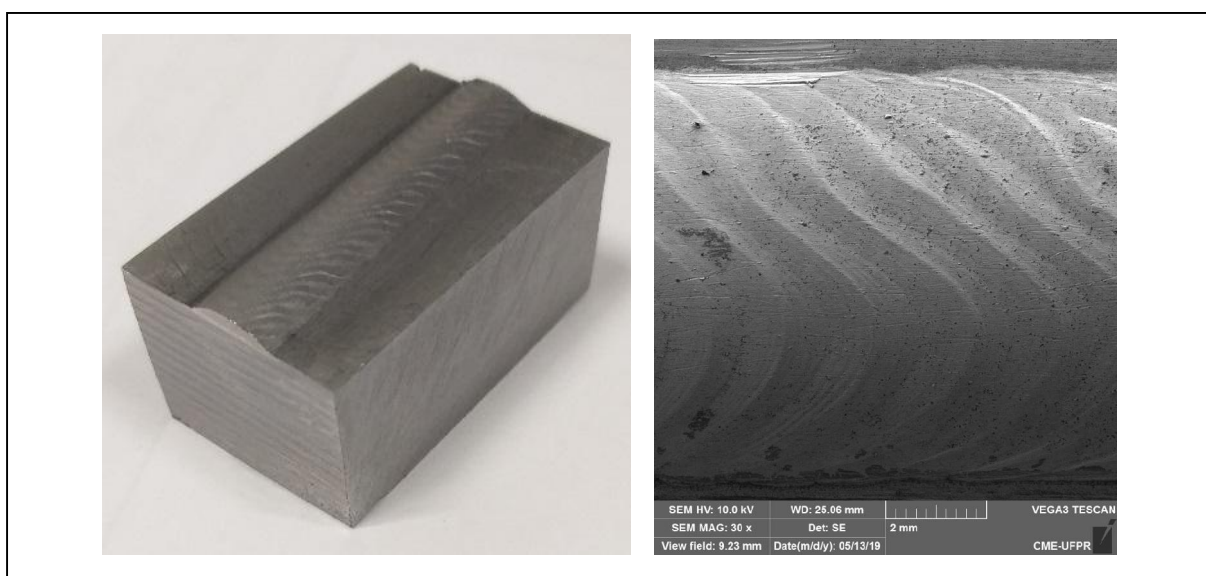
Figura 40 – Corpo de prova com cordão de revestimento depositado na posição plana



Fonte: O autor (2019).

Desta amostra com cordão de revestimento foi retirada uma secção, de modo que fosse possível executar um mapeamento da superfície, verificando as dimensões dos sulcos gerados pelo acabamento superficial deste revestimento. A amostra foi retirada com comprimento de 30 mm e largura de 15 mm do centro perfil, mostrada na figura 41. O mapeamento da superfície proveniente do processo de revestimento é mostrado na figura 45 e gráfico 12.

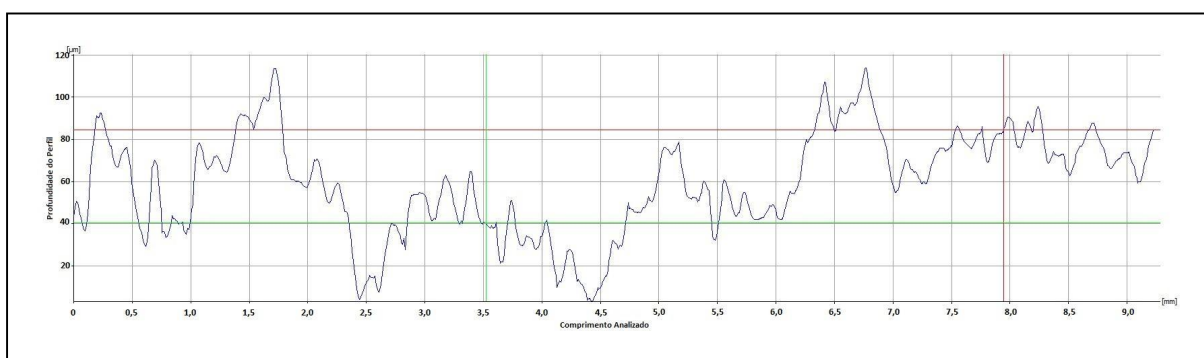
Figura 41 – Corpo de prova para análise da morfologia e dimensionamento do cordão de revestimento



Fonte: O autor (2019).

O gráfico 12 apresenta as imagens obtidas por técnicas de mapeamento topográfico através de perfilometria ótica da amostra retirada. Os resultados encontrados mostram uma diferença de aproximadamente 120 μm (0,12mm) máxima entre pico e vale.

Gráfico 12 – Mapeamento topográfico do cordão do revestimento

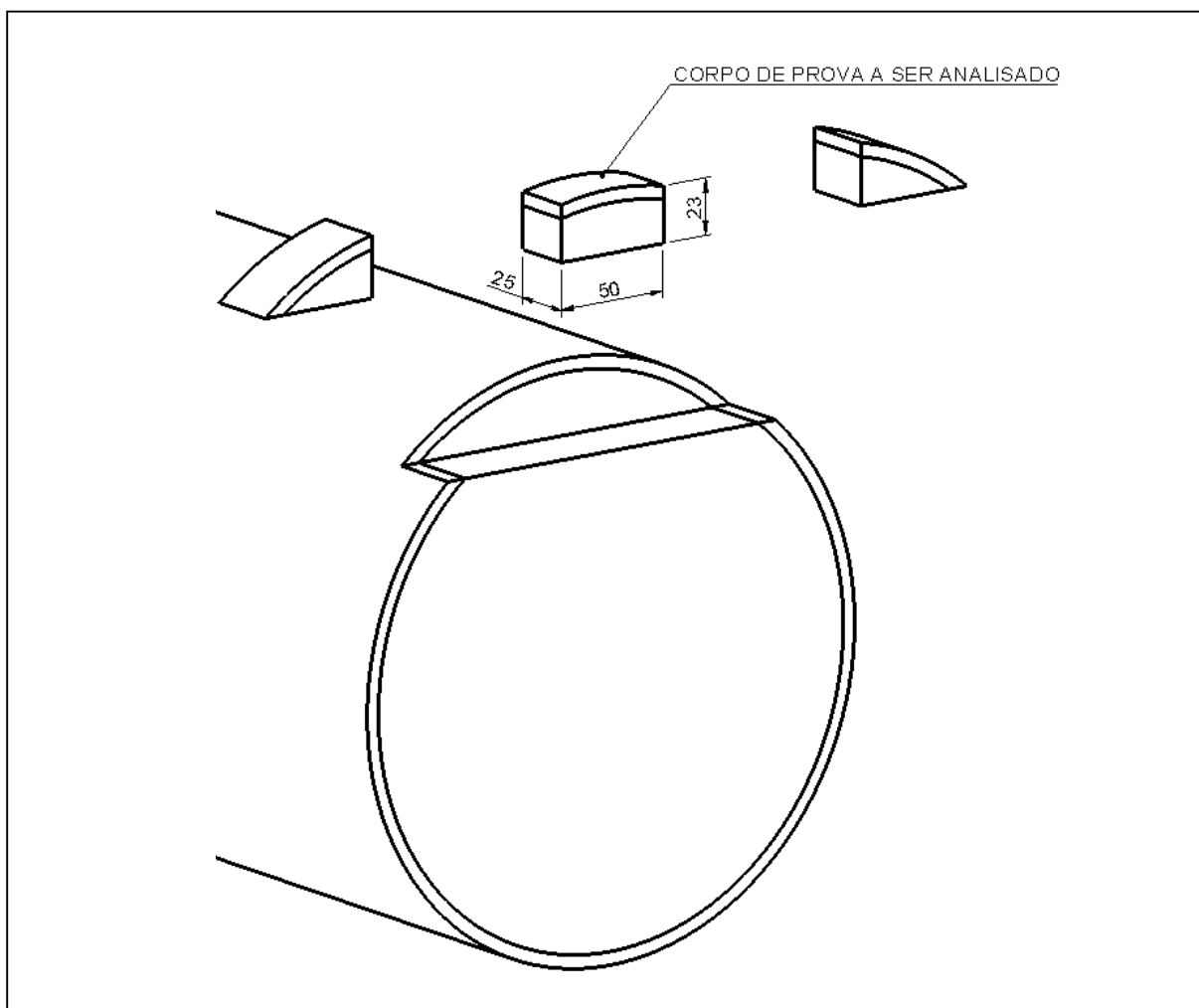


Fonte: O autor (2019).

3.1.1 Caracterização do Material

Antes do início das etapas de testes, fazendo uso de uma cortadora de precisão Isomet, foi retirada uma secção do corpo de prova proveniente do processo de revestimento que, posteriormente, seria submetida à usinagem. Esse corpo de prova foi submetido a ensaios laboratoriais, de modo que fosse possível a correta caracterização do material, que seria colocada às etapas de usinagem. As dimensões e formato desse corpo de prova são evidenciados na figura 42.

Figura 42 – Corpo de prova a ser submetido a ensaios laboratoriais



Fonte: O autor (2019).

Estes ensaios compreenderam a execução de microdureza na seção transversal, análise química, macrografia e análise metalográfica do material depositado.

A análise química foi executada via Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) em Microscópio Eletrônico de Varredura – Hitachi / TM 3000 e Microsonda – Brucker/QUANTAX 70. A preparação para execução do ensaio foi executada conforme ASTM E1508 – 03: *Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy* e ASTM E1829 – 02: *Standard Guide for Handling Specimens Prior to Surface Analysis*. Os resultados dessa análise são descritos na tabela 6.

Tabela 6 – Resultado obtido na análise de composição química

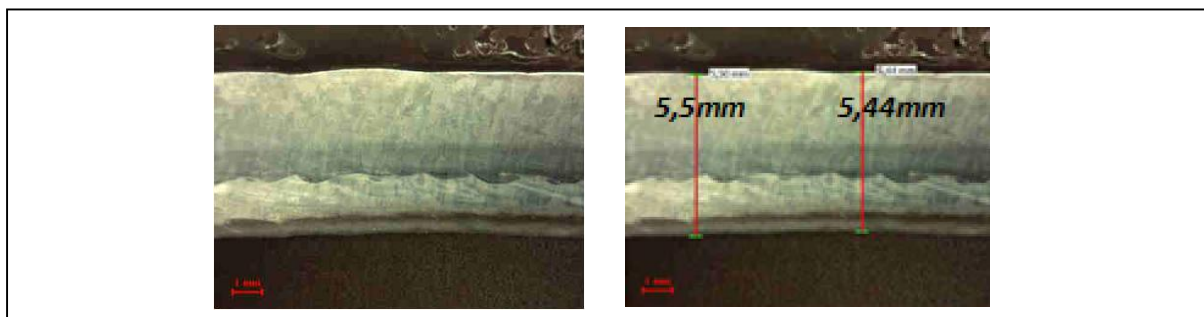
Elemento	Resultado (% em peso)
Ni	61,4
Cr	20,41
Mo	7,62
Fe	6,77
Nb	3,05
Al	0,31
Ti	0,23
S	0,19
Si	0,02
Mn	0,01
P	ND*

*ND: Não detectado

Fonte: O autor (2019).

O ensaio Macrográfico foi executado utilizando-se Estereoscópio Ótico com zoom gradual - ES 02 – Topcon. Temperatura (°C): 24,9 Umidade (%): 70, a preparação foi executada conforme ASTM E3 -11 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* e ASTM E 7 – 09: *Standard Terminology Relating to Metallography* e o método de ensaio foi executado segundo ASTM E381-01 (Reapproved 2006): *Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings* e ASTM E 7 – 09: *Standard Terminology Relating to Metallography*. Os resultados das análises são mostrados na figura 43 e a espessura do revestimento depositado acumulado encontrados variam entre 5,44 e 5,5mm.

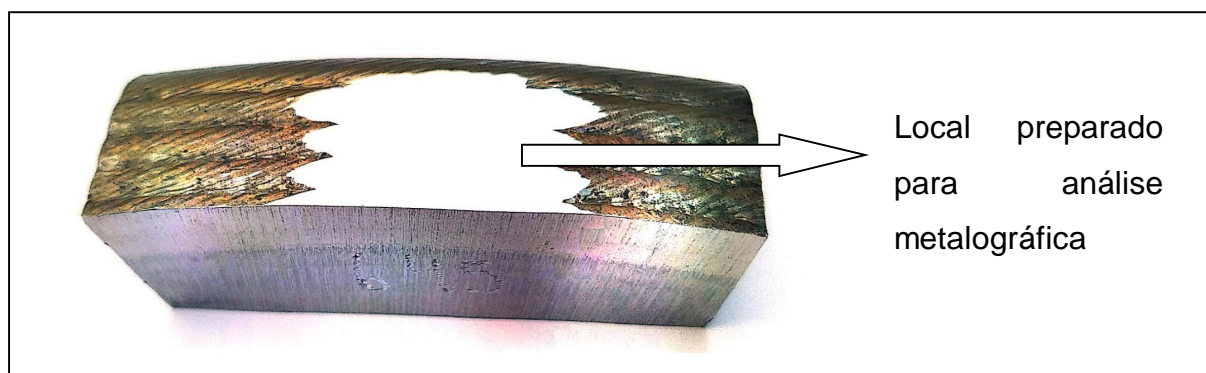
Figura 43 – Avaliação de macroestrutura



Fonte: O autor (2019).

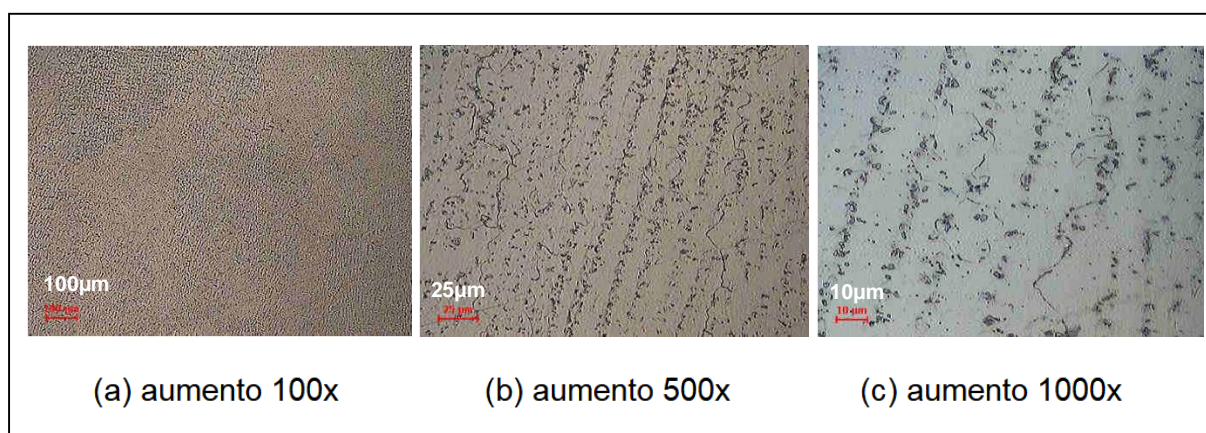
A análise metalográfica foi executada utilizando-se Microscópio ZEISS – Modelo: Axio Scope A1 - Analisador de Imagem: Sistema Quantitativo (DIGIMET PLUS - versão 5.0G). Padrão de referência quantitativa: Régua Padrão Calibrada - RG-01 - KR814C e Termohigrômetro, mod. MT-241, Minipa. Código: TH-06. A preparação do material foi executada conforme ASTM E 3: 2011 – *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* e ASTM E 407: 07 – *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, o método de ensaio foi segundo ASTM E 3: 2011 – *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* e ASTM E 407: 07 – *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, e o reagente utilizado foi o Marble. A figura 44 mostra o corpo de prova preparado para esta análise e a figura 45 mostra o resultado da análise executada.

Figura 44 – Preparação do material para análise de metalográfica



Fonte: O autor (2019).

Figura 45 – Avaliação metalográfica



Fonte: O autor (2019).

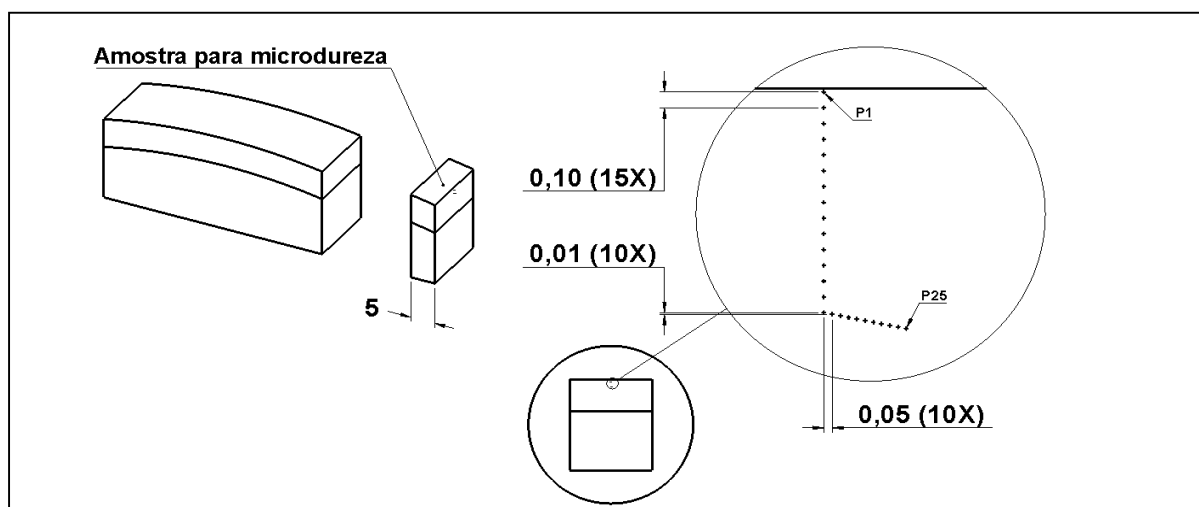
Das análises metalográficas realizadas na amostra, registra-se microestrutura austenítica e carbonetos dispersos.

Foi ainda executada inspeção de microdureza na seção transversal do corpo de prova, compreendendo pontos localizados na região do material de revestimento. Essa inspeção foi realizada em 25 pontos, com o objetivo de analisar a dureza do material do revestimento a ser removido e também a região do material que fará parte da tangente do novo perfil proveniente do processo de torneamento. Os pontos medidos limitaram-se a estes 25 devido ao fato de que a operação de usinagem estaria limitada a uma profundidade de corte média de 1,5mm.

Os 15 primeiros pontos distantes entre si foram 0,1 mm a partir do perfil externo do material revestido. Os demais 10 pontos distantes entre si foram 0,01mm. Para isso, foi retirado uma secção dos corpos de prova e executado embutimento em resina baquelite prensada à quente (figura 46).

Após o embutimento, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento manual úmido. A sequência de lixas utilizadas nesta preparação para o ensaio metalográfico foi: 80, 220, 400, 600 e 1200. Os ensaios foram executados em Microdurômetro Shimadzu HVM 2000, e a preparação foi realizada conforme ASTM E3-11 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* e executado conforme ASTM E384- 2010 – *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials* e a carga aplicada para esse ensaio foi de 490 μN com tempo de penetração de 10 segundos.

