

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

RAFAEL DE MATOS SOARES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS DESGASTES DE FERRAMENTAS
PARA TORNEAMENTO DA SUPERLIGA INCONEL 718**

Caxias do Sul

2013

RAFAEL DE MATOS SOARES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS DESGASTES DE FERRAMENTAS
PARA TORNEAMENTO DA SUPERLIGA INCONEL 718**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito à conclusão do curso de
Engenharia Mecânica na Universidade de
Caxias do Sul.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica.

Supervisor: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann.

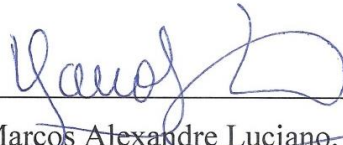
Caxias do Sul

2013

RAFAEL DE MATOS SOARES

**AValiação DO COMPORTAMENTO DOS DESGASTES DE FERRAMENTAS
PARA TORNEAMENTO DA SUPERLIGA INCONEL 718**

ESTE TRABALHO FOI JULGADO ADEQUADO PARA APROVAÇÃO NA DISCIPLINA
DE ESTÁGIO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA NA UNIVERSIDADE DE
CAXIAS DO SUL



Prof. Marcos Alexandre Luciano, Dr. Eng. Prod.

Coordenador de Estágio II em Engenharia Mecânica

DATA DA APROVAÇÃO: 20/06/2013

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Rodrigo Panosso Zeilmann, Dr. Eng. Mec.

Supervisor de Estágio / Universidade de Caxias do Sul



Rodrigo Cattuzzo, Tecg. Autom. Ind.

Orientador / Weatherford Ind. e Com. Ltda.



Prof. Gerson Luiz Nicola, Me. Eng. Materiais

Professor Avaliador / Universidade de Caxias do Sul



Prof. Frank Patrick Missell, Ph.D. Física

Professor Avaliador / Universidade de Caxias do Sul

Para minha família,
pelo carinho e força que sempre me deram
em todos os momentos da minha vida.

Aos meus professores,
por todo o incentivo, conhecimento e por
sempre acreditarem na minha capacidade.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à minha família, que sempre esteve ao meu lado e foi minha fortaleza em momentos difíceis da minha vida. Meus pais, Antônio e Elizabete, pelo exemplo de humildade, trabalho e honestidade. Minhas irmãs, Sabrina e Samara, pelo apoio em todos os momentos que precisei.

À minha namorada Camila C. Machado pelo companheirismo e afeto em todos os momentos desta caminhada e em especial pela ajuda na correção dos textos aqui escritos.

Aos meus orientadores e supervisor que, além do papel acadêmico, foram grandes amigos que fiz. Ao meu orientador Rodrigo Cattuzzo que além de tornar possível este trabalho sempre me incentivou e deu-me todo o apoio necessário, sem dúvida um grande tutor e amigo que levarei por toda minha vida. Ao Prof. Rodrigo P. Zeilmann, meu orientador de iniciação científica e supervisor de estágio, por todos os ensinamentos e auxílios, fundamentais na organização e realização deste trabalho, além das discussões técnicas sempre muito produtivas.

A todos os professores e colegas que tive durante a graduação, que contribuíram para que essa jornada fosse muito enriquecedora.

À professora do ensino fundamental, Bruna Sommacal pelas ricas palavras de incentivo, as quais instigaram em mim a paixão pela ciência.

À empresa Weatherford Ind. e Com. Ltda. por acreditar neste trabalho e fornecer-me todo o suporte necessário para a sua realização.

Aos amigos Francis Dalmas e Daniel Bristot, pelo companheirismo em todas as etapas da graduação e na realização deste trabalho.

A todos os colegas da Weatherford, em especial ao Sanderson Ferreira pela elaboração dos programas CNCs, ao Luan Souza, pelo auxílio na realização dos ensaios experimentais e ao Jerri Zerbielli pela ajuda na aquisição do microscópio digital, sem os quais este trabalho não seria possível.

À Universidade de Caxias do Sul e ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, pela disponibilização de laboratórios e equipamentos.

Enfim, a todos que de alguma forma me ajudaram nesta caminhada, meu muito obrigado.

“Os três grandes fundamentos para se conseguir qualquer coisa são, primeiro, trabalho árduo; segundo, perseverança; terceiro, senso comum.”

Thomas Alva Edison

RESUMO

A crescente demanda por produtos que resistam a ambientes considerados severos vem impulsionando nos últimos anos uma série de pesquisas que visam melhorar as propriedades dos materiais, bem como seus processamentos e aplicações. Dentre os metais comumente empregados em condições extremas de temperatura e corrosão, destacam-se as superligas de níquel, em específico o Inconel 718. Contudo, as mesmas propriedades térmicas, mecânicas e metalúrgicas que o tornam um material de enorme aplicabilidade também o caracterizam como um dos metais de menor usinabilidade. Tendo em vista que a tendência do mercado é cada vez mais utilizar materiais especiais como as superligas, um estudo aprofundado acerca da usinagem destas ligas é estratégico e se faz necessário às empresas que buscam constantemente melhorar seus processos. Sendo assim, o presente trabalho avaliou o desempenho de insertos de metal-duro e cerâmico no torneamento externo longitudinal do Inconel 718, identificando os mecanismos e tipos de desgaste predominantes na usinagem deste material. O inserto de metal-duro que apresentou o melhor resultado foi o de geometria SNMG_QM e revestimento CVD-TiAlN+Al₂O₃+TiCN, sendo que para todos os insertos de metal-duro testados o desgaste predominante foi o de cratera seguido de lascamento. Já para os insertos cerâmicos, o melhor desempenho foi obtido pelo SNGN_SiAlON utilizado com aplicação de fluido lubrificante-refrigerante. Para as ferramentas cerâmicas o principal tipo de desgaste observado foi o de entalhe, na altura da profundidade de corte, o qual se identificou uma correlação com a formação de rebarba e com o tamanho de grão da estrutura do material testado.

Palavras-chave: usinagem, superliga de níquel, metal-duro e cerâmico.

ABSTRACT

The growing demand for products that resist in environments considered severe has stimulated in the last years a series of research having the objective to improve the properties of materials and their processing and applications. Among the metals commonly used in extreme temperature and corrosion, there are the nickel superalloys, in particular the Inconel 718. However, the same thermal, mechanical and metallurgical properties which make it a material of great applicability also characterized as one of the metals of low machinability. Given that the market trend is increasingly using special materials such as superalloys, a detailed study about the machining of these materials is strategic and it is necessary that companies constantly seek to improve their processes. Therefore, this paper evaluated the performance of inserts of carbide and ceramic on external longitudinal turning of Inconel 718, identifying the mechanisms and types of predominant wear in machining this material. The carbide insert that presented the best result was the geometry SNMG_QM and coating CVD-TiAlN+Al₂O₃+TiCN, and for all carbide inserts tested, the crater wear was prevalent and resulted in the cracking of the edges. For the ceramic tools, the principle type of wear observed was notch in the depth of cut, and the best performance was obtained by insert SNGN_SiAlON tested with applying cutting fluid.

Keywords: machining, nickel superalloys, carbide and ceramic insert.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Crescimento anual do consumo de Inconel 718 na Weatherford CXS.....	15
Figura 2.1 – Classificação das superligas de níquel.	17
Figura 2.2 – Comportamento da tensão de escoamento com o aumento na temperatura da superliga Inconel 718 e outros materiais utilizados em turbinas aeronáuticas.....	18
Figura 2.3 – Alguns componentes de uma turbina aeronáutica em superligas de níquel.....	19
Figura 2.4 – Imagem ilustrativa das grades espaçadoras em Inconel 718 de um elemento combustível para reator nuclear.....	20
Figura 2.5 – Exemplo de um típico equipamento de poços de extração de petróleo fabricado em Inconel 718.	20
Figura 2.6 – Diferença de força de corte e temperatura entre aço carbono, inox e Inconel 718.....	22
Figura 2.7 – Imagens metalográficas da geração de cavaco para diferentes velocidades de corte.	24
Figura 2.8 – Representação esquemática dos desgastes observados nas ferramentas de corte.	25
Figura 2.9 – Comparação do desgaste de entalhe para diferentes estratégias de corte na usinagem de Inconel 718 com ferramenta de cerâmica.....	27
Figura 2.10 – Comparação entre a textura superficial gerada por diferentes ferramentas e parâmetros de corte no torneamento de Inconel 718.....	28
Figura 2.11 – Efeito da SCEA na vida da ferramenta de metal-duro revestida com Al_2O_3	31
Figura 2.12 – Comparação entre três diferentes revestimentos no torneamento de Inconel 718.....	32
Figura 2.13 – Imagens em MEV das secções transversais do revestimento CrN/TiN.....	33
Figura 2.14 – Desgaste apresentado após 4 min de usinagem com ferramenta de metal-duro para três condições de revestimento.....	34
Figura 2.15 - Imagens em MEV de algumas cerâmicas utilizadas para ferramentas de corte.	35
Figura 2.16 – Ilustração do sistema de aplicação de fluido em alta pressão.	40

Figura 3.1 – Diferença entre as geometrias dos insertos testados.	43
Figura 3.2 – Características e dimensões dos suportes para fixação dos insertos.	43
Figura 3.3 – Fotografia da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios experimentais.	44
Figura 3.4 – Imagem do microscópio óptico utilizado nos ensaios experimentais e exemplos de imagens obtidas pelo equipamento.	45
Figura 3.5 – Desenho esquemático dos canais usinados nos corpos de prova.	46
Figura 4.1 – Comportamento da curva de vida dos insertos de metal-duro.	48
Figura 4.2 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_QM_CVD-TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN.	50
Figura 4.3 – Desgaste de cratera no inserto SNMG_QM_CVD-TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN.	51
Figura 4.4 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_QM_PVD-TiAlN.	52
Figura 4.5 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_SMR_CVD-TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN.	53
Figura 4.6 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_SMR_PVD-TiAlN.	54
Figura 4.7 – Desenho esquemático da influência do desgaste de cratera sobre a quebra prematura dos insertos de Metal-duro.	54
Figura 4.8 – Comportamento da curva de vida dos insertos cerâmicos.	55
Figura 4.9 – Imagens dos desgastes do inserto SNGN_SiAlON no torneamento com aplicação de fluido lubrificante.	56
Figura 4.10 – Imagens dos desgastes do inserto SNGN_SiAlON no torneamento a seco.	57
Figura 4.11 – Imagens dos desgastes do inserto SNGN_Al ₂ O ₃ + SiC _W no torneamento com aplicação de fluido lubrificante.	58
Figura 4.12 – Desenho esquemático da influência da formação de rebarba no desgaste de entalhe nos insertos cerâmicos.	59
Figura 4.13 – Imagens dos cavacos gerados no torneamento com inserto cerâmico e aplicação de fluido lubrificante.	60
Figura 4.14 – Influência do tamanho de grão sobre a formação de rebarba na usinagem da superliga de níquel Inconel 718.	61
Figura 4.15 – Imagens dos desgastes do inserto SNGN_Al ₂ O ₃ + SiC _W no torneamento a seco.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química da superliga Inconel 718.....	19
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova (Inconel 718).....	41
Tabela 3.2 – Características dos insertos testados nos ensaios experimentais.....	42
Tabela 3.3 – Parâmetros de corte dos ensaios experimentais.....	47

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTÁGIO	13
1.1	INTRODUÇÃO	13
1.2	APRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTÁGIO	14
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	15
1.4	OBJETIVOS	16
1.4.1	Objetivo geral.....	16
1.4.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DA SUPERLIGA INCONEL 718.....	17
2.2	USINABILIDADE DAS SUPERLIGAS DE NÍQUEL	21
2.2.1	Formação do cavaco	23
2.2.2	Mecanismos e tipos de desgastes	24
2.2.3	Integridade superficial	28
2.3	FERRAMENTAS PARA TORNEAMENTO DE SUPERLIGAS DE NÍQUEL ...	29
2.3.1	Ferramentas de metal-duro.....	29
2.3.2	Ferramentas de cerâmica	35
2.3.3	Ferramentas de CBN	38
2.4	APLICAÇÃO DE FLUÍDO LUBRIRREFRIGERANTE.....	38
3	PROPOSTA DE TRABALHO	41
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	41
3.1.1	Corpo de prova	41
3.1.2	Ferramentas de corte.....	42
3.1.3	Equipamentos.....	44
3.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	45
3.2.1	Metodologia.....	45

3.2.2	Aplicação de fluido lubrificante	46
3.2.3	Parâmetros de corte	47
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
4.1	RESULTADO DAS FERRAMENTAS DE METAL-DURO	48
4.1.1	Avaliação dos desgastes apresentados pelos insertos de metal-duro	50
4.2	RESULTADOS DAS FERRAMENTAS CERÂMICAS	55
4.2.1	Avaliação dos desgastes apresentados pelos insertos cerâmicos	56
	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – DESENHO DETALHADO DO CORPO DE PROVA	71
	APÊNDICE B – IMAGENS DOS INSERTOS NOVOS	72
	ANEXO A – CERTIFICADO DO MATERIAL	73

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTÁGIO

1.1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos que resistam a ambientes considerados severos vem impulsionando nos últimos anos uma série de pesquisas que visam melhorar as propriedades físico-químicas dos materiais, bem como seus processamentos e aplicações.

Dentre os metais comumente empregados em condições extremas de temperatura e corrosão, destacam-se as superligas. Segundo Callister (2002), esses materiais são classificados de acordo com o metal predominante na liga, podendo ser em cobalto, ferro ou níquel, e ainda apresentar nióbio, molibdênio, tungstênio, tântalo, cromo e titânio, sendo as superligas à base de níquel as mais utilizadas. Devido as suas propriedades, tais materiais exercem um papel extremamente importante nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, de reatores nucleares, óleo e gás, naval entre outras.

Em específico, a Inconel 718 trata-se de uma superliga à base de níquel que apresenta alta resistência à corrosão, alta resistência mecânica à temperatura ambiente, excelente resistência à fluência e à fadiga em elevadas temperaturas (até 650°C) e que possui boa resistência à corrosão e ductilidade em temperaturas criogênicas (até -250°C) (BYUN e FARRELL, 2003).

Contudo, as mesmas propriedades térmicas, mecânicas e metalúrgicas que tornam a Inconel 718 e as demais superligas materiais de enorme aplicabilidade em condições especiais, também as caracterizam como materiais de baixíssima usinabilidade, tornando a fabricação de componentes destes materiais através dos processos de usinagem um enorme desafio (EZUGWU et al., 2004).

Geralmente, os resultados que prevalecem nos processos de usinagem de superligas à base de níquel são elevados tempos principais e tempos mortos na troca de ferramental, além dos altos custos de ferramentas (WITTING, 2002). Para que seja viável a fabricação de componentes destas ligas é essencial compreender os parâmetros tecnológicos envolvidos no processo, bem como os mecanismos e tipos de desgastes em que as ferramentas de corte são submetidas.

Materiais para ferramentas de corte em geral, sofrem solicitações térmicas e mecânicas quando usinam ligas à base de níquel. Segundo Therezani (2012), tais ferramentas devem

apresentar boa resistência ao desgaste, alta resistência e tenacidade, elevada dureza a quente, boa resistência a choque térmico e estabilidade química adequada em altas temperaturas.

As tensões aplicadas e as elevadas temperaturas no gume influenciam muito o desgaste e, portanto, a vida da ferramenta. As falhas típicas observadas quando se usina as superligas à base de níquel são: desgaste de entalhe, desgaste de flanco, desgaste de cratera e falha catastrófica. Isto é causado pela combinação de alta temperatura na zona de corte aliado à baixa condutividade térmica do material, alta resistência da peça, inclusive em elevadas temperaturas, fácil encruamento do material, cavacos abrasivos e de difícil controle, entre outros fatores (EZUGWU et al., 1999).

Decorrente da grande quantidade de variáveis presentes nos processos de usinagem, um estudo específico e detalhado sobre o comportamento dos desgastes das ferramentas de corte destinadas à usinagem das superligas de níquel se faz necessário.

1.2 APRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Weatherford International, INC. é uma empresa multinacional cujas atividades estão voltadas para o segmento de serviços e equipamentos para perfuração, completação, produção e intervenção em poços de petróleo e gás.

Atualmente está presente em mais de 100 países e conta com cerca de 60.000 colaboradores. A Weatherford destaca-se por ser uma empresa que prima pela busca de novas tecnologias e desenvolvimento de novos projetos sempre em busca da melhoria de sua linha de produtos.

A matriz da empresa é baseada na cidade de Genebra, na Suíça. A sede administrativa da empresa aqui no Brasil está situada na cidade do Rio de Janeiro, e sua participação em Caxias do Sul, é representada pela filial Weatherford Indústria e Comércio Ltda., responsável pela fabricação e montagem de uma grande gama de produtos para as mais diversas aplicações.

O presente estágio será desenvolvido junto à fábrica da empresa, com acompanhamento da engenharia de processos e do setor de programação CNC, os quais viabilizarão a execução dos testes e avaliações dos ferramentais na usinagem em desbaste da superliga Inconel 718.

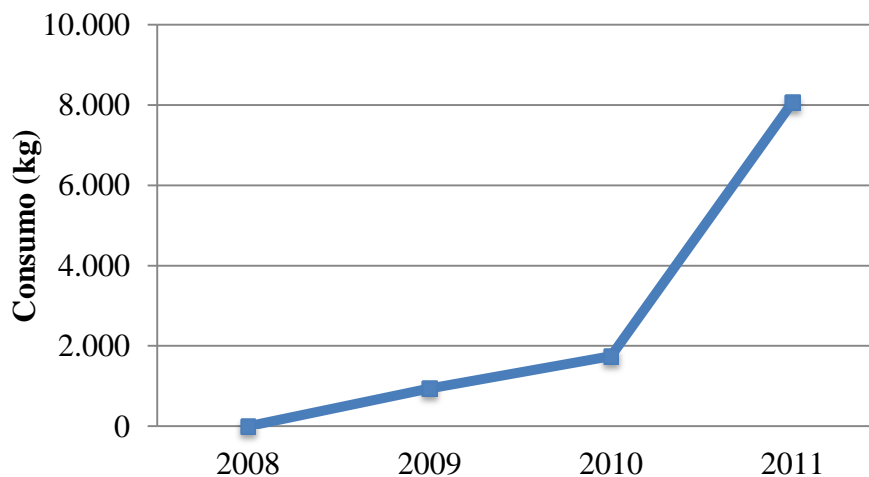
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Com a crescente necessidade de desenvolver produtos especiais, os quais são submetidos as mais inóspitas condições, a utilização de materiais especiais como as superligas vem crescendo consideravelmente (PFINGSTAG et al., 2009). Da mesma forma, a necessidade de modos de produção economicamente viáveis na fabricação de componentes destas ligas se mostra extremamente importante, uma vez que os custos de produção são excessivamente elevados se comparados a dos materiais convencionais como no caso dos aços.

Tendo em vista que a tendência do mercado é cada vez mais utilizar materiais especiais como a superliga Inconel 718, um estudo aprofundado acerca da usinagem deste material é estratégico e se faz necessário às empresas que buscam constantemente melhorar seus processos.

Na Figura 1.1, a qual mostra o consumo anual de Inconel 718 na planta de Caxias do Sul, é possível observar que a utilização deste material vem apresentando nos últimos anos um crescimento considerável.

Figura 1.1 – Crescimento anual do consumo de Inconel 718 na Weatherford CXS.



Fonte: Weatherford (2012).

Sendo a usinagem o processo de fabricação mais utilizado na Weatherford CXS e responsável pela fabricação de 100% das peças em Inconel 718, é de suma importância compreender os parâmetros tecnológicos bem como os mecanismos que interferem nestes processos.

Para tanto, se faz necessário avaliar o desempenho das ferramentas de corte, identificar os principais tipos e mecanismos de desgastes envolvidos na usinagem em desbaste de Inconel 718, possibilitado assim um maior domínio deste complexo processo de fabricação, tornando economicamente viável a produção de equipamentos em ligas especiais.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Identificar e compreender os principais mecanismos e tipos de desgaste utilizando diferentes insertos no torneamento da superliga Inconel 718.

1.4.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral do trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Compreender os parâmetros tecnológicos do processo de torneamento das superligas de níquel e em específico do Inconel 718;
- b) Identificar na literatura científica as ferramentas que apresentaram melhor desempenho no torneamento das superligas à base de níquel;
- c) Realizar ensaios experimentais para avaliar o comportamento dos desgastes nos insertos;
- d) Analisar o comportamento do desgaste das ferramentas ao longo de sua utilização; e
- e) Comparar os resultados das ferramentas.

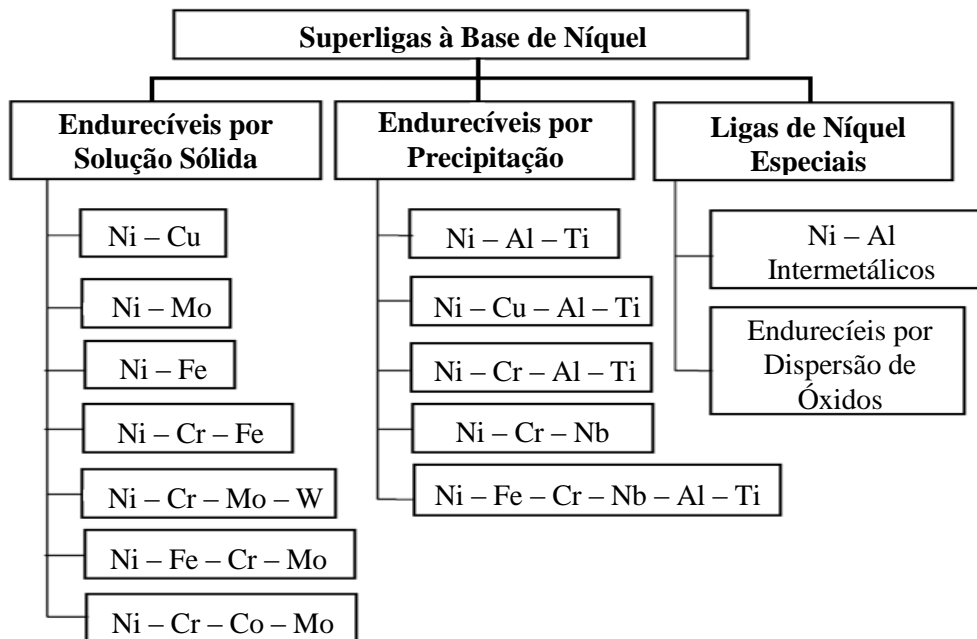
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DA SUPERLIGA INCONEL 718

Historicamente, o níquel e suas ligas vêm exercendo um papel fundamental às indústrias em virtude de suas habilidades de resistir a uma considerável gama de condições extremas de operação, as quais envolvem meios corrosivos, elevadas temperaturas e/ou altas tensões (ASM INTERNATIONAL, 2000).

Atualmente, existem diversas ramificações das superligas de níquel, as quais podem ser classificadas pela composição química predominante e método de aumento de resistência mecânica. A Figura 2.1 ilustra a classificação do níquel e suas superligas.

Figura 2.1 – Classificação das superligas de níquel.



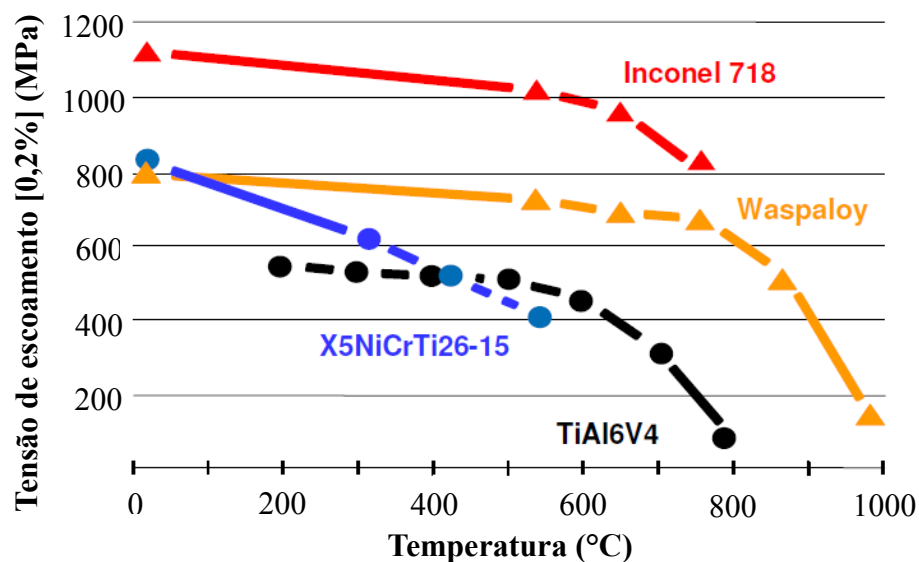
Fonte: Adaptado de Loria (1989).

