

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR DOUGLAS FELLIPE.....
THEREZANI..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 27/02/2012


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Douglas Fellipe Therezani

**Avaliação de diferentes ferramentas no
torneamento da liga Inconel 713C**

Campinas, 2012.

21/2012

Douglas Fellipe Therezani

Avaliação de diferentes ferramentas no torneamento da liga Inconel 713C

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Amauri Hassui

Campinas
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

T343a Therezani, Douglas Fellipe
Avaliação de diferentes ferramentas no torneamento da liga Inconel 713C / Douglas Fellipe Therezani. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Amauri Hassui.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Usinagem. 2. Torneamento. 3. Desgaste físico. 4. Desgaste mecânico. 5. Ligas de níquel. I. Hassui, Amauri. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Evaluation of different tools in turning of Inconel 713C
Palavras-chave em Inglês: Machinability, Turning, Physical wear, Mechanical wear, Nickel alloys

Área de concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, Joel Martins Crichigno Filho

Data da defesa: 27-02-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

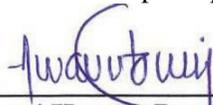
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Avaliação de diferentes ferramentas no
torneamento da liga Inconel 713C**

Autor: Douglas Fellipe Therezani

Orientador: Amauri Hassui

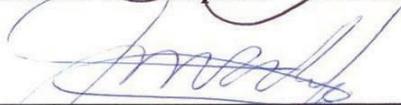
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação



Prof. Dr. Amauri Hassui, Presidente
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



Prof. Dr. Joel Martins Crichigno Filho
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Campinas, 27 de fevereiro de 2012.

Dedico este trabalho à minha família.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao professor Amauri Hassui pela amizade, oportunidade, orientação nos momentos difíceis, paciência e acreditar que o trabalho poderia ser realizado;

À minha família que sempre me apoiou mesmo nos momentos mais difíceis, principalmente minha mãe que sempre me proporcionou acesso aos estudos;

À minha namorada Isabel que me apoiou e abriu mão do tempo juntos para dedicação a este trabalho;

Aos técnicos Aristides Magri, Carmo Pelliciari, Claudenete Vieira Leal, Eduardo Bernardes e Sérgio Gomes Cruz Neto pela ajuda nos ensaios e na utilização dos equipamentos.

Aos amigos da Unicamp Armando, Bruno, Carlos, Daniel, Davi, Henrique, José Manoel, Luciano, Marcos, Mario, Renato, Silvia e Vanderlei que ajudaram e tornaram mais agradável o período de trabalho;

Aos amigos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo pelo apoio e incentivo em diversos momentos;

Aos amigos e colegas da Continental do Brasil Indústria Automotiva pelo apoio e incentivo;

Às empresas Açotecnica, Guhring, Iscar e Sandivk pelos insumos que tornaram possível a realização deste projeto.

*“O que vale na vida não é o ponto de partida, e sim a caminhada.
Caminhando e semeando, no fim terás o que colher.”*
Cora Coralina

Resumo

A super liga Inconel 713C é uma liga cujo principal elemento de sua composição é o Níquel. A combinação do alto teor deste elemento mais a estrutura desse material faz com que ele seja muito difícil de ser usinado. Devido a esta dificuldade e carência de informações a respeito da usinagem desse material, o objetivo deste trabalho foi buscar uma combinação de ferramenta e parâmetros de corte que apresentassem uma vida da ferramenta em torno de 15 minutos, valor considerado viável economicamente pela prática industrial. Para isso foram testadas ferramentas de metal duro com duas geometrias diferentes, quatro tipos de revestimentos (TiAlN, TiAlN-TiN, TiCN-Al₂O₃-TiN e Al₂O₃) além da ferramenta de metal duro sem revestimento. Foram testadas também ferramentas cerâmicas (Al₂O₃ (pura), Si₃N₄ (sialon), Al₂O₃+SiC_w (whiskers)) e de CBN. Dentre os ensaios realizados, a ferramenta de metal duro com a geometria CNMX e revestimento TiAlN apresentou uma taxa de desgaste menor que as demais testadas com uma vida de aproximadamente 17 minutos de corte.

Palavras chave: Usinagem; Inconel 713C; Torneamento; Desgaste de Ferramenta.

Abstract

The super alloy Inconel 713C is an alloy whose main element of its composition is nickel. The combination of high levels of this element and the structure of this material makes it very difficult to be transformed by the machining process. Because of this difficulty and lack of information about the machining of this material, the purpose of this study was to find a combination of tool and cutting parameters to present a tool life of around 15 minutes, which is considered economically viable for industrial practice. To achieve this purpose it was tested cemented carbide tools with two different geometries, four types of coatings (TiAlN, TiN, TiAlN, TiCN-Al₂O₃-TiN and Al₂O₃) in addition to the carbide tool without coating were tested. Tools were also tested ceramics (Al₂O₃ (pure), Si₃N₄ (sialon) + Al₂O₃ SiCw (whiskers)) and CBN. Among the tests, the carbide tool geometry CNMX and coating TiAlN presented a lower wear rate than the others tested with a life of approximately 17 minutes of cutting.

Key Words: Machinability, Inconel 713C, Machining, Tool Wear

Lista de Figuras

Figura 2.1- Microestrutura superliga a base de níquel (Inconel 713C - Ni-Fe-Cr) (adaptado de RODRIGUES 2009)	7
Figura 2.2 - Detalhe do carboneto presente no contorno de grão de uma microestrutura de uma superliga a base de níquel (Ni-Cr). Percebe-se a forma irregular do carboneto e a distância entre estes. (adaptado de RODRIGUES, 2009)	9
Figura 2.2.1: Crescimento da utilização das ligas a base de níquel em turbinas aerogás (adaptado de EZUGWU et al, 2003)	10
Figura 2.2.2: Componentes em Inconel, [A] válvulas de admissão e exaustão, [B] sistema de exaustão/escapamento utilizado no Porsche 911. (www.adlerflow.com – 07/2011)	11
Figura 2.2.3: Exemplo de aplicação do Inconel 713C em turbos automotivos, detalhe da aplicação do rotor dentro do turbo compressor. (www.biagioturbo.com)	11
Figura 2.2.4: [A] Corte de uma turbina modelo Trent 500 da Rolls-Royce utilizado nas aeronaves da família Air bus A340, [B] Áreas de compressão, combustão e exaustão. (www.rolls-royce.com)	12
Figura 2.3.1: Comparação entre formação de cavaco (a) torneamento de aço, (b) torneamento de materiais resistentes a altas temperaturas (adaptado de Witting, 2002)	16
Figura 2.3.2 – Fontes de geração de calor na formação do cavaco, (adaptado de FERRARESI 1995).	28
Figura 3.1 - Torno CNC utilizado nos ensaios	31
Figura 3.1.2 - Sistema de captura de imagens e medição dos desgastes	32
Figura 3.1.3 – Microscópio Eletrônico de Varredura	33
Figura 3.1.4 – Medição da rugosidade do corpo de prova	33
Figura 3.2.1.1 – Corpo de prova utilizado nos ensaios	35
Figura 3.2.1.2 – Fixação placa – contra ponto	36
Figura 3.2.2 – Suportes de ferramentas utilizado nos ensaios	38
Figura 3.4.1 - Ferramenta CNGN 12 04 12E 6065 - fim de vida	41

Figura 4.1.1: Vida das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes	43
Figura 4.1.2: a) Ferramenta CNMX 12 04 A2 – SM 1105 e b) Ferramenta CNMG 12 04 12 – QM 1105	44
Figura 4.1.3: Microdureza dos cavacos e da superfície usinada com as ferramentas CNMX 12 04 A2 – SM 1105 e CNMG 12 04 12 – QM 1105	45
Figura 4.1.4: Desenho do contato teórico entre as ferramentas com geometria CNMX e CNMG com a peça	46
Figura 4.1.5: Evolução do desgaste das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes	48
Figura 4.1.6: Evolução do sinal de potência de corte das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes	49
Figura 4.1.7: Evolução do sinal de potência de corte das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes	50
Figura 4.2.1: (a) Imagem da ferramenta – CNMX 12 04 A2 – SM 1105, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.	51
Figura 4.2.2: (a) Imagem da ferramenta – CNMG 12 04 12 - QM 1105, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.	52
Figura 4.2.3: (a) Imagem da ferramenta – CNMX 12 04 A2 - SM S05F, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.	54
Figura 4.2.4: Ferramenta CNMX 12 04 A2 – SM 1105 v_c: 40m/min, f:0,10mm/volta, a_p:0,5mm	55
Figura 4.3.1: Vida das ferramentas cerâmicas e de CBN	55
Figura 4.3.2: Ferramenta SNGN 12 04 16E IS9	56
Figura 4.3.3: Microdureza dos cavacos e da superfície usinada com as ferramentas IN 11 e IS 9	57
Figura 4.3.4: Evolução do desgaste das ferramentas cerâmicas e de CBN	58
Figura 4.3.5: Rugosidade média (Ra) x Tempo – ferramentas cerâmicas e de CBN	58
Figura 4.3.6: Potência x Tempo – ferramentas cerâmicas	59

- Figura 4.4.1:** (a) Imagem da ferramenta – SNGN 12 04 16E IS9 ($a_p = 0,5\text{mm}$
 $f = 0,15\text{mm/volta}$), (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de
folga, (d) detalhes da superfície de saída 60
- Figura 4.4.2:** (a) Imagem da ferramenta – CNGN 12 04 12E 6065 ($a_p = 0,5\text{mm}$ $f =$
 $0,15\text{mm/volta}$), (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga,
(d) detalhes da superfície de saída. 61
- Figura 4.4.3:** (a) Imagem da ferramenta – SNGA 12 04 16E IN11 ($a_p = 0,3\text{mm}$ $f =$
 $0,10\text{mm/volta}$), (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga,
(d) detalhes da superfície de saída. 62
- Figura 4.4.4:** (a) Imagem da ferramenta - SNGN 12 04 08T IB90, (b) visão geral da
aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída. 63

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Composição química nominal (% em peso) da liga à base de níquel (adaptado de EZUGWU <i>et al</i>, 2003)	6
Tabela 2.3.1: Comparação de usinabilidade em materiais (adaptado de Witting, 2002)	14
Tabela 2.3.2: Condutividade térmica de materiais utilizados na indústria, (ASM - Metals Handbook – Vol.1)	27
Tabela 3.2.1: Composição da superliga Inconel 713C (análise Açotécnica S.A.)	34
Tabela 3.2.2: Descrição da geometria das ferramentas utilizadas	37
Tabela 3.3 – Descrição dos parâmetros utilizados	40

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

ap - Profundidade de usinagem	[mm]
D - Diâmetro	[mm]
E - Modulo de elasticidade	[GPa]
f - Avanço	[mm]
F_c - Força de corte	[N]
PC - Potência de corte	[kW]
R_a - Rugosidade média	[mm]
R_y - Rugosidade máxima	[mm]
VB_{Bmáx} - Desgaste de flanco máximo	[mm]
V_c - Velocidade de corte	[m/min]
V_f - Velocidade de avanço	[mm/min]

Letras Gregas

α_o - Ângulo de folga	[°]
γ_o - Ângulo de saída	[°]
ε_r - Ângulo de ponta	[°]
λ_s - Ângulo de inclinação	[°]
χ_r - Ângulo de posição	[°]
γ_o - Ângulo de saída da ferramenta	[°]
λ_s - Ângulo de inclinação da ferramenta	[°]
χ_r - Ângulo de posição da ferramenta	[°]
γ - Fase gama	
σ_e - Limite de escoamento	[MPa]
σ_u - Limite de resistência à tração	[MPa]

Abreviações

APC - Aresta postiça de corte

CBN - *Cubic boron nitride*

CCC - Estrutura cúbica de corpo centrado

CFC - Estrutura cúbica de face centrada

CDP - Corpo de prova

EDS - *Energy dispersive x-ray spectrometer*

HSM - *High speed machining*

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

MQF - Mínima quantidade de fluido

PCD - *Polycrystalline diamond*

PVD - *Physical vapour deposition*

TCP - *Topologically close packed*

HV - *Hardness Vickers*

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 O INCONEL 713C	3
2.1 – Considerações sobre o Inconel 713C	3
2.2 – Principais aplicações do Inconel 713C	9
2.3 – Usinabilidade do Inconel 713C	13
2.3.1 – Ferramentas para usinagem do Inconel 713C	20
2.3.2 – Fluidos de corte para usinagem do Inconel 713C	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 – Equipamentos	30
3.1.1 – Máquina-ferramenta	30
3.1.2 – Microscópio Óptico	31
3.1.3 – Microscópio Eletrônico de Varredura	32
3.1.4 – Rugosímetro	33
3.2 – Materiais	34
3.2.1 – Corpos de prova	35
3.2.2 – Ferramentas	36
3.2.3 – Fluido de corte	39
3.3 – Planejamento experimental	39
3.4 – Procedimentos experimentais	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 – Resultados de vida das ferramentas de metal duro	43
4.2 – Avaliação dos tipos de desgaste apresentados pelas ferramentas de metal duro	51
4.3 – Resultados de vida das ferramentas cerâmicas e de CBN	55
4.4 – Avaliação dos tipos de desgaste apresentados pelas ferramentas cerâmicas e de CBN	60
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIAS	66
ANEXOS	71

1 INTRODUÇÃO

O termo superliga tem como objetivo simplificar a classificação das ligas metálicas que possuem dentro de suas propriedades físico-químicas, uma ou mais características marcadamente diferentes em relação aos materiais regulares de engenharia. (RODRIGUES, 2009)

Conforme Sims, Stoloff e Hagel, (1987) as diferentes fases presentes nas superligas permitem que ocorra um aumento de resistência ao escoamento com o aumento de temperatura. Os autores ainda acrescentam que os carbonetos reforçadores das ligas a base de níquel e cobalto são do tipo $M_{23}C_6$ e M_6C , tratados termicamente, face a lenta decomposição do carboneto primário MC.

As superligas à base de níquel são comumente destinadas a aplicações em temperaturas elevadas, já que mantêm boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão até temperaturas próximas ao seu ponto de fusão. Isto é conseguido graças à combinação de uma matriz austenítica endurecida por solução sólida – fase γ – com elevadas frações volumétricas de precipitados coerentes do tipo $Ni(Ti, Nb, Ta)_3Al$ - fase γ' . (AZEVEDO, MOREIRA E HIPPERT Jr, 2001).