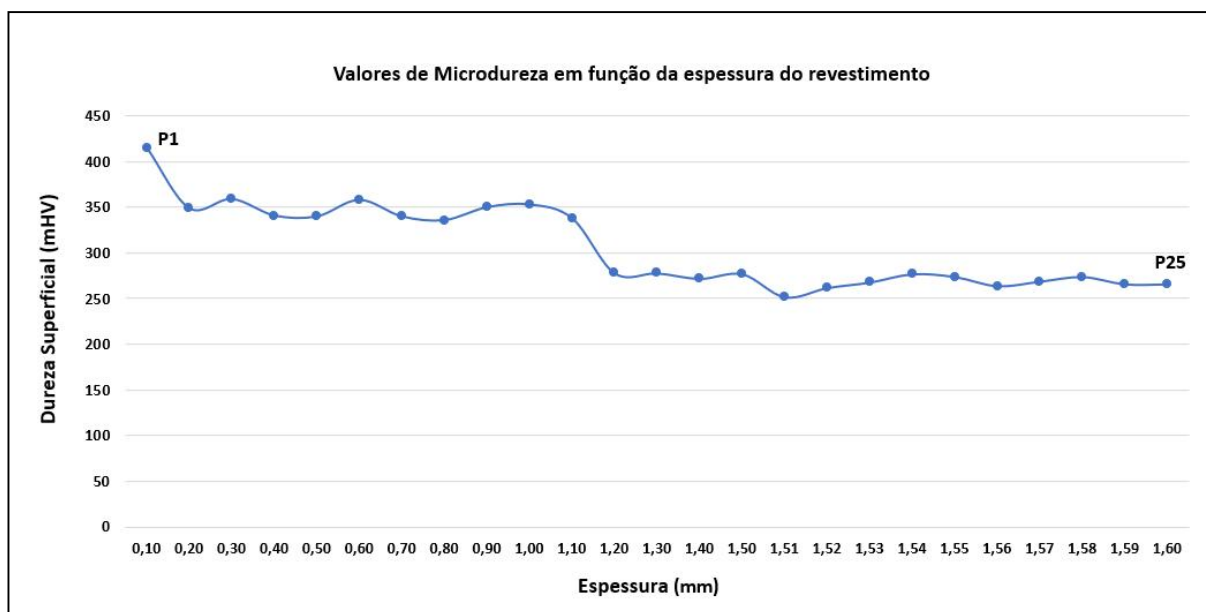
Figura 46 – Amostra e pontos para inspeção de microdureza



Fonte: O autor (2019).

Os resultados desta análise são mostrados no gráfico 13. O ponto de microdureza identificado como P1 é o mais próximo da extremidade do corpo de prova, enquanto o ponto identificado como P25, por sua vez, é o mais distante.

Gráfico 13 – Resultado obtido no ensaio de microdureza Vickers



Fonte: O autor (2019).

Conforme pode ser observado nos valores de microdureza mostrados no gráfico 13, quanto mais próximo à superfície do revestimento, maior foi o valor de dureza encontrado. Já a partir de uma determinada profundidade, o valor encontrado retorna às características originais da liga de níquel 625. Essa profundidade coincide com a espessura do cordão de revestimento depositado, que foi de 1,5mm.

O último cordão de revestimento é submetido a uma maior velocidade de resfriamento após ter sido submetido à influência dos ciclos térmicos durante processo de revestimento. Os menores valores de dureza abaixo da espessura de 1,5mm são decorrentes da sobreposição dos cordões de revestimento, que proporcionam o controle das transformações microestruturais dos passes anteriores por meio da interferência do calor gerado nos passes posteriores da solda. Esse processo é chamado de técnica do passe de revenimento (KÜCHLER, 2009).

3.1.2 Equipamentos para Usinagem

Os ensaios de torneamento da Liga de níquel 625 foram realizados em um torno CNC da marca Mazak, modelo Aland Turn 60N, com comando numérico Mazatrol T Plus, potência do motor principal de 45 KW e rotação do eixo árvore limitada a 1000 rpm (rotação contínua). Esse equipamento é mostrado na figura 47.

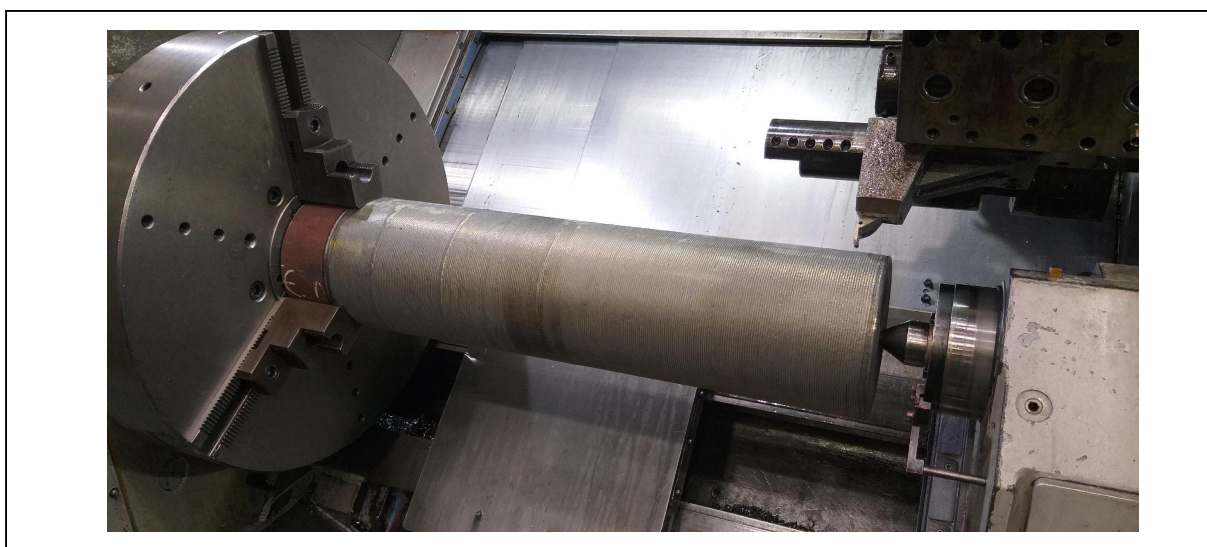
Figura 47 – Torno horizontal Mazak, modelo Aland Turn 60N



Fonte: Cortesia AKER SOLUTIONS (2019).

Conforme ilustrado na figura 48, o *setup* para usinagem foi executado fazendo uso de placa de três castanhas e apoiado em contra ponto, objetivando assim, maior estabilidade ao sistema.

Figura 48 – Fixação do corpo de prova com uso de contra ponta



Fonte: O autor (2019).

3.1.3 Ferramentas usadas para Usinagem

Durante os testes preliminares, para validar a hipótese de utilização de insertos de cerâmica para usinagem diretamente sobre os cordões de revestimento da liga de níquel 625, foram utilizados insertos de cerâmica com geometria ISO RNGN 12 07 00 (SiAlON) classe 3020 e suporte TRGNL 3232 P1207-F. Seguindo os resultados obtidos por Jack (1986), também foram utilizados insertos SiAlON da mesma geometria da ferramenta e mesmo suporte de torneamento.

Acompanhando os estudos executados por autores como Ezugwu et al. (2002), Jianxin et al. (2005), Altin et al. (2007) e Marques (2015), que fizeram experimentos com bons resultados durante usinagem de outra superliga à base de níquel do Grupo D-2 (liga 718), foi também aplicado o $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ (RNGN 12 04 00 - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$). Embora tenham utilizado com variáveis distintas, como pressão de óleo lubrificante e aplicação de lubrificantes sólidos, há consenso entre esses autores relatando que tais insertos apresentaram bons resultados em relação à vida útil da ferramenta durante usinagem desse material. De modo geral, as cerâmicas *whiskers* apresentaram bons resultados com predominância de desgaste de entalhe.

A tabela 7 mostra o detalhamento do suporte utilizado para fixação do inserto de cerâmica, enquanto a figura 49 mostra o suporte já com o inserto e fixado na torre da máquina.

Tabela 7 – Detalhamento do suporte utilizado para fixação do inserto de cerâmica

	h1	32 mm
	h	32 mm
	b	32 mm
	l1	170 mm
	l2	29 mm
	f	40 mm

Fonte: Adaptado de TAEGUTEC (2019).

A tabela 8 traz algumas informações sobre as características principais das ferramentas cerâmicas utilizadas nos testes preliminares, como dureza e tenacidade à fratura.

Tabela 8 – Características principais dos insertos utilizados nos pré testes

Classe	Al ₂ O ₃ + Whisker	SiAlON
Dureza (Hv)	2000	1476
Tenacidade à fratura (K _{IC})	4.0	3.0

Fonte: Adaptado de TAEGUTEC (2018).

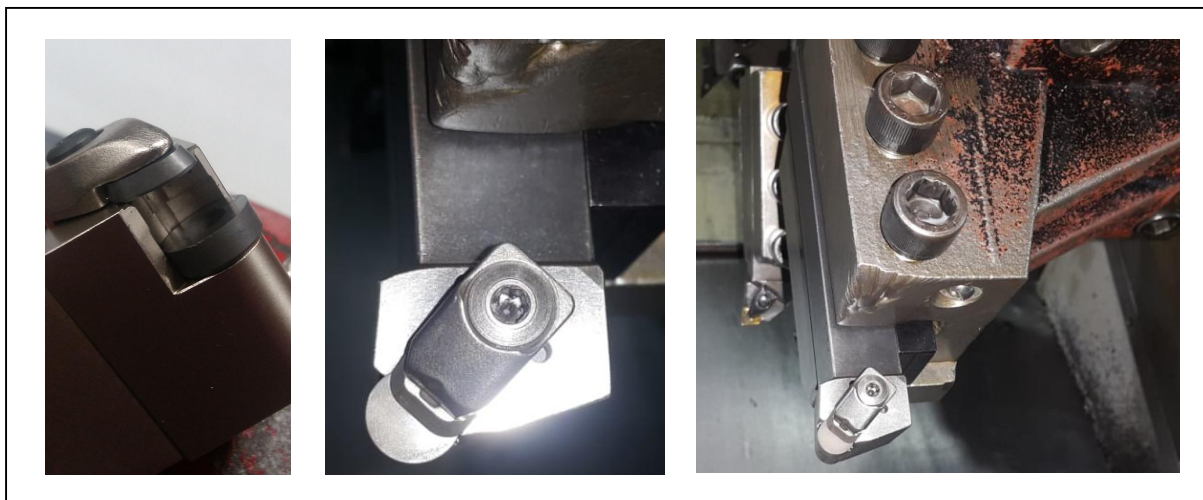
Ainda com base nas características principais destas ferramentas utilizadas, Diniz et al, 2008 descreveram um comparativo entre estes insertos, comparando as diferentes escalas onde foram estabelecidos valores para comparação entre 1 a 5, sendo 1 a àquele que apresenta as piores condições e 5 àquele que apresenta os melhores resultados em relação a cada característica observada. Estes valores são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Características principais dos insertos utilizados nos pré testes

Material de Corte	Tenacidade	Dureza à quente	Resistência ao choque térmico	Estabilidade Química (Fe)	Estabilidade térmica
Cerâmica com Whisker	4	3	3	2	3
SiAlON	3	5	4	1	2

Fonte: Adaptado de DINIZ et al (2008).

Figura 49 – Suporte fixado na torre da máquina



Fonte: O autor (2019).

3.2 ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS INICIAIS E CLASSE DE INSERTO

Tendo em vista a dificuldade para identificar valores de velocidade de corte e também a classe de inserto a ser utilizada nas condições expostas nesta pesquisa, serão utilizadas na referida etapa duas classes distintas de insertos de cerâmica, assim como diferentes valores de velocidade de corte e avanço. Esta primeira etapa compreende a utilização:

- a) Insertos de cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ e SiAlON .
- b) Diferentes velocidades de corte.
- c) Utilização de fluido de corte com pressão convencional.

3.3 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE CORTE

Embora seja possível encontrar diversas publicações margeando a usinagem de superligas à base de Níquel, estas são bastante escassas quando esta se refere especificamente à liga de níquel 625, sendo ainda mais reduzidas quando a abordagem é feita em uma operação de usinagem executada diretamente sob o

revestimento com a liga de níquel 625, depositado nas condições desta pesquisa e com utilização de ferramentas de cerâmica. Esse fato acarreta em um desafio maior para definição dos parâmetros de corte a serem adotados.

Perante o exposto, os valores encontrados na literatura foram utilizados com base nas indicações para o inserto cerâmico reforçado com *whisker* ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$) e SiAlON, utilizado durante a usinagem de desbaste dessa liga (NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, 1992; IMC COMPANIES, 2019).

Em virtude da escassez de informações para usinagem nestas condições, optou-se pela variação de 10% (para mais e para menos) nos valores de velocidade de corte, de forma que fosse possível verificar o impacto da velocidade de corte na aresta dos insertos. A profundidade de corte variou entre 1,25 e 1,50 mm devido à diferença gerada pelo processo de revestimento anteriormente abordado. Os valores extraídos dessas referências foram utilizados para formulação da tabela 10.

Com intuito de verificar a capacidade de o revestimento de Nitreto de Titânio auxiliar na redução dos desgastes de entalhe e flanco proveniente das características da liga utilizada, foi utilizada uma amostra de inserto Al_2O_3 reforçado com *whisker* com cobertura PVD. Foi utilizado ainda uma amostra de Al_2O_3 reforçado com zircônia em virtude de esta apresentar maior resistência à ruptura transversal (em torno de 40%) e/ou tenacidade a fratura maior do que no caso da alumina pura.

Tabela 10 – Parâmetros para usinagem da etapa 1 de testes

Amostras	Velocidade de Corte (m/min)	Classe do Inserto	Avanço (mm/rev)
Teste 1	140	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ (RNGN 12 07 00)	0,20
Teste 2	140		0,25
Teste 3	160		0,20
Teste 4	160		0,25
Teste 5	180		0,20

Teste 6	180		0,25
Teste 7	305		0,20
Teste 8	240		0,20
Teste 9	160	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ (RNGN 12 07 00)	0,25
Teste 10	160	Al ₂ O ₃ + SiCw (RNGN 12 07 00) Revestido com TiN	0,25
Teste 11	140	SiAlON (RNGN 12 07 00)	0,20
Teste 12			0,25
Teste 13	160		0,20
Teste 14			0,25
Teste 15	180		0,20
Teste 16			0,25

Fonte: Adaptado de NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE (1992) e IMC COMPANIES (2019).

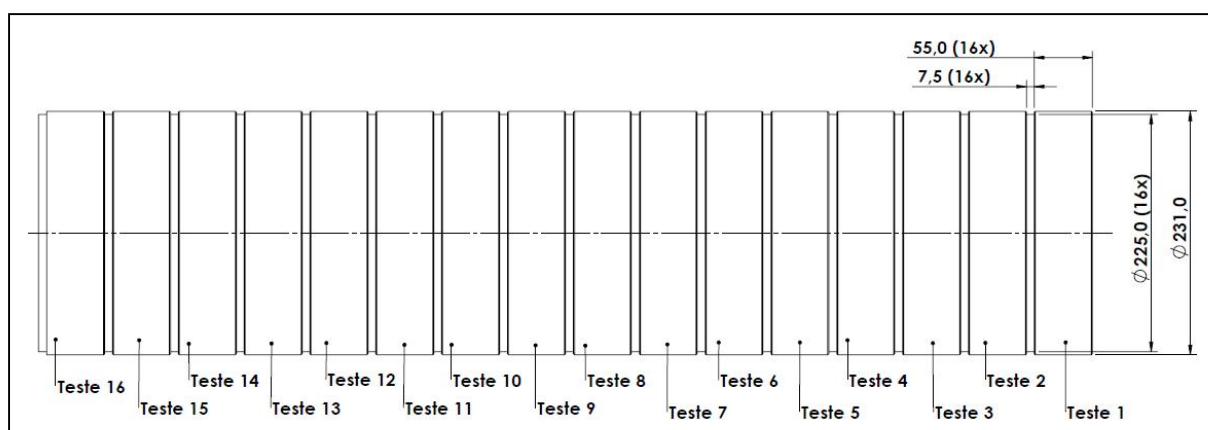
3.3.1 Usinagem para definições de classe de inserto e velocidade de corte

A usinagem para as avaliações da etapa 1 foi executada sob um diâmetro de 231 mm, conforme detalhamento mostrado na figura 50.

O tempo de contato entre o inserto e a peça foi de 1 minuto para todos os testes. Para evitar um possível choque mecânico na entrada da ferramenta, foi usinado um chanfro com 7,5 mm x 45° no início do perfil revestido. A saída da ferramenta do perfil usinado seguiu um ângulo de 45° para evitar uma abrupta interrupção do processo e também já proporcionar um perfil adequado para a usinagem do passe seguinte.

O formato do inserto, atrelado a essa saída em ângulo, é capaz de proporcionar um início de corte constante e sem choques mecânicos entre a peça de trabalho e o inserto. Na etapa 1 não foram usinados canais de saída ao final do percurso usinado, para que fosse possível analisar a formação de rebarbar na altura da profundidade de corte.

Figura 50 – Detalhamento do perfil a ser usinado em testes iniciais



Fonte: O autor (2019).

A usinagem foi executada com uso de fluido lubrificante Blasocut de base mineral, emulsionado em água e com concentração de 10%. A pressão da refrigeração utilizada foi de 0,8MPa (convencional) com jato direcionado na zona de cisalhamento primária, acessível pela região de fluxo do cavaco (sobre cabeça).

3.4 ETAPA 2 – ENSAIOS PARA ANÁLISES DOS INSERTOS E IMPACTO SOBRE A SUPERFÍCIE USINADA

Tendo definido o valor de velocidade de corte, assim como a classe do inserto de cerâmica a ser utilizado, a etapa seguinte contempla a análise para identificar os itens que seguem:

- Tipo de desgaste ocorrido nas configurações utilizadas.
- Possível influência da pressão de lubrificante no desgaste na aresta de corte dos insertos.

- c) Possível influência do ângulo de posição no desgaste dos insertos e impacto na superfície gerada pelo processo de usinagem.
- d) As características superficiais da região usinada, como dureza superficial, formação de camada encruada e acabamento superficial.

Para a execução dessa etapa, foi utilizado o mesmo equipamento e porta ferramentas, descritos na etapa 1.

Foram realizados passes com o mesmo diâmetro da etapa 1 (231 mm) e os comprimentos usinados foram variados de forma a controlar os tempos de contato de cada aresta que, por sua vez, variaram entre 1 e 3 minutos (com intervalos de 0,5 minuto). Como o objetivo principal é a execução diretamente sobre os cordões de revestimento, sobre cada região foi dado somente um passo, ou seja, em nenhuma das amostras o material usinado já estava regularizado. Por motivos de quantidade de materiais disponíveis para testes, para os insertos com diâmetro de 19mm, os testes foram limitados de 1 a 2,5 minutos de contato (com intervalos de 0,5 minuto).

Foram utilizadas ainda estratégias distintas para fornecimento de lubrificante, na qual foi fornecido com pressão de 4,5 MPa e também uma amostra executada em usinagem sem o uso de lubrificação. Foi usado, inclusive, inserto com diâmetro de 19 mm (RNGN 19 07 00), com o intuito de diminuir ainda mais o ângulo de posição proporcionado pelo inserto com diâmetro de 12 mm. Dessa maneira, o intuito foi verificar qual seria o impacto no inserto e na superfície usinada com essa alteração.