Com o advento das turbinas aeronáuticas durante a segunda guerra mundial, surgiu também a necessidade de desenvolver materiais mais resistentes, capazes de serem utilizados em altas temperaturas. A invenção do Inconel 718 por Eiselstein (DECKER, 2006) no final da década de 1950 foi um marco na história das superligas de níquel, sendo atualmente a liga mais utilizada nos componentes de turbinas a gás e em diversos componentes na indústria nuclear e de petróleo (PATEL, 2006; BYUN E FARRELL, 2003).

O Inconel 718 é uma superliga de níquel endurecida por precipitação com alta resistência à corrosão, excelente resistência à fluência e à fadiga, alta resistência mecânica a elevadas temperaturas (até 650°C) como pode ser observado na Figura 2.2. Este material apresenta também de boa resistência à corrosão e ductilidade em temperaturas criogênicas (até -250°C) e excelentes soldabilidade (KUO et al., 2009; BYUN E FARRELL, 2003).

A Figura 2.2 ilustra a perda na propriedade mecânica de tensão de escoamento com o aumento na temperatura para diversos materiais utilizados em turbinas aeronáuticas. É possível identificar que a partir de 650°C ocorre uma redução brusca nas propriedades do Inconel 718, o que limita a utilização desta liga em temperaturas superiores.

Figura 2.2 – Comportamento da tensão de escoamento com o aumento na temperatura da superliga Inconel 718 e outros materiais utilizados em turbinas aeronáuticas.



Fonte: Adaptado de Zeilmann (2003 apud RWTH 2003).

Quando comparada com outras ligas à base de níquel, a Inconel 718 se caracteriza pelo seu alto teor de nióbio, responsável pela fase fortemente endurecedora γ'' (Ni_3Nb). Além disso, observa-se os baixos teores de molibdênio, tungstênio e tântalo, responsáveis pelo endurecimento por solução sólida nas ligas de níquel, e baixos valores de alumínio e titânio, constituintes da fase γ' . Isso mostra que o mecanismo mais efetivo de endurecimento desta liga é a precipitação da fase γ'' . É importante ressaltar também que o alto teor de ferro e a ausência de cobalto resultam em diminuição do custo da liga (REED, 2006; DECKER, 2006). A Tabela 2.1 mostra a composição química da superliga de níquel Inconel 718.

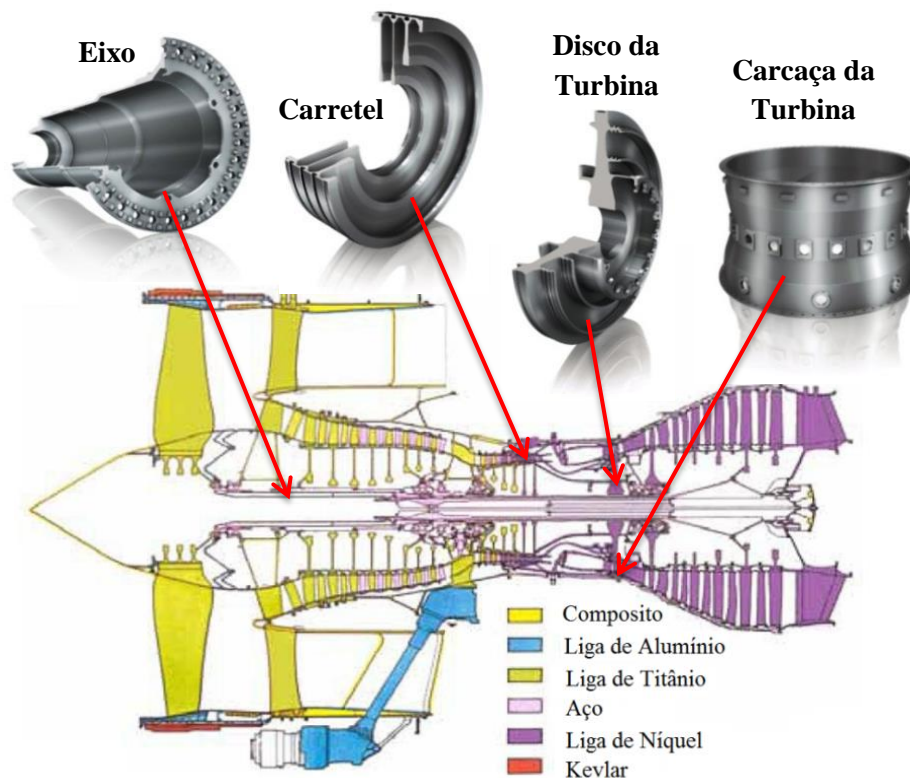
Tabela 2.1 – Composição química da superliga Inconel 718.

Composição química (%)											
Al	B	C	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Nb	Ti
0.20			17.0						50.0	4.75	0.65
0.8	< 0.0060	< 0.080	21.0	< 1.0	< 0.30	Bal.	< 0.35	2.80	55.0	5.50	1.15

Fonte: Adaptado de Special Metals (2007).

O desenvolvimento e utilização das superligas estão intimamente ligados à indústria aeronáutica, mais em específico à fabricação de turbinas. Haja vista que estes componentes são submetidos a condições extremas de temperatura, tensão e corrosão, sua utilização não seria viável sem o desenvolvimento das superligas (REED, 2006). A Figura 2.3 ilustra os componentes de uma turbina bem como os respectivos materiais utilizados em sua fabricação, em destaque algumas peças produzidas em superligas de níquel.

Figura 2.3 – Alguns componentes de uma turbina aeronáutica em superligas de níquel.

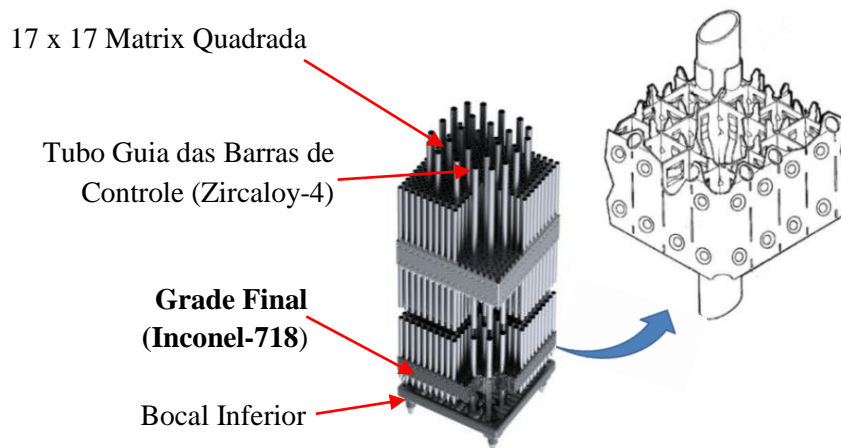


Fonte: Adaptado de Reed (2006) e Sandvik Coromant (2012).

Uma aplicação típica da superliga Inconel 718 na indústria nuclear é na confecção das grades espaçadoras nos Elementos Combustíveis, bem como das molas de fixação destas, nas varetas de combustíveis. As grades espaçadoras têm a função de manter a posição das varetas

de combustíveis dentro do arranjo, bem como melhorar a troca térmica entre as varetas e a água refrigerante, além de permitir movimentos axiais no conjunto sem causar tensões excessivas (PERROTTA, 1999). Segue abaixo a Figura 2.5, a qual mostra de forma ilustrativa as posições das grades espaçadoras no elemento combustível de um reator nuclear.

Figura 2.4 – Imagem ilustrativa das grades espaçadoras em Inconel 718 de um elemento combustível para reator nuclear.

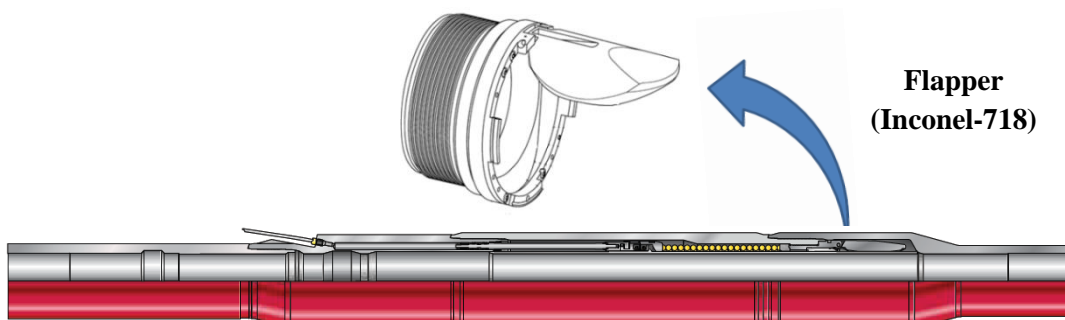


Fonte: Adaptado de Williams (2011).

Outra importante indústria que utiliza a superliga Inconel 718 é a indústria de óleo e gás para aplicações em condições críticas de serviço, que envolvem tanto componentes de poço quanto equipamentos auxiliares submersos, susceptíveis à corrosão e à fratura devido à presença de CO_2 , cloretos, H_2S e S livre (SANTOS, 2009).

Abaixo, na Figura 2.5 é possível observar um equipamento típico utilizado na extração de petróleo, cujas condições a qual é submetido exigem a utilização de materiais especiais a exemplo do Inconel 718.

Figura 2.5 – Exemplo de um típico equipamento de poços de extração de petróleo fabricado em Inconel 718.



Fonte: Adaptado de Weatherford (2012).

2.2 USINABILIDADE DAS SUPERLIGAS DE NÍQUEL

Usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade em usinar um determinado material, segundo Weingaertner et al. (1994), a usinabilidade de metais é, normalmente, analisada com relação a quatro critérios: formação de cavaco, vida da ferramenta, qualidade superficial e forças de corte.

Nesse aspecto, a usinabilidade exerce forte influência sobre a produtividade, custo final de produção e serve como parâmetro para reforçar a necessidade da preocupação não só de materiais com propriedades mecânicas, físicas e químicas superiores, mas também com o comportamento destes materiais quando submetidos a algum tipo de processo de fabricação.

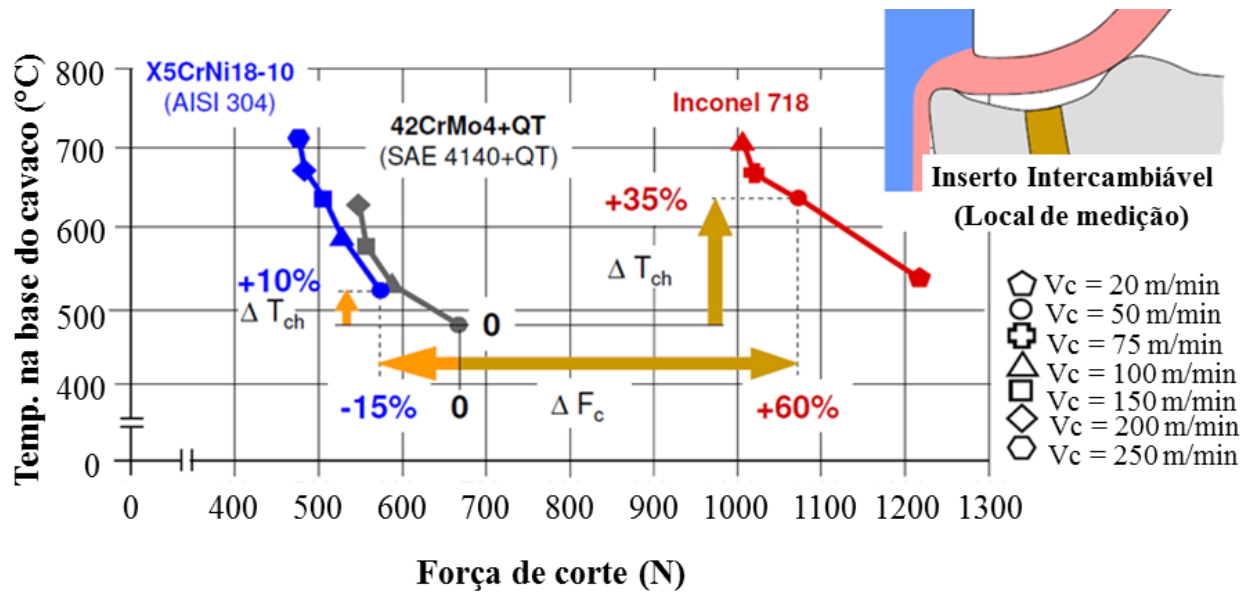
Superligas a base de níquel estão entre os materiais mais difíceis de usinar. Estas ligas são projetadas para manter a sua alta resistência em temperaturas elevadas, e sua usinagem implica, assim, forças que são consideravelmente mais elevadas do que aquelas encontradas na usinagem de aço (THAKUR et al., 2009).

De acordo com Witting (2002), no torneamento, na zona de contato entre a ferramenta e a peça, formam-se elevadas pressões e temperaturas. Na usinagem dos aços, 75% do calor são retirados pelos próprios cavacos. Nas ligas resistentes a altas temperaturas, devido à sua reduzida condutibilidade térmica, a condução de calor para o cavaco ocorre em pequena escala. Estas temperaturas elevadas podem produzir tensões indesejáveis na estrutura das peças. A usinagem ainda é dificultada pelo encruamento e pela formação de gume postiço. Além disso, devem ser consideradas a elevada tenacidade do material e a formação desordenada de cavacos em forma de fita e espiral.

Forças de corte geradas durante a usinagem podem diminuir com o aumento da velocidade ou ter o efeito oposto. Por um lado, a alta temperatura gerada na interface de corte pode resultar na redução da resistência à ruptura do material da peça, como consequência, inferiores forças de corte são necessárias. Por outro lado, ocorre perda de propriedades mecânicas da ferramenta também.

A Figura 2.6 mostra a diferença entre aço carbono (SAE 4140), aço inox (AISI 304) e Inconel 718 quanto à força de corte e temperatura na base do cavaco. Tais resultados foram obtidos no torneamento a seco com ferramenta de metal-duro revestida, profundidade de corte de 2 mm e avanço de 0,1 mm/rot, utilizando insertos de geometria CNMG 120412 (KLOCKE, 2011).

Figura 2.6 – Diferença de força de corte e temperatura entre aço carbono, inox e Inconel 718.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

De acordo com Ezugwu, Bonney e Yamane (2003), as principais dificuldades encontradas na usinagem das superligas de níquel, podem ser resumidas como:

- a) a maior parte da resistência do material é mantida durante a usinagem devido a sua alta resistência ao calor;
- b) encruamento ocorre rapidamente a partir dos esforços aplicados sobre o material durante a usinagem, contribuindo para o desgaste de entalhe na ferramenta, principalmente na altura da profundidade de corte e aumentando os esforços de corte;
- c) presença de carbonetos duros e abrasivos na microestrutura destas ligas levam a excessivos desgastes por abrasão, podendo levar a ferramenta à falha prematura;
- d) altas taxas de difusão no par ferramenta-peça devido às elevadas temperaturas presentes na região de corte. Choudhury e El-Baradie (1998) apresentaram resultados de temperaturas em torno de 1000°C durante o corte de uma superliga a base de níquel;
- e) baixa condutividade térmica. Esta característica prejudica o desempenho da ferramenta uma vez que o calor gerado no processo de usinagem não será extraído da maneira convencional pelo cavaco ou pelo fluido refrigerante, caso este seja empregado no processo; e
- f) a soldabilidade do material da peça no gume da ferramenta, forma uma gume postigo de corte, comprometendo a integridade superficial da peça, assim como a ferramenta de corte.

2.2.1 Formação do cavaco

A formação de cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado durante a usinagem, penetração do fluido lubrificante, dentre outros (DINIZ et al., 2008).

Além disso, a morfologia micro e macroestrutural final do cavaco podem revelar indícios das dificuldades encontradas no processo de corte. Para diferentes condições de usinagem, isto ocorre devido à influência que estas situações exercem no processo de formação normal de cavaco.

Materiais resistentes a altas temperaturas possuem menor condutividade térmica, apresentando maiores temperaturas durante a formação dos cavacos e concentração de calor na região de corte. O controle da formação do cavaco e sua quebra ficam mais difíceis (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

Para melhor compreender a formação do cavaco na usinagem da superliga Inconel 718 Gao et al. (2011) realizaram inúmeros testes utilizando um equipamento *Quick-Stop* para avaliar a formação do cavaco no torneamento de Inconel 718.

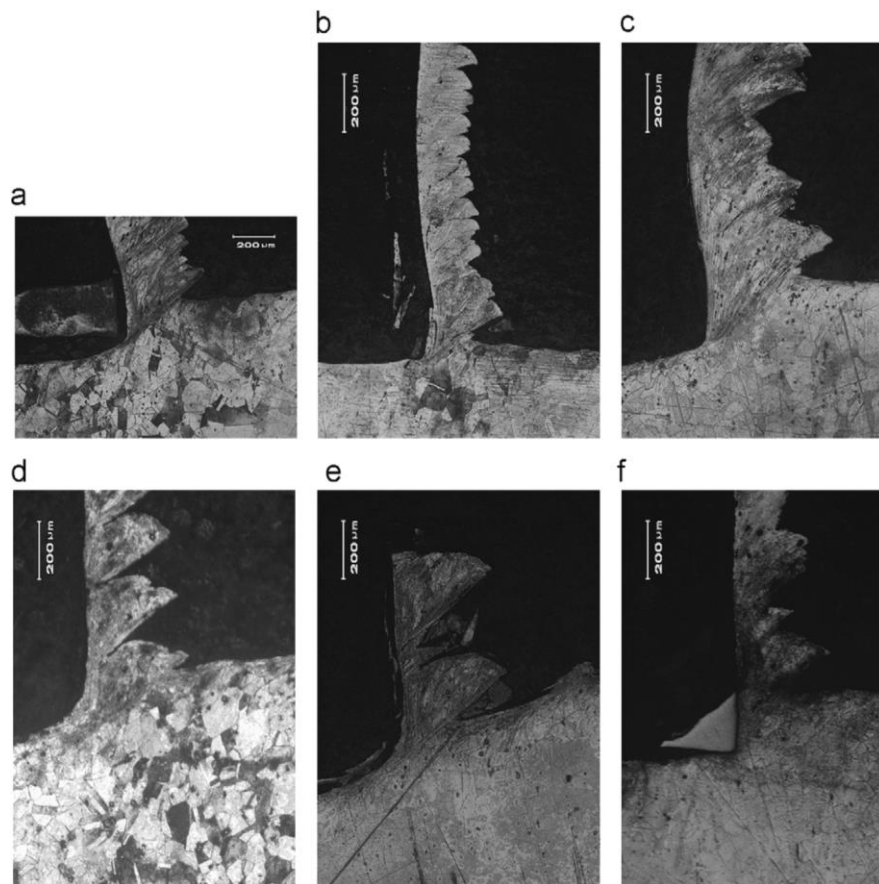
O *Quick-Stop* trata-se de um dispositivo de parada rápida que permite que a ferramenta de corte se separar da peça mais rapidamente durante o processo de corte, “congelando” o estado de corte conforme estava durante o processo. Nesta análise foram utilizados os seguintes parâmetros de corte: velocidades de corte de 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 m/min, avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 2 mm.

A Figura 2.7 mostra as imagens dos cavacos sendo gerados sob as seguintes velocidades de corte: (a) $v_c = 20$ m/min, (b) $v_c = 30$ m/min, (c) $v_c = 40$ m/min, (d) $v_c = 50$ m/min, (e) $v_c = 80$ m/min, e (f) $v_c = 100$ m/min, sendo a escala das imagens de 200 μm .

De acordo com os autores, quando a velocidade de corte é de 20 e 30 m/min, o cavaco gerado apresenta forma de fita e não têm zona de concentração de esforço cortante. Quando a velocidade de corte é superior a 40 m/min, o cavaco apresentado é serrilhado. A zona de cisalhamento e a ruptura do cavaco podem ser vistas claramente.

Com o avanço no processo de corte, o ângulo de esforço cortante é reduzido, o plano de cisalhamento é convertido e a tensão aumenta. A ruptura do cavaco ocorre ao longo da direção de cisalhamento, quando a tensão aplicada supera a resistência do material usinado.

Figura 2.7 – Imagens metalográficas da geração de cavaco para diferentes velocidades de corte.



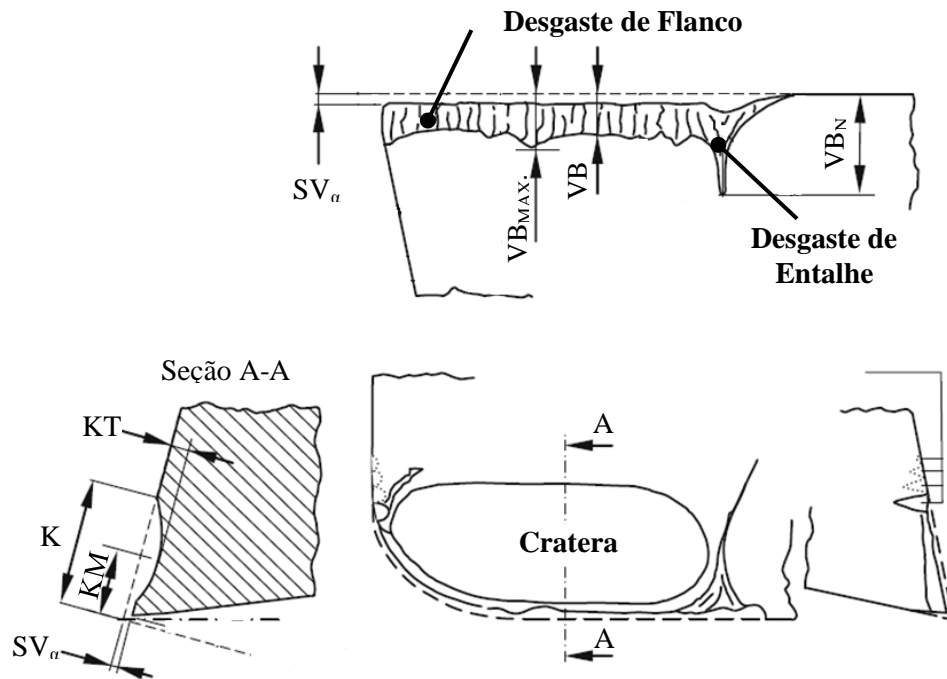
Fonte: Adaptado de Gao et al. (2011).

2.2.2 Mecanismos e tipos de desgastes

A análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte requer medidas cuidadosas para assegurar a qualidade e um bom desempenho da operação de usinagem. Esses mecanismos de desgaste combinam-se para atacar o gume da ferramenta de várias maneiras, dependendo do material da peça e parâmetros de usinagem (DINIZ, COPPINI e MARCONDES, 2008).

Na Figura 2.8, a qual ilustra de forma esquemática os principais tipos de desgastes, é possível observar que na superfície de saída da ferramenta, têm-se o desgaste de cratera, onde se vê a sua profundidade (KT), largura (KB) e a distância do centro da cratera ao gume (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (VB), mostrado na figura, o valor médio na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco (VB_{MAX}). Mede-se ainda, o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes.

Figura 2.8 – Representação esquemática dos desgastes observados nas ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

Há diversos mecanismos de desgastes básicos na usinagem dos metais, dentre eles pode-se citar a abrasão, difusão, oxidação e adesão.

O mecanismo de desgaste por abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta, tanto o desgaste de flanco como o de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém, ela se faz mais presente no desgaste frontal, onde a superfície de folga atrita com o elemento rígido, a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com o elemento flexível que é o cavaco.

O desgaste gerado pela abrasão é induzido pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. As partículas duras contidas na superliga Inconel 718 causam expressivos desgastes abrasivos, principalmente no flanco da ferramenta (DUDZINSKI et al., 2004).

As superligas à base de níquel têm alta afinidade química com muitos materiais de ferramentas e, como tal, frequentemente formam uma camada de aderência conduzindo aos mecanismos de difusão conforme Choudhury e El-Baradie (1998).

No processo de corte da superliga Inconel 718, a temperatura de corte é muito elevada, o contato estreito entre a ferramenta-cavaco e entre ferramenta-peça fornece um ambiente ideal para a difusão de átomos do material da ferramenta (DUDZINSKI et al., 2004).