O principal campo de aplicação da liga Inconel 713C diz respeito aos componentes de turbinas a gás, como palhetas, rotores e direcionadores de fluxo. Tecnologias inicialmente desenvolvidas para a aviação militar foram transferidas para a aviação civil e, em seguida, utilizadas em turbinas para a geração de eletricidade. (AZEVEDO, MOREIRA E HIPPERT Jr, 2001).

As indústrias automotivas, aeroespaciais e de energia vêm testemunhando uma maior procura por materiais tais como ligas de titânio e à base de níquel para fabricação de componentes críticos, principalmente devido à sua alta resistência mecânica em relação ao peso. Isto gerou a necessidade de modos economicamente viáveis para fabricar componentes destas ligas. Ligas à base de níquel são consideradas muito difíceis de usar quando comparadas ao aço com as mesmas propriedades à temperatura ambiente, pois elas mantêm a resistência à deformação plástica em elevadas temperaturas. (EZUGWU *et al.*, 2004).

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10 % da produção de metais e empregando milhões de pessoas. Apesar de toda essa popularidade, trata-se de um processo ainda bastante

imprevisível, haja vista que envolve um número bastante grande de variáveis. Assim, se torna necessário para um aumento do desempenho, principalmente econômico, das operações de usinagem, estudos relacionados à vida da ferramenta, forças de corte, potência consumida e superfície gerada (MACHADO *et al.*, 2009).

A usinagem de ligas resistentes ao calor normalmente apresenta reduzidas taxas de remoção de cavacos e grande desgaste das ferramentas. A utilização de materiais de ferramentas considerados avançados como cerâmicas e pCBN geram expectativas de ganhos na forma de redução significativa de tempos de usinagem e aumento da eficiência econômica. (WITTING, 2002)

Baseado nesse panorama, o presente trabalho tem como objetivo avaliar ferramentas de corte no torneamento, com diferentes geometrias, materiais, classes e revestimentos buscando as que apresentem vidas economicamente viáveis (em torno de 15 min) dentro das condições testadas. As condições de corte foram definidas em um trabalho anterior. Para isso, foram testadas ferramentas de metal duro, cerâmicas e de pCBN. Como objetivos secundários pode-se citar a compreensão dos mecanismos de desgaste. A motivação do trabalho foi a escassez de literatura sobre a usinagem do Inconel 713C associada à grande dificuldade de sua usinagem.

2 O INCONEL 713C

2.1 – Considerações sobre o Inconel 713C

Superliga é uma denominação genérica para ligas à base de ferro, níquel ou cobalto, contendo cromo para fornecer resistência à oxidação e corrosão bem como outros elementos para resistência mecânica em temperaturas elevadas. Tradicionalmente essas ligas são recomendadas para emprego em temperaturas superiores a aproximadamente 540°C.

Para aplicações em temperaturas acima de 600°C três grupos de materiais são considerados: aços austeníticos para altas temperaturas, superligas endurecidas por solução sólida e superligas endurecidas por precipitação. Para aplicações estruturais o limite de temperatura é de aproximadamente 950°C, enquanto para aplicações sem solicitações mecânicas, o limite de temperatura de até 1200°C pode ser aceito em alguns casos. Grande parte do desenvolvimento das superligas pode ser creditada às necessidades decorrentes do desenvolvimento de turbinas a gás. (SILVA e MEI, 2006)

As ligas de níquel possuem composição química com elevado teor de elementos de liga, que são responsáveis por suas propriedades mecânicas e térmicas, porém estas características e a afinidade para reagir com os materiais de ferramentas de corte dificultam sua usinagem, classificando-as como materiais de “difícil corte”. Uma usinagem com geração de bom acabamento superficial tem sido um desafio para engenheiros na prática. (THAKUR, RAMAMOORTHY e VIJAYARAGHAVAN, 2009)

A microestrutura de uma liga a base de níquel, formada através de uma solução sólida de matriz reforçada, contém diversos tipos de carbonetos além de fases secundárias após transformações. Em linhas gerais, as fases presentes numa liga a base níquel são:

1. Liga matriz (γ): É a solução sólida austenítica CFC com elevado teor de elemento de liga (cobalto, cromo, molibdênio e tungstênio). Conforme Sims, Stoloff e Hagel, (1987), a austenita de níquel é o elemento central de uma superliga;

2. Fase (γ'): Esta fase surge pela precipitação de altas frações de Al e Ti de acordo com a austenita de níquel. Esta é um intermetálico que aumenta a resistência mecânica da liga com o

aumento da temperatura. O alumínio nesta fase é o principal elemento desoxidante (SIMS, STOLOFF e HAGEL, 1987). É a fase que gera o maior aumento de resistência;

3. Carbonetos: Carbono é adicionado para reagir com os elementos refratários e reativos, resultando na formação de carbonetos primários MC. Durante a exposição a temperaturas elevadas em longos períodos, o MC é decomposto em dois tipos de carbonetos ($MC + \gamma \rightarrow M_{23}C_6 + \gamma'$ e $MC + \gamma \rightarrow M_6C + \gamma'$) localizados nos contornos de grão, proporcionando um aumento da resistência às tensões, principalmente aquelas de origem trativa;

4. Contornos de grãos: Uma fina camada de carbonetos e outros elementos químicos em proporções menores formam esta região, resultam no aumento de resistência em temperaturas médias a elevadas. Boretos eventualmente também se formam nesta região (SIMS, STOLOFF E HAGEL, 1987);

5. Fases TCP (*Topologically Close Packed*) - Fases topologicamente empacotadas: Estas são fases secundárias μ , σ e δ que proporcionam perda de resistência mecânica à liga. Sua estrutura é tetragonal e sua interação ocorre pela afinidade química e geométrica com a matriz CFC da liga.

Técnicas de tratamento térmico são utilizadas para a formação da fase primária (γ') nos contornos de grão, elevando a tensão de ruptura do material. As propriedades superiores apresentadas pelas superligas, foram estudadas por Shuangqun et al. (2004). Os autores demonstraram que, para diferentes temperaturas de envelhecimento, ocorrem alterações significativas da microdureza para as superligas. No entanto, para tempos de envelhecimentos diferentes (500 – 4000 h) mas mesma temperatura, esta alteração ocorre de maneira bem menos significativa, o que significa que as propriedades da liga podem ser mantidas durante longos períodos de trabalho.

Exigências crescentes sobre as superligas como classe de material requerem o máximo de desenvolvimento metalúrgico, tanto para o projeto da liga quanto para o processo de fabricação da mesma. Pode-se citar como propriedades importantes do desenvolvimento e caracterização das superligas: resistência à fluência, resistência à fadiga térmica e mecânica, estabilidade estrutural e resistência à corrosão/oxidação à quente. (SIMS, STOLOFF e HAGEL, 1987)

As ligas à base de níquel também empregam o cromo para obter resistência à corrosão e oxidação, por meio da formação de uma película protetora de óxido de cromo.

Adições de alumínio são favoráveis no tocante à resistência à oxidação em temperaturas superiores a 1000°C quando a película de óxido de cromo torna-se menos protetora. Além disso, o alumínio desempenha papel fundamental nas reações de precipitação, responsáveis pelo endurecimento. (SILVA e MEI, 2006)

Sims, Stoloff e Hagel, (1987) apresentam uma descrição correlacionando os diferentes arranjos atômicos e a proeminente resistência das superligas ao longo de grandes faixas de temperaturas. Um arranjo CFC possui a capacidade de manter maior resistência a tensões, ruptura, fadiga termomecânica e fluência que o arranjo CCC. Os autores ainda enfatizam que o arranjo CFC apresenta maior módulo de elasticidade quando comparado a outros sistemas similares.

Por outro lado, o surgimento imediato de diversos planos de escorregamento causa um grande número de intersecções entre esses, durante o processo de deformação. Isso eleva o nível de tensão necessária para dar prosseguimento à deformação plástica. Em resumo, o aumento do nível de tensão é proporcionado pelo encruamento do material, mesmo este apresentando grande ductilidade. (RODRIGUES, 2009)

Um grande avanço no desenvolvimento de ligas à base de níquel ocorreu na década de 1950 com a introdução da fusão à vácuo por indução e refino. A fusão à vácuo impede a oxidação dos elementos de proteção reativa. Assim, tornou-se possível incorporar mais titânio e alumínio (por precipitação γ') no processo de produção. O refino à vácuo também remove alguns traços de elementos voláteis (bismuto, chumbo, telúrio, etc) presentes nas matérias-primas utilizadas, que adversamente afetam a força de deformação e ductilidade de ligas a base de níquel. Uma das primeiras ligas fundidas utilizando o vácuo foi o Inconel 713C. O alto teor de carbono da liga deu origem a excesso de carbonetos primários e pouca ductilidade em baixas temperaturas, o que causou problemas na fundição de discos de palhetas. Uma versão de baixo carbono da liga foi desenvolvida para superar esse problema. (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1999).

Superligas contém adições de cromo, alumínio, titânio, cobalto, molibdênio e outros em quantidades variadas para melhorar seu desempenho. (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1999)

Os elementos de liga e suas porções percentuais são decisivos para as propriedades mecânicas e térmicas. (WITTING, 2002)

Na tabela 2.1 segue a comparação entre a composição das ligas Inconel 713C e Inconel 713LC.

**Tabela 2.1: Composição química nominal (% em peso) da liga à base de níquel
(adaptado de EZUGWU *et al*, 2003)**

Liga	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	Mn	Si	C	B	Zr
713C	74	12,5	-	4,2	-	-	2,0	0,8	-	-	-	0,12	0,012	0,10
713LC	74	12,0	-	4,2	-	-	2,0	0,6	-	-	-	0,05	0,010	0,10

Conforme citado no Metals Handbook (1990), segue uma relação de elementos bem como suas características e efeitos na usinabilidade das ligas a base de níquel.

- Cromo (Cr): Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação. Este elemento protege a liga durante a sua soldagem, evitando a oxidação da zona termicamente afetada. Aumenta a resistência ao desgaste de componentes sujeitos a atrito. Diminui a usinabilidade devido à sua forte presença na formação de carbonetos;

- Ferro (Fe): O acréscimo de ferro tende a baixar a resistência à oxidação devido à baixa escala de aderência de óxido (elemento desoxidante);

- Molibdênio (Mo): É um metal considerado refratário com ponto de fusão próximo a 3000°C. É acrescido na liga para aumentar a resistência mecânica e à corrosão em altas temperaturas. Forma carbonetos resistentes à abrasão;

- Nióbio (Nb): Também é um metal considerado refratário com ponto de fusão próximo a 2470°C. Modera o endurecimento da liga quando associado ao alumínio e ao titânio. É o elemento que melhor diminui a taxa de envelhecimento do material. Reduz a tendência à trinca causada pelo alumínio. Aumenta a soldabilidade. Altas concentrações de nióbio podem levar à formação de uma fase dura Ni_3Nb , separada do alumínio e do titânio;

- Carbono (C): É um elemento intersticial de aumento de resistência do níquel. Durante a soldagem, o carbono na zona afetada é dissolvido devido à temperatura atingida na região. Esse carbono precipita-se como grafita no contorno de grão, reduzindo a ductilidade da zona afetada termicamente e conseqüentemente seu limite elástico. Possui grande influência na formação de carbonetos, tais como carboneto de cromo, nióbio e titânio;

- Manganês (Mn): Reduz a plasticidade de forma moderada. Aumenta a endurecibilidade;

- Silício (Si): Aumenta a fluidez e a fundibilidade. Causa a fratura a quente da liga;

- Fósforo (P): É um elemento indesejável para a liga devido a sua capacidade de fragilização em temperaturas médias. Este elemento surge a partir de reações de redução durante a fusão da liga;

- Enxofre (S): Idem ao fósforo;

- Alumínio (Al): Possui o maior potencial de endurecimento da liga. Sua presença fragiliza o material, gerando tendência de trincas a quente que ocorre durante a soldagem. Diminui a fundibilidade. Responsável pela formação de carbonetos complexos junto do titânio, ou mesmo o Al_2O_3 , que possui alta resistência à corrosão em temperaturas elevadas;

- Titânio (Ti): Modera a capacidade de endurecimento da liga quando substitui em volume o alumínio. Presente na formação de carbonetos. Diminui a fundibilidade;

- Cobalto (Co): Aumenta a resistência em altas temperaturas. Diminui a usinabilidade. Reduz a solubilidade do alumínio e do titânio na matriz CFC austenítica. Possui maior solubilidade para o carbono do que para o níquel, logo para uma quantidade equivalente de carbono, menos carbonetos estarão presentes na matriz γ ;

- Boro (B) e Zircônio (Zr): São adicionados para melhorar o escoamento, porém a sua utilização não é totalmente benéfica em ligas de níquel, pois afetam a soldabilidade.

A figura 2.1 apresenta uma microestrutura característica de uma superliga a base de níquel (Inconel 713C- Ni-Cr-Fe) com diferentes ampliações. Em (a) pode ser visto a estrutura dendrítica. Em (b), (c) e (d) o detalhe do contorno de grão reforçado com particulado diferente da matriz Ni-Cr-Fe. Em (e) é possível visualizar a presença de carbonetos reforçadores da matriz metálica. A forma irregular alongada dos carbonetos proporciona resistência por afinidade geométrica com a forma dendrítica da matriz.

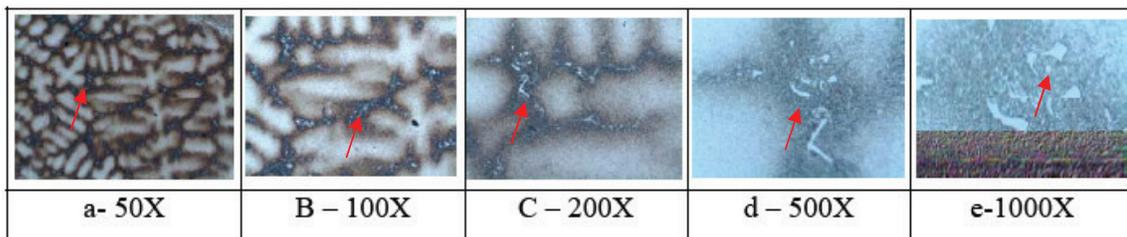


Figura 2.1- Microestrutura superliga a base de níquel (Inconel 713C - Ni-Fe-Cr) (adaptado de RODRIGUES 2009)

Ligas à base de níquel contêm pelo menos 50% de níquel e, em ligas de níquel-ferro, o primeiro é o principal componente soluto. Além disso, os elementos deletérios, tais como silício, oxigênio, fósforo, enxofre devem ser controlados através de práticas adequadas de fusão. Outros elementos, tais como o bismuto, selênio e chumbo devem ser considerados como residuais.