A cada passe, a aresta dos insertos era substituída, fotografada e, posteriormente, submetida à análise no microscópio para medição do desgaste de flanco e de entalhe. A cada passe, o inserto era substituído e um novo utilizado para usinagem. Esta decisão foi baseada no possível risco de quebra abrupta e, conseqüente perda da amostra. Também foram realizadas as medidas de rugosidade (R_a) da superfície da peça usinada, medição de camada encruada e microdureza na superfície usinada.

A amostra que, durante a etapa 1 de testes, apresentou os melhores resultados não foi repetida para a etapa 2. Para facilitar o entendimento e melhor formulação numérica das tabelas e gráficos, essa amostra foi nomeada como número 18.

Após a fixação do corpo de prova no torno CNC, foram utilizados os parâmetros de usinagem identificados anteriormente e foi definido o procedimento experimental, conforme descrito na tabela 11.

Assim como fora executado na etapa 1, para esta etapa a profundidade de corte, em virtude da diferença entre pico e vales dos cordões, a profundidade de corte variou entre 1,25 e 1,5mm.

Tabela 11 – Parâmetros para usinagem da etapa 2 de testes

Amostra	Velocidade de Corte (m/min)	Inserto SiAlON	Avanço (mm/rev)	Condições da Lubrificação	Tempo de contato	ap
Teste 17	160	RNGN 12 07 00	0,25	Sem refrigeração	1,0 min.	1,25 a 1,50
Teste 18				0,8 MPa	1,0 min.	
Teste 19				0,8 MPa	1,5 min.	
Teste 20				0,8 MPa	2,0 min.	
Teste 21				0,8 MPa	2,5 min.	
Teste 22				0,8 MPa	3,0 min.	
Teste 23				4,5 Mpa	1,0 min.	
Teste 24				4,5 Mpa	1,5 min.	
Teste 25				4,5 Mpa	2,0 min.	
Teste 26				4,5 Mpa	2,5 min.	
Teste 27		4,5 Mpa		3,0 min.		
Teste 28		RNGN 19 07 00		0,8 Mpa	1,0 min.	
Teste 29				0,8 Mpa	1,5 min.	
Teste 30				0,8 Mpa	2,0 min.	

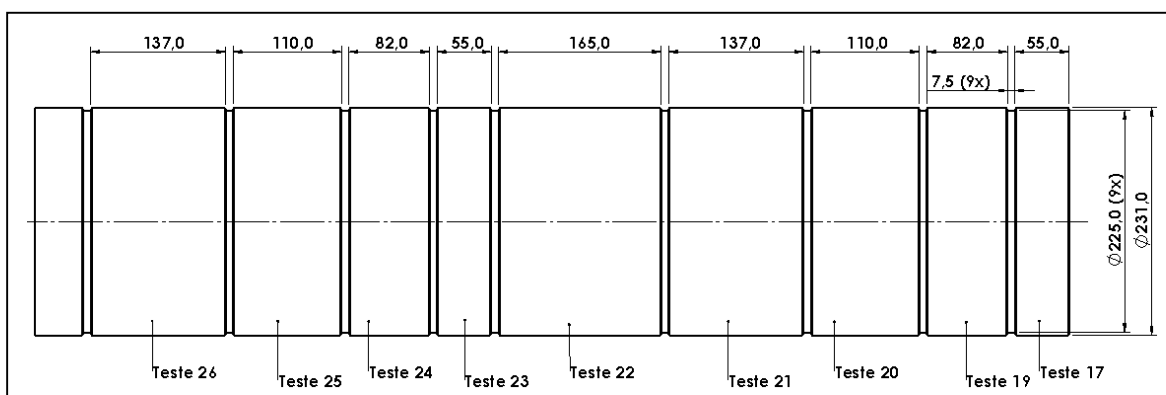
Teste 31				0,8 Mpa	2,5 min.	
Teste 32				4,5 Mpa	1,0 min.	
Teste 33				4,5 Mpa	1,5 min.	
Teste 34				4,5 Mpa	2,0 min.	
Teste 35				4,5 Mpa	2,5 min.	

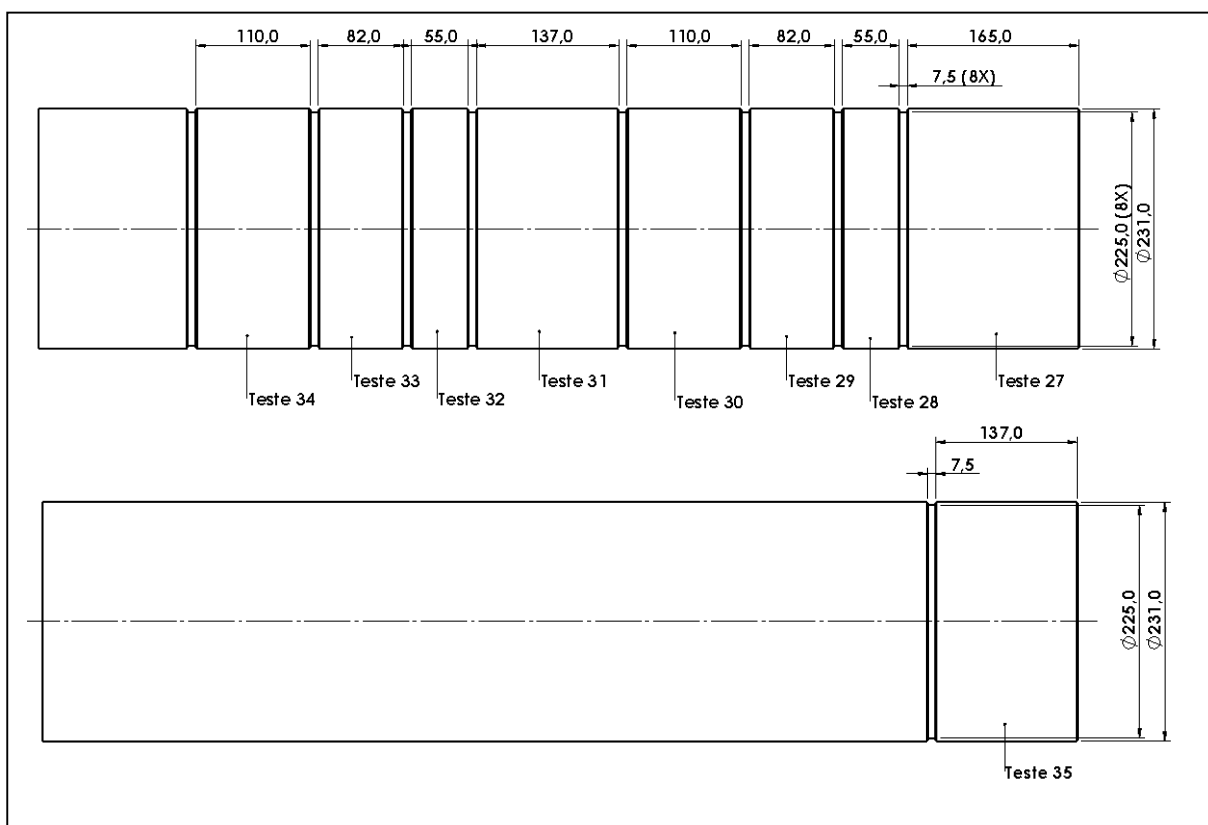
Fonte: O autor (2019).

Para delimitar o local de início e fim de cada trecho de usinagem e posterior extração dos corpos de prova, foram usinados canais com as mesmas dimensões já citadas na etapa 1 (7,5 mm de largura e chanfros de 2,0 x 45° no início e fim de cada trecho usinado), conforme detalhamento mostrado na figura 51. Para o teste 18, a usinagem não foi executada novamente, tendo em vista que os parâmetros são os mesmos anteriormente validados na etapa 1.

Assim, para análises laboratoriais do corpo de prova e do inserto foram utilizados os mesmos coletados do Teste 14. Entretanto, para facilitar o controle e manter uma sequência numérica, na segunda etapa esse teste recebeu o número 18 para sua identificação, na qual não foi repetido.

Figura 51 – Detalhamento para usinagem dos canais sob o diâmetro externo do corpo de prova

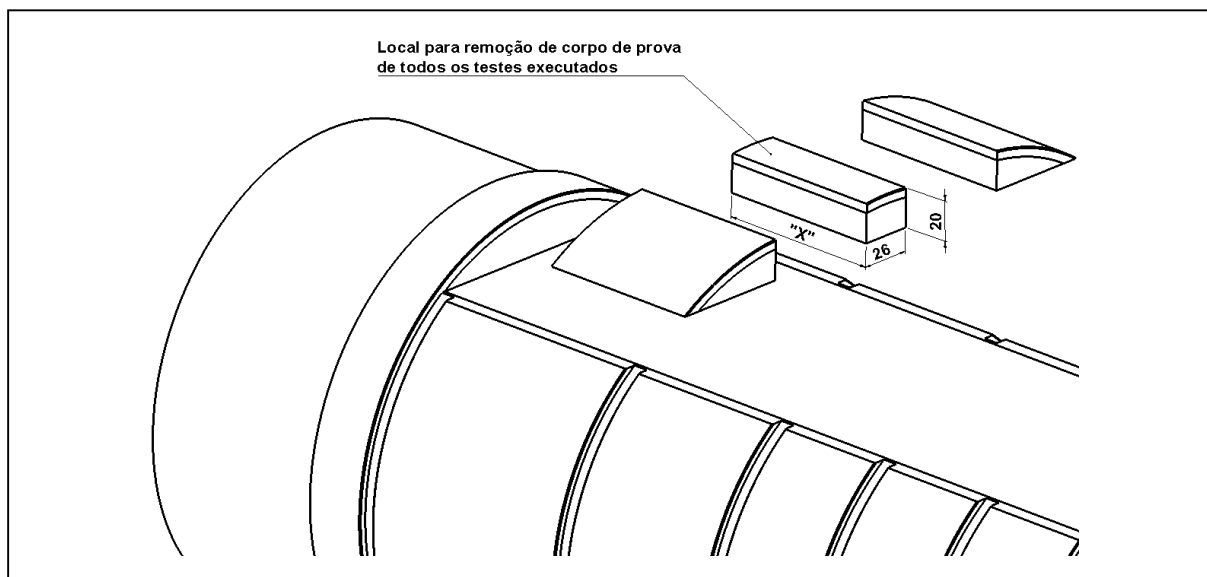




Fonte: O autor (2019).

Após conclusão da usinagem, conforme já detalhado na tabela 9, os corpos de prova foram seccionados de modo que pudessem ser submetidos aos ensaios de laboratório, fazendo uso de uma cortadora de precisão Isomet. Todos os corpos de prova foram seccionados segundo detalhado na figura 52, na qual a cota descrita como “X” variou conforme o tempo de contato de cada teste executado. Essa dimensão para cada teste executado é detalhada na tabela 12.

Figura 52 – Usinagem dos Corpos de Prova para ensaios laboratoriais



Fonte: O autor (2019).

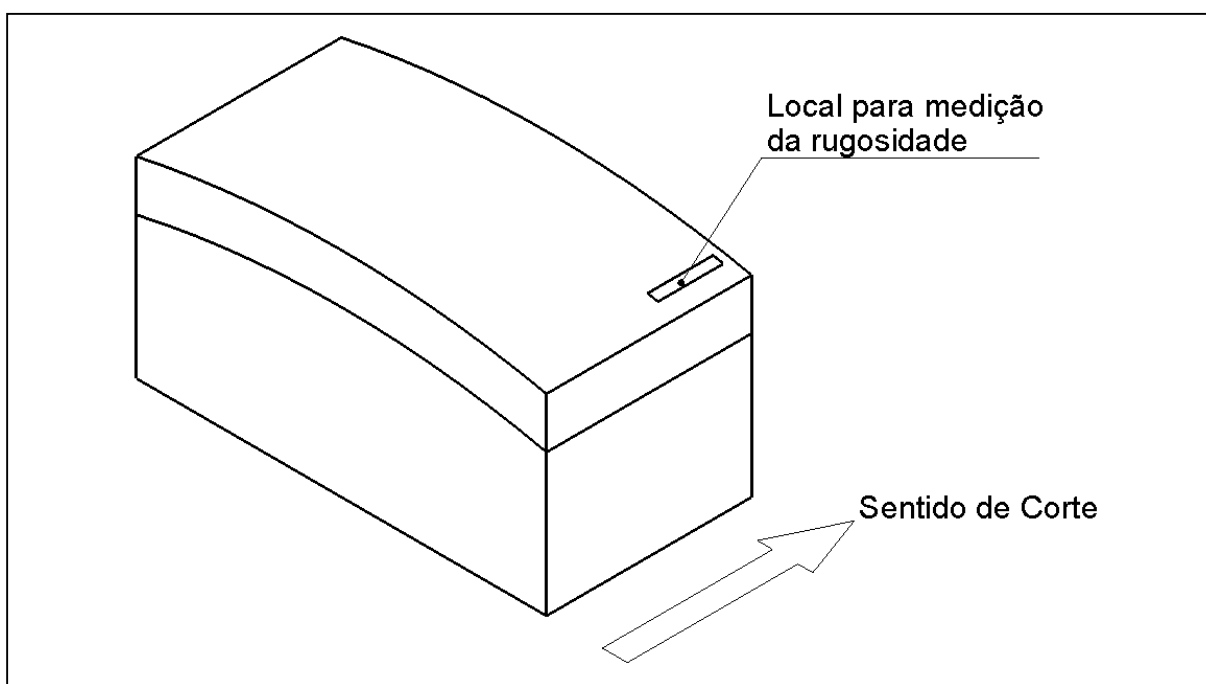
Tabela 12 – Dimensões para corte dos corpos de prova

Amostras	Cota X	Amostras	Cota X
Teste 17	55 mm	Teste 27	165 mm
Teste 18	55 mm	Teste 28	55 mm
Teste 19	82 mm	Teste 29	82 mm
Teste 20	110 mm	Teste 30	110 mm
Teste 21	137 mm	Teste 31	137 mm
Teste 22	165 mm	Teste 32	55 mm
Teste 23	55 mm	Teste 33	82 mm
Teste 24	82 mm	Teste 34	110 mm
Teste 25	110 mm	Teste 35	137 mm
Teste 26	137 mm		

Fonte: O autor (2019).

Para medição de rugosidade, foi utilizado o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-301. A cada parada para medição de desgaste, era feita a medição da rugosidade próximo ao final do comprimento usinado. O ponto de medição foi identificado como R1. O comprimento de amostragem medido é de 8mm (*cut off*). Portanto, esse ponto de medição é ilustrado na figura 53.

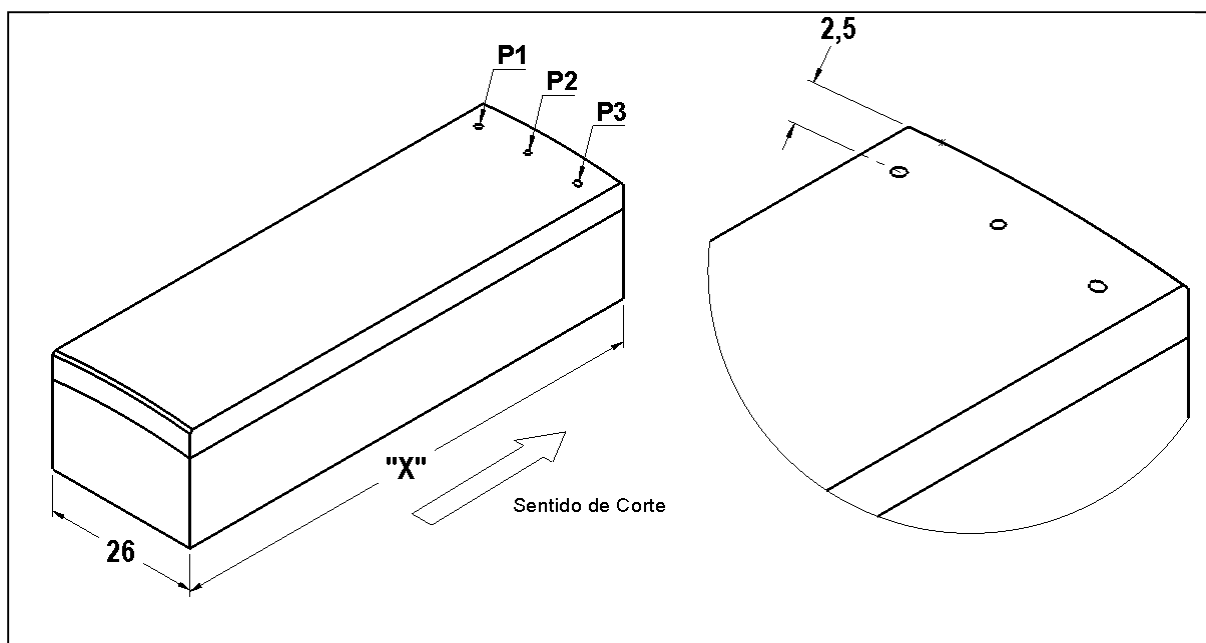
Figura 53 – Pontos para medição de rugosidade nos corpos de prova



Fonte: O autor (2019).

Foram executados 3 pontos de inspeções de microdureza de topo, em espessura “zero”, na distância de 2,5mm do final de cada comprimento usinado em cada corpo de prova. Para essa análise foi utilizado um Durômetro Vickers - D-07 - Mitutoyo. Carga Aplicada: 1000 g/Penetrador: Pirâmide diamante (136°). Essa inspeção visa verificar o impacto que o possível encruamento possa ter causado na superfície do material, alterando inclusive, sua dureza superficial. Tais pontos de inspeção de dureza foram identificados como P1, P2 e P3, conforme mostrado na figura 54.

Figura 54 – Pontos para medição de microdureza nos corpos de prova



Fonte: O autor (2019).

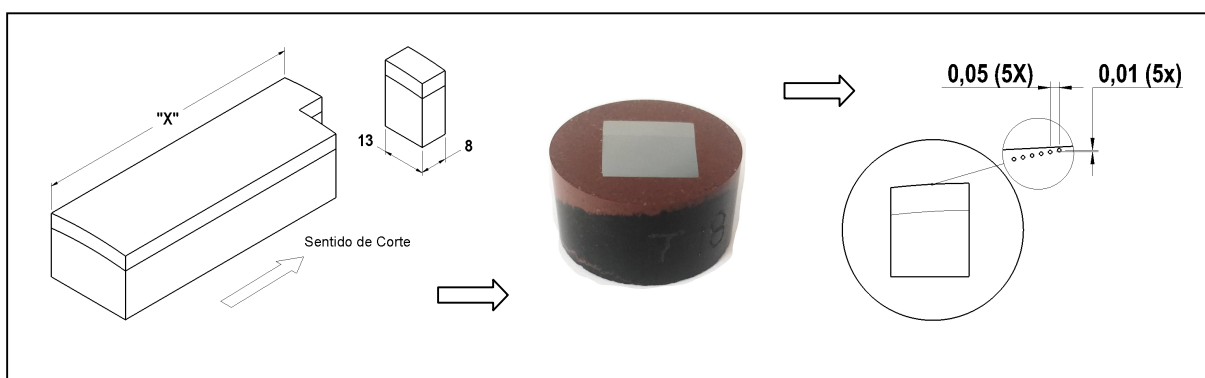
A superfície endurecida gera dificuldades nos processos de corte. Para estimar quantitativamente o efeito que o endurecimento da camada é capaz de causar na aresta da ferramenta, foram feitas imagens da seção transversal no início e no final de cada estratégia de corte (considerando-se os diferentes ângulos de posição, pressão da lubrificação, corte a seco e seção transversal antes de ser submetida ao processo de usinagem). Essas imagens foram coletadas através de análise metalográfica executada utilizando-se Microscópio ZEISS - Modelo: Axio Scope A1 - Analisador de Imagem: Sistema Quantitativo (DIGIMET PLUS - versão 5.0G). O reagente utilizado foi o Marble.