Para as ferramentas de metal-duro, o Cobalto (Co) é o mais fácil de perda por difusão, assim, o teor de Co destas ferramentas pode determinar a ocorrência de desgaste por difusão (EZUGWU et al., 1998).

A difusão entre a ferramenta e o cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na região de corte. Em elevadas velocidades de corte, é responsável, principalmente, pelo desgaste de cratera, tendo-se em vista que é na superfície de saída da ferramenta que se tem as condições apropriadas, tais como: alta temperatura (causada pelas velocidades e zona de aderência) e tempo de contato cavaco-ferramenta na zona de aderência, onde a velocidade de saída do cavaco é nula (DINIZ, COPPINI E MARCONDES, 2008).

Comparativamente, na usinagem da superliga Inconel 718 com as ferramentas de cerâmica, a velocidade de corte é maior do que as ferramentas de metal-duro revestidas, a temperatura durante o corte é muito mais alta, e então é mais propenso ao desgaste por difusão em condições de alta temperatura e pressão. Esta visão é apoiada por Ezugwu et al.(1998) que o desgaste por difusão, resultando em uma superfície lisa também foi observado quando se usinava superligas à base de níquel com ferramentas de cerâmica.

Conforme Shaw (1984), o mecanismo de adesão ocorre quando duas superfícies são colocadas em contato sob cargas moderadas e velocidade relativa suficiente para que, através da deformação das asperezas de ambas, ocorra a formação de um extrato metálico na interface, unindo momentaneamente os dois materiais. Em um momento subsequente a esta adesão, ocorre, através da continuidade do movimento relativo, a ruptura desta união, na região de menor resistência ao cisalhamento.

Segundo Dudzinski et al.(2004), a adesão está entre os mecanismos de desgaste dominantes na usinagem de Inconel 718. O material usinado tende a aderir ao gume, para formar um gume postiço, dependendo das condições de corte. O gume postiço nem sempre é estável e é, por vezes, repetidamente removido levando parte do material que compõe a ferramenta, inclusive o revestimento.

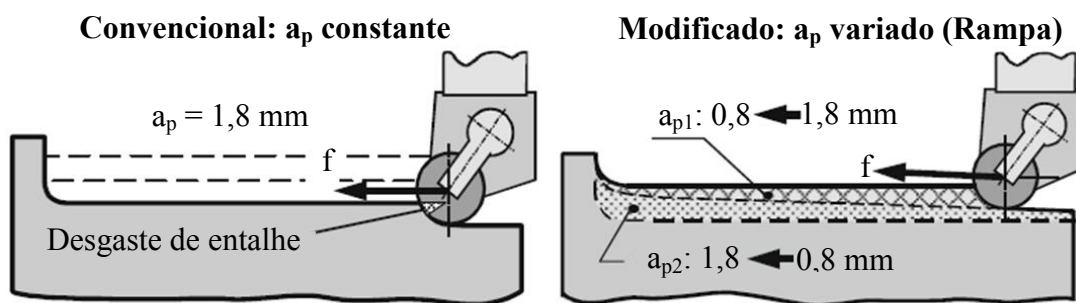
A elevação da temperatura e a presença de oxigênio contido no ar e na água levam à oxidação da maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente levados embora pelo atrito, gerando desgaste. Alguns materiais de ferramenta desgastam-se com facilidade devido à oxidação, por não conter óxidos com maior dureza e resistência. Esse mecanismo de desgaste ocorre especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido a sua exposição ao ar nessa região, permitindo assim uma possível explicação para o aparecimento do desgaste de entalhe.

Geralmente, encontra-se o desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte como o responsável pela rejeição da ferramenta de corte em baixas velocidades. Entalhe na ponta da ferramenta e/ou no gume é o modo de falha mais comum na usinagem de ligas à base de níquel. Isto é causado pela combinação de alta temperatura, alta resistência da peça, encruamento da peça e cavacos abrasivos (EZUGWU et al., 1999).

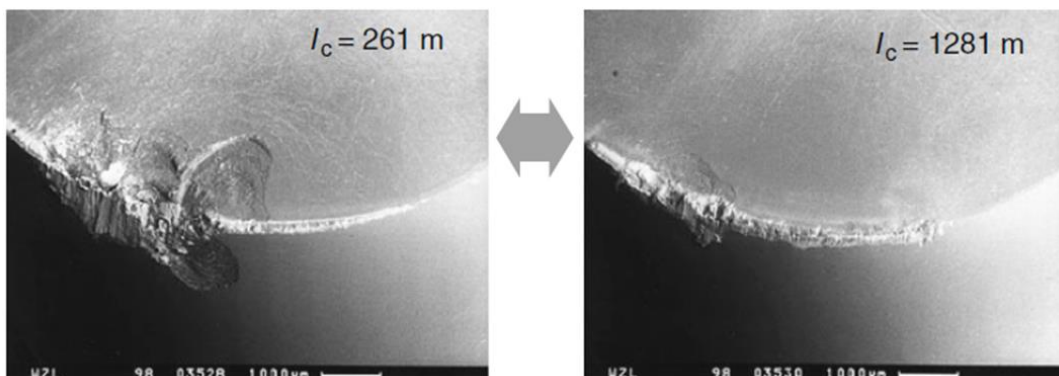
Formação de desgaste por entalhe no gume principal pode ser eficazmente reduzido e a vida da ferramenta melhorada através da seleção de uma estratégia de corte apropriado (KLOCKE, 2011). Uma medida que tem se mostrado muito eficaz, especialmente em pré-usinagem das superligas de níquel com insertos redondos de cerâmica é o torneamento em rampa, conforme pode ser observado na Figura 2.9, a qual mostra um comparativo entre a estratégia convencional de usinagem com profundidade de corte constante e a estratégia em rampa cuja profundidade de corte é variada.

Como consequência da constante mudança na profundidade de corte, os elevados esforços e efeito abrasivo do cavaco sobre a ferramenta são melhor distribuídos em toda a extensão do gume, promovendo assim com que o desgaste de entalhe se forme mais lentamente aumentando a vida da ferramenta.

Figura 2.9 – Comparação do desgaste de entalhe para diferentes estratégias de corte na usinagem de Inconel 718 com ferramenta de cerâmica.



Inconel 718. Ferramenta em cerâmica reforçada com *whisker*, $v_c = 180 \text{ m/min}$, $f = 0,15 \text{ mm/rot.}$



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

2.2.3 Integridade superficial

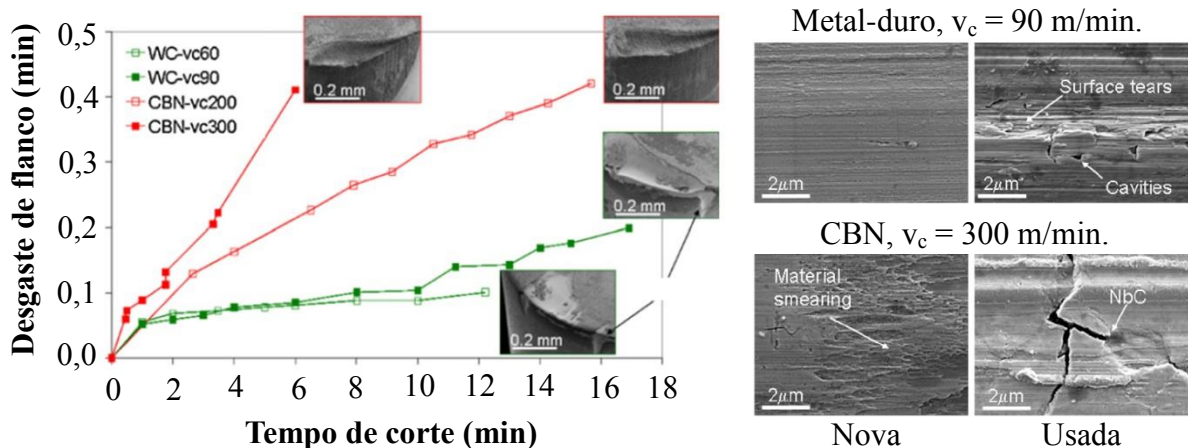
A geração de calor e a deformação plástica induzida durante a usinagem afetam a superfície usinada. O calor gerado geralmente altera a microestrutura da liga e induz tensões residuais. As tensões residuais são também produzidas pela deformação plástica sem calor. Calor e deformação geram alterações microestruturais e trincas, bem como variações de microdureza da subsuperfície (EZUGWU e TANG, 1995).

As tensões residuais têm consequências sobre o comportamento mecânico, especialmente sobre a vida em fadiga das peças. As tensões residuais são também responsáveis pelo fenômeno de instabilidade dimensional das peças as quais podem conduzir a dificuldades durante a montagem (DUDZINSKI et al., 2004).

Extremo cuidado deve ser tomado, por conseguinte, para assegurar a integridade da superfície do componente durante a usinagem. Sendo assim, os principais parâmetros dos processos de usinagem, incluindo a escolha da máquina, do material e revestimento e geometria da ferramenta, o método de processamento, os parâmetros de corte e fluido a ser utilizado devem ser controlados, a fim de conseguir uma adequada vida do ferramental utilizado sem comprometer a integridade da superfície usinada (EZUGWU e TANG, 1995).

A Figura 2.10 traz um exemplo de como as condições da ferramenta bem como os parâmetros de corte empregados no torneamento de Inconel 718 podem influenciar na vida do ferramental e na qualidade da superfície gerada, reforçado a importância de controlar este parâmetro.

Figura 2.10 – Comparação entre a textura superficial gerada por diferentes ferramentas e parâmetros de corte no torneamento de Inconel 718.



Fonte: Adaptado de M'Saoubi et al. (2012).

2.3 FERRAMENTAS PARA TORNEAMENTO DE SUPERLIGAS DE NÍQUEL

As propriedades especiais das superligas faz com que haja requisitos particulares em relação às ferramentas. Materiais para ferramentas de corte em geral, sofrem elevadas solicitações térmicas e mecânicas quando usinam ligas à base de níquel. As tensões aplicadas e as temperaturas geradas no gume e/ou próximo ao mesmo influenciam muito o desgaste e, portanto, a vida da ferramenta.

Ezugwu et al.(1999) listam algumas propriedades cujas ferramentas empregadas na usinagem das superligas devem apresentar:

- a) excelente resistência aos mecanismos de desgaste;
- b) alta resistência mecânica, dureza e tenacidade em alta temperatura;
- c) resistência ao choque térmico;
- d) alta condutividade térmica; e
- e) suficiente estabilidade química em altas temperaturas.

Thangaraj e Weinmann, (1992), Gatto e Iuliano (1994), Jun et al. (1997) e Ezugwu et al. (1999) afirmam que a vida da ferramenta obtida na usinagem das superligas à base de níquel é inadequada, aumentando o custo de produção.

Na maior parte dos casos, os principais parâmetros considerados para um melhor desempenho do processo são: seleção do material e geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte. Com esses parâmetros bem controlados, pode-se conseguir um tempo de vida adequado para as ferramentas durante a usinagem.

2.3.1 Ferramentas de metal-duro

As ferramentas de metal-duro suportam tensões compressivas maiores em altas temperaturas e podem, conseqüentemente, ser usadas para usinar o níquel e suas ligas com velocidades de corte muito mais elevadas do que as ferramentas de aço rápido. Mesmo assim, é raro encontrar ferramentas operando a uma velocidade acima de 60 m/min.

As velocidades de corte recomendadas ao usinar ligas a base de níquel com ferramentas de metal-duro são inferiores a 50 m/min. O desgaste severo de flanco e o entalhe

na ponta da ferramenta e/ou na região da profundidade de corte são as modalidades de falha dominantes ao se usinar com tais ferramentas.

Ferramentas de metal-duro não são recomendadas para usinar em altas velocidades de corte, pois não suportam as condições de temperatura e tensão extremamente altas na zona de corte, levando à fratura prematura do gume inteiro do inserto (EZUGWU et al., 1999).

Os avanços recentes na tecnologia de revestimento levaram à introdução de revestimentos múltiplos nas ferramentas de corte de metal-duro, que tendem a aumentar a velocidade de corte acima de 50 m/min na operação de torneamento.

Liao e Shiue (1996) analisaram os mecanismos de desgastes de duas ferramentas de metal-duro classes K20 e P20, no torneamento a seco de Inconel 718 com avanço 0,10 mm/rot, profundidade de corte 1,5 mm e velocidades de corte de 35 e 15 m/min.

Na superfície desgastada da pastilha K20, estes autores observaram uma camada aderida muito perto do gume, com formação de gume postiço, na velocidade de 35 m/min, com conseqüente lascamento do gume da ferramenta.

Quando a pastilha P20 foi usada, a camada aderida também foi encontrada, mas comparativamente, o desgaste era mais irregular e o comprimento do desgaste de flanco era maior. O mecanismo de desgaste observado neste trabalho, na velocidade de corte mais alta (35 m/min), acontecia pelo arrancamento de partículas da ferramenta, que eram destacadas do substrato junto com o material do cavaco.

Rahman, Seah e Teo (1997) estudaram a usinabilidade do Inconel 718 submetido a diferentes parâmetros de usinagem, incluindo a geometria da ferramenta, velocidade de corte e avanço. O desgaste de flanco dos insertos, rugosidade da peça e os componentes da força de corte foram considerados como indicadores do desempenho da ferramenta em ensaios de torneamento, que foram realizados com fluido de corte.

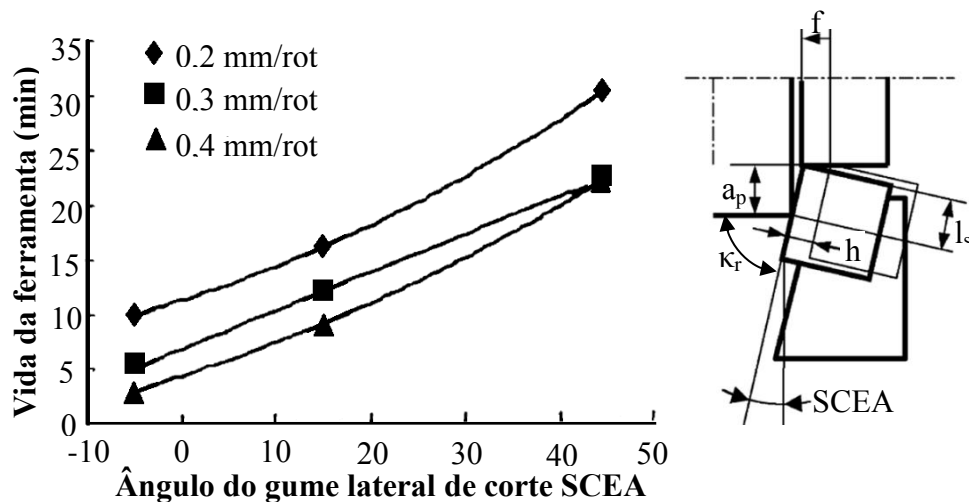
Dois tipos de insertos foram usados: inserto de metal-duro tipo K com revestimento PVD-TiN e inserto com revestimento múltiplo CVD- Al_2O_3 . Foi estudado o efeito do ângulo de posição (κ_r) do gume na vida da ferramenta para três avanços (0,2; 0,3 e 0,4 mm/rot) e três velocidades de corte (30, 40 e 50 m/min), já a profundidade de corte foi fixada em 2 mm.

A Figura 2.11 mostra o efeito do ângulo do gume lateral de corte sobre a vida da ferramenta de metal-duro revestida com Al_2O_3 usinando Inconel 718 com velocidade de corte de 30 m/min e diferentes avanços.

Para os dois insertos, os autores observaram o aumento da vida da ferramenta com a diminuição do ângulo de posição κ_r de 95° para 45° . Para estes valores decrescentes do κ_r a temperatura da interface ferramenta-cavaco diminui, assim como a espessura do cavaco, além

disso, o calor gerado durante o corte é distribuído sobre um comprimento maior do gume, o que melhora a remoção de calor, a distribuição das forças de corte sobre uma parcela maior do gume, a redução do entalhe e, ainda, melhora substancialmente a vida da ferramenta.

Figura 2.11 – Efeito da SCEA na vida da ferramenta de metal-duro revestida com Al_2O_3 .



Fonte: Adaptado de Rahman, Seah e Teo (1997).

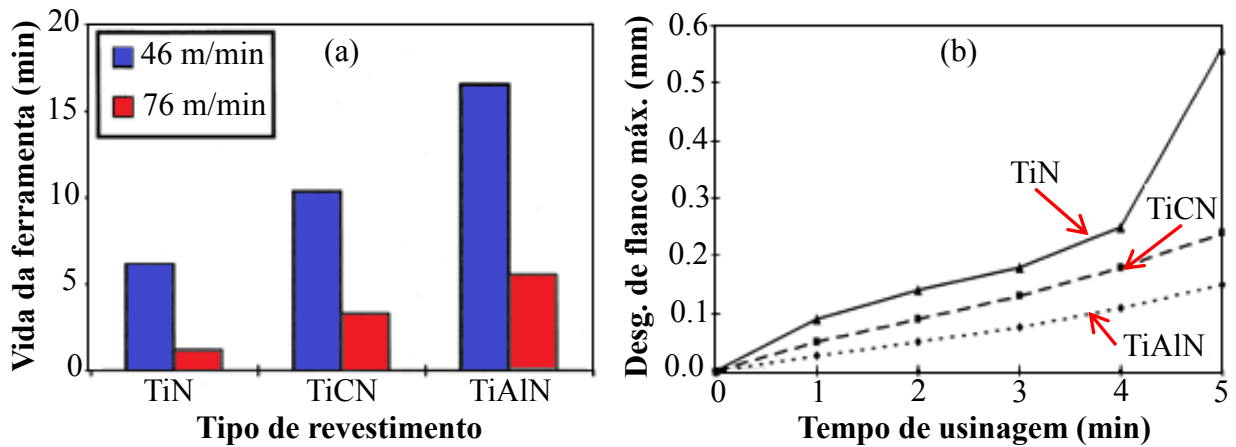
Durante todos os ensaios, a ferramenta PVD-TiN mostrou excelente resistência ao desgaste de entalhe na profundidade de corte, nos ângulos de posição de 75° e 45° . Os insertos usinaram satisfatoriamente, mesmo na velocidade de corte mais elevada (50 m/min) e na taxa de avanço maior (0,4 mm/rot), com o ângulo de posição 45° . A ferramenta revestida com CVD- Al_2O_3 mostrou um desgaste de entalhe mais severo em todos os três ângulos testados.

Jindal et al. (1999) estudaram os revestimentos PVD de TiN, de TiCN e de TiAlN em insertos de metal-duro no torneamento de Inconel 718 com fluido de corte. As velocidades de corte testadas foram 46 e 76 m/min, o avanço e a profundidade de corte eram constantes: 0,15 mm/rot e 1,5 mm respectivamente.

A Figura 2.12 ilustra os resultados obtidos nos testes. O gráfico (a) mostra o tempo de vida total para todas as condições de revestimentos testadas e o gráfico (b) apresenta o comportamento do desgaste de flanco máximo usinando Inconel 718 com velocidade de corte de 46 m/min nos primeiros 5 min de usinagem.

Como o material do substrato era o mesmo para todas as ferramentas revestidas, as diferenças observadas em tempos de vida da ferramenta e comportamento de desgaste foram atribuídas aos revestimentos.

Figura 2.12 – Comparação entre três diferentes revestimentos no torneamento de Inconel 718.



Fonte: Adaptado de Jindal et al. (1999).

Em ambas as velocidades, as ferramentas revestidas com TiAlN e TiCN usinaram significativamente melhor do que ferramentas com TiN. Na velocidade de corte mais baixa, observou-se um desempenho excelente das ferramentas revestidas com TiAlN, após um tempo de corte de 5 minutos, o desgaste máximo do flanco era aproximadamente 0,15 mm. Estas ferramentas apresentaram ainda, menor índice de desgaste de cratera e de entalhe do que as revestidas com TiCN e TiN.

Os revestimentos aumentam a resistência ao desgaste e podem reduzir forças de corte e temperaturas no gume da ferramenta, desse modo, afetam indiretamente a deformação e o comportamento de fratura da ferramenta.

O revestimento de TiAlN tem uma dureza significativamente mais elevada do que os de TiCN ou TiN acima de 750°C, o que se traduz em melhor resistência ao desgaste abrasivo, exhibe também boa estabilidade química em alta temperatura. O TiAlN tem a condutividade térmica mais baixa entre os três revestimentos testados, isto deve resultar em temperaturas mais baixas na ponta da ferramenta, fazendo com que o calor gerado durante a usinagem tenha uma maior parcela carregada pelo cavaco. Em consequência, o revestimento de TiAlN dá uma resistência excelente ao desgaste de cratera.

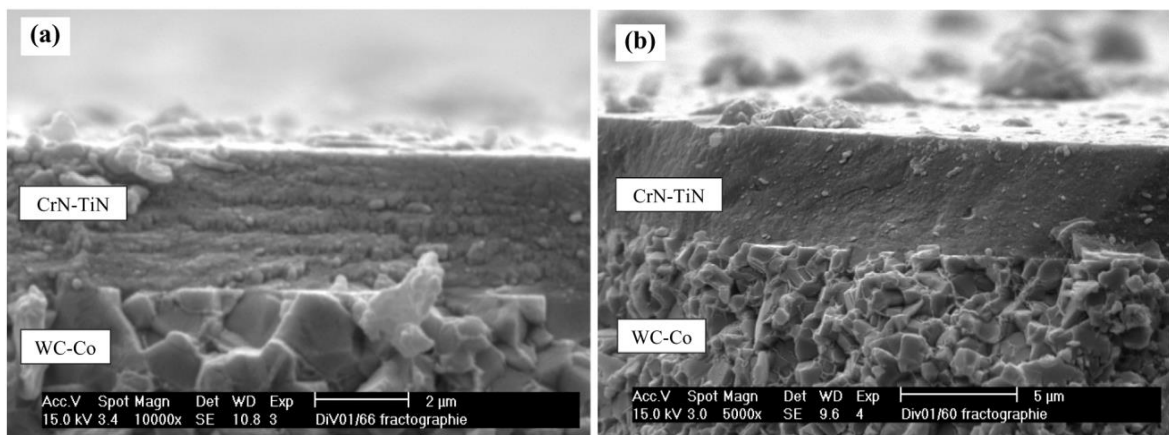
Prengel et al. (2001) realizaram o mesmo estudo de Jindal et al. (1999), porém com ferramentas revestidas com multicamadas. Tornearam Inconel 718 com aplicação de fluido lubrificante e ferramentas de corte em metal-duro com diferentes revestimentos PVD, com velocidades de corte de 61 e 76 m/min. O revestimento múltiplo TiAlN mostrou algumas vantagens sobre o revestimento TiAlN simples e sobre o revestimento múltiplo TiN/TiCN/TiAlN, particularmente na velocidade mais elevada de 76 m/min.

A modalidade de falha principal na usinagem do Inconel 718 foi o desgaste abrasivo do gume, acompanhado pela deformação plástica. Foi também observado entalhe na profundidade de corte, que é bastante influenciado pela formação da rebarba e também lascamento na profundidade de corte para todas as ferramentas revestidas testadas.

Ducros, Benevent e Sanchette (2003) estudaram o comportamento de revestimentos nanocamadas de TiN/AlTiN e CrN/TiN em ferramentas de metal-duro K20 no torneamento da superliga Inconel 718 com aplicação de fluido de lubrificação-refrigerante. Os parâmetros de corte utilizados nos testes foram: velocidade de corte de 40 m/min, avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de 1,5 mm.

A Figura 2.13 mostra as imagens em MEV do revestimento de CrN/TiN em multicamadas e nanocamada, sendo a imagem (a) multicamadas de revestimento e a imagem (b) nanocamada de revestimento.

Figura 2.13 – Imagens em MEV das secções transversais do revestimento CrN/TiN.