Muitas superligas à base de níquel contêm de 10-20% de Cr, até cerca de 8% de Al e Ti, 5-15% de Co, e uma pequena quantidade de boro, zircônio, magnésio e carbono. Outros aditivos são o molibdênio, nióbio e tungstênio. O cromo e o alumínio também são necessários para melhorar a estabilidade da superfície. (CHOUDHURY e BARADIE, 1998)

Superligas à base de níquel apresentam algumas características que são responsáveis pela baixa usinabilidade. Elas têm uma matriz austenítica, como os aços inoxidáveis, e endurecem rapidamente durante a usinagem. Além disso, a localização do corte produz rebarbas nas bordas da peça o que torna estas rebarbas de difícil manipulação. Estas ligas também têm uma tendência a soldar no material da ferramenta devido à alta temperatura gerada durante a usinagem. As superligas à base de níquel endurecem pela precipitação da fase γ do tipo $Ni_3(Ti, Al)$, onde titânio e alumínio são permutáveis. Em geral, aumentando-se a quantidade da fase γ , a quantidade de titânio e de alumínio, aumenta-se também a taxa de desgaste da ferramenta. (CHOUDHURY e BARADIE, 1998)

É visto em Sims, Stoloff e Hagel, (1987) que para um sistema a base de níquel a região de contorno de grão é efetivamente saturada de carbonetos e fase γ' (figura 2.2). Isso faz com que o mecanismo de ruptura ocorra não pela degradação das regiões de contorno que não são carbonetos ou fase γ' . Estas regiões tendem às fases TCP, ou seja, ocorrerá uma ruptura do interstício da dendrita (ruptura intergranular).

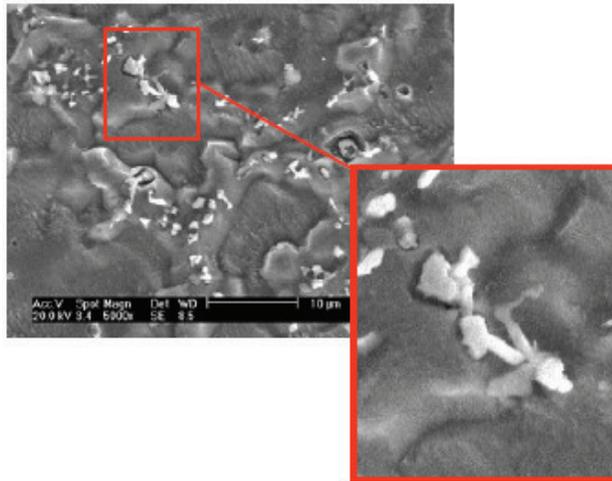


Figura 2.2 - Detalhe do carboneto presente no contorno de grão de uma microestrutura de uma superliga a base de níquel (Ni-Cr). Percebe-se a forma irregular do carboneto e a distância entre estes. (adaptado de RODRIGUES, 2009)

2.2 – Principais aplicações do Inconel 713C

Algumas ligas à base de níquel são utilizadas em ambientes agressivos em função de sua alta resistência à corrosão, fadiga mecânica e térmica, choque térmico e mecânico, deformação a quente e erosão a elevadas temperaturas. Estas propriedades garantem o eficiente e efetivo desempenho dos componentes. No caso das turbinas aeronáuticas estes materiais são utilizados especialmente para a fabricação das palhetas, as quais operam a elevadas temperaturas e pressões. As ligas à base de níquel contêm compostos intermetálicos $Ni_3(Al, Ta)$ em uma matriz de solução sólida de níquel com cromo, tungstênio e rênio como elementos endurecedores da solução sólida. O tântalo, em um composto intermetálico, melhora a resistência a altas temperaturas e à oxidação. Com estes elementos as palhetas de turbina à base de níquel podem operar em temperaturas até 520 °C (MILLER, 1996).

Uma característica geral das ligas resistentes ao calor é a boa resistência à corrosão, elevada resistência ao desgaste e boa tenacidade, mesmo em altas temperaturas. (WITTING, 2002)

Componentes para turbinas a gás, corpo e partes de bombas, facas para corte a quente, matrizes para extrusão, motores aeronáuticos e equipamentos para extração de petróleo são exemplos de peças candidatas a serem fabricadas com superligas.

A figura 2.2.1 mostra o percentual de peso de cada material em uma turbina aerogás típica.

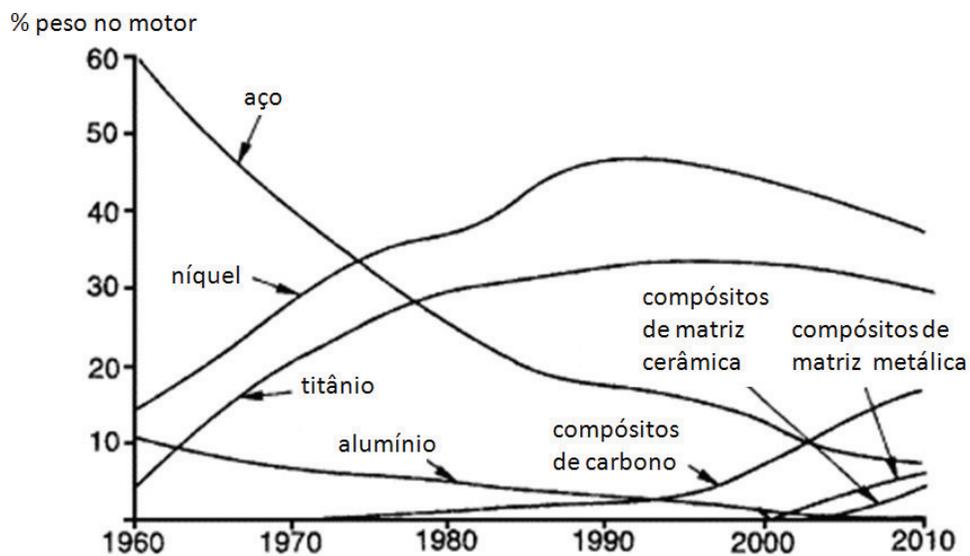


Figura 2.2.1: Crescimento da utilização das ligas a base de níquel em turbinas aerogás (adaptado de EZUGWU et al, 2003)

Componentes fabricados em Inconel não apresentam vantagens em termos de peso quando comparados aos de aço inoxidável, porém sua resistência em altas temperaturas é maior. Isso faz com que sua durabilidade seja muito maior e, portanto a primeira escolha para aplicações de automobilismo e turbo, tais como *Fórmula 1*, *IndyCars*, *Nascar*, *Le Mans*, ou seja todas as categorias de automobilismo consideradas de ponta, onde pesquisa e desenvolvimento ocorrem.

Na figura 2.2.2, observa-se um sistema de exaustão/escapamento utilizado no Porsche 911. O material utilizado foi o Inconel após o componente feito de aço inoxidável não resistir às elevadas temperaturas desenvolvidas.



Figura 2.2.2: Componentes em Inconel, [A] válvulas de admissão e exaustão, [B] sistema de exaustão/escapamento utilizado no Porsche 911. (www.adlerflow.com – 07/2011)

Na figura 2.2.3 são mostrados detalhes de um turbo compressor utilizado na indústria automotiva. O rotor é feito em Inconel 713C, devido a sua elevada resistência a altas temperaturas, comumente desenvolvidas nesses componentes.



Figura 2.2.3: Exemplo de aplicação do Inconel 713C em turbos automotivos, detalhe da aplicação do rotor dentro do turbo compressor. (www.biagioturbo.com)

Ligas à base de níquel são responsáveis pela grande maioria dos materiais necessários para fabricar o motor de uma aeronave, devido à sua elevada resistência à oxidação em elevadas temperaturas, superiores a 550 °C. (SIMS, STOLOFF e HAGEL, 1972).

Na figura 2.2.4 pode-se observar as regiões frias (*cold sections*) e regiões quentes (*hot sections*). As ligas a base de níquel são amplamente utilizadas nas regiões quentes, bem como nas palhetas nas regiões frias.

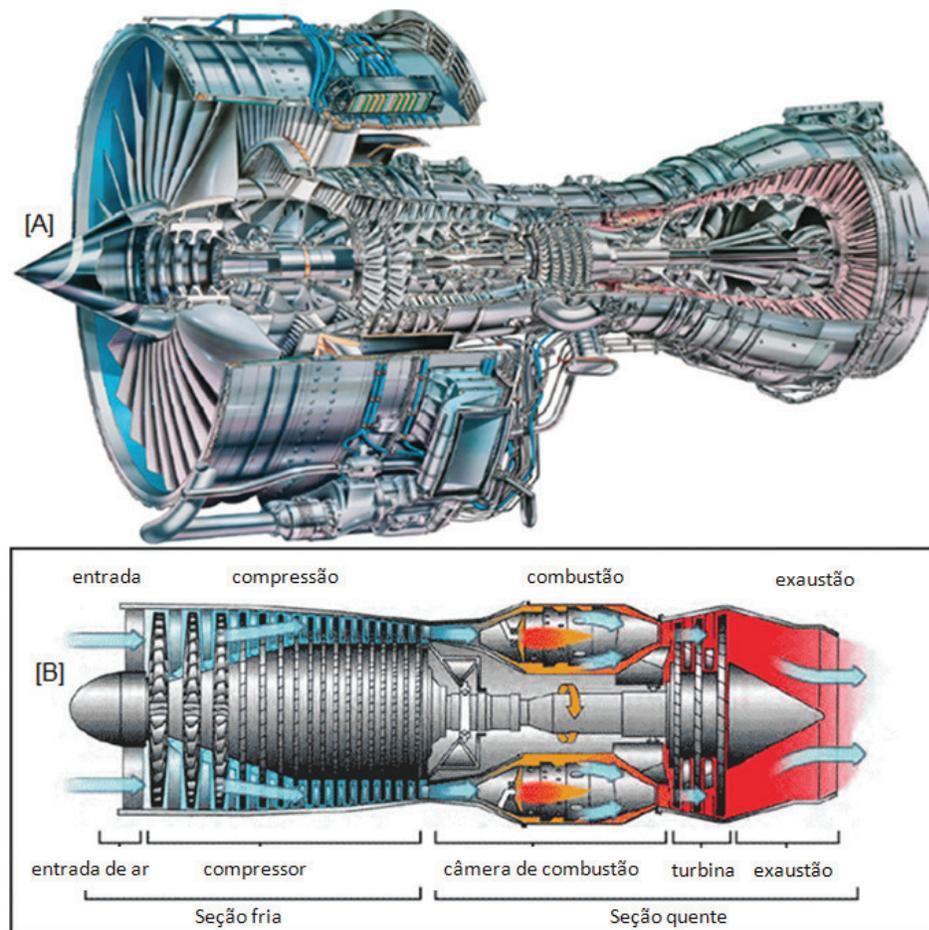


Figura 2.2.4: [A] Corte de uma turbina modelo Trent 500 da Rolls-Royce utilizado nas aeronaves da família Air bus A340, [B] Áreas de compressão, combustão e exaustão.

(www.rolls-royce.com)

2.3 – Usinabilidade do Inconel 713C

Uma das principais características das superligas à base de níquel, além de sua altíssima resistência mecânica em altas temperaturas, é a sua baixa usinabilidade. Ezugwu, Wang e Machado (1999) chegaram a considerá-las como uma das mais baixas usinabilidades dentre os materiais usualmente utilizados na indústria metal-mecânica. Essa baixa usinabilidade é caracterizada por elevada taxa de desgaste da ferramenta de corte. Isso ocorre devido às características térmicas, mecânicas e metalúrgicas das superligas. (SILVA, COELHO e CATAI, 2004)

As superligas a base de níquel possuem estrutura CFC austenítica até o seu ponto de fusão. Estas ligas possuem alto percentual de elementos químicos na forma de solução sólida em sua matriz de Ni. Conforme citado por Ezugwu, Wang e Machado (1999) e Sims, Stoloff e Hagel (1972), a baixa usinabilidade de uma liga de níquel ocorre devido a alguns fatores:

1. A maior parte da resistência do material é mantida durante a usinagem devido a sua alta resistência ao calor;
2. 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;
3. Alto desgaste abrasivo da ferramenta devido à presença de diversos carbonetos com dureza elevada;
4. Altas taxas de difusão no par ferramenta-peça devido às altas temperaturas presentes na região de corte. Choudhury e Baradie (1998) apresentaram resultados de temperaturas em torno de 1000°C durante o corte de uma superliga a base de níquel;
5. Soldagem por atrito da liga de níquel nas superfícies de saída e de folga da ferramenta de corte, devido à alta adesão da liga além das baixas velocidades empregadas para a usinagem, causando entalhe severo bem como lascamento na superfície de saída da ferramenta. Choudhury e Baradie (1998) apresentaram resultados de tensões acima de 3450 MPa na região do corte de uma superliga a base de níquel;
6. Alta ductilidade sob uma dureza média (250-350 HV);

7. 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.

A tabela 2.3.1 mostra uma classificação relativa em termos de dificuldade de se usar diferentes superligas. Pode-se observar que o Inconel 713 C, material usado no presente trabalho é considerado, mesmo dentre as superligas, como difícil de ser usinado.