Ainda com objetivo de mensurar a espessura do material deformado plasticamente, em virtude do arranque de material durante o processo de usinagem (camada encruada), foram ainda executados ensaios de microdureza na seção transversal em todas as amostras. Para isso, foi retirada uma seção dos corpos de prova e executado embutimento em resina baquelite prensada à quente (figura 55).

Após o embutimento, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento manual úmido. A sequência de lixas utilizadas nessa preparação para o ensaio metalográfico foi: 80, 220, 400, 600 e 1200. Os ensaios foram executados em

Microdurômetro Shimadzu HVM 2000, a carga aplicada para esse ensaio foi de 490 μN e o tempo de penetração de 10 segundos. A distância de medição entre os pontos foi de 0,01mm na vertical e 0,05mm na horizontal. Já a primeira edentação foi executada na extremidade do corpo usinado, utilizando o limite máximo entre este e a resina baquelite.

Figura 55 – Esquema de preparação e medição do perfil de dureza



Fonte: O autor (2019).

Para inspeção e medição dos desgastes ocorridos na aresta dos insertos utilizados, foi usado o Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU. Foram analisadas as dimensões do desgaste médio de flanco e também do desgaste de entalhe (ambos identificados como ocorrência existente nos insertos utilizados na etapa 1 de testes).

Por fim, foram ainda coletadas amostras de cavacos de cada etapa de usinagem, a fim de avaliar sua morfologia e somente a classificação do tipo de cavaco resultante deste processo, conforme ISO 3685. Desses cavacos, foram registradas imagens de uma seção do cavaco e, ainda, de cavacos agrupados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como os testes foram executados em duas etapas distintas, tendo a primeira o objetivo de identificar a classe de inserto a ser utilizada, assim como os parâmetros de corte, e na segunda novas variáveis ao processo para verificação do impacto destas na aresta de corte e na superfície usinada. A análise dos resultados foi executada seguindo a mesma lógica.

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES RELATIVOS À ETAPA 1

4.1.1 Definição da classe do inserto

Após os testes com tempo de contato de 1 minuto, os insertos foram analisados em um Microscópio Eletrônico de Varredura, na qual foram analisadas as dimensões de desgaste do flanco e desgaste do entalhe. Essas análises foram realizadas de acordo com a norma ISO 3685 (1993).

Os resultados foram diferentes para os dois tipos de insertos testados. Os insertos reforçados com *whisker* ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$) sofreram falhas catastróficas já nos estágios iniciais da usinagem, impedindo uma avaliação adequada. No entanto, é possível observar um alto desgaste de entalhe nos flancos da ferramenta (figura 56).

Apesar de suas altas propriedades mecânicas, que resultam do reforço da matriz de Al_2O_3 com carboneto de silício, não foi possível desenvolver nas condições testadas a usinagem do revestimento da liga de níquel 625 usando esta classe de inserto. Nem mesmo a utilização de revestimento TiN e reforço com bióxido de zircônia foram capazes de viabilizar a utilização desta classe de inserto.

Uma hipótese para justificar tal ocorrência é a existência de diferentes profundidades de corte ao longo da usinagem, martelamento na face do inserto, decorrente do acabamento superficial processo de revestimento e a elevada dureza sobre o revestimento depositado. Outro fator potencial é a grande fragilidade destes insertos, consequência da dureza elevada. Mesmo a maior tenacidade dos insertos de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ quando comparada aos insertos SiAlON não foram capazes de superar os impactos negativos gerados pelo acabamento do cordão.

Figura 56 – Falha catastrófica nos insertos $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$



Fonte: O autor (2019).

Esses resultados obtidos nas etapas iniciais mostram ainda que, mesmo fazendo parte do mesmo grupo na tabela das superligas de níquel, os resultados

obtidos em experimentos de usinagem executados em diferentes ligas podem apresentar resultados substancialmente diferentes (baseados em resultados em estudos realizados sobre o inconel 718 e os resultados sobre a liga de níquel 625 desta pesquisa). Acrescentando ainda a variável da qualidade superficial gerada pelo processo de revestimento, os resultados encontrados podem requerer outras características a serem inseridas ou reavaliadas no processo, de modo que a usinabilidade e a vida útil da ferramenta utilizada atinjam níveis aceitáveis quando analisada com viés econômico e científico.

Essa diferença nos parâmetros corrobora ainda com estudos de Marques (2007), que descrevem sobre o aumento do desgaste das ferramentas diretamente ligado ao aumento do teor de níquel no material usinado, além dos carbonetos existentes em cada uma das ligas, que é responsável pela característica abrasiva das ligas.

Diferentes estudos já foram feitos para investigar os mecanismos de desgaste durante a usinagem de ligas de níquel, mas ainda não existe um consenso comum de opinião quanto à sua causa. No entanto, há um consenso de que estes resultam de uma combinação de fatores e não de um único mecanismo de desgaste (RICHARDS e ASPINWALL, 1989). De forma análoga, os resultados negativos obtidos com uso do inserto da classe Al_2O_3 reforçados com *whisker* possivelmente seja decorrente de mais de um mecanismo, ou ainda característica dos insertos utilizados.

Choques mecânicos, além de alta carga mecânica e térmica resultante da deformação plástica do cavaco são aplicados continuamente na face de ataque. Pequenos lascamentos, juntamente com o arrancamento de partículas, podem também ter contribuído para a formação de fratura na aresta de corte e face da ferramenta. A maior dureza, quando comparada com os insertos SiAlON, faz ainda com que insertos de $Al_2O_3 + SiC_w$ sejam mais suscetíveis à quebras decorrentes desses processos cíclicos.

Os insertos SiAlON apresentaram melhores resultados. O padrão de desgaste observado na aresta das ferramentas foi semelhante para as diferentes condições de corte. Pode ser observado desgaste de flanco uniforme e também alto desgaste de entalhe em forma de V. O desgaste do entalhe resulta de uma combinação de condições agressivas envolvidas durante o processo de usinagem

de ligas de Ni, como cavacos abrasivos, alta temperatura, resistência elevada e encruamento da região usinada mantida em alta temperatura.


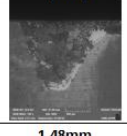
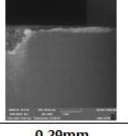

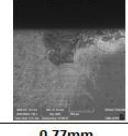
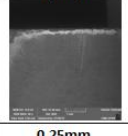

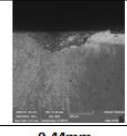
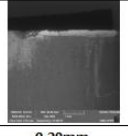

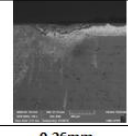
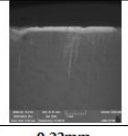

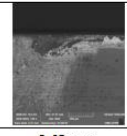
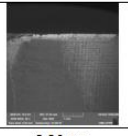

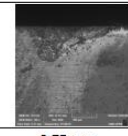
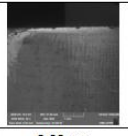
Outro fator observado é que a formação de um elevado desgaste de entalhe ocorrido de forma prematura, conforme pode ser observado nos testes 2 e 3 seguido da quebra abrupta também reforça esta hipótese (figura 60). Entretanto, é importante salientar que durante o processo não foi evidenciada a existência de corte interrompido, mas sim pequenas oscilações dimensionais pertinentes ao processo de revestimento. Os insertos SiAlON possuem excelentes propriedades em termos de dureza à quente, característica essa que podem ter contribuído diretamente na formação de um menor desgaste de entalhe que, quando pronunciado de maneira extremamente precoce, pode ocasionar a fratura abrupta do inserto.

4.1.2 Desgaste nas arestas de Corte

A figura 57 mostra os resultados e dimensões dos desgastes ocorridos nos insertos SiAlON. Corroborando com a literatura disponível, o desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte foi predominante para todos os parâmetros testados. Diferentemente dos insertos $Al_2O_3 + SiC_w$, o SiAlON apresentou boa resistência à quebra, diferenciando-se, assim, de outros estudos que apresentaram bons resultados durante utilização de $Al_2O_3 + SiC_w$ para usinagem de superligas.

O fato de a ferramenta SiAlON ter a maior resistência ao choque térmico é considerado uma das razões pelas quais ela não é tão suscetível ao desgaste de entalhe quanto as ferramentas cerâmicas baseadas em Al_2O_3 (JUN et al., 1997).

Figura 57 – Desgastes nas arestas dos insertos SiAlON

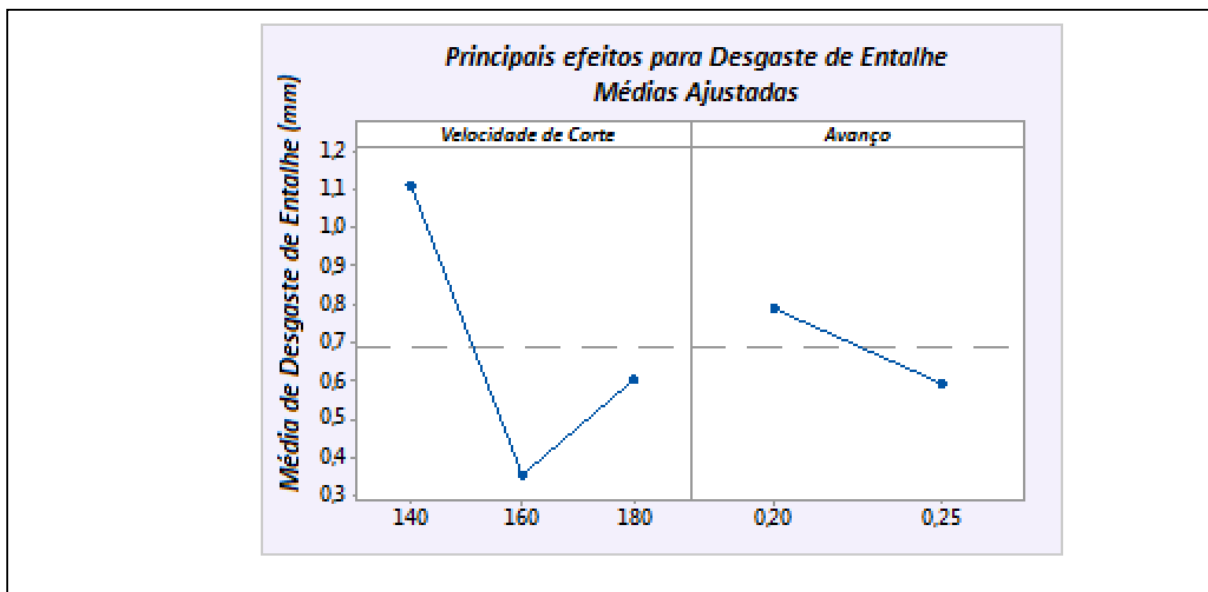
Teste	Desgaste do Inseto	Desgaste de Entalhe (VBN)	Desgaste de Flanco (VBB)	Teste	Desgaste do Inseto	Desgaste de Entalhe (VBN)	Desgaste de Flanco (VBB)
11		 1,48mm	 0,29mm	12		 0,77mm	 0,25mm
13		 0,44mm	 0,29mm	14		 0,26mm	 0,22mm
15		 0,48mm	 0,34mm	16		 0,75mm	 0,30mm

Fonte: O autor (2019).

O gráfico 14 mostra o comportamento do desgaste do entalhe em função da velocidade de corte e avanço. A velocidade de corte apresentou maior contribuição para a evolução do desgaste do entalhe (VBN). Inicialmente, o desgaste do entalhe é alto a 140 m/min, depois sofre uma queda brusca (160 m/min) e logo depois começa a aumentar novamente a 180 m/min. Existe uma tendência de que o maior avanço (0,25 mm/rot) diminua o desgaste do entalhe.

O maior desgaste do entalhe (VBN) foi observado na menor velocidade de corte (140 m/min) com a menor taxa de avanço (0,20 m/rot). A combinação de velocidade de corte de 160 m/min e taxa de avanço de 0,25 mm/rot resultou em menor desgaste do entalhe.

Gráfico 14 – Desgaste de entalhe em função da velocidade de corte e avanço



Fonte: O autor (2019).

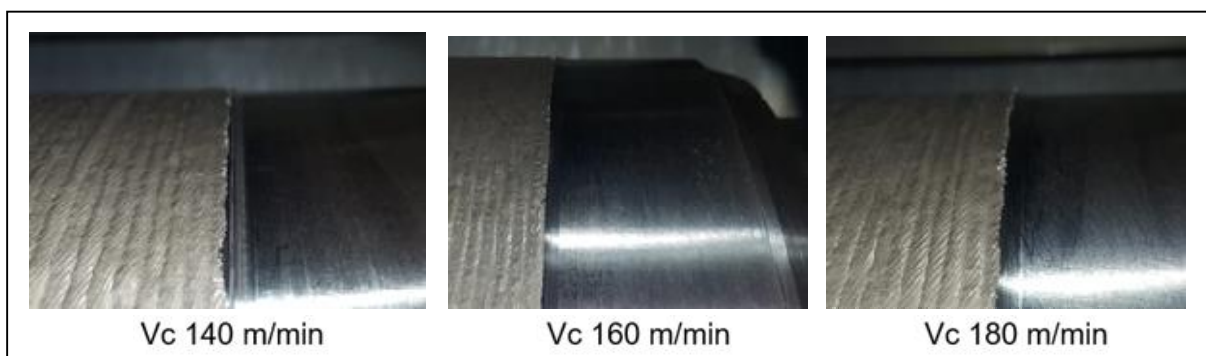
Essa ocorrência pode estar diretamente relacionada ao encruamento ocorrido na região de contato entre peça e ferramenta. A alta capacidade de encruamento, típica dos austeníticos, gera uma camada endurecida (YOUSSEF, 2015). Ao aumentar o avanço, a espessura do cavaco é aumentada de tal forma que supera a espessura de camada encruada, contribuindo, assim, para redução da formação do desgaste de entalhe evidenciado na altura da velocidade de corte.

Formação de pequenas rebarbas na profundidade de corte foi observada nos perfis usinados, especialmente para a menor velocidade de corte (figura 58). Essa ocorrência foi identificada por diferentes pesquisadores como uma das principais causas do desgaste acelerado do entalhe durante a usinagem de ligas de níquel (MAGRI, 2015; XIAO et al., 2010).

Embora nenhum grande volume de rebarbas tenha sido gerado, o comportamento do material influenciou a morfologia do cavaco e a qualidade da superfície. O cavaco se separa com um fluxo plástico lateral significativo do material da peça de trabalho na borda da zona de cisalhamento, causando a formação de rebarbas. O desgaste de entalhe é notavelmente o principal desgaste encontrado na usinagem de ligas de níquel. O uso de baixas velocidades de corte se mostrou extremamente prejudicial e propício a esse desgaste. Em todas as amostras, apesar

das diferentes dimensões, percebeu-se que esse desgaste ocorre na altura da profundidade de corte, corroborando trabalhos anteriores.

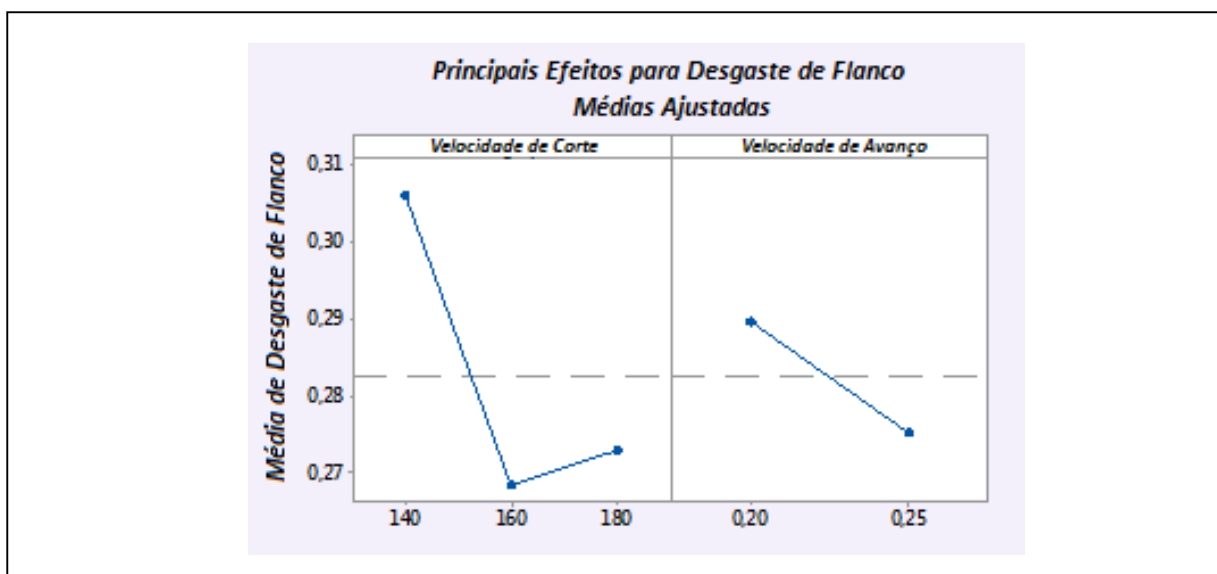
Figura 58 – Rebarbas formadas nos perfis usinados



Fonte: O autor (2019).

O gráfico 15 mostra o desgaste do flanco em função da velocidade de corte e avanço. Os gráficos são semelhantes aos do entalhe, porém, a diferença entre as melhores e piores condições foi menos pronunciada (cerca de 20%). O menor desgaste de flanco foi obtido empregando velocidade de corte de 160 m/min e taxa de avanço de 0,25 mm/rot.

Gráfico 15 – Desgaste de flanco em função da velocidade de corte e avanço



Fonte: O autor (2019).

O aumento do avanço se mostrou propício à redução do desgaste de flanco (VB_B), em que o avanço de 0,25 mm/rot apresentou em todos os testes valores inferiores àqueles com menor avanço (0,20 mm/rot). Esses resultados estão em acordo com Jahanbakhsh et al. (2016) que, segundo os autores, a interação entre avanço e velocidade de corte não causam mudança significativa na temperatura durante o processo.

4.1.3 Cavaco gerado durante o processo de corte

A figura 59 mostra as características dos cavacos provenientes dos testes compreendidos entre 11 e 16.

Figura 59 – Imagens dos cavacos provenientes da usinagem da Etapa 1



Fonte: O autor (2019).