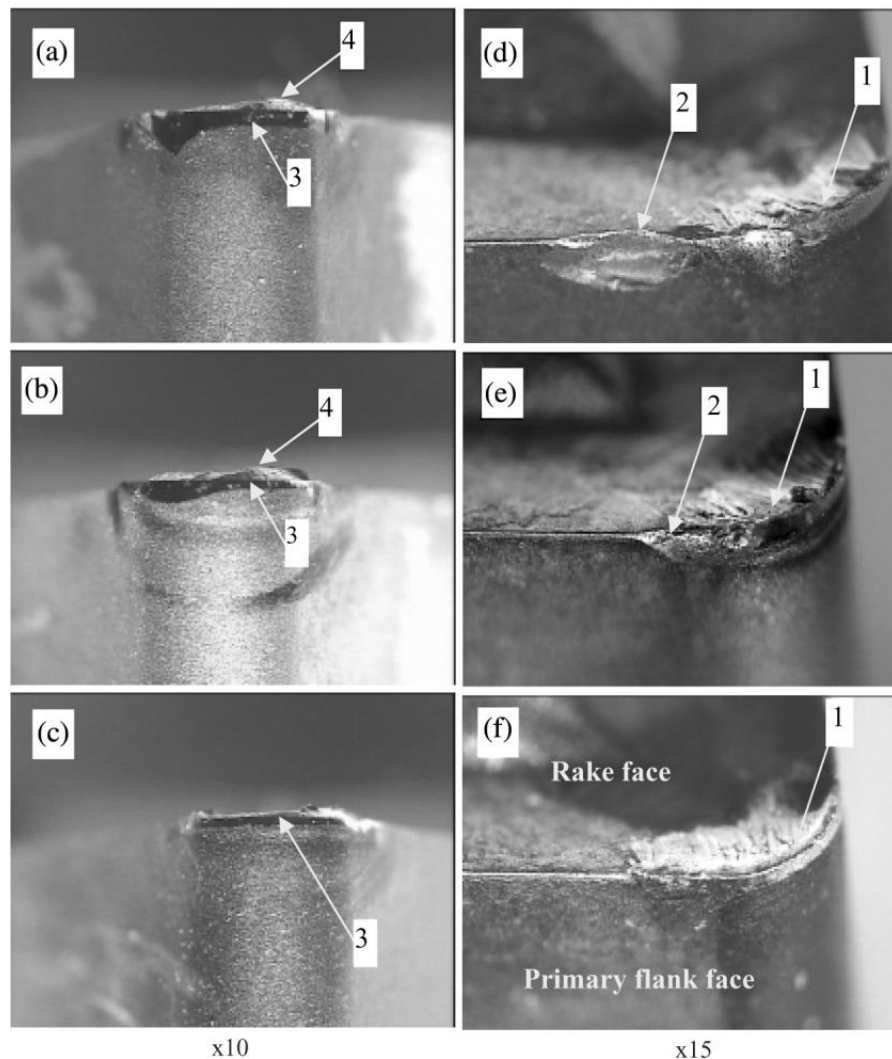


Fonte: Adaptado de Ducros, Benevent e Sanchette (2003).

O desempenho das ferramentas revestidas com nanocamadas foi comparado com o das ferramentas com revestimento clássico mono e multicamadas e sem revestimento. A Figura 2.14 mostra as imagens dos gumes após 4 min de usinagem para as três condições de revestimento. Sem revestimento (a/d), nanocamada de CrN/TiN (b/e), nanocamada de TiN/TiAlN.

Para melhor identificar os modos de falha apresentados nos testes, os mesmos estão destacados nas imagens com os seguintes números: (1) craterização, (2) entalhe e lascamento, (3) o desgaste de flanco e (4) material aderido.

Figura 2.14 – Desgaste apresentado após 4 min de usinagem com ferramenta de metal-duro para três condições de revestimento.



Fonte: Adaptado de Ducros, Benevent e Sanchette (2003).

Desgaste abrasivo da ponta da ferramenta e lascamento do gume foram as principais modalidades de falha observadas. O entalhe na profundidade de corte foi considerado como um determinante para a vida da ferramenta ao usinar a superliga Inconel 718. O entalhe é influenciado pela formação da rebarba, este tipo de falha se deve principalmente ao encruamento do material durante a usinagem.

Este fenômeno apareceu para as ferramentas sem revestimento e com revestimento CrN/TiN, tendo sido atenuado no caso do inserto revestido com nanocamadas TiN/TiAlN. De acordo com os autores, isto ocorreu provavelmente devido ao melhor deslizamento do cavaco e uma temperatura de corte reduzida, obtidos com este revestimento. O desgaste abrasivo foi devido principalmente às partículas duras presentes no Inconel 718.

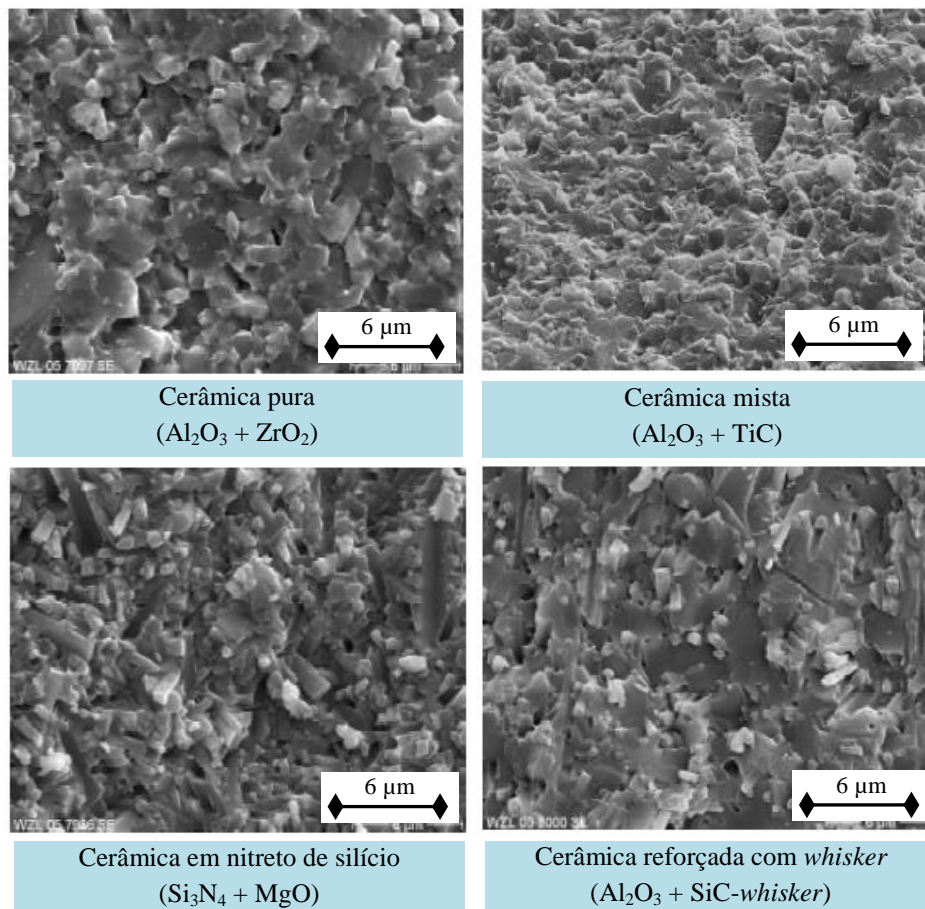
A dureza elevada do revestimento de nanocamadas de TiN/TiAlN forneceu uma melhor resistência à abrasão do que as estruturas clássicas multicamadas e monocamadas. Além disso, o revestimento nanocamadas de TiN/TiAlN apresenta uma melhor resistência à aderência.

2.3.2 Ferramentas de cerâmica

Os custos de usar as ligas à base de níquel são muito elevados. As taxas de remoção de metal são limitadas pela capacidade dos materiais utilizados nas ferramentas de suportar as temperaturas e as tensões geradas. Muito esforço está sendo posto desde a década de 1980 em empregar ferramentas cerâmicas para aumentar a eficiência destas operações (TRENT e WRIGHT, 2000).

A Figura 2.15 mostra as imagens em MEV de algumas cerâmicas utilizadas como material para ferramentas de corte.

Figura 2.15 - Imagens em MEV de algumas cerâmicas utilizadas para ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de König e Klocke (2008).

Materiais cerâmicos para ferramentas como a cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), cerâmica Si_3N_4 (SiALON) e cerâmica SiC reforçado com *whiskers* têm sido utilizados cada vez mais para usinagem de ligas à base de níquel. (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1999).

A cerâmica pura é baseada em Al_2O_3 , mas contém uma pequena quantidade de zircônia (ZrO_2) para uma maior resistência, enquanto a cerâmica mista é baseada em Al_2O_3 , mas contém carboneto de titânio (TiC) que lhe confere propriedades térmicas melhores.

Os óxidos de alumínio (Al_2O_3) são cerâmicos de alta dureza e alta resistência à compressão. São quimicamente muito estáveis e inertes à maioria dos ambientes, o que as tornam adequadas para aplicações em altas temperaturas. No entanto, têm baixa resistência aos choques mecânico e térmico em comparação com metal-duro. A tenacidade à fratura das cerâmicas de alumina pode ser melhorada pela adição de óxido de zircônio (ZrO_2), enquanto que a sua resistência ao choque térmico pode ser melhorada pela adição de carboneto de titânio ou de nitreto de titânio. Esta alumina mista é termicamente mais resistente e mantém sua dureza em altas temperaturas. Com isso a faixa de velocidades de corte utilizada pode ser quase dez vezes superior em relação ao metal-duro. (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

As ferramentas de cerâmica pura ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$) não têm desempenho eficaz ao usinar ligas à base de níquel, apesar de sua boa estabilidade química, dureza a quente e resistência ao desgaste elevadas. O baixo desempenho de ferramentas cerâmicas de óxido puro pode ser atribuído à sua baixa resistência ao choque térmico, baixa tenacidade à fratura ou à baixa resistência ao choque mecânico em temperaturas elevadas.

Segundo Ezugwu et al. (1999), o torneamento contínuo com ferramenta monocortante testada em Inconel 718 mostrou que a cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) é muito mais adequada para a usinagem deste material que a cerâmica pura.

O uso de ferramentas de cerâmica mista foi relatado primeiramente no final dos anos 70, com velocidades de corte entre de 120 e 240 m/min, bem maiores do que aquelas usadas para o metal-duro simples. A vida da ferramenta sob estas condições foi limitada severamente pelo entalhe excessivo na região da profundidade de corte, através da soldagem e do arrancamento de partículas, que podem ser causados pela tenacidade relativamente baixa da ferramenta. Vidas razoáveis da ferramenta foram obtidas na usinagem do Incoloy 901 com ferramentas de cerâmica mista, com altas velocidades de corte (até 300 m/min). A alta velocidade de usinagem da liga a base de níquel Inconel 718 foi conseguida também com outra classe (Al + Zr + W) de cerâmicas mistas (EZUGWU et al., 1999).

O nitreto de silício (Si_3N_4), com base de cerâmica conhecida como SiAlON tem melhores propriedades térmicas e dureza do que o Al_2O_3 . Estas ferramentas estão sendo amplamente utilizadas para usinagem de superligas (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

A introdução destes super-abrasivos nas ferramentas de corte permitiu alcançar altas velocidades de corte. A cerâmica SiAlON tem um baixo coeficiente de dilatação térmica comparada com a alumina. Alta tenacidade em conjunto com o baixo coeficiente de expansão térmica tornou as ferramentas de SiAlON resistentes ao choque térmico.

A cerâmica de nitreto de silício (Si_3N_4) é conhecida por ser um dos mais duros materiais cerâmicos. São constituídos de duas fases, cristais de nitreto de silício em uma fase ligante intergranular. Uma mistura de alumina (~13%), nitreto de silício (~77%), de ítrio (~10%) e nitreto de alumínio são utilizadas como material de sinterização para a produção de cerâmica SiAlON.

A principal vantagem desta cerâmica é a sua tenacidade elevada. Ela é muito mais tenaz que a cerâmica a base de Al_2O_3 -TiC e usada para desbaste de superligas. As cerâmicas a base de silício têm um baixo coeficiente de dilatação térmica (metade em relação ao metal-duro e um terço em relação à alumina). Estas ferramentas podem ser utilizadas para usinagem de ligas à base de níquel com maiores velocidade de corte e maiores velocidade de avanço em relação às ferramentas de alumina mista (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

Observou-se uma redução de até 70% (em relação ao metal-duro) na taxa de formação do entalhe na usinagem do Incoloy 901 com ferramenta a base de nitreto de silício. Este desempenho melhorado resultou em uma economia de 57% nos custos em comparação com ferramentas de metal-duro simples em torneamento de semi-acabamento de Inconel 718. Ferramentas cerâmicas de SiAlON usinam melhor a liga Waspaloy na presença de fluido refrigerante (EZUGWU et al., 1999).

Ferramentas cerâmicas reforçadas com *whiskers*, inclusões de monocristais de SiC em uma matriz cerâmica, confere maior resistência à tração e tenacidade à fratura. A condutividade térmica também aumenta em 40% sobre a alumina, reduzindo assim os gradientes térmicos e melhorando a capacidade de resistir ao choque térmico (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998). As ferramentas cerâmicas de alumina reforçadas com *whiskers* foram desenvolvidas especialmente para usinar as ligas a base de níquel (EZUGWU et al., 1999).

O desenvolvimento da ferramenta cerâmica de alumina (Al_2O_3 + SiC-*whisker*) melhorou a resistência por meios mecânicos, em vez de químicos. As fibras ou *whiskers* de carboneto de silício são adicionadas para reforço de uma matriz de alumina. Os *whiskers* têm um diâmetro médio de aproximadamente 0,6 μm e um comprimento de 10 a 80 μm . O

material resultante tem uma tenacidade à fratura de $8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$. Este valor é 4,3 para a alumina pura (Al_2O_3), de 4,5 para alumina mista ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) e de 6,8 para cerâmica SiAlON.

A cerâmica de alumina reforçada com *whiskers* tem um baixo coeficiente de dilatação térmica, além de boa resistência em altas temperaturas. O carboneto de silício (SiC) possui uma alta resistência à tração, mas é quimicamente menos estável quando comparado a alumina. Logo, os carbonetos de alumina-silício reforçado com *whiskers* têm melhores propriedades mecânicas (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

2.3.3 Ferramentas de CBN

O nitreto cúbico de boro (CBN) é um dos materiais mais duros disponíveis depois do diamante e não é encontrado na natureza. A síntese do CBN policristalino é composta por cerca de 50-90% de CBN e ligantes de cerâmica, tais como carboneto de titânio e nitreto de titânio. Um alto teor de CBN é melhor para o corte de superligas, já que o maior teor de CBN, geralmente, aumenta a resistência ao lascamento.

Tem sido relatado que, no torneamento de Inconel 718, o desempenho de ferramentas com alto teor de CBN foi melhor devido à sua elevada dureza. A dureza aumenta quase linearmente com o teor de CBN. Em comparação com a cerâmica, o CBN tem melhor dureza e resistência à fratura, porém uma menor estabilidade química. Estas ferramentas são utilizadas para usinagem de ligas de níquel com dureza igual ou superior a 340 HV. A faixa de velocidade recomendada dessas ferramentas para usinagem de Inconel 718 é de 120 a 240m/min (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998).

Ferramentas de CBN são eficientes na usinagem em condições de velocidade mais altas. Uma grande desvantagem dessas ferramentas normalmente é seu custo, daí a busca por ferramentas mais baratas ou materiais que possam executar igualmente bem a operação em condições de corte superiores. (EZUGWU et al., 2004).

2.4 APLICAÇÃO DE FLUÍDO LUBRIRREFRIGERANTE

As principais funções dos fluidos lubrirrefrigerantes são a redução do atrito (lubrificação), eliminação do calor (refrigeração) e auxílio no transporte dos cavacos (limpeza). Com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material

da peça não será mais suficientemente garantida e o atrito aumentará. Uma consequência para a ferramenta é o aumento dos mecanismos de desgaste por abrasão, adesão e difusão.

Com o aquecimento, os cavacos terão mais dificuldade para adquirir uma forma mais definida e podem soldar-se à ferramenta. Conforme Shaw (1984), a utilização de fluido lubrificador tem as seguintes funções em uma operação de usinagem:

- a) diminuir a adesão entre o cavaco e a ferramenta e proporcionar baixo atrito e desgaste, além da redução da formação de gume postiço;
- b) refrigerar a ferramenta e a peça além da condução do calor gerado na zona de corte para fora desta;
- c) remover os cavacos da região de corte; e
- d) proteger a superfície usinada contra corrosão.

Com base nestas informações é possível avaliar que o calor e o atrito exercem grande influência na escolha da utilização do fluido lubrificador.

Durante o torneamento das superligas à base de níquel, o calor gerado concentra-se no gume da ferramenta com uma intensidade superior àquela atingida no torneamento dos aços carbono usualmente processados, visto que a condutividade térmica deste material é baixa, tornando esta liga refratária.

O atrito gerado entre a superfície de saída, superfície de folga primária e secundária da ferramenta e o cavaco, resultam em calor e desgaste da ferramenta de corte. Uma terceira fonte de calor, que é a principal, é o atrito interno que ocorre no plano de cisalhamento ao longo da formação do cavaco. Diferente da ação refrigerante que atua na extração de calor, a ação lubrificante atua na diminuição dessa, ou seja, o seu efeito é minimizar o atrito.

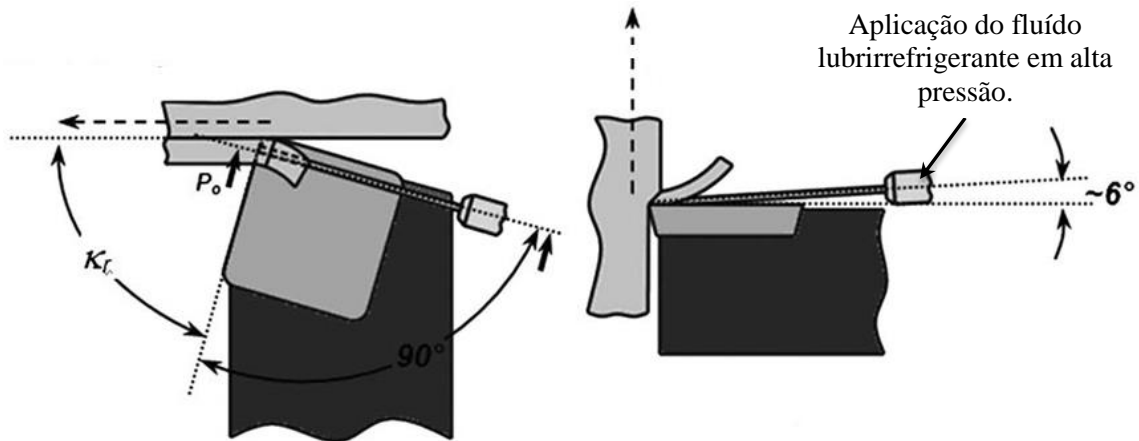
No trabalho com materiais de difícil usinagem, o efeito refrigerante dos fluidos de corte (responsáveis pela retirada de calor da região do corte), é bastante restrito devido à sua evaporação prematura ocasionado pelas altas temperaturas alcançadas nesta região.

Esta evaporação não permite o acesso do fluido na interface cavaco ferramenta e/ou ferramenta peça. Devido a isto, o efeito lubrificante se destaca pela formação de um filme de óleo que reduz significativamente o atrito reduzindo com isto, a geração de calor e consequentemente diminuindo a temperatura da região do corte (EZUGWU e BONNEY, 2004).

Outra técnica possível é a utilização de um sistema de alta pressão que não só fornece refrigeração adequada na interface ferramenta peça, mas também promove uma remoção eficaz de cavacos da área de corte.

A Figura 2.16 ilustra de forma esquemática o sistema de aplicação de fluido em alta pressão.

Figura 2.16 – Ilustração do sistema de aplicação de fluido em alta pressão.



Fonte: Adaptado de Courbon et al. (2009).

O jato de refrigerante com alta pressão é capaz de criar uma cunha hidráulica entre a ferramenta e a peça, penetrando profundamente a interface com uma velocidade superior ao necessário, mesmo para a usinagem de alta velocidade. Este fenômeno também muda as condições de fluxo do cavaco (KOVACEVIC, CHERUKUTHOTA e MAZURKIEWICZ 1995).

3 PROPOSTA DE TRABALHO

No presente capítulo encontram-se de forma detalhada, a metodologia e os materiais empregados no desenvolvimento deste trabalho, levando em consideração o referencial teórico e os recursos disponíveis.

Estão descritos os equipamentos e procedimentos usados na realização dos ensaios experimentais de usinagem, bem como as características das ferramentas de corte selecionadas, o material e dimensionamento dos corpos de prova, os parâmetros de usinagem e os equipamentos e métodos de análise realizados para avaliação dos mecanismos e tipos de desgastes predominantes na usinagem da superliga Inconel 718.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os materiais e equipamentos utilizados para o desenvolvimento e análise experimental deste trabalho encontram-se especificados a seguir.

3.1.1 Corpo de prova

Os corpos de prova para os ensaios experimentais foram fabricados em barras forjadas cilíndricas de Inconel 718 endurecidas por precipitação com as propriedades físicas e mecânicas conforme a Tabela 3.1, onde estão destacadas as principais características informadas no certificado do material, o qual pode ser analisado detalhadamente no Anexo A.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova (Inconel 718).

Densidade	Tensão de ruptura	Tensão de escoamento	Dureza	Alongamento	Condutividade Térmica
8,19 g/cm ²	1264 MPa	959 MPa	37 HRc	35 %	11,4 W/m.K

Fonte: Weatherford Ind. e Com. Ltda.

As barras foram ainda furadas e pré-usinadas a fim de eliminar as carepas provenientes dos processos de forjamento e melhorar sua fixação na máquina-ferramenta. O Apêndice A, mostra detalhadamente o desenho dos corpos de prova bem como a sua fixação durante os ensaios experimentais.

3.1.2 Ferramentas de corte

A seleção das ferramentas se deu com base no material apresentado pelo referencial teórico concomitantemente com o que é disponível comercialmente.

Foram testados insertos em metal-duro e cerâmico, com variações de geometria, substrato e revestimento, conforme pode ser observado na Tabela 3.2, a qual destaca as características geométricas, o material do substrato e o revestimento de cada inserto ensaiado.

Tabela 3.2 – Características dos insertos testados nos ensaios experimentais.

Inserto	Geometria			Material do substrato	Revestimento
	γ (°)	α (°)	r		
SNMG QM S05F	13 15(9)*	0	0,8	Metal-duro	CVD TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN
SNMG QM 1105	13 15(9)*	0	0,8	Metal-duro	PVD TiAlN
SNMG SMR S05F	15	0	0,8	Metal-duro	CVD TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN
SNMG SMR 1105	15	0	0,8	Metal-duro	PVD TiAlN
SNGN E 6065	0	0	1,2	Cerâmico (SiAlON)	---
SNGN T01020 670	0	0	1,2	Cerâmico (Al ₂ O ₃ + SiC _w)	---

* Ângulos da ponta.

Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2012).

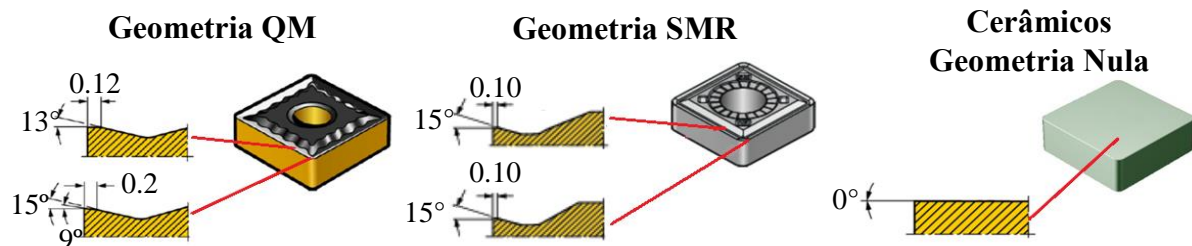
Analisando a Tabela 3.2 é possível identificar que tanto os insertos em metal-duro (SNMG) quanto os cerâmicos (SNGN) são de geometria tipo S (quadrado). Tal escolha deu-se por tratar-se de uma geometria robusta que possibilita um ângulo lateral de corte em 45°, o qual segundo diversos pesquisadores garante um melhor desempenho da ferramenta na usinagem das ligas de níquel.

Para os insertos em metal-duro utilizou-se duas geometrias de gume diferentes (QM e SMR) e dois revestimentos (CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN e PVD-TiAlN), todos indicados para usinagem de ligas de níquel pelo fabricante das ferramentas.

Para os insertos cerâmicos, foram selecionadas dois materiais (SiAlON e Al₂O₃+SiC_w) os quais mostraram ser os mais promissores pelo referencial teórico e igualmente são indicados pelo fornecedor para a usinagem de superligas de níquel.

Para melhor compreender as diferenças geométricas dos gumes dos insertos ensaiados, segue na Figura 3.1 o desenho esquemático de cada tipo de geometria. Para os insertos em metal-duro foram testadas as geometrias tipo QM e SMR, já para os insertos cerâmicos a geometria testada foi Nula. No Apêndice B é possível observar as imagens dos insertos novos.