Tabela 2.3.1: Comparação de usinabilidade em materiais (adaptado de Witting, 2002)

Fácil remoção de cavaco		Dificuldade moderada de remoção de cavaco		Difícil remoção de cavaco
Ligas de Ni-Cu		Ligas não temperáveis		Ligas temperáveis
Ligas fundidas de alta resistência ao calor				
Monel 400	Inconel 600	Nimonic 90	Inconel 718	Inconel 713 C
Monel 404	Hastelloy X	Rene 41	Waspaloy	Nimocast 739

Compreender o comportamento das forças durante a usinagem é útil para o projeto da ferramenta de corte. Como forças excessivas de corte podem induzir vibrações que são prejudiciais à qualidade dos componentes usinados, pode-se escolher condições de corte para impedir que isso aconteça. Forças de corte geradas durante a usinagem podem diminuir com o aumento da velocidade ou ter o efeito oposto (LI *et al.*, 1994). Por um lado, a alta temperatura gerada na interface de corte pode resultar na redução da resistência à ruptura do material peça, daí inferiores forças de corte são necessárias. Por outro lado, ocorre perda de propriedades mecânicas da ferramenta também. Caso essa perda seja maior do que ocorreu no material da peça, ocorrem desgastes na primeira com conseqüente aumento dos esforços de corte (ZHAN *et al.*, 2000).

Ezugwu e Wang (1996) afirmam que o severo desgaste de flanco e entalhe na ponta da ferramenta e/ou ao longo da aresta de corte são os modos de falha dominantes na usinagem de superligas com ferramentas de metal duro. Esses mesmos autores afirmam que essas mesmas ferramentas não podem ser utilizadas na usinagem em altas velocidades de ligas à base de níquel, pois elas não suportam as condições extremas de temperatura e tensão na zona de corte.

A composição química dos materiais das ferramentas possui papel significativo no seu desempenho. A cerâmica a base de alumina (Al_2O_3) apresenta melhor resultado do que a base de nitreto de silício (Si_3N_4) no torneamento de Inconel 718. (EZUGWU *et al.*, 2004)

Ferramentas cerâmicas de óxido puro ($Al_2O_3 + ZrO_2$) não foram eficazes na usinagem de ligas à base de níquel, apesar de sua boa estabilidade química, alta dureza a quente e alta

resistência ao desgaste. O fraco desempenho das ferramentas de óxidos cerâmicos puros pode ser atribuído à sua má resistência ao choque térmico, à baixa resistência à fratura ou baixa resistência ao choque mecânico em temperaturas elevadas. Ensaio de usinagem realizados com ligas de níquel mostraram que ferramentas de cerâmica de alumina reforçada com *whiskers* foram mais favoráveis para a usinagem da liga de níquel Inconel 718, com ou sem refrigeração. Além disso, ferramentas de SiAlON apresentaram melhor desempenho com utilização de refrigeração. (EZUGWU E WANG, 1996)

Materiais para ferramentas de corte em geral, sofrem solicitações térmicas e mecânicas quando usinam ligas à base de níquel. As tensões aplicadas e as temperaturas geradas na aresta de corte e ou próximo à mesma, influenciam muito o desgaste e, portanto, a vida da ferramenta. Entalhe na ponta da ferramenta e/ou na aresta de corte 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, cavacos abrasivos, etc. (EZUGWU E WANG 1996)

No torneamento, na zona de contato entre a ferramenta e a peça formam-se elevadas pressões e temperaturas. Na usinagem do aço, aproximadamente 75% do calor gerado é retirado pelos cavacos. Nas ligas resistentes a altas temperaturas, devido à sua reduzida condutividade térmica, essa retirada ocorre em menor escala. Estas temperaturas elevadas podem produzir tensões indesejáveis na estrutura das peças. Tendo em vista que a velocidade de corte exerce uma influência decisiva sobre a energia inserida, e conseqüentemente, sobre a temperatura do processo, estas ligas só podem ser usinadas com velocidade reduzidas. A usinagem também é dificultada pelo encruamento, além disso, pode-se acrescentar a elevada tenacidade do material e formação caótica de cavacos em forma de fitas e espirais. (WITTING, 2002)

Na figura 2.3.1, é possível observar a comparação entre a zona de contato na formação do cavaco no torneamento de um aço e de um material resistente a alta temperatura.

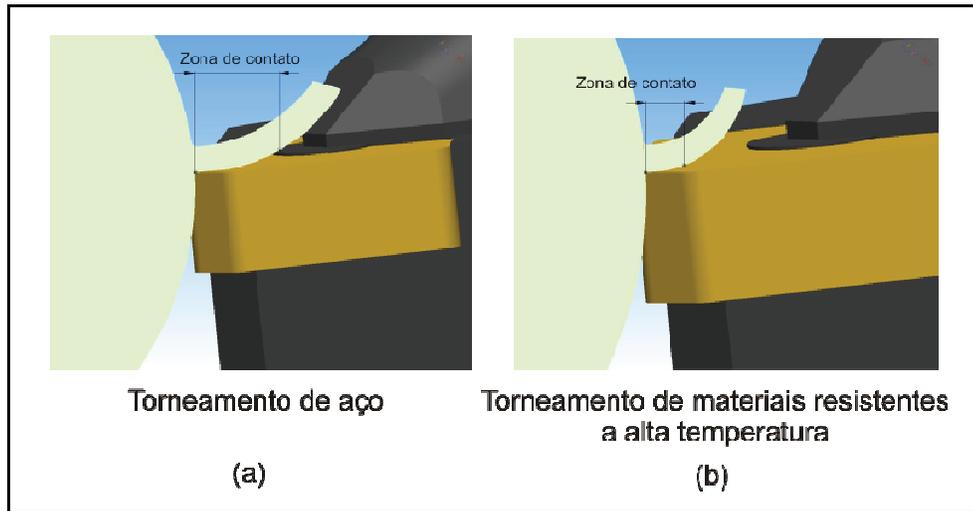


Figura 2.3.1: Comparação entre formação de cavaco (a) torneamento de aço, (b) torneamento de materiais resistentes a altas temperaturas (adaptado de Witting, 2002)

Na usinagem de aços em geral, a aresta de corte da ferramenta recebe uma carga bem menor quando comparada à usinagem de superligas. Os cavacos são arrancados da peça com raio relativamente grande e a força principal de corte é aplicada em uma área de contato mais ampla e estável. Ao contrário, o processo de deformação da estrutura e cisalhamento para formação dos cavacos dos materiais resistentes a altas temperaturas ocorre na região próxima da aresta de corte. (WITTING, 2002)

O impacto no desgaste da ferramenta deve ser considerado quando do cômputo de um valor de usinabilidade relativa entre diferentes condições de corte, entretanto, sob o prisma da mecânica do contínuo em diferentes temperaturas, a maior carga térmica reduz os esforços de deformação da peça, concluindo que apesar das condições de desgaste sofrerem diretamente com o aumento da temperatura, esta será mais facilmente cortada. (RODRIGUES, 2009)

Sims, Stoloff e Hagel, (1987) concluem que as ligas a base de níquel apresentam insensibilidade à temperatura para o valor da tensão de escoamento.

A relação equilibrada entre dureza e resistência ao desgaste pelo calor torna o nitreto de alumínio-titânio (TiAlN) o material mais indicado como revestimento para usinagem de ligas à base de níquel. Além disso, geometrias positivas das ferramentas de corte bem como arestas de corte afiadas facilitam o cisalhamento, reduzem a força de corte e a carga térmica sobre a ferramenta. Vale lembrar que a utilização do processo de deposição física de vapor (*Physical*

Vapor Deposition - PVD) facilita a obtenção de arestas mais afiadas nas ferramentas revestidas. (WITTING, 2002)

O destaque na usinagem de ligas à base de níquel é que a temperatura na ferramenta é muito maior do que em aços devido à sua elevada resistência, baixa condutividade térmica, etc.. Além disso, a ponta da ferramenta é freqüentemente a região com maior temperatura durante a usinagem de ligas à base de níquel, enquanto a temperatura máxima em usinagem de aços ocorre sobre a superfície de saída próximo da aresta de corte. Tem-se observado que as ferramentas de metal duro utilizadas para usinagem de ligas à base de níquel em velocidades $> 30 \text{ m min}^{-1}$ falham devido ao amolecimento do cobalto e da deformação plástica subsequente da aresta de corte em função das altas temperaturas. (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1999)

A geometria da ferramenta na usinagem de ligas à base de níquel tem influência significativa em muitos aspectos fundamentais, como forças de corte, formação de cavacos, redução da temperatura, desgaste e vida da ferramenta. (PAWADE *et al.*, 2007)

A aresta de corte afiada é eficaz na redução das forças de usinagem e da temperatura, quando associado à menor velocidade de corte. (PAWADE *et al.*, 2007).

A resistência do material de uma peça aumenta quando este é deformado plasticamente. O crescimento da resistência depende da taxa de deformação e da capacidade de encruamento. Materiais com alta taxa de encruamento requerem muita energia para formação do cavaco (valor alto da pressão específica de corte e baixa usinabilidade). Com isto, o corte acarretará um substancial aumento de dureza numa fina camada da superfície usinada, facilitando a formação de aresta postiça (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2006).

O tipo de cavaco é uma função direta da composição química e do estado metalúrgico (tratamento térmico, quantidade de trabalho a frio acumulado). Através da mudança dos parâmetros de corte, é possível mudar com pouca eficiência o tipo de cavaco formado. Como conclusão do conhecimento empírico sobre o tipo de cavaco formado para cada tipo de material, tem-se os três tipos de cavacos usualmente obtidos durante a usinagem de materiais metálicos, conforme Oxley (1989): descontínuo, contínuo e contínuo com aresta postiça de corte.

O cavaco tipo descontínuo apresenta fratura à frente da ferramenta, condição que proporciona a obtenção de muitos fragmentos. A superfície usinada de um material com cavaco tipo descontínuo é irregular, devido à formação de poros e microlascas. Os materiais que

proporcionam cavacos descontínuos são aqueles considerados frágeis no ensaio tensão deformação, ou seja, alto módulo de elasticidade e pequeno escoamento.

O cavaco tipo contínuo se forma por deformação plástica sem fratura, pelo menos em escala macro. O escoamento do material é controlado, desde uma etapa de boa razão volumétrica (cavaco pequenos e com volume empacotado) até a etapa de cavaco tipo fita ou mola sem ruptura, condição inadequada sob a óptica de alguns processos produtivos. Neste caso, de maneira mais pronunciada do que para o cavaco tipo descontínuo, os elementos químicos e o estado de tratamento térmico determinam o fluxo e as condições de quebra, junto da correta escolha dos ângulos da ferramenta de corte e das velocidades de corte e de avanço empregadas neste.

O último tipo é aquele caracterizado como contínuo, porém ocorre a formação de aresta postiça de corte (APC). Este tipo forma-se em materiais com elevada plasticidade e soldabilidade por fricção. A APC é muitas vezes interpretada como soldagem do material na aresta de corte, formando uma zona morta de escoamento. Este fenômeno tem origem tanto pela constituição do material que está sendo cortado bem como pelas condições de velocidade. Aspectos tribológicos como regime de lubrificação e qualidade superficial também influenciam na formação da aresta postiça de corte.

Na usinagem do Inconel 713C foi constatado a formação de cavacos contínuos e descontínuos.

A baixa usinabilidade das ligas à base de níquel impõe uma extrema solicitação térmica e mecânica a aresta de corte, levando a deformações plásticas e acelerados desgastes das ferramentas de corte. As falhas típicas observadas quando se usina estas ligas são: desgaste de entalhe, desgaste de flanco, desgaste de cratera e falha catastrófica. As ferramentas usadas para usinagem destas ligas devem possuir adequada dureza a quente devido às altas temperaturas geradas. (EZUGWU, BONNEY, YAMANE, 2003)

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2006) são vários os fenômenos causadores do desgaste da ferramenta, sendo predominante o desgaste de flanco, desgaste de cratera, aresta postiça de corte, bem como outros. Há diversos mecanismos de desgastes básicos na usinagem dos materiais dentre eles pode-se citar a abrasão, difusão, oxidação e adesão.

A 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.

A difusão ocorre durante o processo de remoção de material, forma-se na superfície de saída da ferramenta um tipo de desgaste chamado desgaste de cratera, ou crateramento, que é a principal manifestação do fenômeno da difusão. Este fenômeno se desenvolve pelo arrancamento de grãos microscópicos da superfície da ferramenta devido à ativação da migração atômica no par ferramenta-peça.

Conforme Diniz, Coppini e Marcondes (2006), a presença de altas temperaturas, ar e água geram oxidação para a maioria dos metais. Este mecanismo ocorre principalmente na região onde a terna temperatura-ar-água está presente, ou seja, nas regiões do final da profundidade de usinagem, tanto na superfície primária quanto na secundária de folga.

A principal manifestação da oxidação é o desgaste chamado entalhe. O entalhe, localizado no fim do corte é resultado das tensões cíclicas que ocorrem nesta região, seja em corte interrompido ou em contínuo.

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 à esta adesão, ocorre, através da continuidade do movimento relativo, a ruptura desta união, na região de menor resistência ao cisalhamento.

Trent e Wright (2000) afirmam que a condição necessária para que o desgaste por *attrition* ocorra é um fluxo intermitente e menos laminar do material da peça sobre a aresta de corte. Quando vibração ou *chatter* ocorrem, o fluxo de metal sobre a ferramenta é bastante irregular, o que faz com que seja possível ocorrer a penetração de material da peça/cavaco entre aresta e peça, aderindo sobre a superfície de folga da ferramenta e proporcionando o *attrition*.

Segundo Ezugwu, Wang e Machado (1999), a operação de usinagem induz efeitos, que afetam a integridade superficial das superligas, tais como: rugosidade; modificações na dureza da camada superficial devido ao endurecimento da peça; deformações plásticas, transformações metalúrgicas e alterações químicas (difusão entre o material da peça e da ferramenta) atribuídas à

alta temperatura; tensões residuais (tração e compressão). Esse aspecto é crítico quando se trata de superligas à base de níquel, uma vez que suas aplicações são feitas em situações de grande exigência técnica e a camada superficial do componente pode afetar as propriedades de fadiga, fratura/trinca por tensão de corrosão e fluência, tendo um grande impacto na sua vida em serviço.

A geração de rebarbas durante o processo de usinagem traz inconvenientes para a obtenção do produto final como, por exemplo, diminuição da vida da ferramenta, distorções geométricas e riscos de ferimentos ao operador durante o manuseio da peça. A esses fatores, soma-se, ainda, a necessidade de rebarbação posterior à usinagem, o que torna o custo do processo mais elevado. (BARBOSA e SANTOS, 2010).