Com os resultados coletados, foi possível uma análise qualitativa nesta primeira etapa. Foram analisadas as imagens do desgaste na aresta de corte obtidas através de MEV e a morfologia do cavaco proveniente desse processo. Conforme relatado por Youssef (2015), a alta taxa de encruamento e a baixa condutividade térmica das superligas de níquel afetam a formação de cavacos, levando a cavacos segmentados. O autor relata ainda que as ligas de níquel formam cavacos contínuos quando usinadas com velocidades de corte até 60 m/min, mas com valores superiores, o que é possível identificar o início da segmentação.

Conforme pode ser observado na amostra coletada do teste 5, fazendo uso da velocidade de corte mais baixa e maior avanço, o resultado é a forma de cavaco diferente das demais. De acordo com a ISO 3685 (1993), o cavaco proveniente do teste 5 se aproxima mais da classificação de formato helicoidal curto, enquanto todos os demais podem ser classificados como espiral cônico.

O ângulo de posição proveniente do uso de insertos redondos também tem ação direta na formação do cavaco, na medida em que a seção transversal do cavaco se modifica. Um maior ângulo de posição resulta em um corte mais contínuo e um fluxo de cavacos mais suave. A espessura do cavaco é reduzida e a largura também é aumentada com ângulos menores. A profundidade de corte não sofre influência do raio de ponta (inexistente para a geometria de inserto escolhida) e o ângulo de posição contribuiu para a formação de um cavaco em espiral direcionado para fora.

Essas características fizeram com que o inserto SiAlON fosse identificado com potencial de aplicação para usinagem da Liga de níquel de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico. Assim, novas configurações foram definidas para a execução da etapa 2 de testes, na qual, além da análise do impacto desse processo no inserto utilizado, foram analisadas algumas características da superfície resultante de tal processo de usinagem. Os parâmetros do teste 14 foram posteriormente utilizados para essa sequência de testes.

4.1.4 Material aderido nos insertos

As amostras resultantes foram submetidas ainda à análise pelo recurso de Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS), que permite identificar de forma semi-

quantitativa os elementos químicos presentes no desgaste de entalhe formado na aresta do inserto. O sulcamento inicial provocado pelo cavaco propiciou espaço para adesão de partículas, com posterior arrancamento do material junto com partículas da ferramenta (*attrition*), acelerando o desgaste de entalhe. O resultado dessa análise é mostrado na tabela 13.

Tabela 13 – Análise por EDS no desgaste de entalhe das amostras

Amostra	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
11	19.53	9.30	4.48
12	10.98	5.40	2.76
13	10.86	4.54	2.72
14	7.82	3.61	1.89
15	8.86	5.19	2.85
16	12.16	6.57	3.66

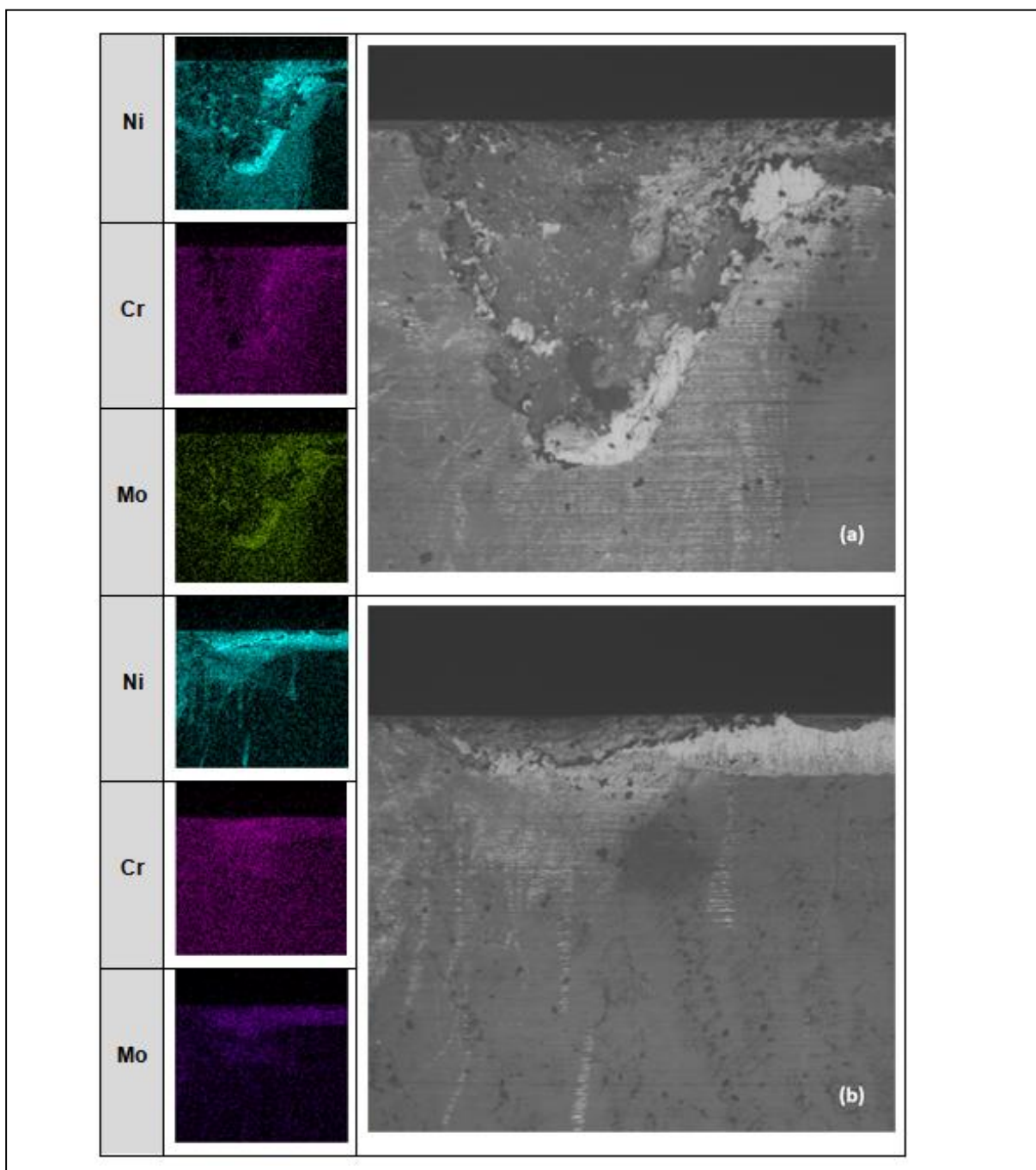
Fonte: O autor (2019).

A avaliação da análise de EDS pode ser uma indicação de *attrition* como um dos possíveis mecanismos de desgaste envolvido. Os resultados mostram, ainda, a amostra 14 como a melhor combinação para validação de parâmetros e classe de inserto para sequência dos testes seguintes, tendo em seus resultados o menor volume de material aderido.

As análises de EDS mostradas na tabela 13 demonstram uma relação direta entre a dimensão do desgaste de entalhe na profundidade de corte e o volume de material aderido. Assim, é possível concluir que o desgaste propiciou espaço para extrusão do cavaco que, conseqüentemente, aderiu na ferramenta com posterior arrancamento causando desgaste por *attrition*. O menor volume de material aderido é encontrado no desgaste de entalhe com menor dimensão, assim como fora encontrado o maior volume de material no maior desgaste de entalhe. A figura 60

mostra a concentração do material aderido no desgaste de entalhe das amostras 12 e 14 (que apresentaram maior e menor porcentagem de material aderido respectivamente), e pode ser observada a concentração dos principais elementos da liga no desgaste de entalhe ocorrido durante o processo de usinagem.

Figura 60 – Imagem do desgaste de entalhe com os principais elementos aderidos (a) amostra 12 e (b) amostra 14



Fonte: O autor (2019).

Também pode ser observada uma correlação entre o avanço e o volume de material aderido. Nas amostras 12 e 15, fazendo uso do avanço de 0,25 mm/rot com os extremos de velocidade de corte (140 e 180 m/min), são vistos maiores volumes de material da peça usinada e também as maiores dimensões do desgaste de entalhe.

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES RELATIVOS À ETAPA 2

Neste item serão tratados os resultados provenientes da segunda etapa de testes, em que os parâmetros previamente obtidos na etapa 1 foram aplicados com alterações empregadas ao diâmetro do inserto de cerâmica, pressão de lubrificação e tempo de contato inserto x peça.

Essas análises visam verificar os desgastes ocorridos na aresta dos insertos, condições superficiais dos corpos de prova após a usinagem (dureza e espessura de camada encruada), além de uma análise da morfologia do cavaco gerado durante o processo.

4.2.1 Desgaste da Ferramenta

Neste tópico serão analisados os desgastes de flanco e entalhe evidenciados durante os testes. Excluíram-se os insertos de Al_2O_3 reforçados com *whisker*, que teve sua hipótese de aplicação descartada na primeira etapa de testes e não foi possível mensurar os desgastes ocorridos nas arestas, no entanto, todos os parâmetros onde foi utilizado o inserto SiAlON puderam ser analisados. Foi executada a verificação dimensional dos desgastes e uma curva pode ser traçada, mostrando a evolução destes.

O tipo de desgaste dominante nos parâmetros ensaiados foi o desgaste de entalhe (VB_N), seguido pelo desgaste de flanco médio (VB_B). Em nenhuma das amostras foi observada a formação de aresta postiça, mas em algumas foi observada a presença de micro lascamento na aresta de corte, que pode ser

decorrente do acabamento superficial irregular, característico do processo de revestimento para deposição da liga de níquel 625 utilizado para esta pesquisa.

















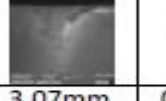

















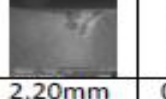


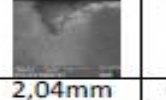


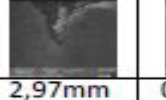




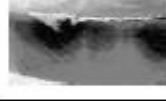






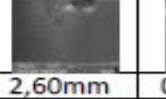


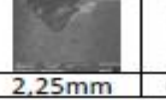

O desgaste ocorrido na aresta de corte do teste 17 (corte a seco) se mostrou bastante acentuado, com desgaste abrasivo bastante severo após 1 minuto de contato com a peça de trabalho. Esse desgaste pode estar relacionado à temperatura atingida na região de contato, uma vez que a amostra foi usinada sem uso de lubrificante. Conforme já abordado, quando submetidas a altas temperaturas, as ligas de níquel apresentam alta resistência mecânica. Assim, a utilização de lubrificantes é essencial para usinagem da liga nas configurações testadas neste trabalho, mesmo quando utilizadas ferramentas cerâmicas.

O mecanismo abrasivo foi mais significativo no desgaste de flanco médio na aresta da ferramenta. Embora as ferramentas cerâmicas mantenham uma dureza à quente elevada quando submetidas a operações em alta temperatura, o desgaste da ferramenta, ao usinar ligas à base de níquel, é dominado pelo mecanismo de abrasão e também por grãos arrancados da própria ferramenta soltas através do *attrition*. Esse desgaste abrasivo visualizado nas ferramentas é decorrente da presença de carbonetos abrasivos duros existentes na microestrutura das ligas a base de níquel que, quando arrancadas do material da peça de trabalho, ficam presas na interface ferramenta-peça de trabalho (EZUGWU et al., 1999).

Pode-se observar ainda que o desgaste de flanco evolui gradativamente ao longo da vida útil, independentemente se o corte foi realizado com refrigeração convencional ou em alta pressão. Entretanto, é vista uma evolução desse desgaste mais lento nas configurações onde foi utilizado maior ângulo de posição combinado com fluido lubrificante de baixa pressão. Observa-se, também, que nos insertos menores (maior ângulo de posição), o desgaste abrasivo ocorreu de forma mais intensa, quando comparado aos insertos maiores (menor ângulo de posição). Tal ocorrência possivelmente esteja relacionada à temperatura na região de contato, pois os insertos maiores possuem maior área para distribuição da temperatura ao longo da aresta de corte.

Os desgastes ocorridos são mostrados na Figura 61.

Figura 61 – Desgaste ocorrido na aresta de corte dos inserts

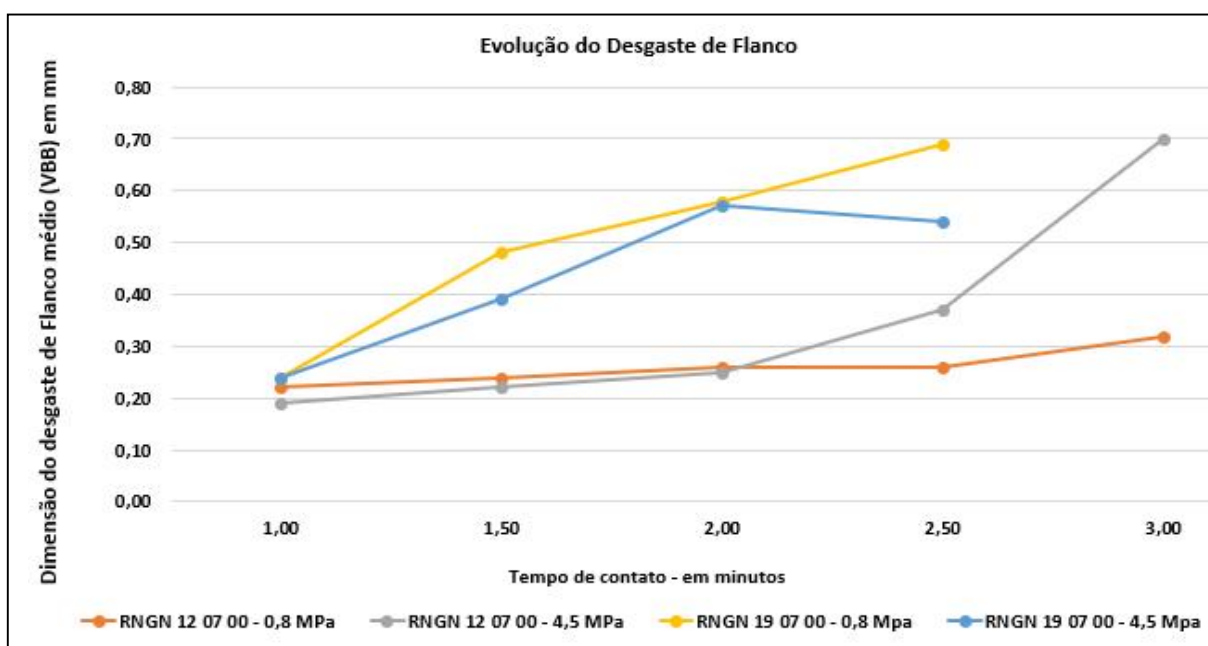
Teste	Desgaste do inserto	Desgaste de Entalhe (VBN)	Desgaste de Flanco (VBB)	Teste	Desgaste do inserto	Desgaste de Entalhe (VBN)	Desgaste de Flanco (VBB)
17				18			
		1,35mm	0,19mm			0,26mm	0,22mm
19				20			
		1,62mm	0,24mm			2,76mm	0,26mm
21				22			
		3,14mm	0,26mm			3,07mm	0,32mm
23				24			
		2,19mm	0,19mm			2,15mm	0,22mm
25				26			
		2,82mm	0,25mm			3,09mm	0,37mm
27				28			
		4,47mm	0,70mm			2,20mm	0,24mm
29				30			
		2,04mm	0,48mm			2,97mm	0,58mm
31				32			
		3,48mm	0,69mm			1,68mm	0,24mm
33				34			
		3,35mm	0,39mm			2,60mm	0,57mm
35							
		2,25mm	0,54mm				

Fonte: O autor (2019).

Após o dimensionamento do desgaste de flanco médio, foi possível visualizar sua evolução em função do tempo de contato durante corte. Conforme pode ser visto no gráfico 16, o desgaste de flanco se mostrou maior desde a primeira medição na configuração com menor ângulo de posição e baixa pressão de

lubrificação. Em contrapartida, o inserto RNGN 12 07 00, que proporciona maior ângulo de posição durante o processo de usinagem fazendo uso de lubrificação em baixa pressão (0,8 MPa), resultou nos menores valores de desgaste médio de flanco.

Gráfico 16 – Evolução do Desgaste médio de Flanco (VB_B) nas diferentes configurações de teste



Fonte: O autor (2019).

Apesar de o desgaste de flanco geralmente ser encontrado mais facilmente em operações que envolvem altas temperaturas, afetando as propriedades da ferramenta e do material usinado, os testes executados demonstraram que os menores valores foram encontrados na amostra com maior ângulo de posição e menor pressão de lubrificação. Esse tipo de desgaste é formado a partir da ação de fricção da superfície da peça de trabalho recém-gerada, à medida que se movem pela área de contato, sendo agravado durante a usinagem da liga de níquel 625 pela presença de carbonetos duros na matriz austenítica da liga.

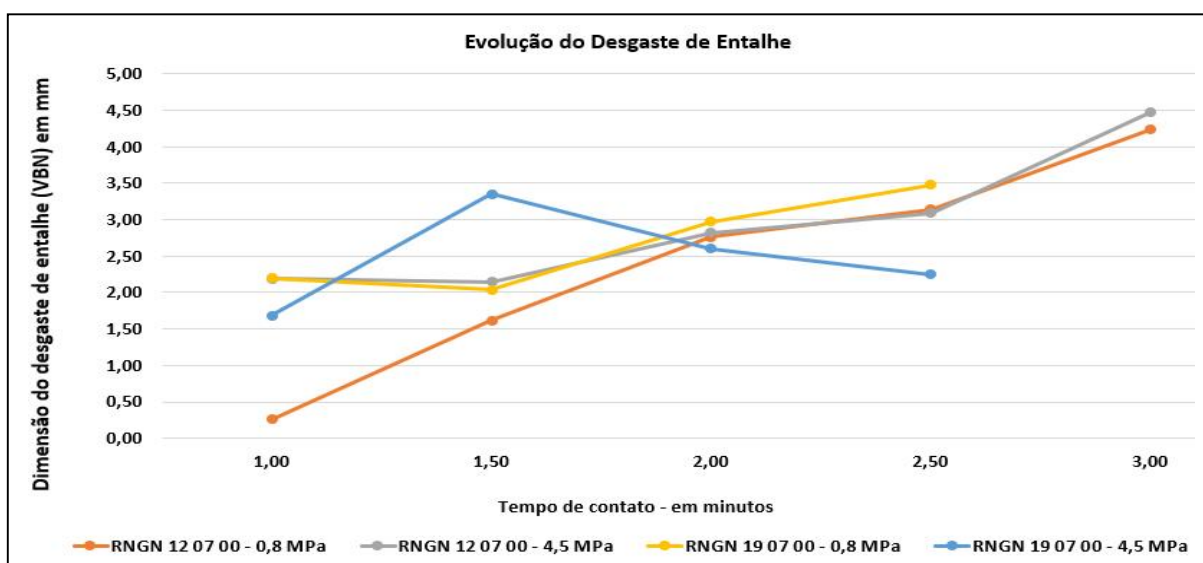
Shaw et al. (2005) e Ezugwu et al. (1999) afirmam que o desgaste de entalhe é formado pelas rebarbas produzidas nas arestas laterais do cavaco e pelo endurecimento da camada superficial produzido durante a usinagem, alta tensão na

interface cavaco-ferramenta e cavacos abrasivos provenientes da usinagem de ligas de níquel. Embora não tenha sido observada a formação de rebarbas durante a Etapa 1 de testes, essa região, por sua vez, é suscetível ao encruamento do material na altura da profundidade de corte na parte mais externa da superfície da peça usinada, conforme já relatado por diferentes pesquisadores.