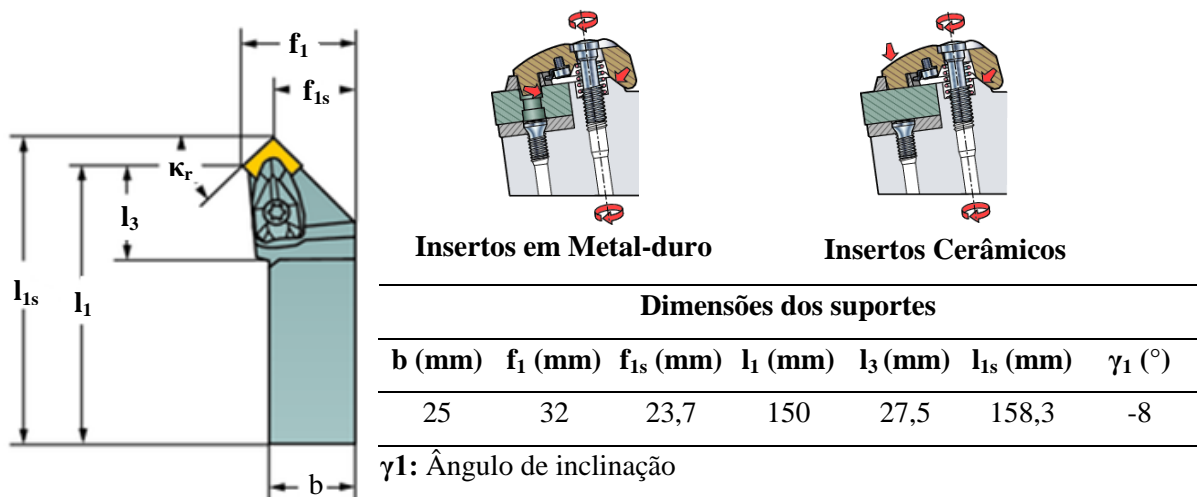
Figura 3.1 – Diferença entre as geometrias dos insertos testados.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2012).

Observando a Figura 3.1, é possível identificar que todas as geometrias a serem testadas apresentam um ângulo de folga (α) nulo. Contudo tais ferramentas foram fixadas em suportes que as confere um ângulo de inclinação de -8° . A Figura 3.2 mostra as características dimensionais dos suportes utilizados.

Figura 3.2 – Características e dimensões dos suportes para fixação dos insertos.



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2012).

A única diferença entre os suportes para os insertos de metal-duro e cerâmico está na forma de fixação dos insertos, haja vista que as ferramentas em metal-duro possuem furo central e as cerâmicas não.

3.1.3 Equipamentos

Os testes práticos de usinagem foram realizados em um torno CNC da marca Daewoo, modelo PUMA 350L, conforme Figura 3.3, com potência de 22 kW e rotação máxima de 2000 rpm pertencente a empresa Weatherford Ind. e Com. Ltda.

Figura 3.3 – Fotografia da máquina-ferramenta utilizada nos ensaios experimentais.



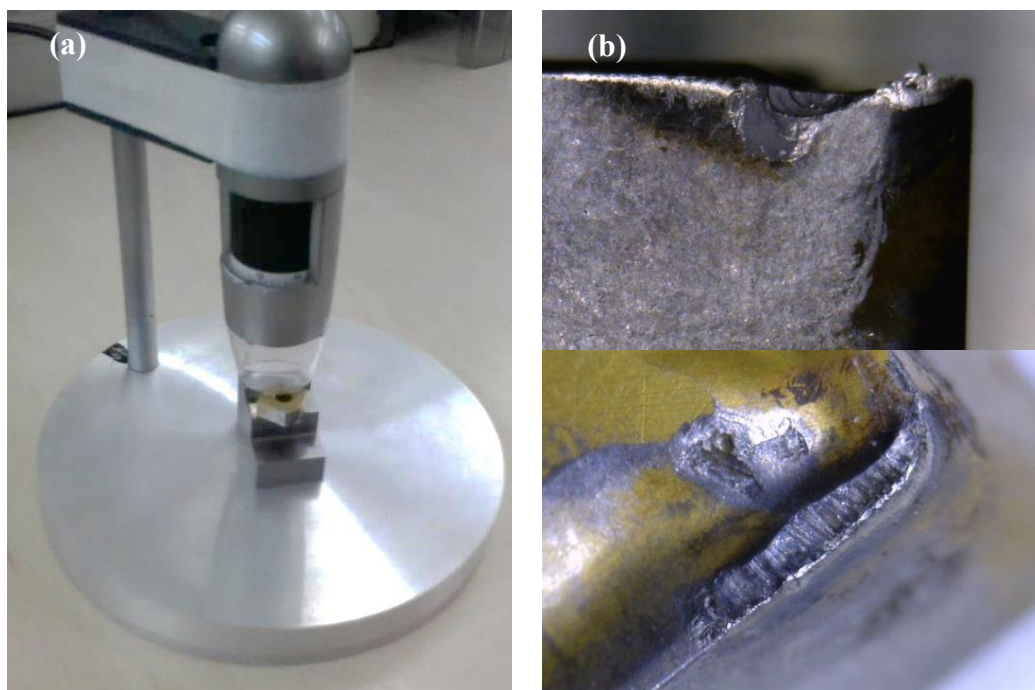
Fonte: Weatherford Ind. e Com. Ltda.

Para realização das análises dos desgastes ao longo da vida dos insertos, foi utilizado um Microscópio Digital, modelo AM3013T, da marca Dino-Lite com resolução 640x480 e ampliação máxima de 200 vezes, como pode ser observado na Figura 3.4 (a).

Com o objetivo de melhor caracterizar os desgastes apresentados pelas ferramentas, durante a primeira fase de organização metodológica deste trabalho, foi identificada uma possível necessidade de utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para a avaliação dos insertos em fim de vida.

Contudo, como mostrado pela Figura 3.4 (b), as imagens obtidas pelo equipamento óptico utilizado nos ensaios experimentais apresentaram uma excelente qualidade, mostrando claramente os desgastes e avarias apresentados pelos insertos. Com isso, foi descartada a utilização do MEV.

Figura 3.4 – Imagem do microscópio óptico utilizado nos ensaios experimentais e exemplos de imagens obtidas pelo equipamento.



Fonte: O Autor.

3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos e parâmetros de entrada utilizados durante os ensaios experimentais e metodologia de análise das ferramentas testadas se encontram a seguir.

3.2.1 Metodologia

Com o objetivo de reduzir ao máximo a influência das vibrações geradas pela máquina-ferramenta e fixação do ferramental, a estratégia de usinagem testada foi a de torneamento externo longitudinal, permitindo assim ter um melhor controle destes parâmetros.

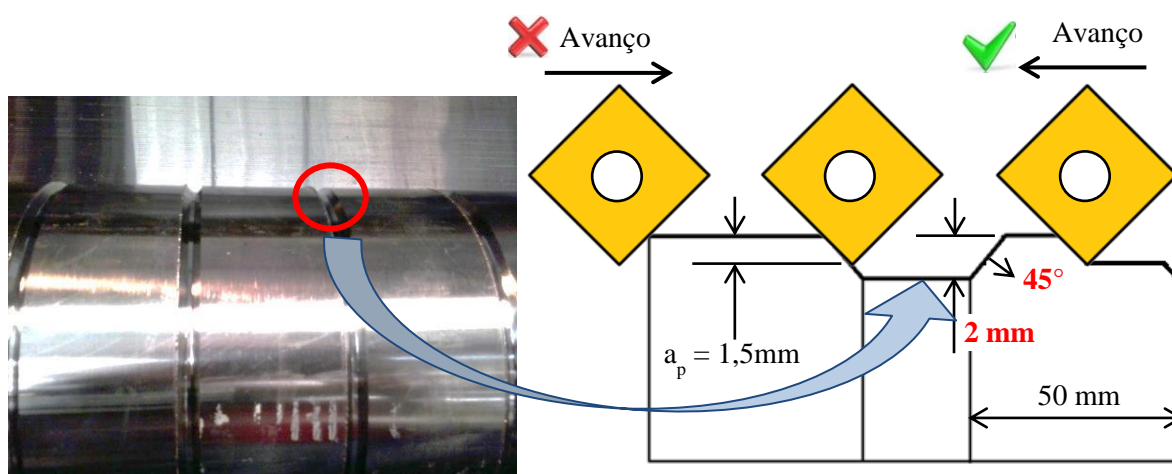
Durante os testes de usinagem os insertos passaram por uma análise de microscopia digital para avaliação qualitativa e quantitativa dos desgastes apresentados.

O comportamento dos desgastes fora monitorado a cada 50 mm de comprimento usinado para todas as ferramentas testadas. Com o objetivo de reduzir a influência das interrupções do corte para análise dos desgastes, foram usinados canais a cada comprimento

de corte de 50 mm, como pode ser observado na Figura 3.5, a qual ilustra os canais usinados bem como as condições de entrada das ferramentas.

Tais canais foram usinados com profundidade de 2 mm e chanfros de 45° para suavizar a entrada e saída das ferramentas, conforme pode ser observado detalhadamente no Apêndice A.

Figura 3.5 – Desenho esquemático dos canais usinados nos corpos de prova.



Fonte: O Autor.

Os critérios de fim de vida adotados fora um desgaste de flanco máximo ($VB_{m\acute{a}x.} = 0,6$ mm), falha catastrófica (lascamento) ou fim de teste após um comprimento usinado de 600 mm devido ao elevado custo do material.

3.2.2 Aplicação de fluido lubrificador

Para os ensaios com ferramentas de metal-duro fora empregado como fluido lubrificador um óleo miscível de base vegetal (emulsão), da marca Vasco 1000, fornecido pela Blaser Swissslube, com concentração de 10% aplicado externamente à ferramenta e a uma vazão de aproximadamente 30 l/min e pressão de 1,45 MPa.

Os testes com insertos cerâmicos foram realizado com aplicação de fluido lubrificador e a seco.

Ambas as condição foram testadas, pois o fornecedor do inserto cerâmico SNGN_SiAlON sugere a utilização de fluido, haja vista que este material apresenta boa tenacidade e elevada resistência a choques térmicos, contudo, não recomenda utilizar fluido com o inserto de cerâmica SNGN_Al₂O₃ + SiC_w.

3.2.3 Parâmetros de corte

Os valores dos parâmetros de corte foram definidos com base no catálogo técnico do fabricante das ferramentas utilizadas para torneamento externo em pré-acabamento e estão destacados na Tabela 3.3.

Embora os catálogos não forneçam as condições ótimas para cada processo, constituem um bom referencial de valores dos parâmetros, a partir dos quais pode ser realizada a adequação do processo.

Tabela 3.3 – Parâmetros de corte dos ensaios experimentais.

Ferramenta	v_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/rot)
Metal-duro	50	1,5	0,27
Cerâmica	250	1,5	0,2

Fonte: O Autor.

Como é possível observar na Tabela 3.3, os parâmetros foram divididos pelas classes de materiais dos insertos, ou seja, metal-duro e cerâmico. Outra característica importante a se destacar é que as velocidades de corte testadas com os insertos cerâmicos são aproximadamente 500% maiores que as testadas utilizando metal-duro.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

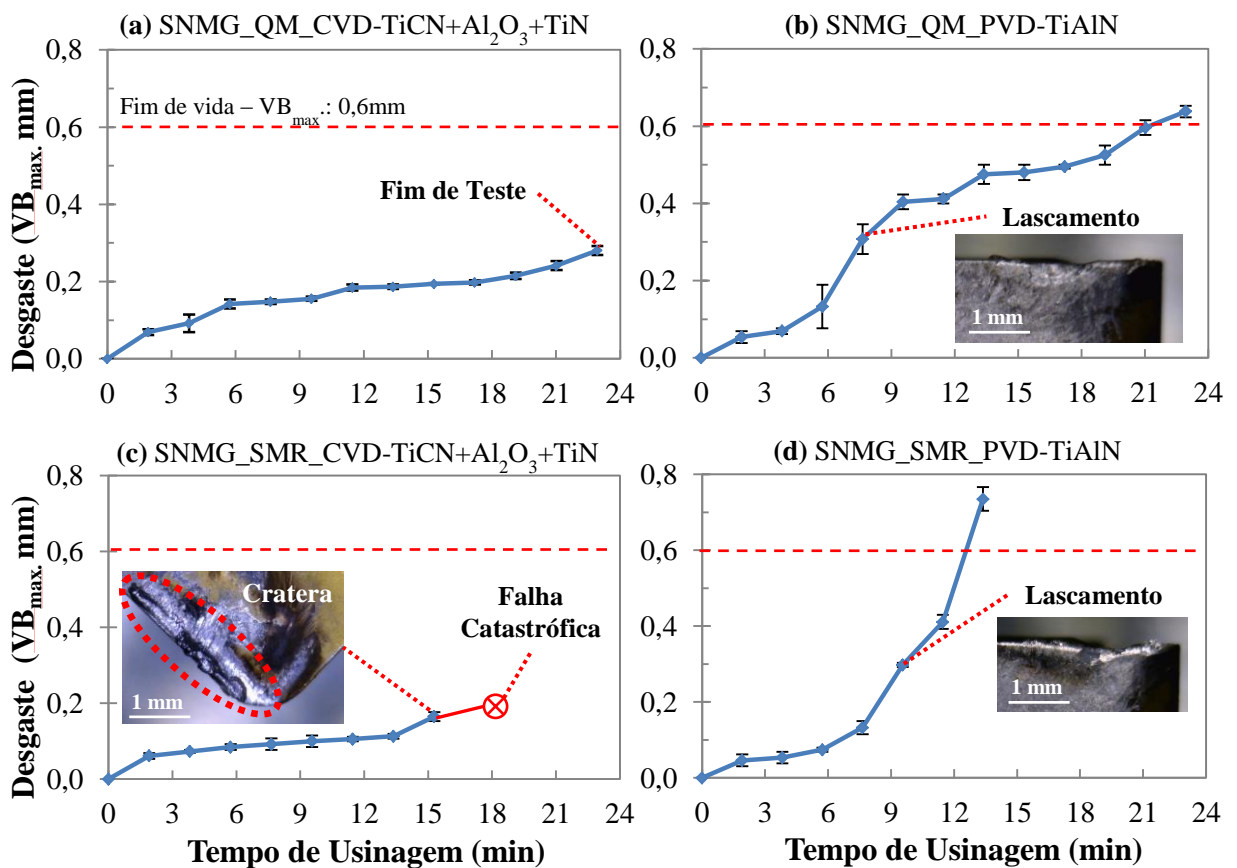
Este capítulo apresenta a aplicação da metodologia descrita para a avaliação do comportamento dos desgastes no torneamento externo longitudinal, através do monitoramento periódico da usinagem por meio de microscopia.

Inicialmente, será apresentado o levantamento das curvas de desgaste em função do tempo, com o objetivo de compreender o comportamento das ferramentas ao longo de sua utilização. Por fim, são expostas as imagens e discussões acerca dos desgastes apresentados, sendo concluído o presente estágio com comentários e sugestões para futuros desenvolvimentos.

4.1 RESULTADO DAS FERRAMENTAS DE METAL-DURO

A Figura 4.1 mostra os resultados do comportamento dos desgastes em função do tempo para as quatro ferramentas de metal-duro testadas.

Figura 4.1 – Comportamento da curva de vida dos inserts de metal-duro.



Fonte: O autor.

Analisando os gráficos da Figura 4.1 é possível identificar que o inserto (a) SNMG_QM_CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN apresentou o melhor resultado dentre os insertos de metal-duro ensaiados, não chegando ao fim de vida estipulado em um desgaste de flanco máximo de 0,6 mm. O fim de teste se deu em decorrência do elevado custo do Inconel 718.

O inserto (b) SNMG_QM_PVD-TiAlN, que se difere do inserto (a) somente no revestimento, chegou ao fim de vida com 22,93 min de usinagem, sendo que a intensificação do desgaste se deu após um pequeno lascamento do gume seguido de outro lascamento na face.

O inserto (c) de geometria SMR e revestimento CVD-multicamadas usinou por 15,29 min até chegar ao fim de vida devido a um lascamento que o levou a falha catastrófica. O mesmo inserto foi testado duas vezes e em ambos os testes ocorreu falha catastrófica logo após 15 min de usinagem.

Para o inserto (d) com monorevestimento de PVD-TiAlN, o desgaste de flanco foi acelerado após um pequeno lascamento do gume aos 9,56 min de usinagem. Tal lascamento modificou a geometria inicial da ferramenta, gerando uma maior superfície de atrito com a peça, além de perder a ação protetora do revestimento, acelerando assim o desgaste de flanco.

Bhatt et al. (2010) realizaram um estudo a fim de melhor compreender o comportamento dos desgastes no torneamento de acabamento do Inconel 718, utilizando ferramentas redondas de metal-duro revestidas com PVD-TiAlN e CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN. Em seus testes, concluíram que em elevados parâmetros de corte o revestimento triplo CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN apresenta desempenho superior, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho.

Tal resultado superior do revestimento CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN pode estar associado a diversos fatores. Em primeiro lugar, o processo CVD cria uma ligação do tipo difusão entre o revestimento e o substrato, que é muito mais forte do que a ligação criada através do processo PVD (JAWAID e KOKSAL, 2000).

Em segundo lugar, o revestimento multicamadas atua como uma barreira contra a propagação de trincas (BHATT et al., 2010).

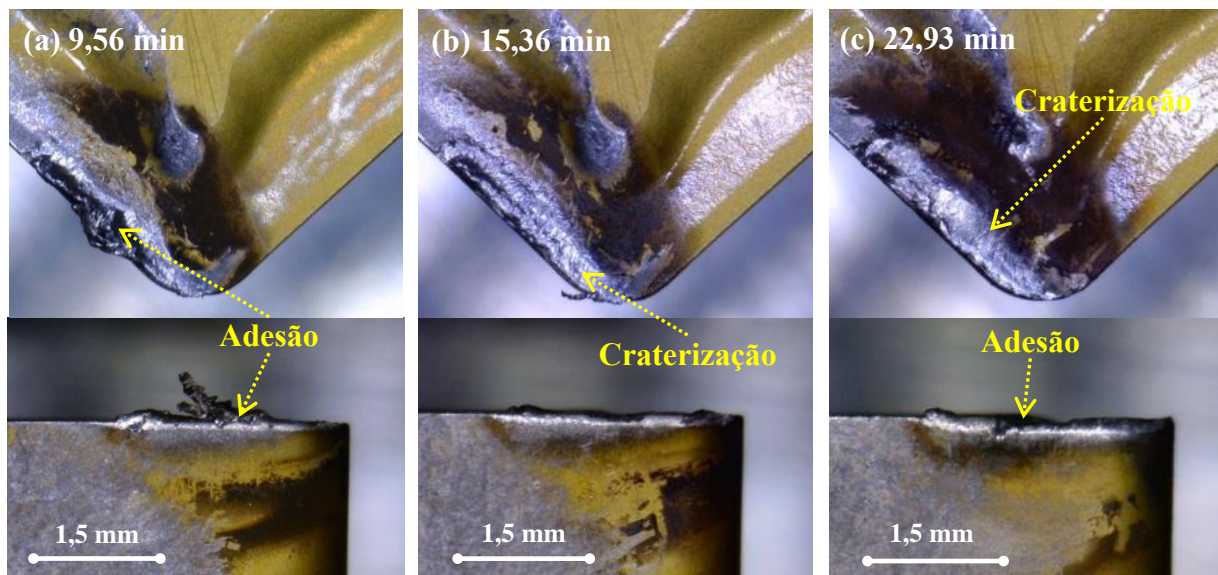
Conforme Kamata e Obikawa (2007), a camada superior de TiN oferece um menor coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, já a camada intermediária de Al₂O₃ assegura uma excelente proteção térmica enquanto que a camada mais interna de TiCN apresenta uma forte adesão ao substrato de metal-duro e excelente resistência a abrasão. Os autores ainda afirmam que tais propriedades em conjunto não podem ser conseguidas por um único revestimento de PVD.

4.1.1 Avaliação dos desgastes apresentados pelos insertos de metal-duro

Com o objetivo de melhor compreender os resultados obtidos por cada ferramenta e identificar os principais tipos e mecanismos de desgaste predominantes na usinagem do Inconel 718, a presente seção traz as imagens e discussões acerca dos fenômenos observados durante a usinagem.

A Figura 4.2 mostra as imagens da face e flanco do inserto SNMG_QM_CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN em três instantes diferentes.

Figura 4.2 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_QM_CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN.



Fonte: O autor.

Avaliando a Figura 4.2 é possível constatar que em todos os instantes mostrados há presença de material aderido na face da ferramenta. Tal condição é típica da usinagem de superligas de níquel e foi observado por inúmeros pesquisadores durante o torneamento do Inconel 718 com ferramentas de metal-duro, revestidas e não revestidas (THEREZANI, 2012; IBRAHIM et al., 2011; BHATT et al., 2010).

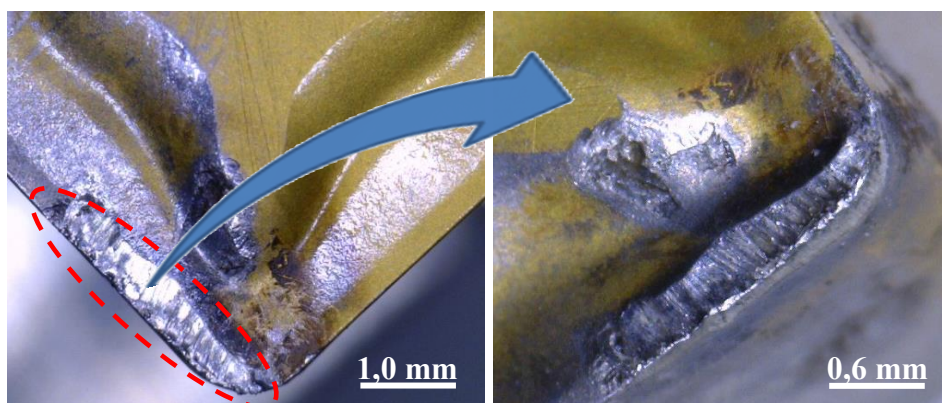
Dudzinski et al.(2004) sustentam que o material usinado tende a aderir ao gume da ferramenta devido às condições extremas de alta temperatura, baixos parâmetros de corte e elevada afinidade química. Tal material aderido é repetidamente removido levando parte do material que compõe a ferramenta, inclusive o revestimento.

Conforme Ibrahim et al.(2011 apud KÖNIG, 1979), a adesão ocorre após o revestimento estar desgastado ou ter ocorrido sua remoção. Alguns pesquisadores têm

atribuído a remoção do revestimento à reação química, ao passo que outros têm argumentado que é devido à propagação de micro-trincas na interface da superfície, o que pode ser devido à diferença no coeficiente de expansão térmica entre a matriz de revestimento e o substrato (HARON, 2001; EZUGWU et al.,2005).

Além da adesão observada, é possível identificar a craterização da face do inserto, sendo este, o principal tipo de desgaste observado em todos os insertos de metal-duro testados. A Figura 4.3 mostra detalhadamente o desgaste de cratera formado após 22 min de usinagem.

Figura 4.3 – Desgaste de cratera no inserto SNMG_QM_CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN.



Fonte: O autor.