Segundo Barbosa e Santos (2010), rebarbas do tipo Poisson, concentram-se nas laterais da peça usinada, principalmente em materiais dúcteis. O esforço de corte associado ao comportamento do material dúctil resulta na deformação plástica permanente. Quanto mais negativa ou reforçada for a geometria da ferramenta, maior será a rebarba gerada.

Barbosa e Santos (2010) afirmam que a variação do raio de ponta da ferramenta tem relação direta com a rebarba de Poisson, devido à diminuição dos esforços durante a usinagem.

2.3.1 – Ferramentas para usinagem do Inconel 713C

Sims, Stoloff e Hagel (1972) afirmam que das muitas variáveis que afetam qualquer operação de usinagem, a ferramenta de corte, embora pequena e relativamente barata, é uma das mais críticas. Os requisitos para qualquer material de ferramenta de corte utilizada para usinagem de ligas à base de níquel devem incluir: (i) boa resistência ao desgaste; (ii) alta resistência e tenacidade; (iii) elevada dureza a quente; (iv) boa resistência a choque térmico; (v) estabilidade química adequada em altas temperaturas.

Geralmente, os resultados que prevalecem nos processos de usinagem de superligas à base de níquel utilizando ferramentas de metal duro sem revestimento são elevados tempos principais e tempos mortos na troca de ferramental, além dos altos custos de ferramentas. (WITTING, 2002)

No tocante à geometria da ferramenta, um ângulo ortogonal de saída maior, positivo, por exemplo, reduz o trabalho de corte. Com isso a temperatura diminui na zona primária de

cisalhamento. (NOVASKI e DÖRR, 1999). Por outro lado, isso tende a diminuir a resistência mecânica da ferramenta, tornando-a mais suscetível a avarias.

O revestimento das ferramentas tem uma importância fundamental quando se pretende elevada resistência ao desgaste em temperaturas altas e baixo coeficiente de atrito em relação à peça. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

Ferramentas cerâmicas estão sendo aplicadas em maiores quantidades na usinagem de ligas com difíceis condições de corte, em que se utiliza máquinas com altas velocidades devido à sua melhor tenacidade de fratura, resistência ao choque térmico e menor coeficiente de expansão. (KIM, 1994)

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)

Existem dois tipos básicos de materiais cerâmicos que são utilizados como ferramentas de corte. Estes são o óxido de alumínio (Al_2O_3) e nitreto de silício (Si_3N_4). 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 baseado em Al_2O_3 , mas contém carboneto de titânio (TiC) que lhe confere propriedades térmicas melhor. A cerâmica reforçada é baseada em Al_2O_3 , mas contém carboneto de silício (SiC) que lhe confere uma melhor condutividade térmica e melhora a sua resistência consideravelmente. O nitreto de silício (Si_3N_4), com base de cerâmica conhecida como sialon tem melhores propriedades térmica e dureza do que o Al_2O_3 . Estas ferramentas estão sendo amplamente utilizadas para usinagem de super ligas. (CHOUDHURY e 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. Ferramentas cerâmicas reforçada 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 BARADIE, 1998).

O desenvolvimento da ferramenta cerâmica de alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) melhorou a resistência por meios mecânicos, em vez de químicos. As fibras ou *whiskers* de carbeto de silício são adicionadas para reforço de uma matriz de alumina. Os *whiskers* têm um diâmetro médio de aproximadamente $0,6 \mu\text{m}$ e um comprimento de 10 a $80 \mu\text{m}$. O material resultante tem uma tenacidade à fratura de 8 MPa. 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 carbetos de alumina-silício reforçado com *whiskers* têm melhores propriedades mecânicas (CHOUDHURY e BARADIE, 1998).

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 é utilizada 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 alumina-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 BARADIE, 1998).

Os óxidos de alumínio (Al_2O_3) são cerâmicas de alta dureza e alta resistência à compressão. São quimicamente estáveis em altas temperaturas em relação ao níquel e o ferro. No entanto, tem baixa tenacidade à fratura e resistência ao choque térmico. Esta cerâmica é quimicamente muito estável e inerte à maioria dos ambientes, o que a torna adequada para aplicações em altas temperaturas. No entanto, tem baixa resistência ao choque mecânico 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 BARADIE, 1998)

Metal duro (incluindo os revestidos), cerâmica, nitreto cúbico de boro (CBN) são os materiais de ferramenta comumente empregados. 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)

O processo de deposição CVD, na maioria das aplicações, é utilizado para a produção dos revestimentos TiC, TiN, TiCN e Al₂O₃, enquanto o processo PVD é utilizado para o TiAlN. Esta diferença de aplicação ocorre pela distinção das faixas de deposição do revestimento no substrato. Enquanto o CVD, dividido em dois grupos, pode ser aplicado em altas temperaturas (HT-CVD) que vão de 900 a 1100°C ou médias temperaturas (MT-CVD) que vão de 750 a 900 °C, o PVD está restrito a uma faixa que vai de 300 a 600°C, conforme (PRENGEL, 1998).

O TiAlN caracteriza-se por possuir uma elevada dureza a quente. Portanto este revestimento constitui-se em um dos mais adequados para usinagem a seco. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

O uso de multi-camadas (TiN + TiCN + TiN) revestindo ferramentas de metal duro, produzidas pela deposição física de vapor (PVD), mostrou resultados significativos em ensaios na usinagem de ligas à base de níquel. (EZUGWU e WANG, 1996)

O TiAlN (PVD) apresenta estabilidade química superior àquela oferecida pelos revestimentos TiN e TiCN. O TiAlN é indicado para usinagem de materiais dúcteis, como é o caso do aço inoxidável austenítico, ou quando se deseja arestas de corte mais afiadas. A espessura de camada obtida no PVD (até 5µm) é menor que aquela usualmente obtida com o CVD (de 5 a 20µm), o que confere uma aresta de corte mais afiada. (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2006)

PalDey e Deevi (2003) afirmam que o TiAlN é considerado uma evolução do nitreto de titânio (TiN), com maior estabilidade térmica, resistência à oxidação, maior retenção da dureza em altas temperaturas e menor condutividade térmica. Essas características fazem deste material uma boa opção para revestimento de ferramenta de corte.

O uso de camadas de revestimentos cerâmicos contribuiu para o desenvolvimento de ferramentas com maior dureza na superfície, o que favoreceu o aumento da resistência ao

desgaste ao mesmo tempo em que foi mantida a tenacidade do núcleo. Além disso, as técnicas de deposição utilizadas envolviam altas temperaturas que poderiam ser suportadas por materiais como metal duro.

A deposição de revestimentos finos tem como objetivo alterar as propriedades da superfície. Entre as características modificadas por meio de revestimentos são destacadas as ópticas, magnéticas, eletrônicas, químicas e resistências mecânicas e ao desgaste. (HOGMARK, JACOBSON E LARSSON, 2000).

Biermann *et al* (2011) afirmam que com o aumento do arredondamento das arestas de corte, a ferramenta sofre desgaste mais rápido. E com ferramentas sem preparação de arestas também existe a possibilidade de aumentar a vida, mas a evolução do desgaste, além de não ser totalmente reproduzível, pode apresentar quebra prematura da ferramenta em condições idênticas de processo.

Um menor arredondamento da aresta de corte conduz a uma estabilidade menor mas, ao mesmo tempo, reduz a carga termomecânica na aresta. Logo grandes arredondamentos possuem maior estabilidade, mas geram maiores cargas térmicas e mecânicas no processo de corte, o que leva a um comportamento de desgaste desfavorável, em comparação com ferramentas com arredondamentos menores. A qualidade e a estrutura da aresta de corte influenciam em larga escala o aparecimento de quebras e a falha prematura da ferramenta. (BIERMANN *et al* 2011).

Albrecht (1960) e Waldorf (1999) estabeleceram uma relação entre o raio da aresta de corte e o aumento da força do processo. Segundo eles, o material da peça é prensado contra a superfície de folga devido à contenção do material diante da aresta de corte arredondada. Quanto maior for o arredondamento, tanto mais material flui por baixo da aresta de corte entre ferramenta e peça. Por causa disso, aumentam as forças normais.

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 super ligas, já que o maior teor de CBN, geralmente, aumenta a resistência ao lascamento. Tem sido relatado que, no torneamento do 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 120-240 m/min⁻¹ (CHOUDHURY e BARADIE, 1998).

2.3.2 – Fluidos de corte para usinagem do Inconel

As principais funções dos fluidos de corte 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 do desgaste abrasivo e por adesão. Prevê-se ainda uma elevação da temperatura no processo. Com o aquecimento, os cavacos terão mais dificuldade para adquirir uma forma mais definida e podem soldar-se à ferramenta. A reduzida refrigeração influencia o comportamento térmico da máquina e, como consequência, a precisão dimensional e geométrica das peças. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

Durante a usinagem a seco ocorre uma maior exigência sobre as ferramentas, decorrente principalmente da elevação da temperatura do processo. A dureza e a resistência ao desgaste a quente das ferramentas desempenham um papel fundamental nestes casos. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

Os custos de refrigeração relacionados com o processo de usinagem são freqüentemente relegados a um segundo plano, mas é importante que eles sejam observados ao lado dos custos fixos da instalação dos sistemas de refrigeração. Neles estão embutidos, por exemplo, os gastos feitos com fornecimento, tratamento e eliminação dos resíduos nocivos ao meio ambiente. (NOVASKI E DÖRR, 1999)

Uma das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivos causados pelos desgastes das ferramentas é a introdução, no processo, de sistemas de lubrificação e refrigeração eficientes. Porém, na última década as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal mecânica. Os fatores importantes que justificam esse procedimento incluem os custos operacionais da produção, questões

ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (MACHADO e DINIZ, 2000).

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 a 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 conseqüentemente 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. 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) Conforme Shaw (1984), a utilização de fluido refrigerante/lubrificante tem as seguintes funções em uma operação de usinagem:

- 1º Diminuir a adesão entre o cavaco e a ferramenta e proporcionar baixo atrito e desgaste, além da redução da aresta postiça de corte;
- 2º Refrigerar a ferramenta e a peça além da condução do calor gerado na zona de corte para fora desta;
- 3º Remover os cavacos da região de corte;
- 4º 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 refrigerante/lubrificante.

Em processos de usinagem com baixa velocidade de remoção do cavaco ou dificuldades geométricas de acesso para a região de corte, faz-se necessária utilização de pontos auxiliares de refrigeração/lubrificação para auxiliar na remoção do cavaco.

O aumento de temperatura na região de corte poderá afetar materiais devido à corrosão, porém em superligas a base de níquel, este efeito é desprezível devido à sua alta resistência.

Diniz, Marcondes e Coppini (2006), acrescentam às funções descritas acima que a utilização de fluido refrigerante/lubrificante também irá resultar em:

5º Redução de distorções de origem térmica da peça com objetivo de facilitar a obtenção de tolerâncias apertadas;

6º Evitar dano na estrutura e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície da peça usinada.

A necessidade da aplicação de fluido refrigerante/lubrificante pode ser feita pela opção de um tipo de fluido escolhendo a característica refrigerante em relação à lubrificante e vice-versa.

Durante o torneamento das superligas a base de níquel, o calor gerado concentra-se na aresta de corte da ferramenta com uma intensidade superior àquela atingida no torneamento de aços e ferros e ferros fundidos usualmente processados, visto que a condutividade térmica deste material é baixa, tornando esta liga refratária. A tabela 2.3.2 a seguir ilustra alguns valores do coeficiente de condutividade térmica de alguns materiais.

Tabela 2.3.2. – Condutividade térmica de materiais comumente utilizados na indústria, (ASM - Metals Handbook – Vol.1)

<i>Material</i>	<i>Condutividade térmica*</i>	<i>Material</i>	<i>Condutividade térmica*</i>
Alumínio 5005	0,48	Ti-6Al-4V	0,039
Bronze fosforoso de corte livre	0,18	Oxido de alumínio	0,07
Aço H13	0,095	Aço rolamento 52100	0,12
Aço Inoxidável 18Cr-8Ni	0,035	Aço 1040	0,115
Aço inoxidável 304	0,033	Inconel	0,036

* Valores em cal/cm x s x °C

A função lubrificante atua no somatório das fontes de calor presentes na formação do cavaco, ou seja, nas três zonas de atrito, conforme Ferraresi (1995). O caráter refrigerante não atua na diminuição da geração do calor, mas sim na extração do mesmo após a sua geração. A figura 2.3.2 ilustra as fontes de calor (A, B e C) na formação do cavaco.

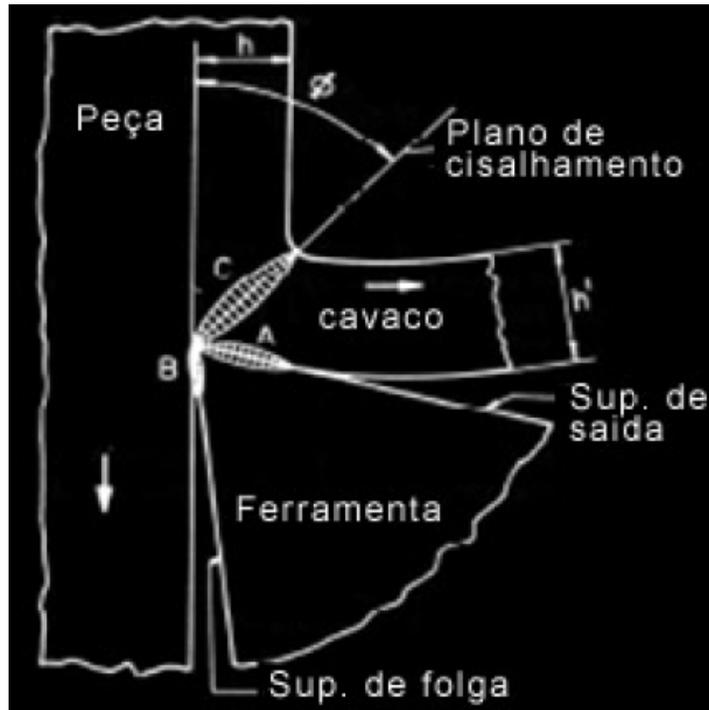


Figura 2.3.2 – Fontes de geração de calor na formação do cavaco, (adaptado de FERRARESI 1995).