O gráfico 17 mostra a evolução do desgaste de entalhe para as diferentes configurações de testes. Somente a configuração onde foi utilizado menor ângulo de posição atrelado à maior pressão de lubrificação apresentou valores mais estáveis para este tipo de desgaste. Analisando-se especificamente a dimensão de desgaste encontrado com 1,5 minutos de contato, utilizando-se inserto RNGN 19 07 00, é possível que, além do contato cíclico com a superfície encruada, o mecanismo de *attrition* (aderência com arrastamento) tenha sido mais acentuado em virtude da presença de partículas de carbonetos duros existentes na região de contato da profundidade de corte durante usinagem desta amostra.

Também tendo em vista que esta foi a única amostra com comportamento diferenciado de forma negativa, é aceitável admitir que a reta traçada para o referido desgaste seja de uma evolução, porém, com o menor valor entre todas as configurações testadas nesta pesquisa.

Gráfico 17 – Evolução do Desgaste de entalhe (VBN) nas diferentes configurações de teste



Fonte: O autor (2019).

Em todos os testes, a incidência do desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte está associada aos desgastes por abrasão, difusão e *attrition* (aderência e arrastamento). A perda de material na aresta de corte é decorrente do sulcamento por partículas de elevada dureza. Conseqüentemente, o mecanismo do tipo *attrition* é transferido para o desgaste de entalhe (SMITH, 1994).

Por meio de ensaios EDS foi analisado o desgaste de entalhe para verificar a presença de material aderido neste perfil. Os valores provenientes desse ensaio são mostrados na tabela 14, com os 3 principais elementos que constituem a liga de níquel 625.

Tabela 14 – Material aderido no desgaste de entalhe

Amostra	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
17	22,54	19,11	0,60
18	7,82	3,61	1,89
19	30,00	6,12	0,88
20	35,01	16,33	0,94
21	29,43	14,85	0,81
22	30,99	1,30	2,57
23	36,10	0,00	1,66
24	28,66	0,00	1,72
25	34,11	4,13	1,58
26	27,67	7,11	1,64
27	44,14	27,03	1,81
28	24,51	1,47	4,35
29	20,05	3,21	3,41
30	18,38	0,00	2,87
31	23,63	1,34	4,32
32	14,66	0,00	2,44
33	23,33	0,00	4,91
34	11,79	0,00	2,34
35	13,83	0,00	2,37

Fonte: O autor (2019).

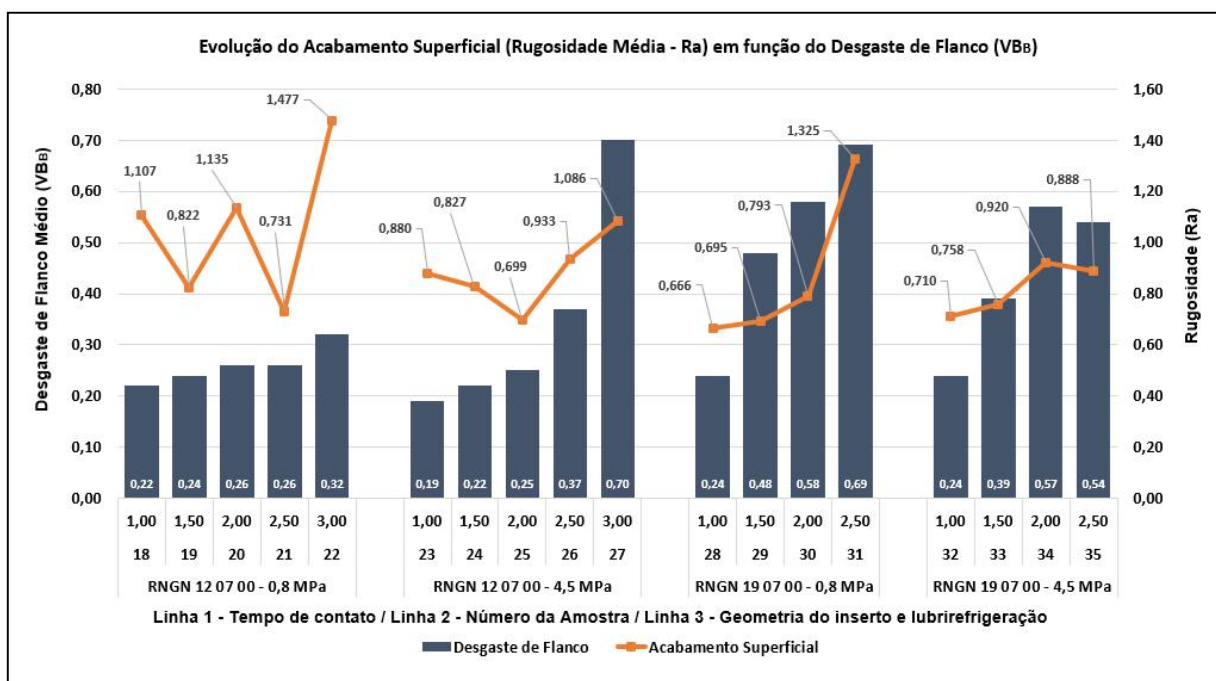
Os dados coletados mostram que os insertos com menor ângulo de posição apresentaram menor volume de material aderido, coincidindo com as menores dimensões de desgaste de entalhe. É percebido ainda que, com a utilização de fluido lubrificante com maior pressão, essa adesão foi menor quando comparada com pressão normal. Tal ocorrência está diretamente ligada aos dois fatores principais: a lubrificação com maior pressão apresenta maior capacidade de distribuição e dissipação do calor, além de o fato de o menor ângulo de posição ser responsável por gerar menores valores de encruamento na região usinada e, conseqüentemente, nas rebarbas, que são responsáveis pela formação do desgaste de entalhe.

4.2.2 Acabamento Superficial

O acabamento superficial proveniente do processo executado, além de ser um parâmetro de controle da qualidade do processo de usinagem, é ainda um indicador do estado da aresta do inserto. O acabamento superficial é importante, pois a grande maioria das falhas durante o processo reflete diretamente na superfície usinada. Nos processos de fabricação, o acabamento é um reflexo da ferramenta que o produz.

O gráfico 18 mostra os valores obtidos na rugosidade superficial nas diferentes configurações testadas. A aresta secundária de corte é responsável pelo controle dimensional e acabamento da superfície que está sendo gerada. Conseqüentemente, quando o processo tende a gerar um elevado desgaste de flanco, há de apresentar também maiores valores de acabamento superficial (Ra).

Gráfico 18 – Evolução do Acabamento superficial (Ra) em função do desgaste de flanco médio (VB_B)



Fonte: O autor (2019).

Em quase todas as configurações, a utilização de lubrificação com alta pressão proporcionou melhores valores para a rugosidade média medida quando comparados aos valores medidos com utilização de pressão normal. Já para a configuração onde fora executado corte sem uso de lubrificação, o valor atingido para rugosidade média foi observado em um tempo de contato 3 vezes mais rápido. Ao final de 1 minuto de contato, a dimensão do desgaste de flanco era de 0,19mm e o Ra de 1,048 μm. Na configuração com uso de lubrificação com alta pressão, chegou-se ao mesmo valor de rugosidade somente após 3 minutos de contato.

De modo geral, considerando-se somente o ângulo de posição, o menor ângulo (insertos RNGN 19 07 00) apresentou valores inferiores de rugosidade superficial média quando comparados ao maior ângulo de posição (insertos RNGN 12 07 00). O aumento da rugosidade superficial se mostra com tendência de acompanhar a evolução do desgaste de flanco, embora com menor intensidade nas configurações onde fora utilizada lubrificação com alta pressão.

Por fim, os parâmetros rugosidade média (Ra) tiveram melhor desempenho no acompanhamento da evolução dos desgastes durante as medidas de vida. Entretanto, não se mostram capazes de fornecer indícios seguros do fim de vida, tendo em vistas que algumas amostras, mesmo não estando dentre os maiores valores de desgaste de flanco, apresentaram um acabamento superficial com valores superiores a outros que apresentaram maiores dimensões de desgaste de flanco médio.

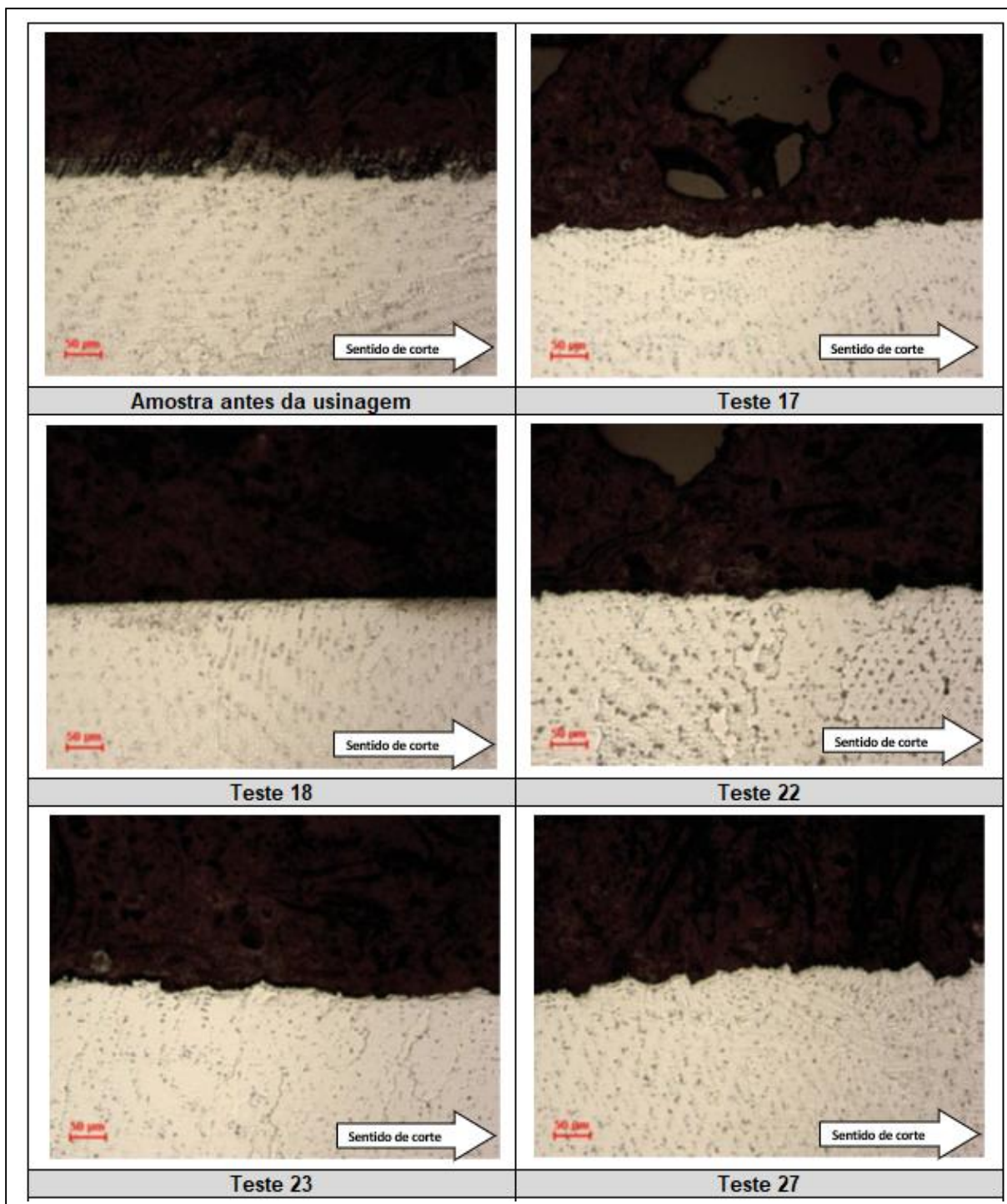
Esse tipo de ocorrência pode ser visualizado na amostra 22 (desgaste de flanco mediano, porém com alto valor de rugosidade superficial) e também na amostra 29 (desgaste de flanco foi o sexto maior identificado enquanto o acabamento superficial foi o segundo mais baixo).

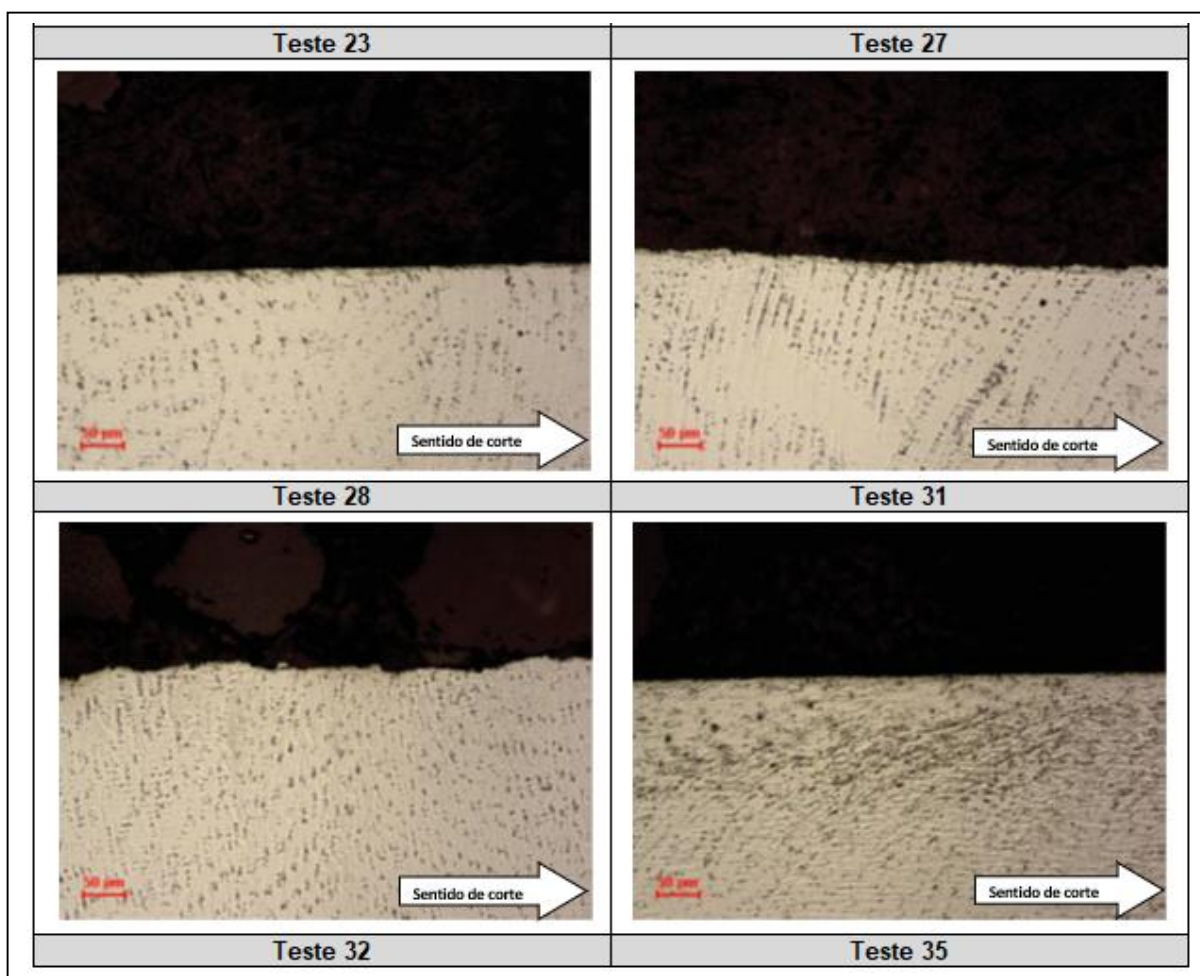
4.2.3 Formação de camada encruada e Dureza Superficial

O endurecimento por deformação ou encruamento (*“strain-hardening”* ou *“work-hardening”*) pode ser definido como o aumento da resistência de um material à medida que ele vai sendo deformado. Conforme abordado por Ezugwu et al., (1999), a matriz austenítica de ligas à base de níquel é responsável por gerar um rápido endurecimento superficial durante a usinagem. Esse é um dos principais motivos de as ligas austeníticas serem classificadas como de baixa usinabilidade.

As imagens obtidas da micrografia executada na seção transversal em cada uma das amostras revelam um deslocamento dos carbonetos no sentido da direção do corte (figura 62). O rearranjo dos grãos da superfície usinada é induzido pela deformação plástica ocorrida ao longo do caminho percorrido pela ferramenta durante o processo de corte. Essas mudanças de microestrutura ocorridas durante o processo de usinagem resultam em uma variação das propriedades mecânicas nas seções transversais da superfície em ligas de níquel, especialmente dureza (ZOU et al., 2009).

Figura 62 – Visualização da camada encruada em cada uma das amostras – aumento 200X





Fonte: O autor (2019).

As diferenças evidenciadas nas imagens obtidas das amostras dos extremos de cada configuração (mínimo e máximo tempo de contato) revelam os diferentes comportamentos na camada subsuperficial. A deformação subsuperficial observada pode ser atribuída a efeitos mecânicos e térmicos possivelmente associados ao aumento dos esforços de corte, decorrente do aumento do desgaste da ferramenta.

O agrupamento dos carbonetos, assim como o aumento do volume de carbonetos inclinados no sentido de corte, corroboram com resultados de testes executados por Zhou et al. (2011) durante usinagem de inonel 718 com insertos de cerâmica reforçados com *whisker*. Segundo os autores, o aquecimento localizado e os altos esforços devido ao aumento de forças são considerados como a principal razão para a mudança na camada subsuperficial, tendo em vista a elevação da carga térmica/mecânica que atuam sobre a superfície usinada como resultado do desgaste da ferramenta.

As imagens revelam ainda danos ocorridos na superfície proveniente do processo de torneamento. Zou et al. (2009) descrevem à respeito da mesma ocorrência de danos na superfície durante usinagem da liga NiCr20TiAl. Para os autores, essa ocorrência é decorrente de um processo de arrancamento de carbonetos e deformação de grãos na zona de deslizamento. Cavidades superficiais são formadas porque as partículas de carboneto não sofrem deformação plástica durante processo de usinagem. Assim, as partículas de carboneto se separam da superfície usinada dando origem às cavidades.

As imagens revelam ainda que durante o processo de corte houve deslocamento e posterior empilhamento irregular dos grãos abaixo da superfície usinada. A formação de uma zona de deslizamento com uma profundidade irregular é decorrente da incompatibilidade de deformação ocorrida durante o processo de corte. Os contornos de grãos impedem um deslocamento uniforme dos grãos, pois estes não podem ultrapassar os limites e acabam se acumulando nos contornos de grão (ZOU et al., 2009).

As imagens mostram a formação de camada encruada nas diferentes configurações, assim, foram medidos pontos de microdureza de topo, de modo que fosse possível visualizar algum tipo de comportamento evolutivo ao final do percurso usinado (tabela 15), seja ele de acordo com as dimensões do inserto utilizado (redução do ângulo de posição) ou ainda, com alteração no modo de fornecimento de lubrificação de baixa pressão (0,8 MPa) ou alta pressão (4,5 MPa).