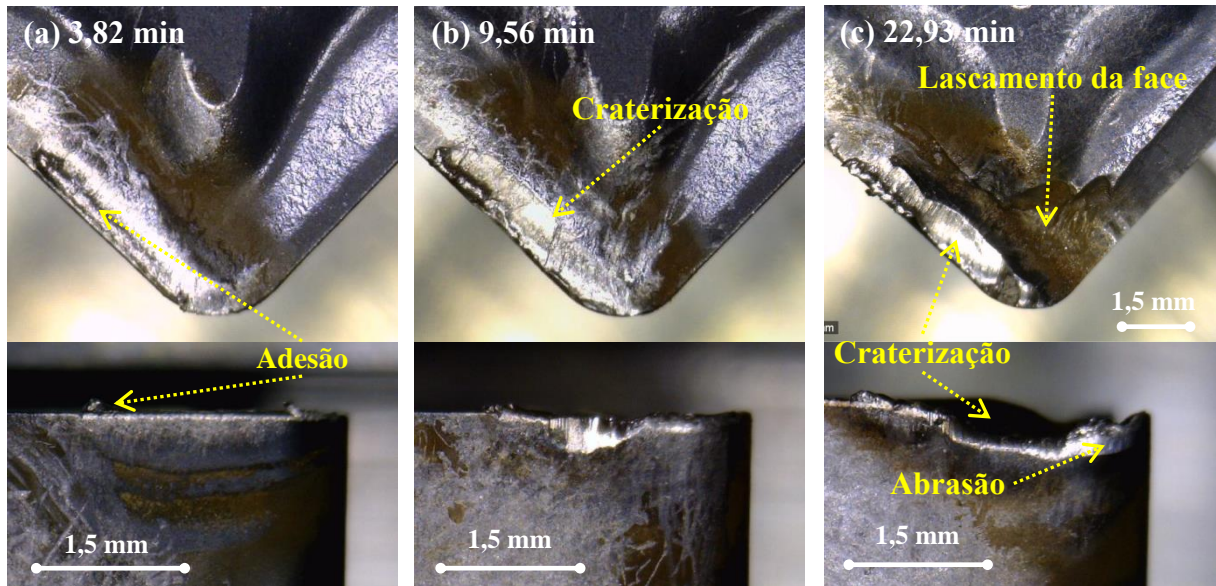
O desgaste de cratera não está associado a um único mecanismo, mas à combinação de diferentes mecanismos, sendo a difusão, a adesão e a abrasão os principais agentes causadores deste tipo de desgaste (ARUNA et al, 2010). Tais pesquisadores sustentam ainda que os fatores mais importantes que induzem ao desgaste de cratera são a temperatura na interface ferramenta-cavaco e a afinidade química entre a ferramenta e o material usinado.

Além destes fatores, o Inconel 718 apresenta em sua estrutura, inúmeros particulados duros a exemplo dos carbonetos de nióbio, que conferem a este material uma elevada abrasividade.

De maneira geral, todos os insertos de metal-duro ensaiados exibiram os mesmos mecanismos e tipos de desgastes, sendo que a craterização foi o tipo de desgaste dominante, controlando a deterioração e falha final das ferramentas. As diferentes geometrias e revestimentos somente modificaram a intensidade na qual as taxas de desgaste ocorreram.

A Figura 4.4 mostra algumas imagens dos desgastes e avarias observados na face e flanco no decorrer da usinagem com o inserto de geometria QM revestido com PVD-TiAlN.

Figura 4.4 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_QM_PVD-TiAlN.



Fonte: O autor.

Examinando a Figura 4.4, é possível reconhecer que da mesma forma como no inserto anterior de geometria QM e revestimento CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN, o inserto de mesma geometria e revestimento de PVD-TiAlN apresentou material da peça aderido à face de escoamento do cavaco.

Entretanto, comparado ao inserto anterior é possível identificar uma redução na quantidade de material aderido. Tal redução na adesão de material, está possivelmente associado às propriedades do revestimento de TiAlN, o qual ao ser exposto ao calor, reage com o oxigênio para formar uma camada de óxido de alumínio (Al₂O₃), que por sua vez, é passivo e quimicamente estável, reduzindo desta forma, a adesão do material usinado no gume da ferramenta (JINDAL et al., 1999).

Como já mencionado, o desgaste predominante foi o de cratera, sendo que a ferramenta sofre lascamento do gume e da face os quais a levaram ao fim de vida após 22,93 min de usinagem.

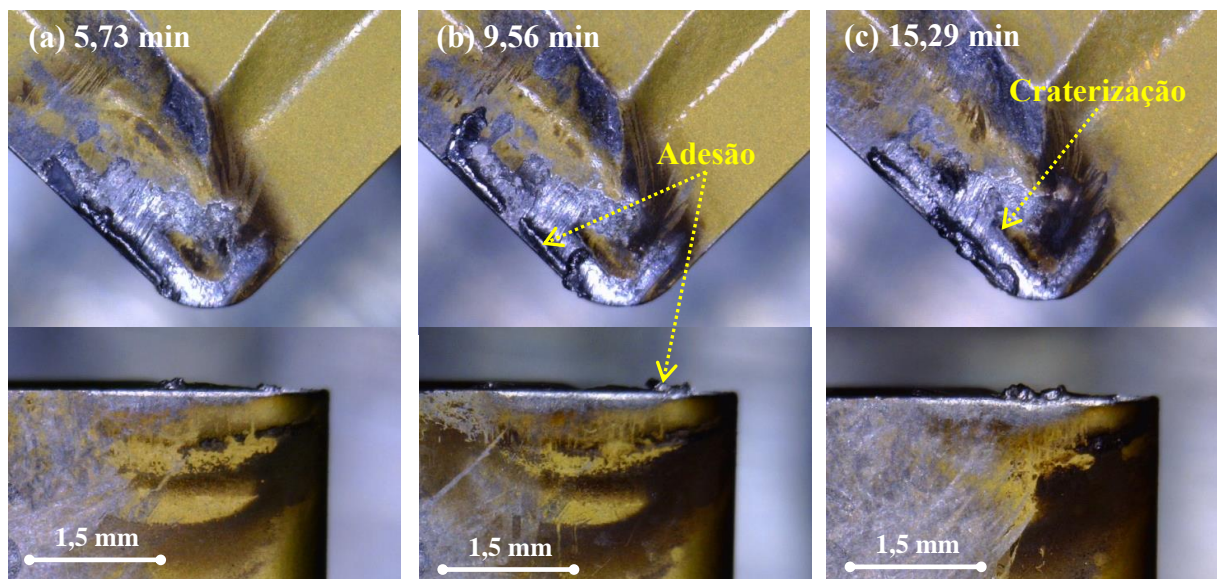
A Figura 4.4 (b) evidencia a craterização da face bem como o desgaste abrasivo do gume depois do mesmo ter sofrido um pequeno lascamento que alterou sua geometria inicial de corte.

A intensificação da craterização e o fato do cavaco gerado ser contínuo favoreceram para que ocorresse o lascamento da face, o que por sua vez, alterou drasticamente a condição geométrica inicial do inserto e proporcionou o aumento da craterização, como mostra a Figura 4.4 (c).

Apesar do revestimento de TiAlN apresentar excelentes propriedades físico-químicas, as quais o confere uma elevada resistência ao desgaste, o mesmo não propiciou ao inserto uma boa resistência à craterização. Tal desgaste pode estar associado à elevada abrasividade do Inconel 718, juntamente ao fato da espessura do revestimento aplicado pelo método PVD ser menor que a do revestimento de multicamadas aplicado pelo método CVD.

A Figura 4.5 mostra as imagens dos desgastes registrados em diferentes instantes pelo inserto SNMG_SMR_CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN.

Figura 4.5 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_SMR_CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN.



Fonte: O autor.

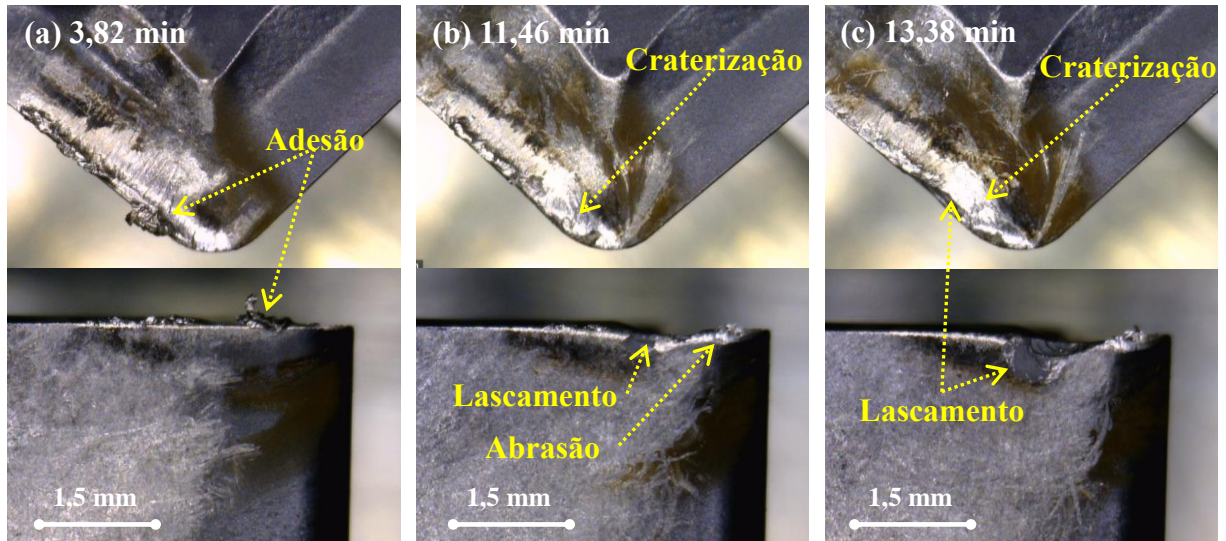
Como identificado nos insertos de geometria QM, o inserto de geometria SMR também apresentou adesão e craterização da face como mostra a Figura 4.5. O fim de vida do inserto SNMG_SMR_CVD-TiCN+Al₂O₃+TiN se deu após um lascamento prematuro que o levou à falha catastrófica após 15,29 min de usinagem.

Tal quebra prematura pode estar associada com a craterização da face, somado ao fato de que o cavaco gerado era contínuo helicoidal, os quais por sua vez, induzem uma condição propícia de fratura da ferramenta.

Outra hipótese para a ocorrência de quebras prematuras está associada ao tamanho e distribuição dos particulados duros contidos na estrutura do Inconel 718.

O mesmo comportamento de desgaste fora também presenciado no inserto de geometria SMR e revestimento de PVD-TiAlN. A Figura 4.6 mostra os desgastes e avarias apresentados por este inserto durante os ensaios experimentais realizados.

Figura 4.6 – Imagens dos desgastes do inserto SNMG_SMR_PVD-TiAlN.

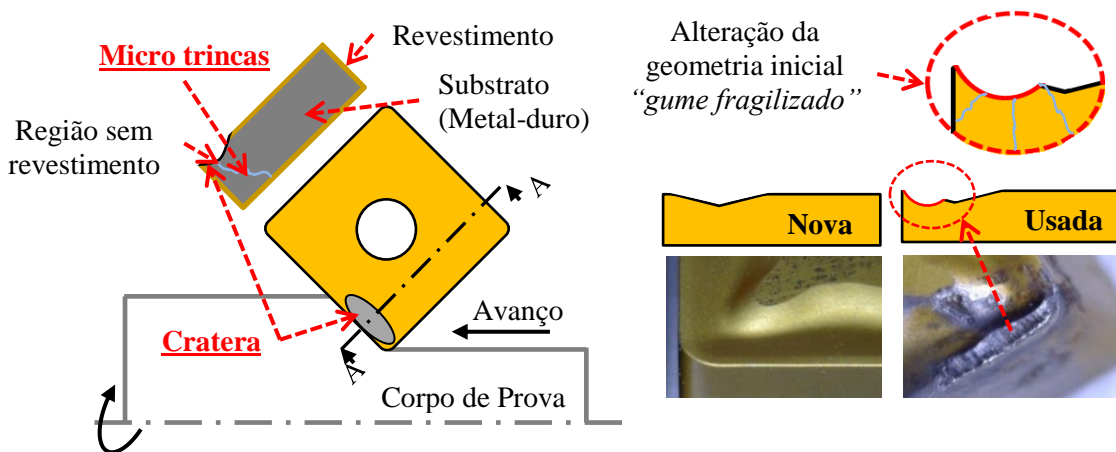


Fonte: O autor.

Igualmente às demais ferramentas, o inserto SNMG_SMR_PVD-TiAlN exibiu elevada craterização da face de escoamento do cavaco, seguida de lascamento do gume, conforme pode ser observado na Figura 4.6.

A fim de melhor compreender a relação entre o desgaste de cratera e o lascamento dos insertos, a Figura 4.7 ilustra um desenho esquemático que demonstra a alteração na geometria inicial da ferramenta, bem como seu impacto sobre a integridade da mesma.

Figura 4.7 – Desenho esquemático da influência do desgaste de cratera sobre a quebra prematura dos insertos de Metal-duro.



Fonte: O autor.

Analisando a Figura 4.7 pode-se identificar que o desgaste de cratera modifica a geometria inicial do inserto tornando-o mais agudo e conseqüentemente mais frágil.

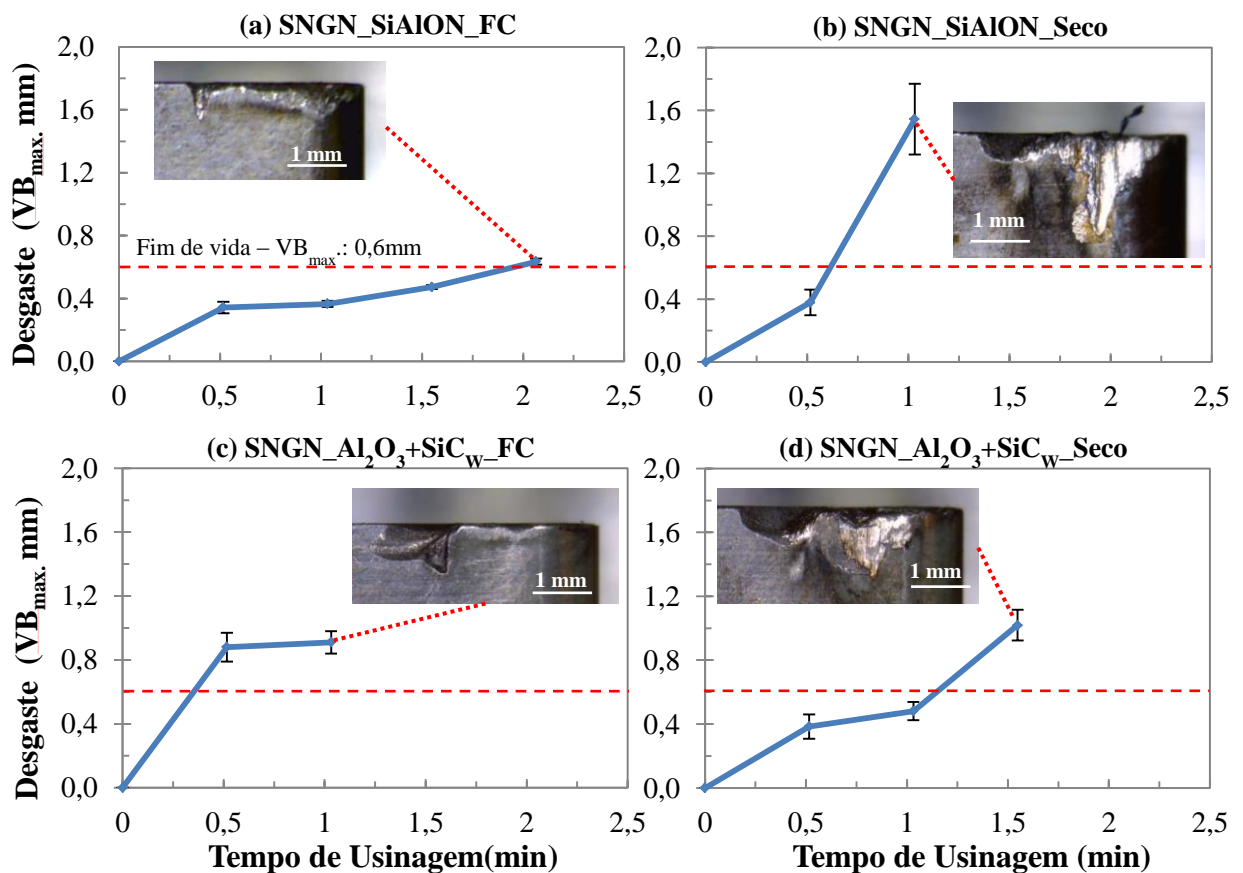
Além da alteração geométrica, a craterização é um indício de que não há mais a ação protetora do revestimento sobre o substrato da ferramenta (ZHU et al., 2013).

Conforme Ezugwu et al.(1998), a exposição do substrato fornece uma condição favorável à difusão de elementos do metal-duro para o material usinado, em especial do cobalto. Tendo em vista que o cobalto é o principal elemento que confere tenacidade ao metal-duro, com a sua difusão, o inserto tende a torna-se frágil, favorecendo assim a formação de micro-trincas e, por conseguinte, o lascamento do inserto.

4.2 RESULTADOS DAS FERRAMENTAS CERÂMICAS

A Figura 4.8 apresenta o comportamento dos desgastes apresentados pelos dois insertos cerâmicos testados (SNGN_SiAlON e SNGN_Al₂O₃+SiC_w) na usinagem com e sem aplicação de fluido lubrificador.

Figura 4.8 – Comportamento da curva de vida dos insertos cerâmicos.



Fonte: O autor.

Analisando os gráficos da Figura 4.8 é possível concluir que o melhor resultado foi obtido pela condição (a), com inserto SNGN_SiAlON e aplicação de fluido lubrificador, o qual chegou ao fim de vida após 2,06 min de usinagem.

As demais condições testadas apresentaram taxas de desgaste tão elevadas que não foi possível sequer avaliar a progressão dos desgastes dentro dos intervalos de tempo estipulados entre cada ensaio.

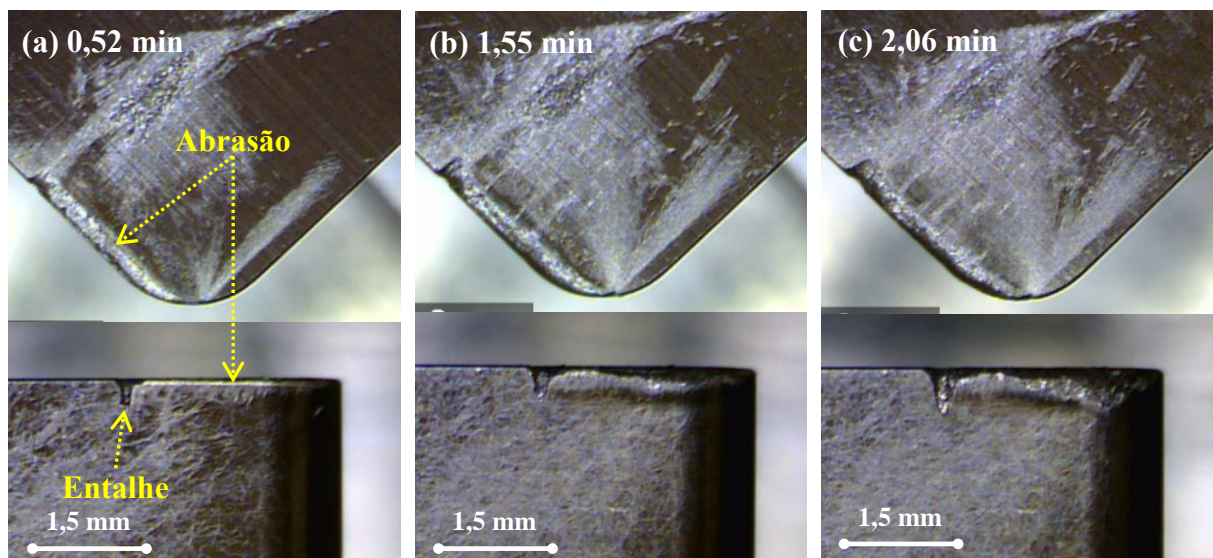
Tal resultado superior do inserto de SiAlON, utilizado com aplicação de fluido lubrificador está de acordo com diversos resultados obtidos por inúmeros pesquisadores no torneamento das superligas de níquel com elevados parâmetros de corte e, está associado a sua excelente tenacidade e resistência à abrasão, além de apresentar uma boa estabilidade química (CHOUDHURY e EL-BARADIE, 1998; SILVA, et al. 2004; THEREZANI, 2012).

4.2.1 Avaliação dos desgastes apresentados pelos insertos cerâmicos

A presente seção traz as imagens e discussões acerca dos desgastes observados na usinagem com insertos cerâmicos, com o intuito de melhor compreender os resultados obtidos por cada ferramenta e identificar os mecanismos de desgaste predominantes no torneamento do Inconel 718.

A Figura 4.9 mostra as imagens da face e flanco do inserto SNGN_SiAlON em três instantes diferentes na usinagem com aplicação de fluido lubrificador.

Figura 4.9 – Imagens dos desgastes do inserto SNGN_SiAlON no torneamento com aplicação de fluido lubrificador.



Fonte: O autor.

Os desgastes predominantes, como podem ser identificados analisando as imagens da Figura 4.9, foram o desgaste de entalhe, juntamente com o desgaste de flanco. Tais desgastes foram igualmente relatados por diversos pesquisadores que testaram insertos cerâmicos na usinagem das superligas de níquel (SILVA et al., 2004; SANTOS, 2009; ARUNA et al., 2010; THEREZANI, 2012).

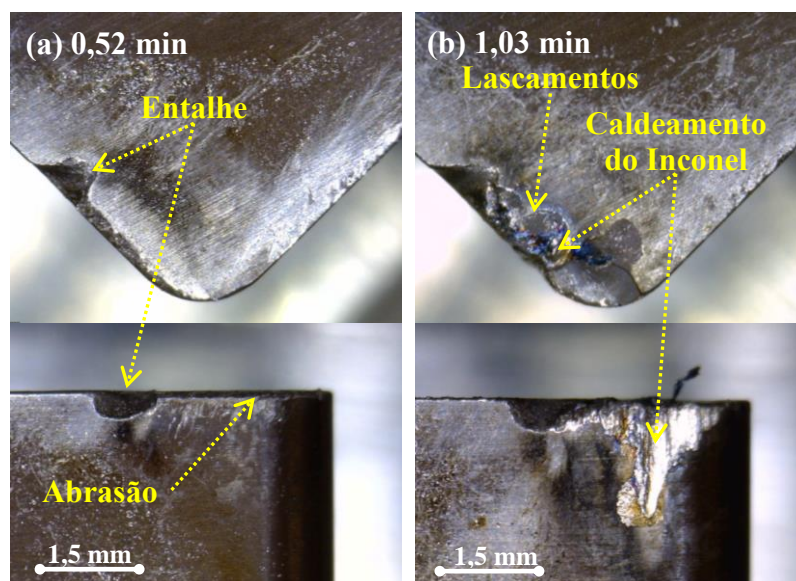
O desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte foi o principal tipo de desgaste observado para todas as condições testadas. Diversos são os agentes envolvidos no surgimento deste tipo de desgaste.

Segundo Klocke (2011), tal desgaste está associado à combinação de elevadas temperaturas, alta resistência do material usinado, deformação plástica seguida de endurecimento da camada superficial, elevadas tensões na interface cavaco-ferramenta, reação química do material da ferramenta de corte com os componentes do meio circundante e formação de cavacos abrasivos.

A usinagem realizada com inserto de SiAlON e fluido de corte apresentou a melhor resistência ao desgaste de entalhe entre os insertos e condições testadas. Este resultado se deve a excelente tenacidade aliada a uma boa estabilidade química e resistência ao desgaste apresentados por esse material.

Contudo, na usinagem a seco, onde o atrito e consequentemente o calor gerado são extremamente superiores, o inserto de SiAlON não apresentou o mesmo desempenho que durante a usinagem com aplicação de fluido, como pode ser visto na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Imagens dos desgastes do inserto SNGN_SiAlON no torneamento a seco.



Fonte: O autor.

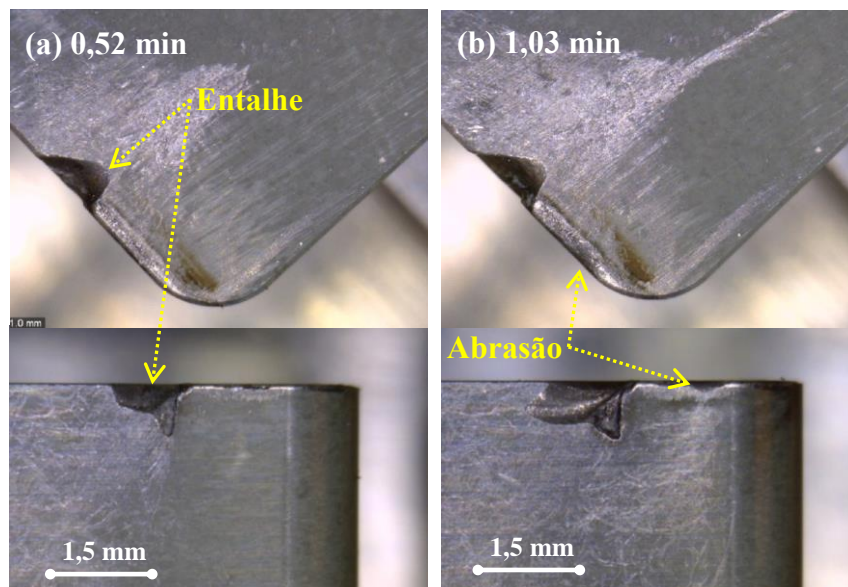
Durante o torneamento a seco os mecanismos de desgaste responsáveis pelas avarias nos inserts são ativados com uma maior intensidade, uma vez que, o Inconel 718 apresenta elevada resistência mecânica, mesmo em altas temperaturas e baixa condutividade térmica, o que dificulta o transporte do calor gerado durante o seu cisalhamento para o cavaco.