Observando a figura 2.3.2, pode-se observar:

Zona A – Zona de geração de calor devido ao atrito entre uma face do cavaco e a superfície de saída da ferramenta, zona secundária de cisalhamento;

Zona B – Zona de geração de calor devido ao atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça que esta sendo processada;

Zona C – Zona de geração de calor devido a deformação plástica sofrida ao longo do plano de cisalhamento do cavaco.

Durante o torneamento das superligas a base de níquel, 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.

Analisando a figura 2.3.2, pode-se afirmar que o fluido irá reduzir o coeficiente de atrito entre as partes, ou seja, entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça (zonas A e B).

A redução do calor na zona C se faz pela diminuição do coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, que conseqüentemente aumenta o ângulo (ϕ) que define a orientação do plano de cisalhamento. Este aumento diminui a taxa de deformação do cavaco gerado, resultando em uma diminuição na força necessária para realizar o corte, que conduz por sua vez à redução da temperatura. O aumento de (ϕ) também aumenta a velocidade de escoamento do cavaco formado, dificultando, desta forma, a troca de calor por condução entre o cavaco e a superfície da ferramenta de corte.

Em relação à discussão clássica da acessibilidade do fluido na região do corte, Trent e Wright (2000), afirmam que o fluido refrigerante não atua diretamente nas zonas A, B e C, mas sim no cavaco, na peça e na ferramenta em regiões que o acesso se faz possível, ou seja, próximo às zonas A, B e C, mas não exatamente nelas. Entretanto, os fluidos lubrificantes tornam a lubrificação da região de contato um caso particular da lubrificação limite, em que o aditivo de extrema pressão atua de maneira importante, reduzindo as forças de corte e a geração de calor além da melhoria do acabamento superficial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se todos os equipamentos e materiais utilizados, assim como o planejamento experimental e os procedimentos adotados ao longo do trabalho. Estes detalhes são importantes para facilitar a compreensão dos métodos utilizados, e possibilitar uma correta aplicação das técnicas empregadas, seja em meio acadêmico ou industrial, e ainda garantir a confiança dos resultados obtidos.

Os experimentos deste trabalho foram realizados no Laboratório de Usinagem dos Materiais do Departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

3.1 – Equipamentos

Neste item, serão apresentados, além da máquina-ferramenta, todos os instrumentos utilizados para aferição e medição das variáveis estudadas neste trabalho.

3.1.1 – Máquina-ferramenta

Os ensaios de torneamento da superliga à base de níquel Inconel 713C, foram realizados em um torno CNC da marca Romi, modelo *Galaxy 20*, com comando numérico *GE-Fanuc 2li-T*, potência do motor principal de 15 kW e rotação máxima do eixo árvore de 4500 rpm (variação contínua), a figura 3.1 mostra a máquina descrita.



Figura 3.1 - Torno CNC utilizado nos ensaios

3.1.2 – Microscópio Óptico

Para o acompanhamento do desgaste das ferramentas ao longo dos ensaios, foi utilizado um microscópio estereoscópico *Leica* (ampliação máxima de 50 x) e uma câmera fotográfica digital *Canon Powershot* ® *S40* (zoom óptico de 2.8 x e resolução máxima de 4 *megapixels*) conectada a um computador contendo os programas *Canon Utilities RemoteCapture*® 2.2.0.11, responsável pela aquisição das imagens, e *Image J 1.40c*, responsável pela medição do desgaste. A Figura 3.1.2 ilustra a montagem descrita.



Figura 3.1.2 - Sistema de captação de imagens e medição dos desgastes

3.1.3 – Microscópio Eletrônico de Varredura

Após os ensaios de vida, as ferramentas desgastadas foram levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Jeol JXA-840A do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica, que possui o recurso de espectrometria de energia dispersiva (ou EDS, do inglês *Energy Dispersive x-ray Spectrometer*), que permite identificar de forma semi-quantitativa os elementos químicos presentes em quaisquer pontos da ferramenta e, assim, propiciar embasamento suficiente para a geração de hipóteses sobre os mecanismos de desgaste atuantes. A figura 3.1.3 mostra o equipamento utilizado.



Figura 3.1.3 – Microscópio Eletrônico de Varredura

3.1.4 – Rugosímetro

Para aferir medir a rugosidade da superfície usinada durante os ensaios realizados, foi utilizado um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ, uma base magnética como suporte do apalpador e uma base em “V” para apoio do corpo de prova durante a leitura da rugosidade. (Figura 3.1.4)



Figura 3.1.4 – Medição da rugosidade do corpo de prova

3.2 – Materiais

Este item contém informações a respeito dos corpos de prova usinados, das ferramentas e do fluido de corte utilizados.

3.2.1 – Corpos de prova

O material utilizado neste trabalho foi o Inconel 713C, com dureza de 63 ± 3 HR_C e sua composição pode ser observada na tabela 3.2.1. Todo material foi fornecido pela Açotécnica em forma de tarugos circulares com diâmetro de 30 mm por 150 mm de comprimento. Ao todo foram fornecidos dez corpos de prova.

Tabela 3.2.1 – Composição da superliga Inconel 713C (análise Açotécnica S.A.)

Composição do material Inconel 713C (% em peso)								
Elemento Químico	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Esperado	0,08 -0,20	<0,5	<0,25	<0,015	<0,015	12,0 – 14,0	3,80 – 5,20	>72,0
Encontrado Amostra	0,13	0,07	0,02	0,002	0,003	13,29	4,29	72,59
Elemento Químico	Nb	Ti	Co	Al	Cu	Fe	B	Zr
Esperado	1,80 – 2,80	0,50 – 1,0	<1,00	5,50 - 6,50	<0,50	<2,25	0,005 - 0,015	0,05 - 0,15
Encontrado Amostra	2,07	0,60	0,04	5,96	0,011	0,83	0,011	0,065

A preparação dos corpos de prova deu-se da seguinte forma.

Com a utilização de um torno mecânico convencional e uma broca de centro de metal duro inteiriça marca Guhring com dimensões 3,15 x 8,00 mm (cód. 39077), a uma rotação de 500 rpm, foram executados furos de centro em todos os corpos de prova.

Após a execução dos furos de centro nos corpos de prova, os mesmos foram encaminhados para o torno CNC, onde foram feitos canais com dimensões de 3 mm x 25 mm de diâmetro utilizando o bedame DGR-3102C-6D (IC328) do fabricante Iscar. Com a abertura destes canais, cada corpo de prova foi dividido em três segmentos com 38 mm cada um, três canais de 3 mm e 27 mm para a fixação na placa de três castanhas.

Estes canais foram realizados com intuito de diminuir o comprimento usinado entre as medições de desgaste, em função da grande dificuldade que o material apresenta para ser usinado. Em ensaios preliminares, observou-se que o comprimento útil do corpo de prova (aproximadamente 120 mm) era excessivamente longo, haja vista que em alguns ensaios foi impossível medir o desgaste da ferramenta, já que ao final de uma passada a ponta da ferramenta apresentava-se com uma avaria muito grande. Assim, optou-se pelo particionamento do corpo de prova para possibilitar o acompanhamento da evolução do desgaste até o fim de vida da ferramenta.

Depois de realizados os canais, foram executados chanfros nos mesmos a fim de evitar variações súbitas de esforços de corte das ferramentas tanto na entrada quanto na saída do corte. (figura 3.2.1.1)

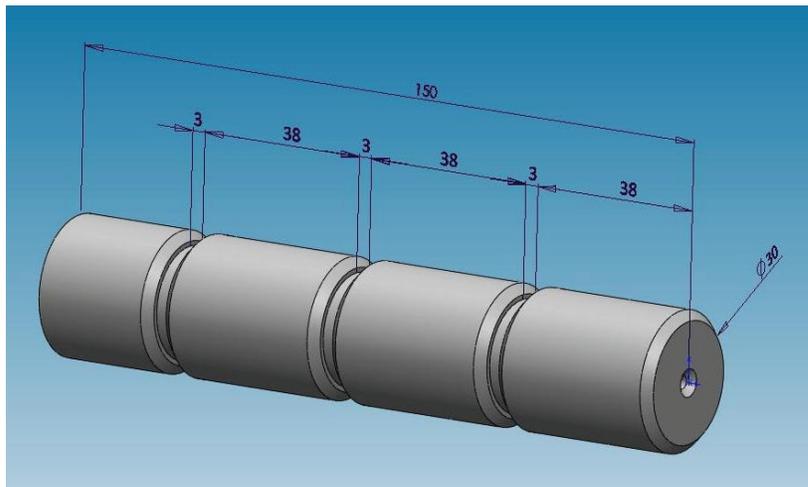


Figura 3.2.1.1– Corpo de prova utilizado nos ensaios

A fixação dos corpos de prova durante os ensaios foi feita com uma placa de três castanhas e contra-ponto rotativo na extremidade oposta com o objetivo de garantir boa rigidez e evitar vibrações no ensaio (figura 3.2.1.2).

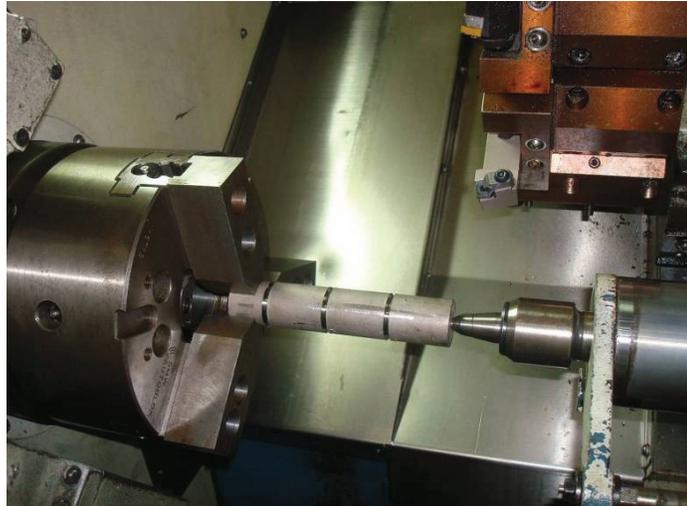


Figura 3.2.1.2 – Fixação placa – contra ponto

3.2.2 – Ferramentas

Para realizar este trabalho, foram selecionadas ferramentas de metal duro e ferramentas de cerâmica disponíveis comercialmente, com variações de geometria, substrato e cobertura, conforme a tabela 3.2.2.

Tabela 3.2.2 – Descrição da geometria das ferramentas utilizadas

	CNMG 12 04 12 - QM 1105 Metal duro	CNMG 12 04 12 - QM 1005 Metal duro	CNMX 12 04 A2-SM S05F Metal duro	CNMG 12 04 12 - QM H13A Metal duro	CNMG 120408-NM4 WSM20 Metal duro
					
Classe	S05-20	S10-25	S05-15	S05-20	S10-30
Cobertura	TiAlN (PVD)	TiAlN-TiN (PVD)	TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN (CVD)	TiAlN (PVD)	s/ cobertura
κ_r (°)	95	95	45	45	95
γ (°)	negativo	negativo	negativo	negativo	negativo
α (°)	-6	-6	-6	-6	-6

	SNGN 12 04 08T IB90 CBN	SNGA 12 04 16E IN11 cerâmica	CNGN 12 04 12E 6065 cerâmica	CNGN 12 04 12 T01020 670 cerâmica	SNGN 12 04 16E IS9 cerâmica
					
Classe	K01-15	K01-10	S05-20	S10-25	S20-30
Substrato	CBN	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄ (sialon)	Al ₂ O ₃ +SiC _w (whiskers)	Si ₃ N ₄
κ_r (°)	75	75	95	95	75
γ (°)	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo
α (°)	-6	-6	-6	-6	-6

A seleção de ferramentas com geometria C foi feita por se tratar de uma ferramenta comum e robusta, além de ter sido recomendado pelo fabricante. Como o corpo de prova apresenta uma geometria simples não se fez necessária uma geometria mais complexa para se usar o mesmo.

A seleção da geometria S para as ferramentas cerâmicas deu-se por se tratar de uma geometria mais robusta, o que é recomendado para ferramentas cerâmicas e também foi sugerido pelo fabricante.

A escolha dos revestimentos óxido de alumínio (Al₂O₃) foi porque esse possui boa estabilidade térmica, já que é um material cerâmico refratário, além de possuir alta resistência ao desgaste por abrasão. Já o nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) possui baixa condutividade térmica, o que protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco.(DINIZ,

MARCONDES E COPPINI, 2006). Cabe ressaltar que o Inconel 713C possui elevada resistência mecânica em altas temperaturas, daí ser interessante procurar ferramentas que possuam comportamento similar.

A escolha de ferramenta com geometria CNMX foi para testar o comportamento de corte com o ângulo de posição igual a 45° , onde se esperava um comprimento de contato maior, portanto um cavaco com espessura menor e, conseqüentemente, uma melhor distribuição dos esforços ao longo da aresta de corte. Essa geometria é recomendada pelo fabricante para usinagem de superligas resistentes ao calor (HRSA do inglês *high resistant super alloys*).

Para fixação das ferramentas foram utilizados dois suportes o DCLNR 2525M 12 e o suporte CSRNL 2525M-12CEA, além de grampos de fixação para insertos com furo central e insertos com superfície plana a fim de atender a variedade de geometrias diferentes conforme ilustração da figura 3.2.2.