Tabela 15 – Valores obtidos em medição de micro dureza de topo (mHV) em cada amostra

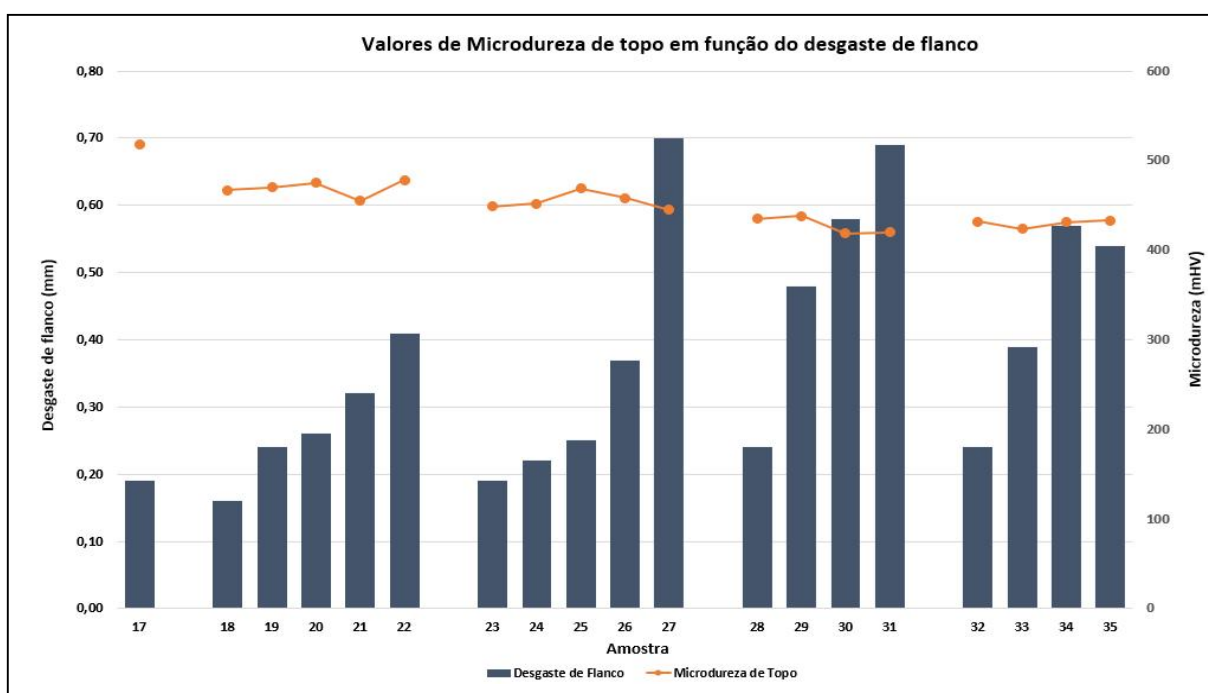
Amostra	Inserto	Lubrificação	Tempo de contato	Pt1	Pt2	Pt3	Média
17	RNGN 12 07 00	à seco	1,00	498	522	534	518
18				480	469	453	467
19		0,8 MPa	1,50	470	478	463	470
20			2,00	490	470	464	475
21			2,50	470	458	436	455
22			3,00	485	468	480	478

23		4,5 MPa	1,00	457	455	435	449
24			1,50	461	443	452	452
25			2,00	482	460	466	469
26			2,50	471	442	460	458
27			3,00	456	438	441	445
28	RNGN 19 07 00	0,8 MPa	1,00	416	451	439	435
29			1,50	447	421	445	438
30			2,00	409	418	431	419
31			2,50	435	410	416	420
32		4,5 MPa	1,00	443	421	432	432
33			1,50	424	438	411	424
34			2,00	423	447	423	431
35			2,50	445	427	427	433

Fonte: O autor (2019).

Para visualizar possível correlação entre de desgaste de flanco e dureza superficial, foi traçada uma curva utilizando-se com os valores médios de dureza mostrados na tabela 15. O cruzamento desses dados é mostrado no gráfico 19.

Gráfico 19 – Valores de microdureza após usinagem das amostras finais

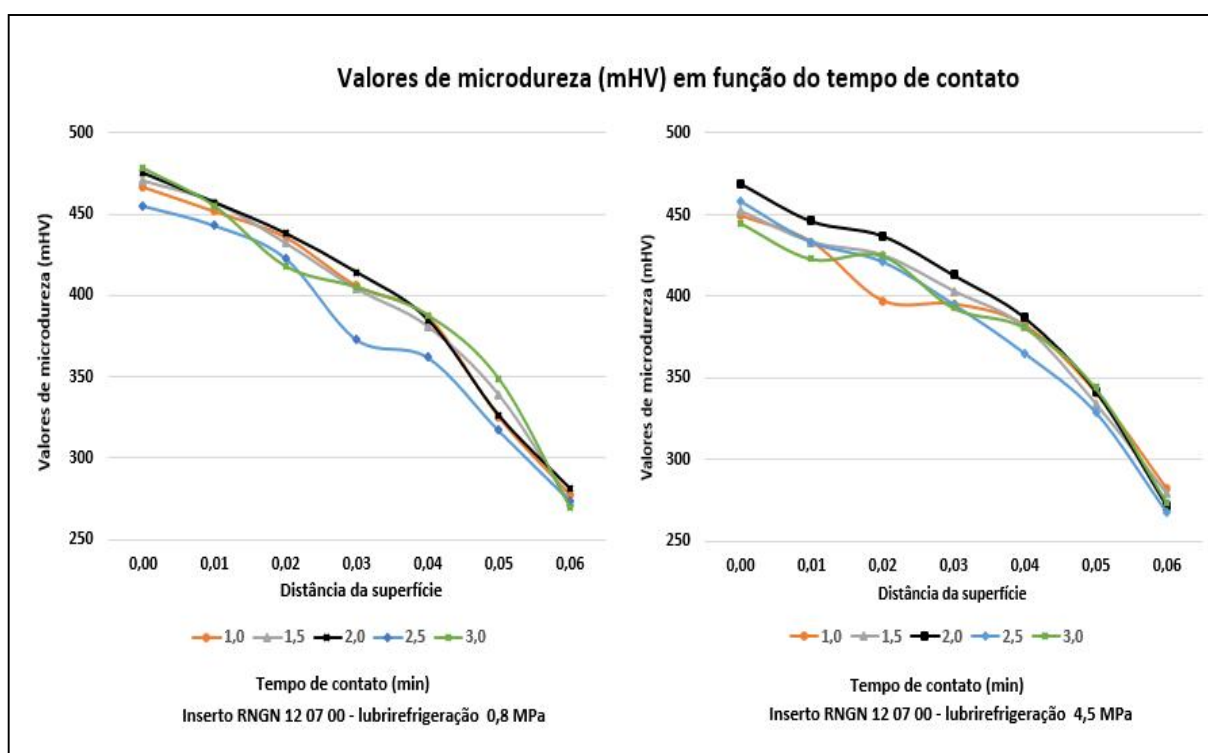


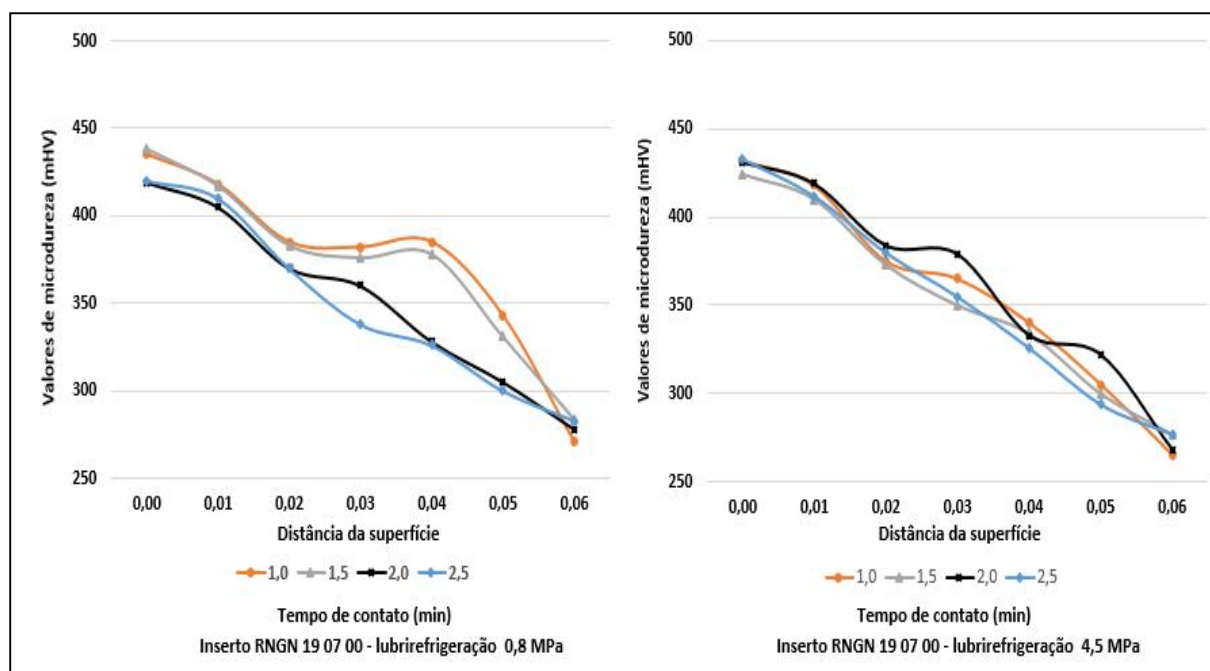
Fonte: O autor (2019).

Os valores de microdureza encontrados não revelam influência direta do desgaste de flanco nos valores de dureza encontrados. A amostra 17 (corte a seco), apesar de ter apresentado desgaste de flanco com valores baixos (conforme abordado foram encontrados outros desgastes mais severos nesta amostra), apresentou o valor mais alto de microdureza superficial. Pode-se observar que a utilização de ângulos de posição maiores (insertos RNGN 19 07 00) é capaz de proporcionar menores valores de dureza superficial.

A geometria da ferramenta também é um fator de grande influência na vida da ferramenta, tendo em vista que a diminuição do ângulo de posição para mesmos parâmetros de usinagem acarreta uma diminuição da espessura de corte. Essa variação do ângulo de posição gera maior vida da ferramenta, já que é responsável também por uma melhor distribuição da temperatura de corte em um trecho maior da ferramenta. Observa-se do gráfico 20 que o valor de microdureza é maior próximo da camada superficial usinada, e diminui gradualmente com a profundidade abaixo da superfície usinada, aproximando-se da média da dureza do material antes de ser submetido ao processo de usinagem.

Gráfico 20 – Valores de microdureza abaixo da superfície após usinagem das amostras finais





Em todas as configurações onde foi utilizado menor ângulo de posição (amostras de 28 a 35 – usinadas com inserto RNGN 19 07 00) é possível perceber que a dureza superficial é inferior àqueles valores maiores. A utilização de ângulos de posição menores demonstra serem favoráveis às operações de torneamento, pois propiciam maior distribuição das forças de corte sobre a aresta.

A diminuição do endurecimento abaixo da superfície pode estar relacionada à neutralização da temperatura e efeitos da tensão gerada durante o processo abaixo da superfície usinada. Os maiores valores de microdureza encontrados nas proximidades da superfície usinada podem ser atribuídos ao empilhamento dos grãos devido às discordâncias durante deformação plástica (EZILARASAN et al., 2013).

A amostra 17, onde fora executada usinagem com 1 minuto de contato e sem refrigeração, é possível verificar que o valor de microdureza superficial decorrente de um encruamento é maior do que todas as demais amostras (considerando-se o mesmo tempo de contato peça x ferramenta). Uma hipótese para essa ocorrência é que os desgastes observados nas arestas dos inserts geram aumento das tensões aplicadas, temperaturas geradas e do atrito na aresta de corte, e/ou próximo à mesma. Com a deformação plástica da microestrutura, que ocorre na superfície da peça por causa da remoção do material, têm-se um processo de

encruamento que, por sua vez, gera o aumento da dureza superficial do material usinado.

Somando-se o desgaste da ferramenta à deformação plástica que é inerente ao processo de usinagem, pode-se afirmar que, ao invés de uma operação de corte, ocorre uma operação de esmagamento da superfície, o que acarreta no aumento da espessura encruada. Deve-se considerar também a principal característica do material usinado, apresentando elevada resistência mecânica quando submetido a elevadas temperaturas. Assim, este acaba por apresentar resistência ao cisalhamento.

Com a diminuição da espessura do cavaco, ocorre ainda uma diminuição no grau de recalque e, portanto, aumento no ângulo de cisalhamento. Assim, os cavacos provenientes desse processo apresentam maior dificuldade de se romper, esperando assim, a produção de cavacos helicoidais longos.

4.2.4 Formas do Cavaco

Foram coletados cavacos do extremo de cada configuração de teste (mínimo e máximo tempo de contato), além dos cavacos provenientes da amostra usinada sem uso de óleo lubrificante, de modo que pudessem ser verificados possíveis impactos do tempo de contato, condições da aresta de corte e pressão da lubrificação na formação destes. Essas amostras de cavacos são mostradas na figura 66.

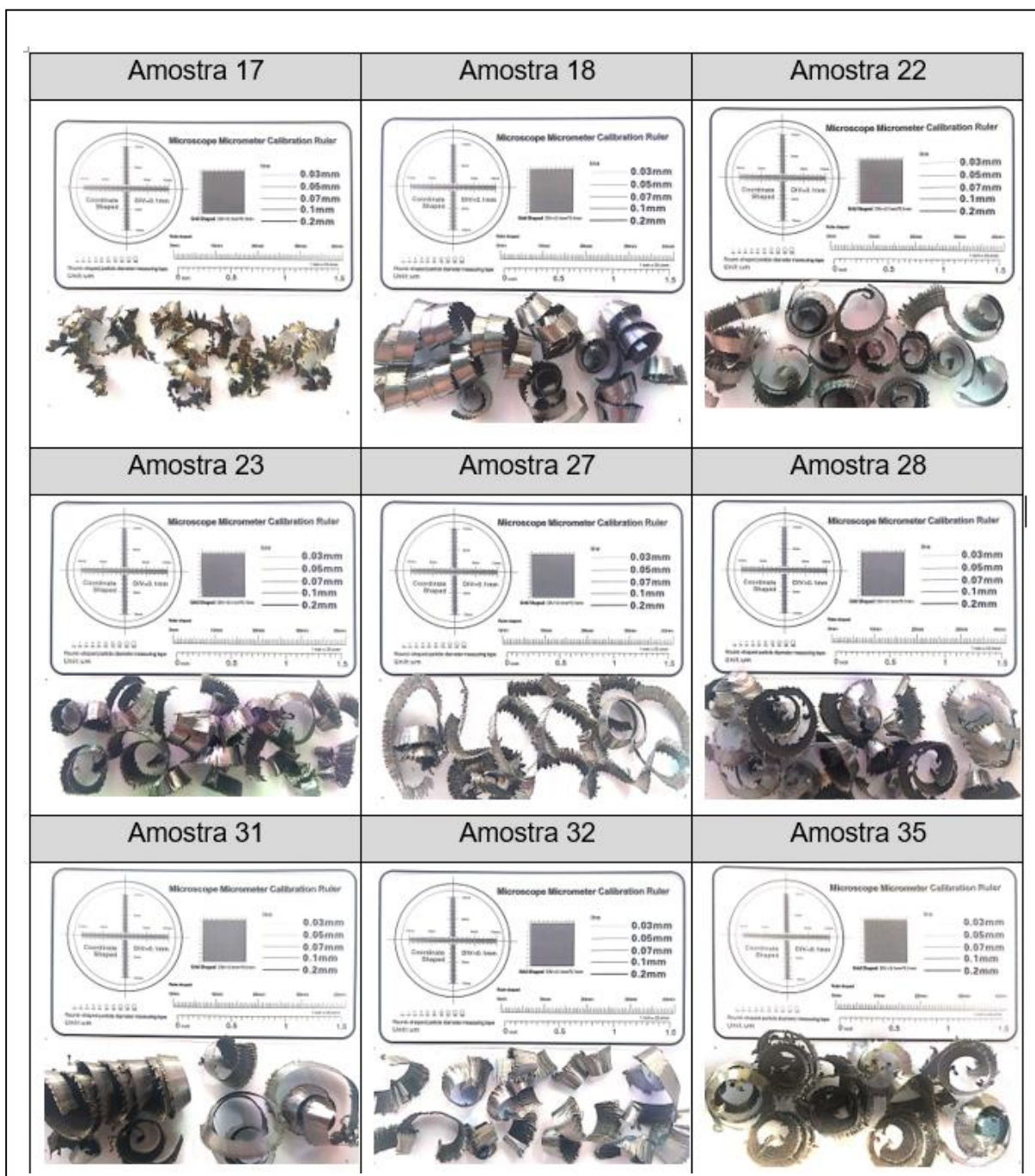
Nas amostras onde a ferramenta apresentou maior desgaste na aresta de corte (desgaste de flanco decorrente do maior tempo de contato), é possível observar irregularidades nas laterais do cavaco. De acordo com Diniz et al. (2010), fatores como o desgaste da ferramenta, forças de corte, temperatura na região de corte e penetração do fluido de corte são influenciadores na formação do cavaco. Como nessas amostras já foram identificados maiores valores de dureza superficial e de desgaste de flanco, essa característica observada possivelmente seja resultado de um arrancamento de material durante o processo ao invés de corte, pois superfícies com alta taxa de encruamento requerem muita energia para formação do cavaco (valor alto da pressão específica de corte – baixa usinabilidade).

Já os estudos de Stodki (2013), durante torneamento longitudinal da liga de níquel 625 com insertos de metal duro, revelaram que é mínima a influência do desgaste de flanco ocorrido no inserto na forma dos cavacos gerados durante o processo. Por outro lado, qualquer pequena mudança na morfologia do material usinado (descontinuidade da estrutura do material) pode ter impacto significativo na forma do cavaco.

Essa mesma ocorrência verificada por Stodki (2013) se replicou em tais estudos, pois, conforme pode ser verificada na figura 63, a forma dos cavacos nos diferentes tempos de contato (que ocasionaram diferentes valores de desgaste de flanco) não fora alterado significativamente, mantendo os cavacos nas formas consideradas ideais citados pelo autor. Como decorrência da menor espessura do cavaco, era esperado que nas amostras usinadas com menor ângulo de posição apresentassem cavacos mais longos, entretanto, isso não foi observado nos testes executados.

Majoritariamente, as amostras apresentaram características de segmentação, que é possivelmente proveniente da diminuição na resistência do material devido o aumento local da temperatura, promovido pelas deformações plásticas que igualam ou excedem a taxa de aumento da resistência, além do encruamento no plano de cisalhamento primário. Esse fenômeno, também referido como cisalhamento termoplástico catastrófico, é característico de materiais com baixa condutividade térmica, quando usinados, utilizando altas velocidades de corte (SHAW, 2005; MACHADO et al., 2011), em que a temperatura que é gerada em velocidades mais elevadas. Associada à refrigeração, causa um rápido resfriamento do cavaco fragilizando-o.

Figura 63 – Imagens dos cavacos provenientes da usinagem da Etapa 2



Fonte: O autor (2019).