Para a usinagem a seco com os parâmetros de corte ensaiados, a severidade da usinagem foi tamanha que o gume da ferramenta apresentou inúmeros microlascamentos, os quais modificaram sua geometria inicial ao ponto do calor gerado ser suficiente para caldear o material usinado sobre o seu gume, como mostra a Figura 4.10 (b). Tais microlascamentos estão possivelmente associados às elevadas tensões térmicas e mecânicas as quais o gume do inserto fora exposto.

Os mesmos comportamentos de desgastes apresentados pelo inserto de SiAlON foram apresentados pelo inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$. Contudo, este cerâmico apresentou um melhor resultado durante a usinagem a seco, corroborando com as indicações do fornecedor e do referencial teórico apresentado no capítulo 3.

A Figura 4.11 mostra os desgastes apresentados pelo inserto $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ no torneamento com aplicação de fluido.

Figura 4.11 – Imagens dos desgastes do inserto SNGN_ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ no torneamento com aplicação de fluido lubrificante-refrigerante.



Fonte: O autor.

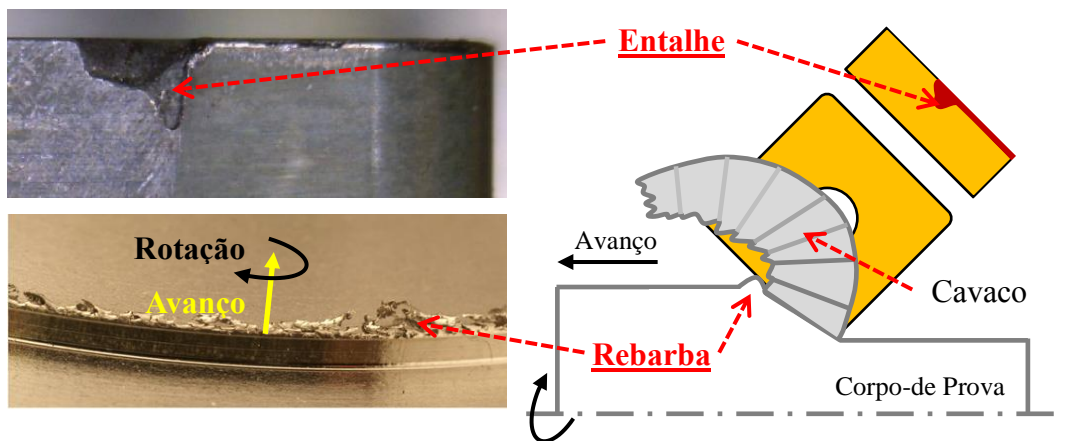
Como mostra a Figura 4.11, o desgaste de entalhe foi o principal fator limitante da vida do inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$, como já mencionado anteriormente. É importante ressaltar a

forma peculiar da geometria do desgaste observado, a qual está provavelmente associada à extrema condição de atrito gerado nesta região, decorrente da formação de rebarba.

Haja vista que todas as condições ensaiadas com utilização de insertos cerâmicos apresentaram a ocorrência de desgaste de entalhe, um estudo mais detalhado acerca dos seus principais mecanismos se faz necessário e é extremamente importante para compreender os fenômenos de maior impacto na vida das ferramentas cerâmicas.

Visando uma melhor compreensão da influência da formação de rebarba sobre o desgaste de entalhe, a Figura 4.12 ilustra de forma esquemática sua formação durante o torneamento do Inconel 718.

Figura 4.12 – Desenho esquemático da influência da formação de rebarba no desgaste de entalhe nos insertos cerâmicos.



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

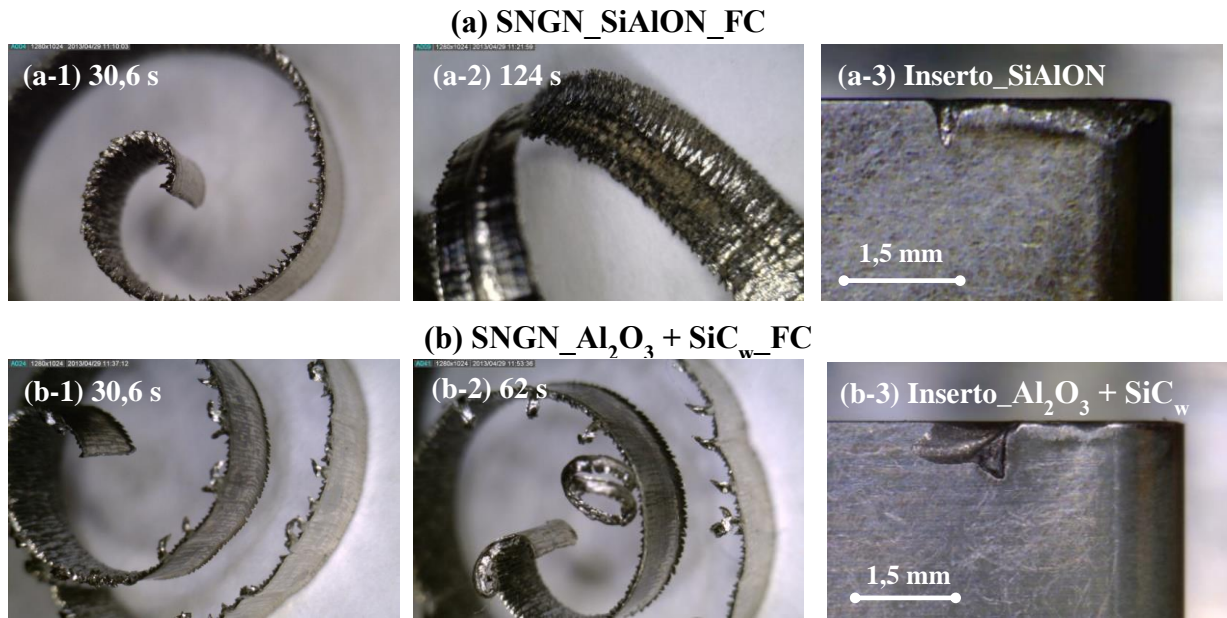
Observando a Figura 4.12 pode-se verificar que a formação de rebarba é irregular e gera uma condição de grande atrito entre a ferramenta e a peça na altura da profundidade de corte. Este atrito por sua vez, juntamente com a atuação dos mecanismos de difusão e oxidação, que tendem a reduzir a resistência à abrasão do inserto, gera uma condição extremamente propícia ao surgimento do desgaste de entalhe na ferramenta.

Uma evidência da formação de rebarba durante os ensaios experimentais executados pode ser observada na Figura 4.13, a qual mostra os cavacos removidos pelas duas ferramentas cerâmicas testadas no torneamento com aplicação de fluido lubrificante-refrigerante.

Nota-se a presença de uma rebarba nos cavacos, principalmente no cavaco gerado pelo inserto de $Al_2O_3 + SiC_w$, o qual apresentou uma maior taxa de desgaste de entalhe. Esse fato, somado ao alto encruamento do material reforça a tendência ao desgaste de entalhe, pois

forma-se uma camada de alta dureza e abrasividade na posição em que se situa a profundidade de corte no gume do inserto.

Figura 4.13 – Imagens dos cavacos gerados no torneamento com inserto cerâmico e aplicação de fluido lubrificador.



Fonte: O autor.

A formação desta rebarba pode estar relacionada a diversos fatores, dentre os quais, destacam-se a geometria da ferramenta, pelo fato de ser mais negativa em relação aos inserts de metal-duro e as propriedades do material usinado.

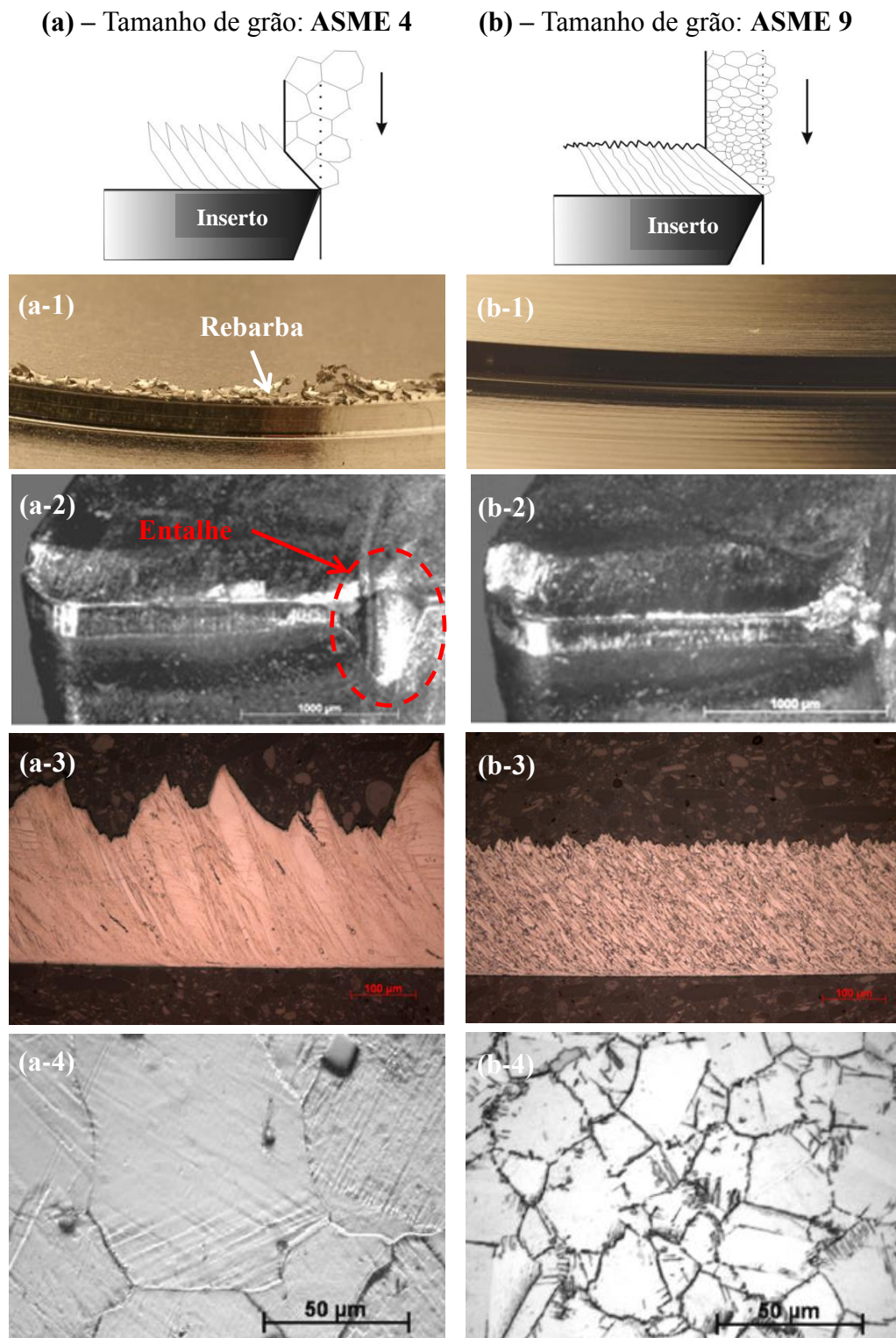
Olovsjö et al. (2010), realizaram um importante estudo sobre a influência do tamanho de grão e da dureza do material sobre os tipos e mecanismos de desgaste no torneamento da superliga Inconel 718.

Tais pesquisadores chegaram à conclusão de que o desgaste de flanco, como já era esperado, é fortemente correlacionado com a dureza do material. Já o tamanho de grão, apresentou um impacto significativo sobre a formação do cavaco, bem como na geração de rebarba e, conseqüentemente, no desgaste de entalhe como pode ser visto na Figura 4.14.

Para o material com um tamanho de grão grande (ASTM 4), a formação de rebarba foi relevante, já o material de grãos finos (ASTM 9) praticamente não apresentou rebarba.

Os pesquisadores observaram ainda que a diferença no tamanho de grão também se reflete na morfologia do cavaco, como apresentado pela Figura 4.14 (a/b-3).

Figura 4.14 – Influência do tamanho de grão sobre a formação de rebarba na usinagem da superliga de níquel Inconel 718.



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

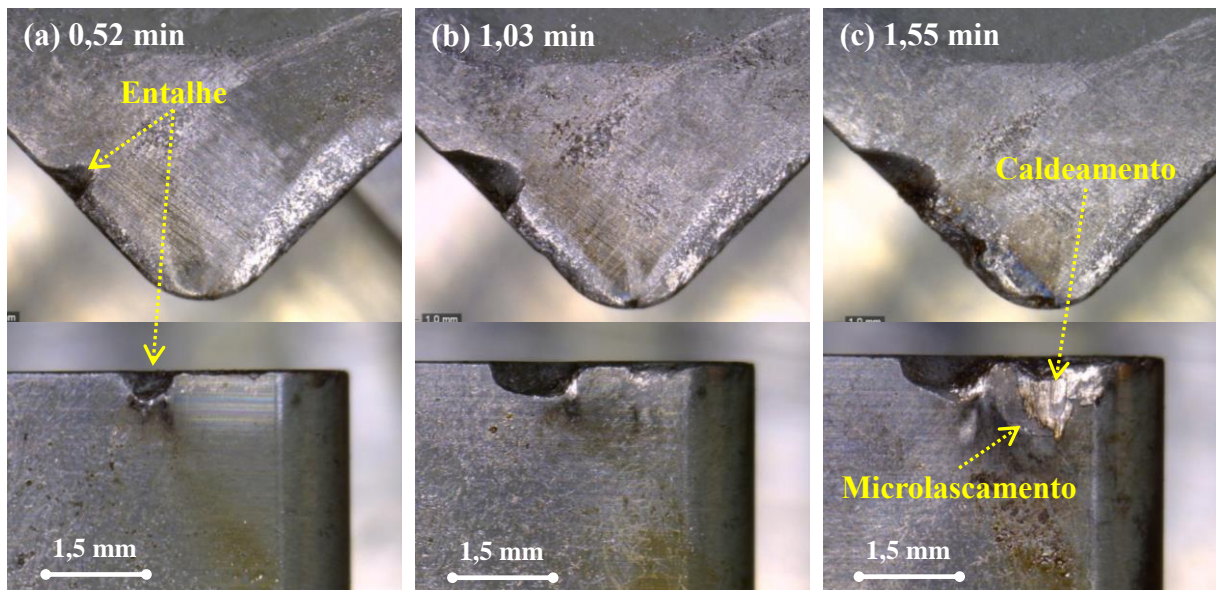
Analisando a Figura 4.14 (a/b-3), é facilmente observado que a estrutura de grãos refinados apresentou uma deformação homogênea, diferente da deformação apresentada pelo

material de grãos grandes, perceptível pelos seus cavacos serrilhados. Esta diferença de resposta, quanto à deformação pode ser entendida em termos da relação entre as proporções geométricas dos tamanhos de grão e o tamanho da zona de corte do inserto, tal como é ilustrado esquematicamente pelos esboços da Figura 4.14.

O tamanho de grão do material utilizado nos ensaios experimentais do presente trabalho é, segundo o certificado apresentado no Anexo 1, classificado em 3,5 conforme ASTM E112-10. O que por sua vez, pode ser considerado como um material de grãos grosseiros, fortalecendo assim a hipótese de que os desgastes de entalhe apresentados pelos insertos cerâmicos estão correlacionados com a formação de rebarba, a qual por sua vez se deve à condição do material usinado e à geometria nula dos insertos cerâmicos utilizados.

Da mesma forma como na usinagem com aplicação de fluido lubrificador, a usinagem a seco com o inserto de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ apresentou excessivo desgaste de entalhe, como mostra a Figura 4.15.

Figura 4.15 – Imagens dos desgastes do inserto $\text{SNGN_Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ no torneamento a seco.



Fonte: O autor.

Comparativamente, a usinagem a seco com inserto $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$ apresentou uma taxa de formação de entalhe menor que a observada durante a usinagem com aplicação de fluido. Isto possivelmente se deve ao elevado calor gerado zona de corte do material, o qual por sua vez, não permitiu que o mesmo aumentasse sua dureza por encruamento, reduzindo assim a ação abrasiva do cavaco gerado sobre o gume do inserto (SILVA, et al. 2004).

Contudo, ao passo que o calor gerado reduz a taxa de encruamento do material usinado e facilita seu cisalhamento, o mesmo confere uma condição de maior instabilidade química e ativa os mecanismos de difusão e oxidação.

Segundo Pashby e Khamsehzadeh (1990), a adição do SiC_w na matriz de Al_2O_3 aumenta a condutividade térmica e a dureza além de conferir uma excelente tenacidade ao inserto, mas a estabilidade química do mesmo é reduzida e há evidência de que isto influencia a taxa de desgaste.

De acordo com Narutaki et al. (1993), Elbestawi et al. (1993) e Jun et al. (1997), o desgaste por difusão pode acontecer na usinagem em elevada velocidade utilizando ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$, no qual o níquel e o ferro difundem para dentro do material da ferramenta, reagindo quimicamente com SiC_w , produzindo FeSi e NiSi . Desta forma, as fibras de SiC_w desaparecem da superfície da ferramenta, diminuindo a resistência e a dureza da ferramenta e aumentando a taxa de desgaste.

CONCLUSÃO

O presente trabalho proporcionou a compreensão de muitos conceitos acerca do comportamento dos desgastes apresentados no torneamento longitudinal externo em desbaste do Inconel 718 com insertos de metal-duro revestidos e insertos cerâmicos.

Através da realização de inúmeros ensaios experimentais e de uma avaliação sistemática apurada dos insertos utilizados, chegou-se às seguintes considerações:

a) Para os insertos de metal-duro:

- Para as ferramentas de metal-duro testadas, o melhor resultado de vida foi obtido pelo inserto com geometria SNMG_QM e revestimento CVD-TiN+Al₂O₃+TiCN, corroborando com inúmeros pesquisadores que obtiveram resultados similares no torneamento em desbaste do Inconel 718. Tal resultado superior está possivelmente associado às excelentes propriedades combinadas do revestimento CVD multicamada o qual conferiu uma resistência maior ao gume do inserto.

- De maneira geral, todos os insertos de metal-duro ensaiados exibiram os mesmos mecanismos e tipos de desgastes, sendo que a craterização foi o tipo de desgaste dominante, ocasionando a deterioração e falha final das ferramentas. As diferentes geometrias e revestimentos somente modificaram a intensidade na qual as taxas de desgaste ocorreram.

- Identificou-se também grande quantidade de material aderido ao gume e face das ferramentas. Vale ressaltar também, que o principal modo de falha apresentada foi o lascamento prematuro dos gumes, o qual está associado à craterização da face e às propriedades do material usinado.

b) Para os insertos cerâmicos:

- O melhor resultado de vida obtido pelos insertos cerâmicos foi apresentado pela ferramenta SNGN_SiAlON utilizada com aplicação de fluido lubrificante-refrigerante. Tal resultado superior está de acordo com diversos resultados obtidos por inúmeros pesquisadores no torneamento das superligas de níquel com elevados parâmetros de corte e está associado a sua excelente tenacidade, resistência à abrasão e boa estabilidade química.

- Os desgastes predominantes foram o de entalhe, juntamente com o de flanco, sendo o desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte, o principal tipo observado para todas as condições testadas.

- Conforme apresentado no referencial teórico, o desgaste de entalhe está associado à combinação de elevadas temperaturas, alta resistência do material usinado, deformação plástica seguida de endurecimento da camada superficial, elevadas tensões na interface cavaco-ferramenta, reação química do material da ferramenta de corte com os componentes do meio circundante e formação de cavacos abrasivos.

Alguns estudos recentes mostram que a formação de rebarba na altura da profundidade de corte, bem como o surgimento do desgaste de entalhe na usinagem do Inconel 718, estão correlacionados ao tamanho de grão do material usinado, sendo os materiais de grãos relativamente grandes mais propícios à formação de rebarbas e, conseqüentemente, ao desgaste de entalhe.

- Comparativamente, a usinagem a seco com inserto $Al_2O_3 + SiC_W$ apresentou uma taxa de formação de entalhe menor que a observada durante a usinagem com aplicação de fluido. Isto possivelmente se deve ao elevado calor gerado zona de corte do material, o qual por sua vez, não permitiu que o mesmo aumentasse sua dureza por encruamento, reduzindo assim, a ação abrasiva do cavaco gerado sobre o gume do inserto.

Com base nos resultados obtidos, podem ser abordados os seguintes trabalhos futuros:

- a) analisar a influência da micro-geometria do gume das ferramentas no torneamento em desbaste do Inconel 718;
- b) avaliar o desempenho dos insertos de metal-duro no torneamento das superligas de níquel com MQL (mínimas quantidades de fluido lubrificante) e a seco;
- c) investigar especificamente a ação dos revestimentos nos insertos de metal-duro para usinagem das superligas de níquel; e
- d) testar os insertos cerâmicos com diferentes estratégias de usinagem, como por exemplo, utilizando profundidade de corte variável.

REFERÊNCIAS

- ARUNA, M.; DHANALAKSHMI, V.; MOHAN, S.; Wear analysis of ceramic cutting tools in finishing turning of Inconel 718. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v.2, pp. 4253-4262, 2010.
- ASM Specialty Handbook, **Nickel, Cobalt, and Their Alloys**, First Edition, ASM International, New York, USA, 2000.
- BHATT, A.; ATTIA, H.; VARGAS, R.; THOMSON, V.; Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. **Tribology International**, v.43, pp. 1113-1121, 2010.
- BYUN, T.S.; FARRELL, K., Tensile properties of Inconel 718 after low temperature neutron irradiation. **Journal of Nuclear Materials**, v. 318, pp.292-299, 2003.
- CALLISTER, William. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 232 p.
- CHOUDHURY, I. A., EL-BARADIE, M. A., Machinability of nickel-base super alloys: a general review. **Journal of Materials Processing Technology**, v.77, pp.278-287, 1998.
- DINIZ, A. E., COPPINI, N. L. E MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6ª edição Editora M.M, São Paulo, 262f, 2008.
- DECKER,R.F., The Evolution of Wrought Age-Hardenable Superalloys - Nickel: a century of Innovation: Overview. **JOM**, pp.32-36, 2006.
- DUCROS, C.; BENEVENT, V.; SANCHETTE, F., Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 163-164, pp. 681-688, 2003.
- DUDZINSKI,D., DEVILLEZ,A., MOUFKIA., LARROUQUE`RE,D., ZERROUKI,V., VIGNEAU,J., A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, pp.439–456, 2004.
- ELBESTAWI, M. A., ELWARDANY, I., TAN, M. Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy, **Annals of the CIRP**, v.42, n.1, pp.99-102, 1993.
- 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**, v.153-154, pp.1045-1050, 2004.
- EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aero-engine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v.134, pp. 233-253, 2003.

EZUGWU, E. O., BONNEY, J., SILVA, R. B., MACHADO, A. R. Evaluation of the performance of different nano-ceramic tool grades when machining nickel-base, Inconel 718, alloy. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v.26 n.1, 2004.

EZUGWU, E.O., TANG,S.H., Surface Abuse When Machining Cast Iron (G-17) and Nickel-Base Superalloy (Inconel 718) With Ceramic Tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v.55, pp. 63–69, 1995.

EZUGWU, E. O., WANG, Z. M., MACHADO, A. R. The Machinability of Nickel-Based Alloys: A Review. **Journal of Materials Processing Technology**, v.86, pp.1-16, 1999.

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

IBRAHIM, G.A.; HARON, C.H.C; GHANI, J.A.; SAID, Y.M.; YAZID, Z.A.; Performance of PVD-Coated Carbide Tools When Turning Inconel 718 in Dry Machining. **Advances in Mechanical Engineering**, v.2011, pp. 1-7, 2011. apud KÖNIG, W.; **Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures**, in Proceedings of the 47th Meeting of AGARD Structural and Materials Panel, Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD), CP256, London, Florence, Ala, USA, 1979.

GAO,D., ZHAOPENG,H., RONGDI,H., YANLI,C., MUGUTHU,J.N., Study of cutting deformation in machining nickel-based alloy Inconel718. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.51, pp.520–527, 2011.