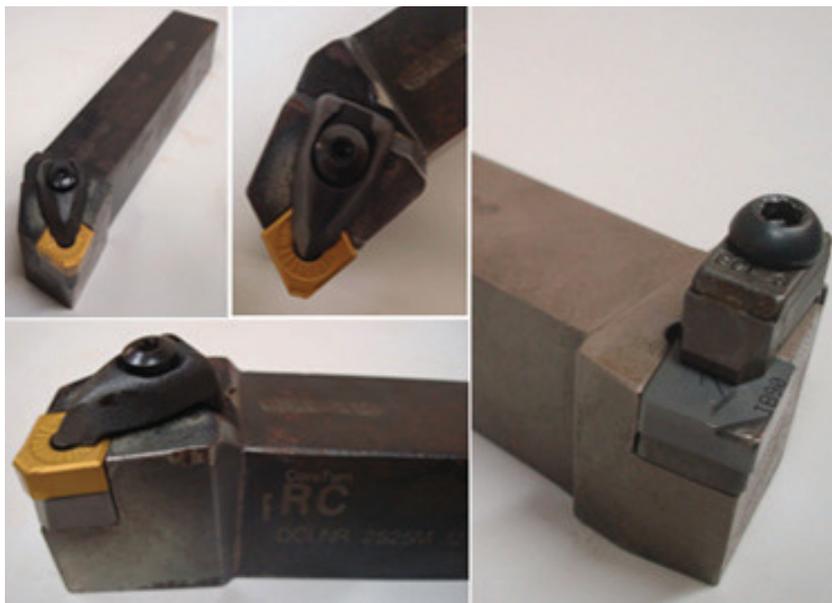


Figura 3.2.2 – Suportes de ferramentas utilizado nos ensaios

3.2.3 – Fluido de corte

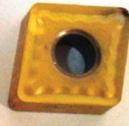
Nos ensaios com as ferramentas de metal duro foi empregado um fluido de corte aquoso, cujo alto poder refrigerante é capaz de minimizar o efeito do calor gerado sobre a ferramenta. Utilizou-se nos experimentos um óleo miscível de base vegetal (nome comercial Vasco 1000®), fornecido pela Blaser Swissslube, com concentração de 10 % brix, aplicado externamente à ferramenta e a uma vazão de aproximadamente 8 l/min. O fluido de corte foi necessário para diminuir a temperatura na região de corte, haja vista que o Inconel 713C possui elevada resistência mecânica à quente.

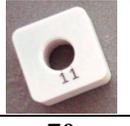
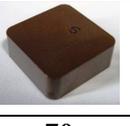
3.3 – Planejamento experimental

Nos experimentos com ferramentas de metal duro, os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram fixados de acordo com valores recomendados em catálogos e ensaios preliminares. Nesse caso as variáveis de entrada foram as classes, tipos de revestimento, geometria da ferramenta e da aresta de corte. Já para os experimentos realizados com ferramentas cerâmicas apenas a velocidade de corte foi fixada e houve variação nos parâmetros de avanço e profundidade de corte, com exceção da ferramenta SNGN120408T que fixou avanço e profundidade de corte e utilizou velocidade de corte de 100 e 150 m/min. Isso foi feito porque a literatura sobre utilização de ferramentas cerâmicas para usinagem da liga à base de níquel Inconel 713C é bastante escassa e o comportamento difere bastante em relação ao Inconel 718.

Para as ferramentas cerâmicas, quando foi utilizado o avanço de 0,10 mm/volta foi empregado duas profundidades de corte, 0,5mm e 0,3mm. Quando foi utilizado o avanço de 0,15mm/volta a profundidade de corte empregada foi de 0,5 mm. A tabela 3.3 mostra os valores utilizados.

Tabela 3.3 – Descrição dos parâmetros utilizados

	CNMG 12 04 12 - QM 1105	CNMG 12 04 12 - QM 1005	CNMX 12 04 A2- SM S05F	CNMX 12 04 A2 - SM 1105	CNMG 12 04 12 - QM H13A	CNMG 120408- NM4 WSM20
						
v_c (m/min)	40	40	40	40	40	40
f (mm/volta)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
a_p (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

	SNGN 12 04 08T IB90	SNGA 12 04 16E IN11	CNGN 12 04 12E 6065	CNGN 12 04 12 T01020 670	SNGN 12 04 16E IS9
					
v_c (m/min)	100 e 150	70	70	70	70
f (mm/volta)	0,15	0,10 e 0,15	0,10 e 0,15	0,10 e 0,15	0,10 e 0,15
a_p (mm)	0,5	0,3 e 0,5	0,3 e 0,5	0,3 e 0,5	0,3 e 0,5

Para as ferramentas de metal duro foi utilizada velocidade de corte de 40 m/min, abaixo da faixa recomendada pelo fabricante, pois testes preliminares mostraram que essa velocidade era a que possibilitava traçar uma curva de desgaste.

A escolha dos parâmetros de avanço e profundidade de corte abaixo da faixa recomendada pelos fabricantes, também foi embasada em testes preliminares numa tentativa de elevar ao máximo a vida da ferramenta. Cabe ressaltar que as recomendações dos fabricantes referem-se à superligas em geral, mas dentre as superligas, o Inconel 713C apresenta um comportamento ruim em relação à usinabilidade, conforme mencionado na revisão da literatura.

3.4 – Procedimentos experimentais

Após a fixação do corpo de prova no torno CNC, foram utilizados os parâmetros de usinagem determinados na tabela 3.2.1 e iniciou-se o procedimento experimental.

Foram realizados passes no diâmetro externo do corpo de prova no sentido longitudinal ao longo do comprimento de 38 mm. A cada comprimento usinado a ferramenta era retirada e submetida a análise no microscópio óptico. Sua superfície de folga era fotografada e, depois de realizada a calibração da imagem por meio de uma escala, o desgaste de flanco era medido, conforme a Figura 3.4.1.

Este procedimento foi repetido até que se atingisse a vida da ferramenta, determinada em $VB_{Bmáx}$ igual a 0,5 mm.

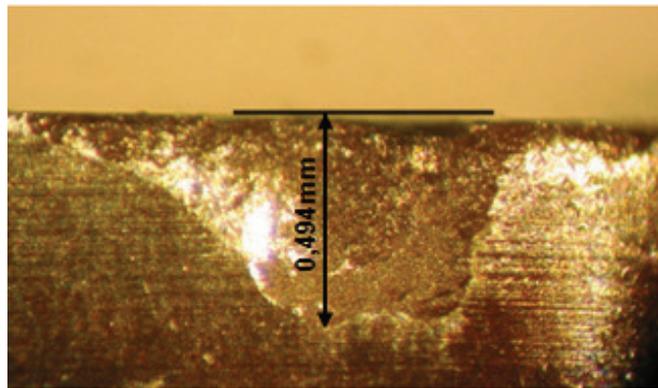


Figura 3.4.1 - Ferramenta CNGN 12 04 12E 6065 - fim de vida

As ferramentas utilizadas nestes ensaios foram, posteriormente, levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para uma análise mais precisa da região desgastada.

Essa etapa foi realizada para se obter maiores detalhes a respeito do(s) mecanismo(s) de desgaste atuantes na aresta da ferramenta de corte, além de se fazer micro análises de material em determinadas regiões da ferramenta, através de EDS.

Todos os ensaios de vida foram replicados de forma a aumentar a confiança estatística dos resultados

Em paralelo a usinagem, foi utilizado um microcomputador para a aquisição da potência elétrica consumida pelo motor com auxílio do *software* LabView 8.5 da *National Instruments*. O sinal foi captado com uma taxa de amostragem de 1,5 kHz, sinal este vindo diretamente do motor em volts e depois convertido em kW pela relação $1 V = 1,47 kW$. Depois da aquisição, os dados foram tratados pelo *software* Excel, onde o trecho inicial e o final, ambos com 4 mm foram descartados, ficando para análise somente o comprimento de 30 mm.

A potência elétrica consumida pelo motor principal da máquina capturada por este sistema é afetada pelo rendimento da máquina. Mesmo assim é um indicador da potência mecânica, que por sua vez fornece informações sobre a potência de usinagem (ROSA, 2009).

Depois de se usinar os três comprimentos de um corpo de prova, o mesmo era retirado da máquina e submetido à aferição da superfície com auxílio do rugosímetro.

A rugosidade média (R_a) e a rugosidade máxima (R_y) dos corpos de prova usinados durante os ensaios foram medidas usando-se um rugosímetro portátil Mitutoyo, com um *cut-off* ajustado em 0,8mm. Foram feitas três medidas em pontos aleatórios ao longo do comprimento e do perímetro de cada comprimento de 38 mm da peça, a fim de conseguir um valor médio para a rugosidade naquele momento do ensaio.

Este procedimento foi replicado para todas as ferramentas de metal duro e ferramentas cerâmicas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão divididos em seções para facilitar a discussão dos mesmos. Por outro lado, as diferentes seções atuam umas sobre as outras, portanto as informações contidas em uma seção eventualmente serão utilizadas para a discussão de resultados de outras seções.

4.1 - Resultados de vida das ferramentas de metal duro

A figura 4.1.1 apresenta os resultados de vida das ferramentas de metal duro obtidas com as diferentes classes e geometrias de ferramentas.

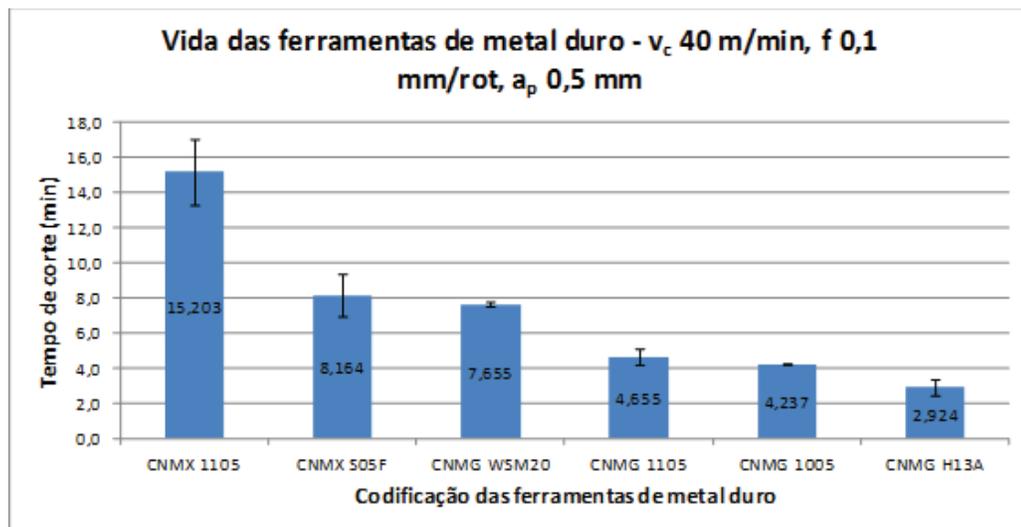


Figura 4.1.1 – Vida das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes

Da figura 4.1.1 pode-se observar diferentes aspectos, a saber:

1) A ferramenta CNMX 1105 apresentou o melhor desempenho dentre as ferramentas testadas. Aliás, do ponto de vista econômico foi a única que apresentou desempenho aceitável. Isso se deve provavelmente à somatória da geometria CNMX (com ângulo de posição de 45°) com a classe 1105 (S05-S20 com cobertura TiAlN PVD), haja vista que a geometria CNMX com

classe S05F (S05-S15 com cobertura TiCN-Al₂O₃-TiN CVD) apresentou desempenho pior (46% em média), o mesmo ocorrendo com a classe 1105 e geometria CNMG (ângulo de posição 95°) (69% em média);

Para observação da geometria da aresta foram cortadas duas pastilhas, CNMX 1105 e CNMG 1105. Essas imagens são mostradas nas figuras 4.1.2 A e B.

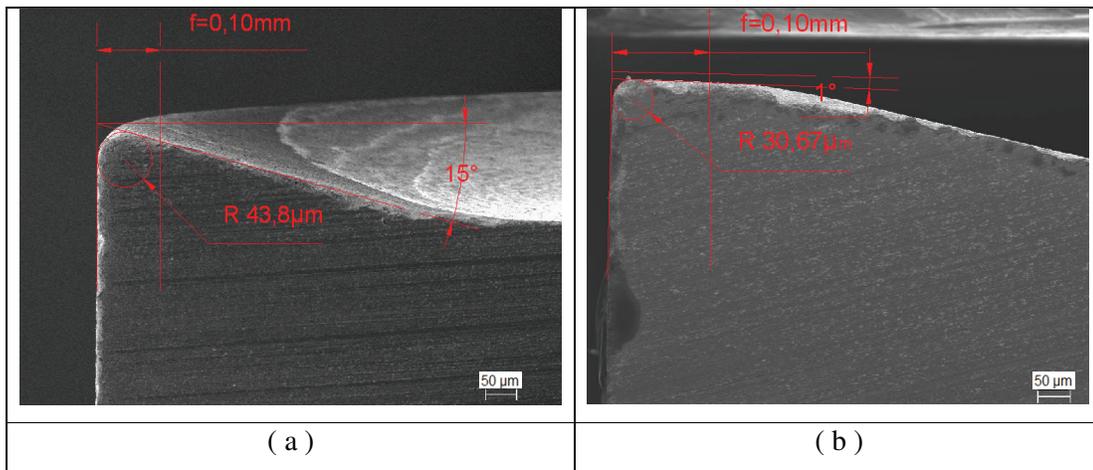


Figura 4.1.2: a) Ferramenta CNMX 12 04 A2 – SM 1105 e b) Ferramenta CNMG 12 04 12 – QM 1105

Analisando-se a figura 4.1.2 nota-se que o raio de aresta da geometria CNMX é maior do que o da aresta com geometria CNMG. Além disso, nota-se uma fase plana na ferramenta CNMG 1105 que praticamente inexiste na ferramenta CNMX 1105. Essa fase plana deforma muito mais o material durante a formação de cavaco. Outro ponto que merece destaque é que o raio de ponta da ferramenta apresenta pouca influência na vida bem como na rugosidade da peça torneada. Isso pode ser observado porque a ferramenta CNMG WSM20 tem raio de ponta de 0,8 mm, diferente das demais que possuem raio de ponta de 1,2 mm. O posicionamento tanto em termos de rugosidade quanto de vida da ferramenta CNMG WSM20 é intermediário, daí poder-se concluir que essa característica não teve influência. A figura 4.1.3 mostra a microdureza das peças usinadas e dos cavacos.