A imagem da amostra cavacos coletado após usinagem do teste 17 apresenta uma forma muito distinta das demais, com aspecto de arrancamento de material ao invés de corte. Esta ocorrência pode estar relacionada à característica das ligas de níquel, que apresentam maior resistência mecânica quando submetida

a altas temperaturas, fato este, sendo um dos maiores responsáveis pela baixa usinabilidade apresentada por estes materiais. Ainda com a falta de lubrificação, há o aumento do atrito entre a ferramenta e superfície de trabalho, tendo em vista a inexistência de uma camada lubrificante entre a ferramenta e a peça (ou cavaco). Esta condição provoca o aumento do desgaste abrasivo na aresta da ferramenta e por consequente, as más condições de corte geram cavacos com aspecto de arrancamento e desformes, conforme pode ser observado.

Para as diferentes condições de lubrificação não foi possível traçar correlação com a formação do cavaco, entretanto, pode-se entender que a utilização de meios lubrificantes são essenciais para usinagem nas condições estudadas.

5 CONCLUSÕES

- A utilização de insertos $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ não é aplicada nas condições deste estudo para usinagem da liga de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico.
- A utilização de óleo lubrificante mostrou-se viável e promissora para viabilizar o uso dos insertos de cerâmica nas condições estudadas.
- Os melhores resultados em relação ao desgaste dos insertos foram encontrados com utilização de V_c de 160 m/min e 0,25 mm/rot.
- Os insertos de SiAlON mostram-se mais promissores para usinagem desta liga, quando comparados ao $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$.
- Os altos valores de microdureza superficial decorrente do processo de revestimento, atrelados às irregularidades superficiais características do processo de deposição da Liga de níquel 625 tem influência direta nos resultados de desgaste dos insertos de cerâmica durante processo de torneamento.
- O desgaste predominante no inserto de SiAlON foi o de entalhe na altura da profundidade de corte e o mecanismo principal é o *attrition*.
- A utilização do inserto com menor ângulo de posição (RNGN 19 07 00) proporcionou menores valores de desgaste de entalhe.
- O desgaste de flanco não aumenta a dureza superficial nas condições testadas nesta pesquisa.
- O menor ângulo de posição associado à alta pressão de lubrificação é capaz de proporcionar menores valores de desgaste de flanco.
- A pressão do lubrificante não foi capaz de aumentar a vida útil ou contribuir na segmentação dos cavacos durante torneamento nas condições estudadas.
- O ângulo de posição do inserto é capaz de alterar as condições superficiais, onde menores ângulos resultam em menor encruamento e consequentemente menor dureza superficial.

- Não foi possível observar influência dos ângulos de posição testados nesta pesquisa na forma do cavaco.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em complemento aos ensaios realizados nesta pesquisa, sugere-se outros estudos para complementar e aprimorar os resultados obtidos durante usinagem da liga de níquel 625, como seguem:

- Estudar as forças de ocorridas durante o processo de usinagem nas diferentes configurações de ângulo de posição e refrigeração.
- Comparar a diferença de camada encruada durante usinagem com uso de insertos de metal duro com os valores obtidos nesta pesquisa.
- Estudar a influência dos revestimentos disponíveis para insertos de cerâmica nos resultados de espessura de camada encruada e desgaste na aresta de corte.
- Expandir os estudos para operações de fresamento da liga de níquel 625 utilizando insertos de cerâmica, comparando resultados de insertos SiAlON e Al_2O_3 reforçados com whisker.

REFERÊNCIAS

- ALTIN A., NALBANT M., TASKESAN A. The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools. *Materials and Design* 28 (2007) 2518–2522.
- ARORA A., PARBHAKAR S.R. (2003) Ceramic Cutting Tools: Challenges And Prospects, *Materials Technology* (2003), 18:3, 151-155,
- ASM METALS HANDBOOK. Machining. 10th Edition, Volume 16. ASM International, USA, 2004b. 929p.
- ASM METALS HANDBOOK. Properties and selection - Nonferrous alloys and special-purpose materials. 10th Edition, Volume 2. ASM International, USA, 2004a. 3470p.
- BRANDT G., GERENDAS A. MIKUS M. Wear Mechanisms of Ceramic Cutting Tools When Machining Ferrous and Non-ferrous Alloys. *Journal of the European Ceramic Society* 6 (1990) 273-290
- BROZEK, M. Cutting conditions optimization when turning overlays. *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005) 488–495.
- CHAKORABORTY A, RAY K. K., BHADURI S. B., Comparative wear behavior of ceramic and carbide tools during high speed machining of steel, *Materials and Manufacturing Processes*. 15 Vol 15, No.2, 269-300, 2000.
- CHILDS, T., MAEKAWA, K., OBIKAWA, T. and YAMANE, Y.; *Metal Machining*. Butterworth-Heinemann; 2 edition. 2004. ISBN-10: 0750657715. ISBN-13: 978-0750657716. 384pp.
- CHOUDHURY, I.A; EL-BARADIE, M.A, Machinability of nickel-base super alloys: a general review, In *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 77, Issues 1–3, 1998, Pages 278-284, ISSN 0924-0136.
- 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 & Manufacture* 49 (2009) 1114–1125
- DEITOS FILHO, M. A. Influência das variáveis do processo de soldagem TIG alimentado duplo arame quente na diluição e morfologia de cordões de solda de Inconel 625 depositados em um aço AISI/SAE 4130. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná*. 2016.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, Artliber Editora, São Paulo, 2014, 9ª ed.
- DONACHIE M. J. e DONACHIE S. J. *SUPERALLOYS A Technical Guide Second*

Edition. 2002 ASM International Materials Park, OH

EZILARASAN, C., SENTHIL KUMAR, V.S. & VELAYUDHAM, Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in Machining Nimonic C-263 Super Alloy Using Whisker-Reinforced Ceramic Insert. A. J. of Materi Eng and Perform (2013) 22: 1619

EZUGWU E.O, BONNEY J., Effect of High-Pressure Coolant Supplies when Machining Nickel-Base, Inconel 718, Alloy with Ceramic Tools. South Bank University, Machining Research Centre, School of Engineering , London, SE1 0AA, England, U.K. (2008).

EZUGWU E.O, BONNEY J., Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. Journal of Materials Processing Technology 153–154, (2004) 1045–1050

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, 2005 162–163 (2005) 609–614.

EZUGWU E.O, BONNEY J., YAMANE Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology, (2003) 162– 233-253.

EZUGWU E.O, WANG Z. M., OKEKE C. I., Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD and CVD coated tools, Tribol.T42 (2) (1999) 353–360.

EZUGWU E.O., BONNEY J., OLAJIRE K. A. Evaluation of the Machinability of Nickel-Base, Inconel 718, Alloy with Nano-Ceramic Cutting Tools. 2002. Tribology Transactions, 45:4, 506-511,

EZUGWU E.O., WANG Z.M., MACHADO A.R, The machinability of nickel-based alloys: a review, Journal of Materials Processing Technology, Volume 86, Issues 1–3, 15 February 1999, Pages 1-16, ISSN 0924-0136,

FARAYIBI, P.K. et al., 2015. Surface improvement of laser clad Ti-6Al-4V using plain waterjet and pulsed electron beam irradiation. Journal of Materials Processing

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo. Edgard Blücher Ltda.1977.

GROOVER, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. John Wiley & Sons, Inc. New York. 5th edition. 2012.

HOSSEINI A., KILSHAWY H.A. (2014) Cutting Tool Materials and Tool Wear. In: Davim J. (eds) Machining of Titanium Alloys. Materials Forming, Machining and Tribology. Springer, Berlin, Heidelberg

INTERNATIONAL, A. ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys. [s.l.: s.n.].

ISO 3685:1993. Tool-life testing with single-point turning tools. International Organization for Standardization.

JACK D. H., Ceramic Cutting Tools Materials. Sandvik Hard Materials Ltd, P O Box 109, Torrington Avenue Coventry, UK. MATERIALS & DESIGN Vol. 7 No. 5 SEPTEMBER / OCTOBER 1986.

JAHANBAKHS M., et al. Optimal flank wear in turning of Inconel 625 super-alloy using ceramic tool. Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture 1–9 Volume: 232 issue: 2 (2016), page(s): 208-216

JANG, D. Y. et al. Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. Wear, v. 194, n. 1-2, p. 168-173, Jun. 1996.

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 & Manufacture 45 (2005) 1393–1401.

JUN, Z., JIANXIN, D., JIANHUA, Z., XING, A. Failure mechanisms of a whisker reinforced ceramic tool when machining nickel-based alloys. Wear, n.208, p.220- 225, 1997.

KITAGAWA T, KUBO A, MAEKAWA K (1997) Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti–6Al–6V–2Sn. 1996. Wear 202(2):142–148

KLOCKE F (2011) Manufacturing processes. Springer, Berlin

KORKUT, I. et al. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. Materials & Design, v. 25, n. 4, p.303-305, Jun. 2004.

KÜCHLER, M. M. – Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem de Dutos em Operação – Porto Alegre: UFRGS, 2009. 95 pg. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – Porto Alegre, RS – 2009.

LIMA F. F. et al (2011). Usinagem da liga Inconel® 751 com ferramentas cerâmicas. 6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação

LIMA, F. F. (2012). Estudo do desgaste de ferramentas de metal duro e cerâmicas no torneamento do inconel 751® e inconel 718®. Universidade Federal de Uberlândia.

MACHADO, A. L.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B.; RUFFINO, R. T.; Teoria da usinagem dos Materiais. São Paulo, Blucher, 2009.

MAGRI, A. - Uma contribuição ao estudo do torneamento da liga 625 (Dissertação de mestrado). – Campinas, SP: [s.n.], 2015.

MARQUES, A. Torneamento de Inconel 718 Com Aplicação de Lubrificantes Sólidos. 2015. 226 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

MARQUES, D. C. Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni / Campinas, SP: [s.n.], 2007.

MEHROTRA P. K. Applications of Ceramic Cutting Tools. Kennametal Inc. Latrobe, PA, USA. Key Engineering Materials Vols 138-140 (1998) pp 1-24.

NARUTAKI N, YAMANE Y, HAYASHI K, KITAGAWA T, Uehara K (1993) High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools. CIRP Annals—Manufacturing Technology 42(1):103–106

NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE, Machining Nickel Alloys. Reference Book, Series No 11 008, 1992.
https://www.nickelinstitute.org/TechnicalLibrary/Reference%20Book%20Series/11008_MachiningNickelAlloys.aspx

BERG E., JONES F. D., HORTON H. L., AND RYFFEL H. H. Machinery's Handbook. 27th Edition. 2004. Industrial Press INC. New York.

ÖJMERTZ K., OSKARSON H. B. Wear on SiC-whiskers reinforced Ceramic inserts when cutting Inconel with waterjet assistance. 1999. Tribology Transactions 42. 471–478

REED, R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press. 2006. doi:10.1017/CBO9780511541285

Revestimento Resistente à Corrosão na Diluição pelo Processo TIG

RICHARDS N, ASPINWALL D, Use of ceramic tools for machining nickel based alloys, In International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 29, Issue 4, 1989, Pages 575-588, ISSN 0890-6955,

RODRIGUES, M. A.; HASSUI, A. Análise dos desgastes de ferramentas de metal duro revestidas no fresamento da liga a base de Níquel – Inconel 625 – depositada em forma de revestimento metálico. Anais do 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Disponível em <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/cobef/2007/files/node007.html>

ROZMUS-GÓRNIKOWSKA, MAGDALENA & CIENIEK, LUKASZ & BLICHARSKI, M & KUSINSKI, JAN. (2014). Microstructure and Microsegregation of an Inconel 625 Weld Overlay Produced on Steel Pipes by the Cold Metal Transfer Technique. Archives of Metallurgy and Materials. 59. 10.2478/amm-2014-0185.

SANDES, S. S., ALVARÃES, C. P., MENDES, M. C., ARAÚJO, L. S., SOUZA, L. F. G., FERREIRA, J. C. Performance of the inconel 625 alloy weld overlay obtained by FCAW process.

SANDVIK COROMANT. Application Guide Heat Resistant Super Alloys. 2010.

Disponível em

<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-us/c-2920-034.pdf>

SANDVIK COROMANT. Metal Cutting Technology training handbook. 2017.

Disponível em http://sandvik.ecbook.se/se/en/training_handbook/

SARMIENTO, H.; NATALIA, K.; RAUL, S. Z. Localized Corrosion Characteristics of Nickel Alloys : A Review. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), n. January, 2017

SETTINERI, L.; FAGA, M. G.; LERGA, B. Properties and performances of innovative coated tools for turning Inconel. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 48, n. 7-8, p. 815-823. 2008.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. 2nd ed. p. cm. New York: — (Oxford series on advanced manufacturing; 5) Includes bibliographical references and index. ISBN 0-19-514206-3 (cloth) 1. Metal-cutting. I. Title. II. Series. 2005. 672pp.

SHOEMAKER, E. L. Alloys 625 and 725: Trends in Properties and applications. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2005

SILVA FILHO, Irineu G. Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem de

SILVA L. R. Estudo da Geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002

SILVA, C. C., AFONSO, C. R. M., RAMIREZ, A. J., MOTTA, M; F., MIRANDA, H. C., FARIAS, J. P. Aspectos Metalúrgicos de Revestimentos Dissimilares com a Superliga à Base de Níquel Inconel 625. Soldag. Insp. São Paulo, Vol.17, Nº. 3, p.251-263, Jul/Set 2012

SINGH, Rajender. Introduction to Basic Manufacturing Process and Workshop Technology. New Age International Limited, Publishers, 2006. ISBN 8122418465, 9788122418460.

SINGH, Simarpreet. Superalloys Report. (2016). AMITY University, Rajasthan. 10.13140/RG.2.1.2385.0009.

SORELL, G. Corrosion and heat-resistant nickel alloy - Guidelines for selection and application. Chemical Processing Magazine, 1997.

SPECIAL METALS CORPORATION. August-2013. INCONEL® alloy 625

STODKI, Bogdan. Chipformers Reliability in Inconel 625 Longitudinal Turning. Management and Production Engineering Review. Volume 4, Number 2, June 2013. pp. 93–101

TAEGUTEC. <http://www.imc-companies.com/taegutec/ttkCatalog/Grade.aspx?grade=TC3030&item=6182042&fnu m=150&mapp=IS>. Acesso em 15/06/2018

TEKINER, Z., YESILYURT, S. Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*, v. 25, n. 6, p.507-513, Set. 2004.

THAKUR, A; GANGOPADHYAY, S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys, In *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 100, 2016, Pages 25-54, ISSN 0890-6955,

THELLAPUTTA, G.R., BOSEB P. S. C., RAO, C.S.P. Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review. *Materials Today: Proceedings 4* (2017) 3712–3721.

THEREZANI, D. F. Avaliação de diferentes ferramentas no torneamento da liga Inconel 713C. *Dissertação de Mestrado*. Campinas, SP: [s.n.], 2012.

TRENT, E.M. WRIGHT, P. *Metal Cutting*. 4 ed. Oxford Butterworths- Heinemann, 2000.

VAGNORIUS Z., SØRBY K. Effect of high-pressure cooling on life of SiAlON tools in machining of Inconel 718. *Int J Adv Manufacture Technology* (2011) 54:83–92.

WERTHEIM R., LAYYOUS A., HARPAZ J. Development and application of new cutting tool materials. In: *Proceedings of the Conference on Improving Machine Tool Performance*, San Sebastian, Spain. 1998. p. 303-313

XIAO, M., HE, N. & LI, L. J. Modeling Notch Wear of Ceramic Tool in High Speed Machining of Nickel-based Superalloy. *J. Wuhan Univ. Technology - Mat. Sci. Edit.* (2010) 25: 78

YOUSSEF, HELMI A. *Machining of stainless steels and super alloys : traditional and nontraditional techniques*, 2015. Alexandria University, Alexandria, Egypt.



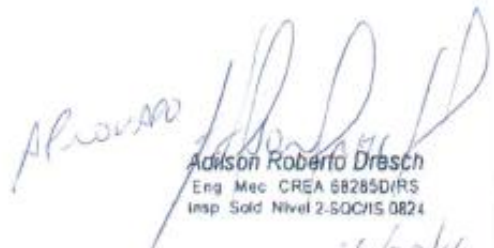
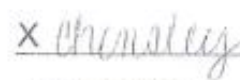
YUE C., FENG H., ZHONG Z., ZHANG H. Development and Application of Materials of Cutting Tools for Machining of Hard Materials. *Recent Patents on Materials Science* 2015, 8, 46-54

ZHOUA, J. M.; BUSHLYAA, V.; PENG B, R. L.; JOHANSSON B S.; AVDOVICC, P.; STAHLA, J-E. Effects of Tool Wear on Subsurface Deformation of Nickelbased Superalloy. *Procedia Engineering* 19 (2011) 407 – 413.

ZHUANG, K.; ZHU, D.; ZHANG, X.; DING, H. Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer. *Wear*. v. 313, n. 1-2, p. 63-74, 2014.

ZOU, BIN; CHEN, MING; HUANG, CHUANZHEN; AN, QINGLONG. Study on surface damages caused by turning NiCr20TiAl nickel-based alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 5802–5809

ANEXO A

 SPECIAL METALS Welding Products Company <small>1401 Berry Road, Winston, North Carolina 28690 Phone (828) 455-0350 - Fax (828) 454-0393</small>		Certified Material Test Report		HEAT # LX7B06AK						
SOLD TO		Load ID. 12087700 Page 1								
AKER SOLUTIONS DO BRASIL LTDA CNPJ 05876349/0001-05 Rua Francisco Sobania 1300 Curitiba, Parana, Brazil 81460 130 Brazil		 Management System ISO 9001:2015 <small>www.iso.org</small>		QUALITY SYSTEM CERTIFICATION Complies with EN ISO 10204, Type 3.1 TUV Rheinland Cert# 9105081167						
				SALES ORDER / RLS 120877 (14) Date Printed 08/06/2015						
CUSTOMER P.O.	CUSTOMER PART	QUANTITY	PIECES	CMTR DATE						
4500556628	BBARA000046	240.0 Lbs 108.9 kg	8	08/06/2015						
PRODUCT: INCONEL Filler Metal 625 .045 x 30Spl N625-045-30SS10										
CERTIFICATION REQUIREMENTS										
Chemical Analysis % <input checked="" type="checkbox"/>										
C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Al	Ti	Cr
0.013	<0.0001	0.13	0.004	0.001	0.13	0.01	64.00	0.15	0.20	22.90
Nb+Ta		Mo	Others							
3.56		8.80	<0.50							
Specifications										
UNS#: NO6625		Classification: <u>ERNiCrMo-3</u>								
Other:										
DIN 1736 Part 1										
Specification:										
ASME Section II Part C SFA-5.14 2013 Edition ANSI AWS A5.14/A5.14M:2011										
Typical Mechanical Properties:										
Tensile Strength, psi 110,000										
		MPa 760								
Elongation, (4d) % 30										
End of Certification										
 Adilson Roberto Dresch Eng Mec CREA 88285D/RS Insp Sold Nivel 2-SOCIS 0824 16/02/16										
Visual and dimensional examination is satisfactory. Material, when shipped, is free from contamination by mercury radium, alpha source, and low melting point elements.										
X 				DATE: 8/6/15						
Quality Assurance				PRINTED BY: chemistry						