GATTO, A., IULIANO, L., Chip formation analysis in high speed machining of a nickel base superalloy with silicon carbide whisker-reinforced alumina. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v.34, n.8, pp.1147-1161, 1994.

JAWAID, A.; KOKSAL, S.; SHARIF, S.; Wear behavior of PVD and CVD coated carbide tools when face milling Inconel 718. **Tribology Transactions**, v.43, pp. 325-331, 2000.

JINDAL, P. C., et. al., Performance of PVD TiN, TiCN and TiAlN coated cemented carbide tools in turning. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v.17, pp.1-3, 1999.

JUN, Z., et. al., Failure mechanisms of a whisker-reinforced ceramic tool when machining nickel based alloys. **Wear**, v.208, n.1-2, pp.220-225, 1997.

KAMATA, Y.; OBIKAWA, T.; High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools, **Journal of Materials Processing Technology**, n. 192-193, pp.281-286, 2007.

KLOCKE, F., **Manufacturing Process 1: Cutting**. Berlin, Springer-Verlag, 2011.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F., **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren**. 8^a Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 2008.

KOVACEVIC, R.; CHERUKUTHOTA, C.; MAZURKIEWICZ, M. High pressure waterjet cooling lubrication to improve machining efficiency in milling. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v.35, n.10, pp. 1459-1473, 1995.

KUO.C.M., YANG, Y.T., BOR, H.Y., WEI, C.N., TAI, C.C., Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy. **Materials Science and Engineering**, v.510-511, pp.289-294, 2009.

LIAO, Y.S., SHIUE, R.H., Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy. **Wear**, v 193, n.1, pp. 16-24, 1996.

LORIA, E.A., **Superalloy 718 - Metallurgy and Applications**. Edited by The Minerals, Metals & Materials Society, pp.673-683, 1989.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 1 ed. São Paulo Editora Blucher, 2009, 384p.

M'SAOUBI, R., LARSSON, T., OUTEIRO, J., GUO, Y., SUSLOV, S., SALDANA, C., CHANDRASEKAR, S., Surface integrity analysis of machined Inconel 718 over multiple length scales. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.61, pp.99-102, 2012.

NARUTAKI, N., YAMANE, Y., KAYASHI, K. High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools. **Annals of the CIRP**, v.42, n.1, p.103-106, 1993.

OLOCSJÖA, S.; WRETLAND, A.; SJÖBERG, G.; The effect of grain size and hardness of wrought Alloy 718 on the wear of cemented carbide tools. **Wear**, v.268, pp. 1045-1052, 2010.

PASHBY, I. R.; KHAMSEHZADEH, H. A usinagem de waspaloy com diferentes pastilhas cerâmicas. **Máquinas e Metais**, n.296, pp.30-39, set. de 1990.

PATEL, S. J., A Century of Discoveries, Inventors, and New Nickel Alloys. **JOM**, v.58, pp. 18-20, 2006.

PERROTA, J.A., **Curso de Introdução à Engenharia de Reatores Nucleares**, julho de 1999. Disponível em:
<<http://www.ipen.br/conteudo/upload/200906040956360.apperrota.pdf>>. Acessado em 15 set. 2012.

PFINGSTAG, M.; MULLER, I., L.; SCHAEFFER, L. Avaliação em relação à corrosão-fadiga de juntas soldadas da liga Inconel 625. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v.21, n.º 3/4, 2009.

PRENGEL, H. G.; et. al., A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v.139, n.1, pp. 25-34, 2001.

RAHMAN, M.; SEAH, W. K. H.; TEO, T. T., The machinability of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, v.63, n.1-3, pp. 199-204, 1997.

REED, R.C., **The Superalloys: fundamentals and applications**, Cambridge, Cambridge University Press, 2006.

SANDVIK COROMANT, **Aerospace Engine - Component Solutions**. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/industrialsolutions/aerospace/engine/pages/default.aspx>>. Acessado em 10 de set. 2012.

SANTOS, T.S.R. **Estudo dos efeitos do hidrogênio nas propriedades mecânicas da liga 718 em diferentes condições de envelhecimento**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. New York: Oxford University Press, 594p., 1994.

SILVA, L.R.; COELHO; R.T; CATAI, R.E.; Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga “waspaloy”. **Metalurgia & Materiais**, v. 57, pp. 109-114, 2004.

SPECIAL METALS (CATALOGO), 2007. Disponível em: <<http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>>. Acesso em: 10 de set. 2012.

THAKUR, D.G; RAMAMOORTHY, B; VIJAYARAGHAVAN, L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. **Materials and Design**, v.30, pp.1718-1725, 2009.

THANGARAJ, A. R., WEINMANN, K. J., On the wear mechanisms and cutting performance of silicon carbide whisker-reinforced alumina. **Journal of Engineering for Industry**, v.114, pp.301- 308, 1992.

THEREZANI, Douglas Fellipe. **Avaliação de diferentes ferramentas no torneamento da liga Inconel 713C**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, 2012.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K., **Metal Cutting**. 4.ed. Butterworth Heinemann, 446p, 2000.

WAYNE, S. F., BULJAN, S. T., Wear of ceramic cutting tools in Ni-based superalloy machining. **Tribology Transactions**, v.33, n.4, pp.618-626, 1990.

WEATHERFORD, Safety Valves (Catalogo). Disponível em: <<http://www.weatherford.com/ECMWEB/groups/web/documents/weatherfordcorp/WFT003619.pdf>>. Acessado em 20 de set. 2012.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; BARBA JUNIOR, D. J.; KISH, M. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. **Máquinas e Metais**, p.82-89, 1994.

WILLIAMS, J., Babcock & Wilcox - Introduction to m-Power. **IRUG Conference Salt Lake City**, Utah July 27, 2011.

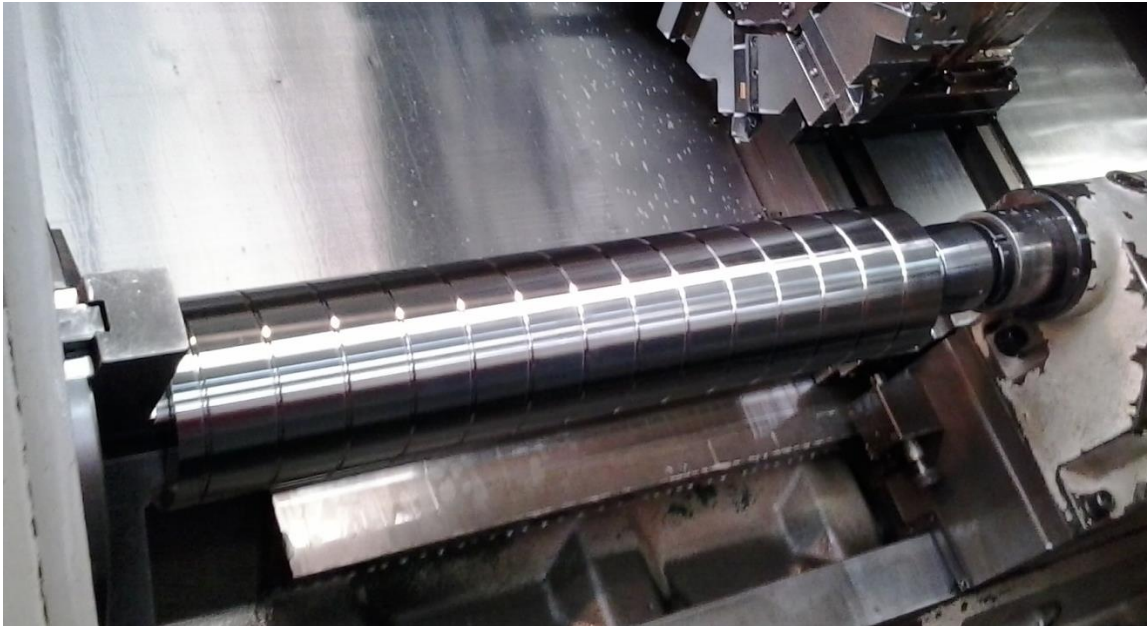
WITTING, H. Torneamento de superligas. **Máquinas e metais**, v. 38 (440), pp.156-165, 2002.

ZEILMANN, R.P; **Furação da Liga de Titânio Ti6Al4V com Mínima Quantidade de Fluido de Corte**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. apud

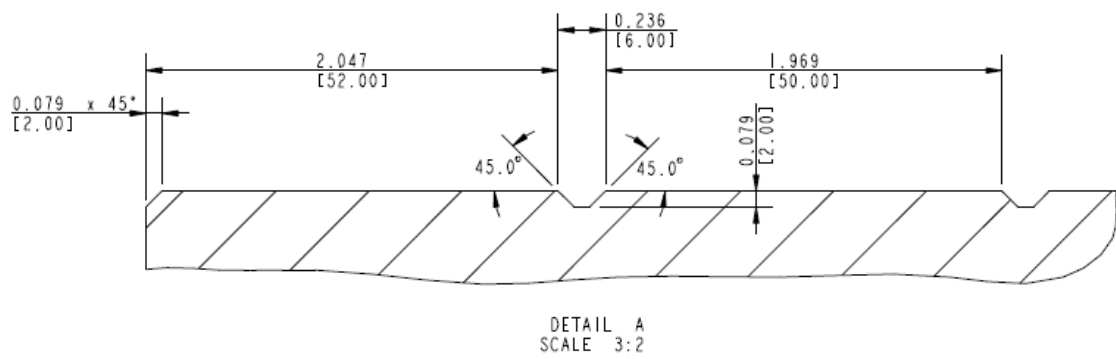
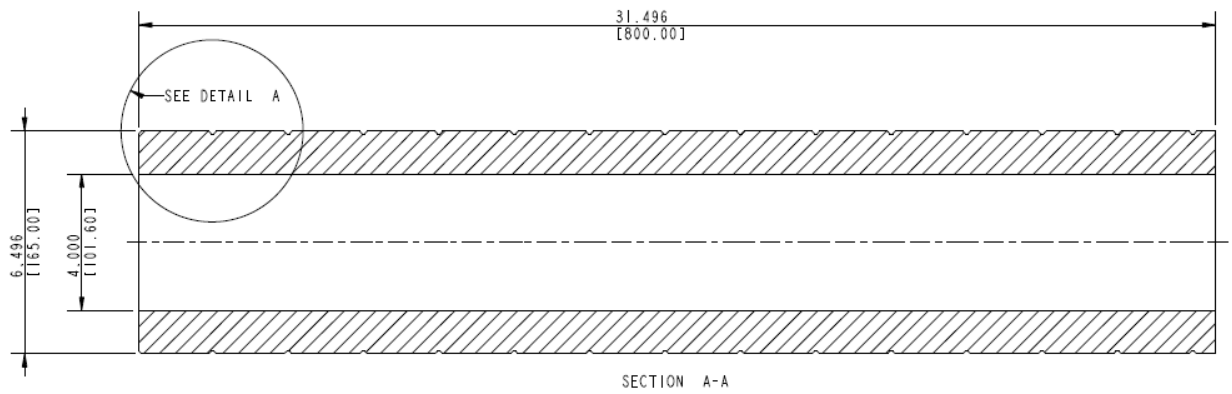
RWTH; NN. **Der Werkstoff Titan**. Material apresentado em palestra no WZL der RWTH Aachen, 2003.

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

APÊNDICE A – DESENHO DETALHADO DO CORPO DE PROVA



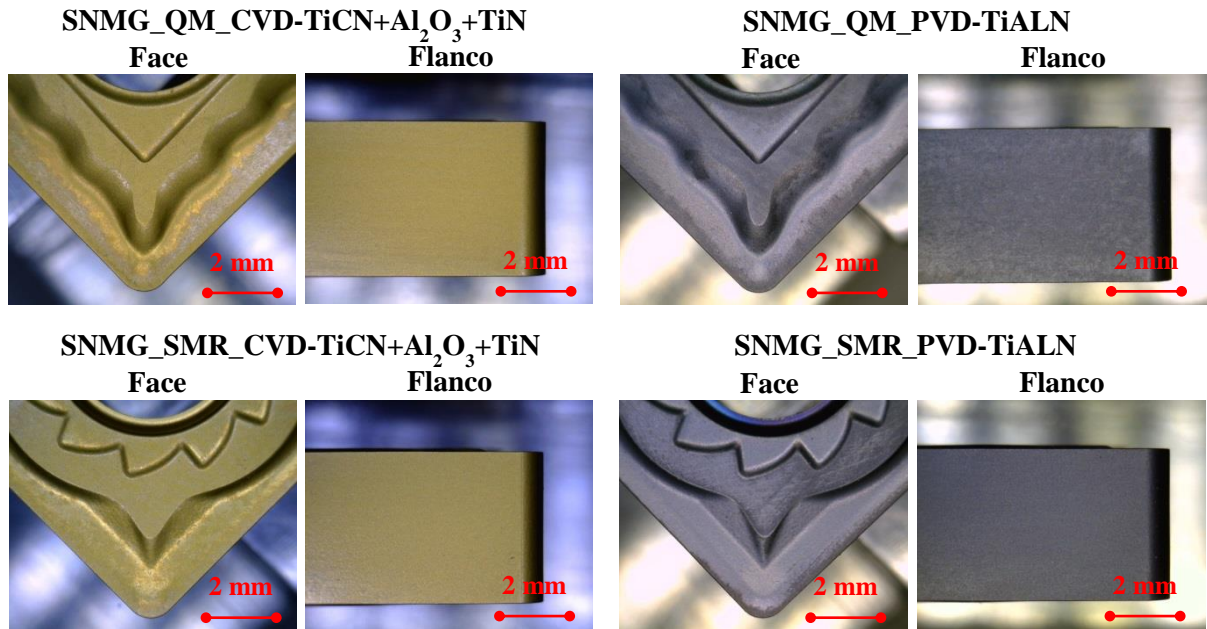
Fonte: O autor.



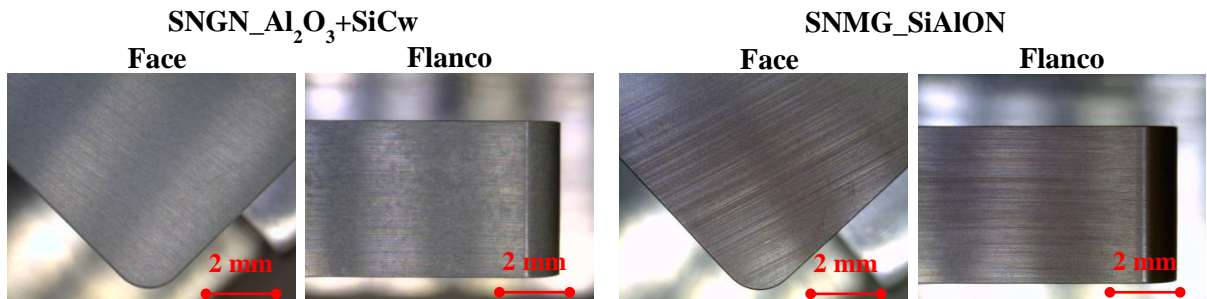
Fonte: O autor.

APÊNDICE B – IMAGENS DOS INSERTOS NOVOS

INSERTOS DE METAL-DURO



INSERTOS DE CERÂMICA



Fonte: O autor.

ANEXO A – CERTIFICADO DO MATERIAL

Chemical Composition (%)

Chemical Composition Steelmaking Process: VIM+VAR										Heat No.
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Co	U80076
0,011	0,08	0,08	0,006	0,0006	17,73	3,03	53,3	0,04	0,19	
Ti	Al	Nb	B	Fe	N	Pb	Ta	O	Bi	U80076
1,05	0,52	4,99	0,0029	18,90	0,005	<0,0003	<0,020	<0,0003	<0,00003	
Ca	Mg	Sn	Se							U80076
<0,0003	0,0015	<0,0010	<0,0003							

Country of origin and melt: AUSTRIA

Name of melt source: Bohler Edelstahl GmbH & Co KG

Macroetch Examination:

The macroetch examination is performed on full transverse cross-section slices representative of the top and bottom section of the remelted ingot.

Etchant used: Hydrochloric-Peroxide

Macrostructure acc. to ASTM A604 :

Class	Severity
1	A
2	A
3	A
4	A

The material complies with the requirements of the macroetch examination acc. to API 6A 718 - Para.4.2.1

Microstructural Analysis:

The center, 1/2 radius and surface locations are evaluated.

Etchant used: H₂O 100ml, HCL 300ml, H₂O₂ 15ml

Grain Size Evaluation:

The grain size is determined in accordance with ASTM E 112-10.

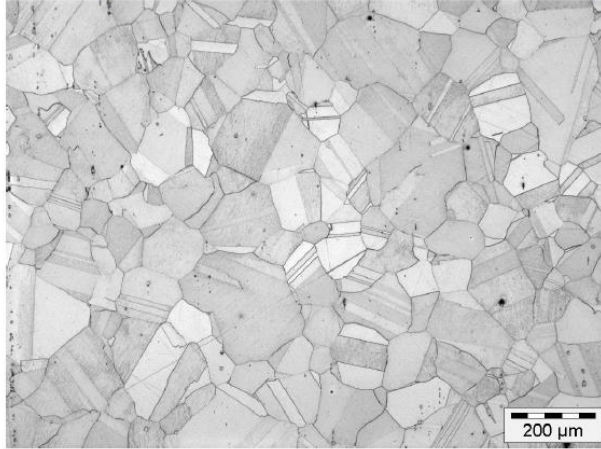
Pos.:	Rim	Midradius	Center
Average	Long.	ASTM No.: 3,5	ASTM No.: 3,5
		ASTM No.: 3,5	ASTM No.: 3,5

The material complies with the topological duplex grain size requirements according to API 6A 718 - Para. 4.2.2.2.2

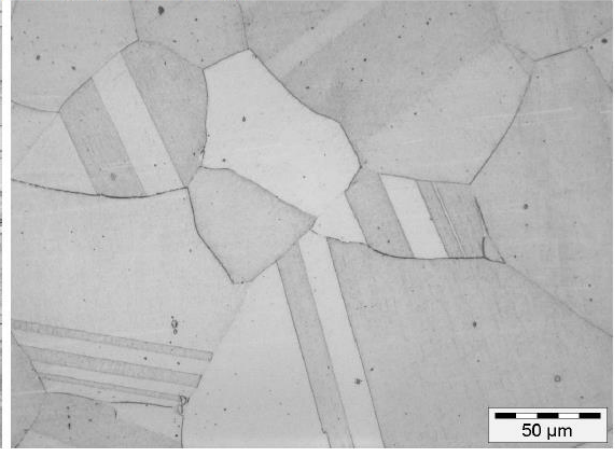
Fonte: Böhler Edeltahl

Photomicrographs:

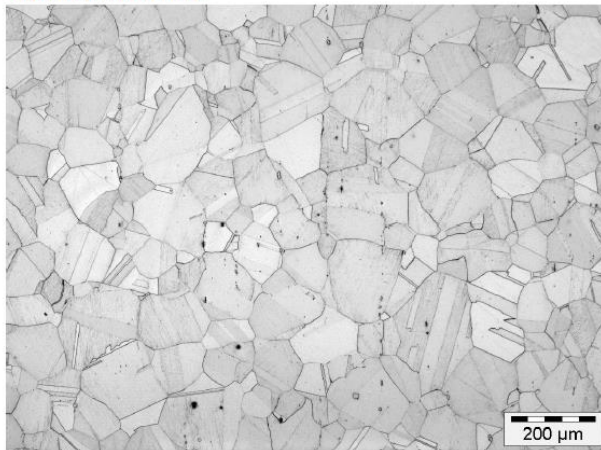
The microstructural samples are examined at 100x and 500x using light microscopy.



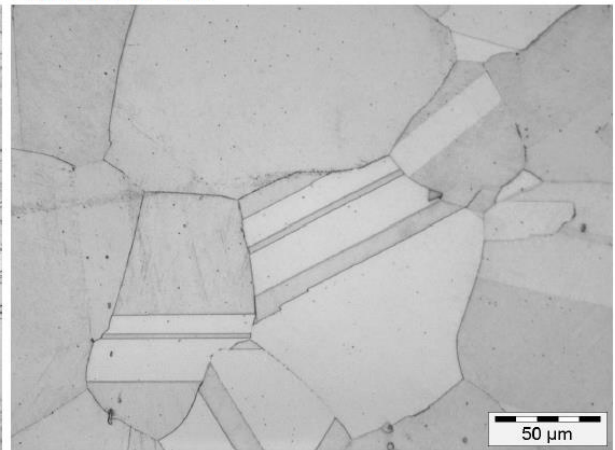
Location: Surface
original photo: 100x



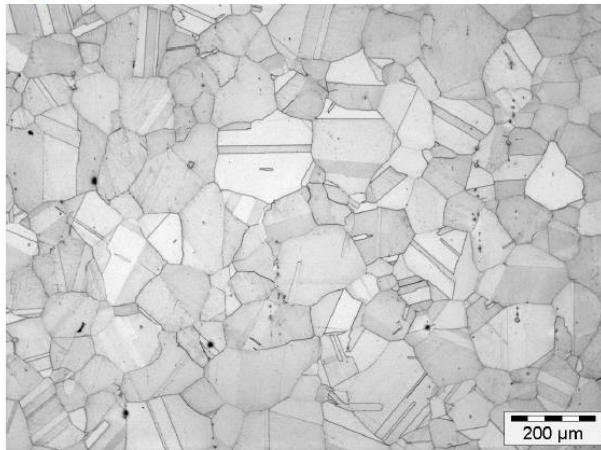
Location: Surface
original photo: 500x



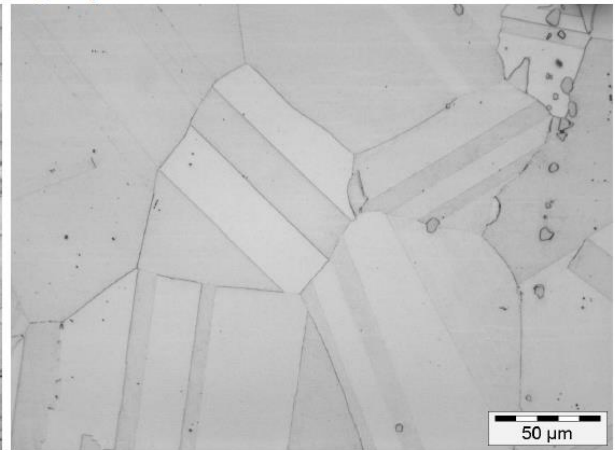
Location: 1/2 radius
original photo: 100x



Location: 1/2 radius
original photo: 500x



Location: center
original photo: 100x



Location: center
original photo: 500x

Fonte: Böhler Edeltahl

The test frequency is one test per remelted ingot, per heat treat lot and for material of the same size.
 The QTC is a prolongation of the final heat treated bar.
 The test specimen and the test method is in accordance with ASTM A 370 - 11

Tensile Properties:

The orientation of the tensile test specimen is longitudinal. The location is in the 1/4 thickness.

Tensile test in delivery condition

Test no.	*Piece no.	Testing standard	Location	Temp. °F	Yield Strength	Ultimate Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area
					YS0.2 KSI	UTS KSI	A4 %	RoA %
					120 - 145	>=150	>=20	>=35
1225877-1	20S	ASTM E8/E8M-09	L2	73	138.177	182.748	37	47
1225877-1	21B	ASTM E8/E8M-09	L2	73	139.932	183.763	33	44

Impact Toughness:

The orientation of the impact toughness specimen is transverse.

Impact test in delivery condition

Test no.	*Piece no.	Testing standard	Location	Temp. °F	Impact energy	Lateral expansion	Shear area
					Charpy-V ft-lbf	mils	%
					>=35	>=15	info.
1225877-1	20S	ASTM E23-07A E1	Q	-76	53 49 50	32 28 31	20 20 20
1225877-1	21B	ASTM E23-07A E1	Q	-76	52 50 52	31 26 29	20 20 20

Hardness test in delivery condition

Test no.	Piece no.	Testing standard	Location	HBW10/3000	HRC
				313 - 354	34 - 39
1225877-1	20S	-		352-352	
1225877-1	21B	-		352-352	
1225877-1	22S3	-		352-352	
1225877-1	20S	ASTM E18-08b	Surface		38.0
1225877-1	20S	ASTM E18-08b	Surface		36.7
1225877-1	20S	ASTM E18-08b	Surface		36.9
1225877-1	20S	ASTM E18-08b	1/2 Radius		37.4
1225877-1	20S	ASTM E18-08b	1/2 Radius		36.9
1225877-1	20S	ASTM E18-08b	1/2 Radius		37.6

Fonte: Böhler Edeltahl