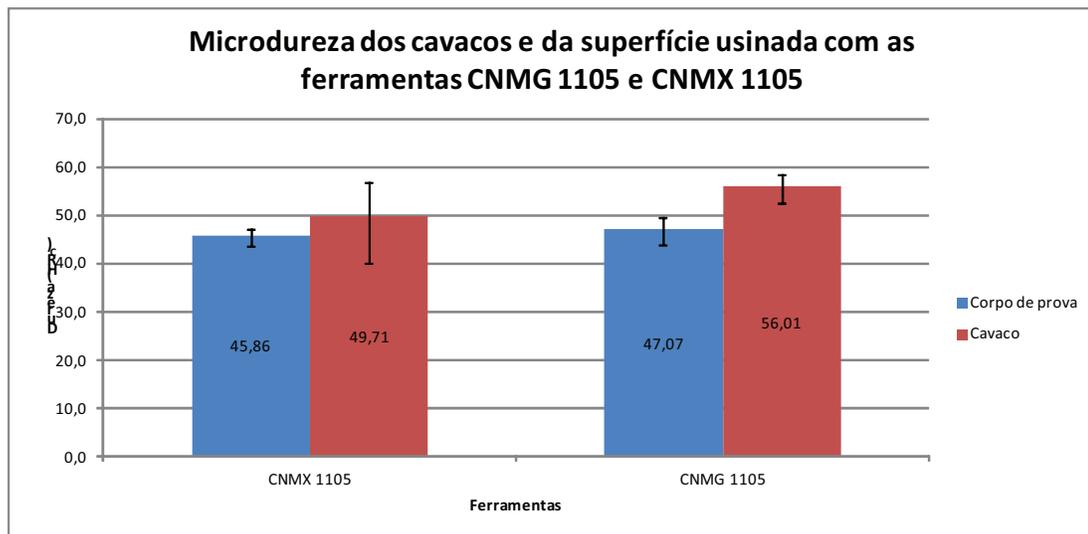


Figura 4.1.3: Microdureza dos cavacos e da superfície usinada com as ferramentas CNMX 12 04 A2 – SM 1105 e CNMG 12 04 12 – QM 1105

Na figura 4.1.3 pode-se observar que a dureza da superfície após a usinagem é praticamente a mesma, porém os cavacos removidos com a ferramenta CNMG 1105 apresentam dureza maior, indício de que encruou mais, devido ao maior grau de deformação. Essa maior dureza do cavaco provavelmente incorreu em maior taxa de desgaste, principalmente abrasivo da ferramenta.

Outro ponto que merece destaque é o raio de ponta e ângulo de posição da ferramenta. O fabricante de ferramentas alega que o ângulo de posição menor pastilhas CNMX (45°) proporciona um comprimento de contato maior, que por sua vez faz com que a espessura do cavaco seja menor, em relação ao da CNMG (95°). Isso faria com que os esforços de corte fossem suportados por um comprimento de aresta maior, gerando, portanto menor taxa de desgaste. A fim de se investigar essa alegação, foi feito um desenho em CAD com as dimensões reais das ferramentas e do processo envolvido. Esse desenho é apresentado na figura 4.1.4.

Nota-se na figura 4.1.4 que dada a baixa profundidade de corte utilizada (0,5 mm) a atuação das ferramentas ocorre basicamente em seu raio. Tanto o comprimento de contato quanto a área de contato teórica não apresentam diferenças significativas entre os cortes com as ferramentas CNMX e CNMG, portanto a alegação do fabricante de aumento do comprimento de contato não é válida no caso de baixas profundidades de corte. A diferença significativa pode ser

observada no raio de ponta, 1,0 mm para a CNMX versus 1,2 mm para a CNMG. Novamente, cortes que apresentam ferramentas mais agudas favorecem o desempenho.

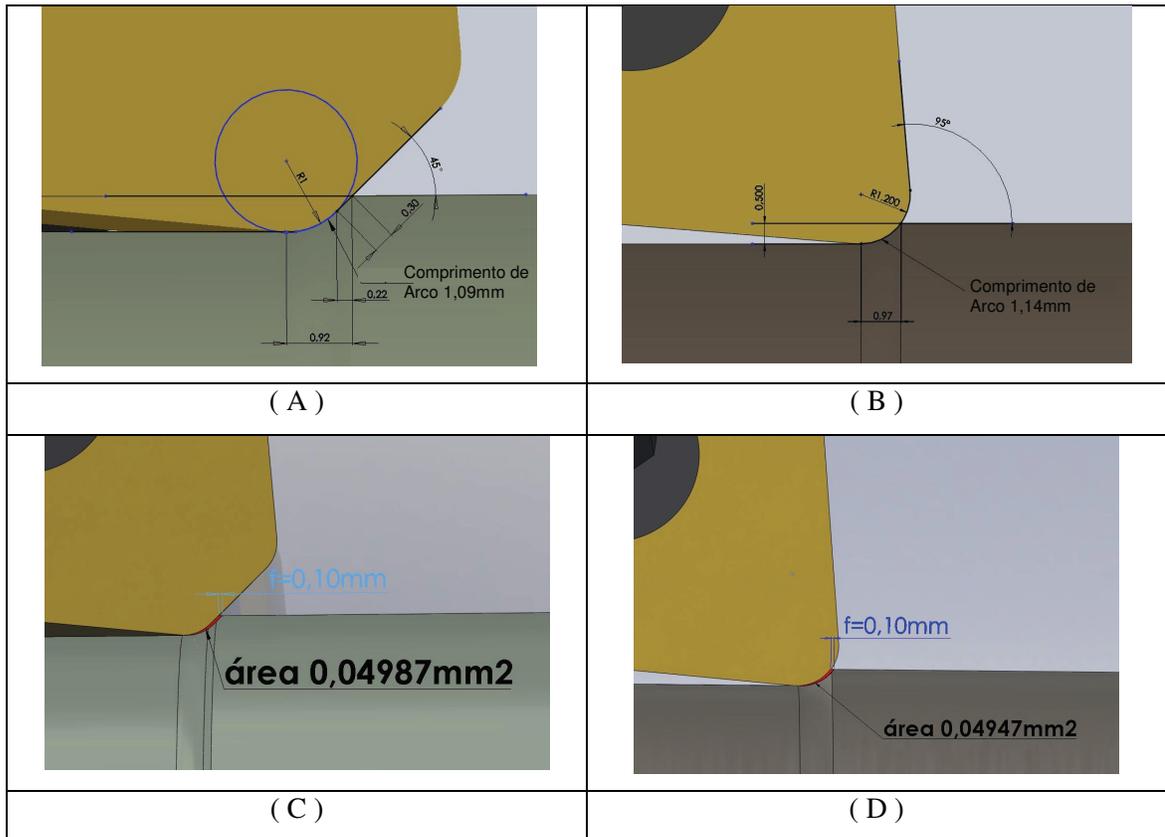


Figura 4.1.4: Desenho do contato teórico entre as ferramentas com geometria CNMX e CNMG com a peça

2) O revestimento de TiAlN PVD apresentou desempenho superior ao TiCN-Al₂O₃-TiN CVD (comparação entre as ferramentas CNMX 1105 e CNMX S05F). Isso confirma a literatura que menciona uma maior resistência à temperatura do primeiro revestimento. Além disso, a literatura também menciona que arestas mais agudas apresentam melhor desempenho na usinagem de superligas, esse é o caso do revestimento PVD em relação ao CVD. Para se comprovar qual fator influenciou de forma mais significativa esse desempenho seria necessário um teste com uma ferramenta com revestimento TiAlN CVD ou TiCN-Al₂O₃-TiN PVD que não foi possível pela inexistência comercial dessa ferramenta;

3) A comparação das diferentes classes e revestimentos (CNMG WSM20, 1105, 1005 e H13A) mostra que o desempenho foi, em ordem decrescente: Al_2O_3 , TiAlN, TiAlN-TiN e sem revestimento. Isso pode ser explicado pela resistência a altas temperaturas de cada revestimento. O Al_2O_3 apresenta maior resistência seguido dos demais mencionados. Além disso, o revestimento de TiN sobre o de TiAlN fez com que o primeiro degradasse a uma temperatura mais baixa, danificando a segunda camada mais facilmente. A ferramenta sem revestimento (CNMG H13A) apresentou a aresta mais afiada de todas, porém o efeito das elevadas temperaturas e abrasividade do material preponderou sobre a facilidade de corte;

4) Outra característica interessante dos ensaios realizados é que a geometria CNMX apresenta maior dispersão da vida, mesmo essa sendo maior nas duas classes testadas em relação às CNMG.

A figura 4.1.5 mostra a evolução do desgaste de flanco para todas as classes de metal duro testadas. Pode-se observar na figura 4.1.5 que, a menos da CNMX 1105, todas as ferramentas apresentaram comportamento similar, com crescimento relativamente constante ao longo dos ensaios. A diferença residiu na taxa com que esse crescimento ocorreu. A única ferramenta que apresentou bom desempenho teve taxas de crescimento diferentes e crescentes do desgaste ao longo dos ensaios. Se o critério de fim de vida adotado fosse o de desgaste de flanco igual a 0,3 mm, a ferramenta CNMX 1105 apresentaria uma vida de aproximadamente 15 min, o que continuaria aceitável para os padrões industriais.

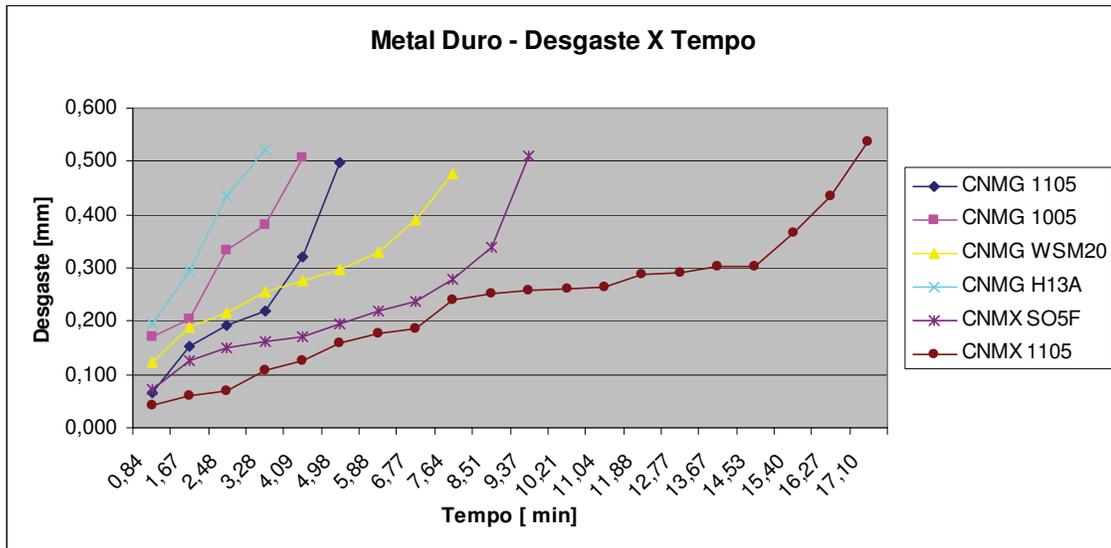


Figura 4.1.5 – Evolução do desgaste das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes

A figura 4.1.6 mostra a rugosidade média (Ra) medida nas peças torneadas ao longo dos ensaios. Alguns pontos merecem destaque. Inicialmente, nota-se que a faixa de rugosidade obtida foi bastante baixa, com valores comparáveis à obtida em processos de retificação. Além disso, não é possível identificar-se nenhuma tendência nos valores de rugosidade média com o desgaste da ferramenta, haja vista que em alguns casos ocorreu uma estabilização dos valores (CNMG 1105, CNMG 1005) em outros uma elevação (CNMX S05F, CNMG WSM20) e em um caso queda (CNMG H13A). Esse resultado pode ser considerado normal, dado o avanço e raio de ponta utilizado (0,10 mm/rev, 1,0 mm para CNMX e 1,2 mm para CNMG), e atribuído à característica da rugosidade, ou seja, oscilar em torno de um determinado valor. Vale ressaltar que a rugosidade média teórica para as condições e ferramentas utilizadas varia entre 0,27 μm (CNMX) e 0,32 μm (CNMX), isso indica que houve outras fontes geradoras de rugosidade, além da geometria, atuando. Outro ponto que vale a pena mencionar é que a medição ocorre em pontos localizados, que variam entre as medidas e mesmo tais medidas são bastante sensíveis à variações instantâneas do processo.

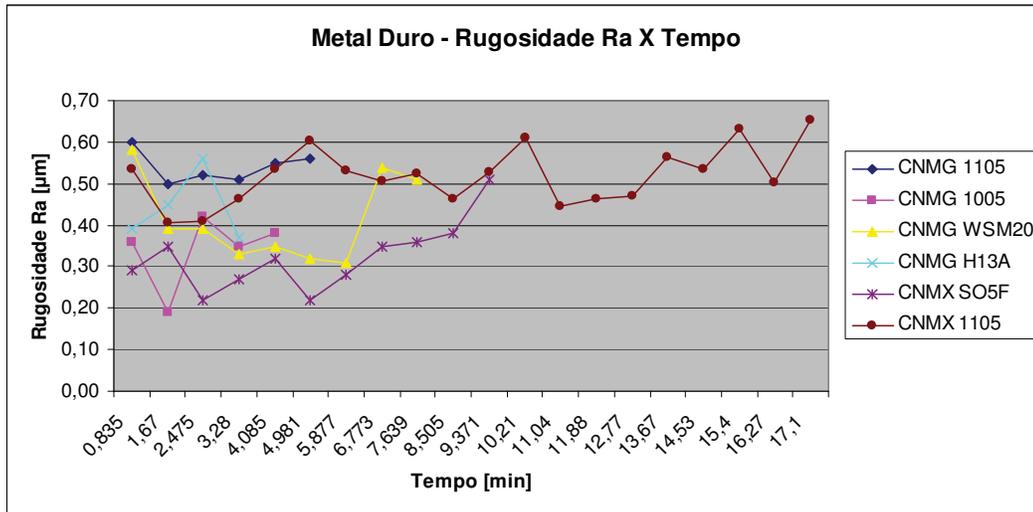


Figura 4.1.6 – Evolução do sinal de potência de corte das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes

Das figuras 4.1.5 e 4.1.6 pode-se afirmar que a vida da ferramenta foi determinada pelo desgaste da mesma, não pela rugosidade da peça. Aliás, provavelmente, dentro das condições ensaiadas a ferramenta poderia ser utilizada por mais tempo, já que a faixa de rugosidade estava baixa e sem tendência de crescimento, na maioria dos casos. Logicamente, nesse caso, poderia ocorrer avarias nas ferramentas, em função do desgaste excessivo.

A figura 4.1.7 mostra a potência de corte relativa aos ensaios com ferramentas de metal duro.

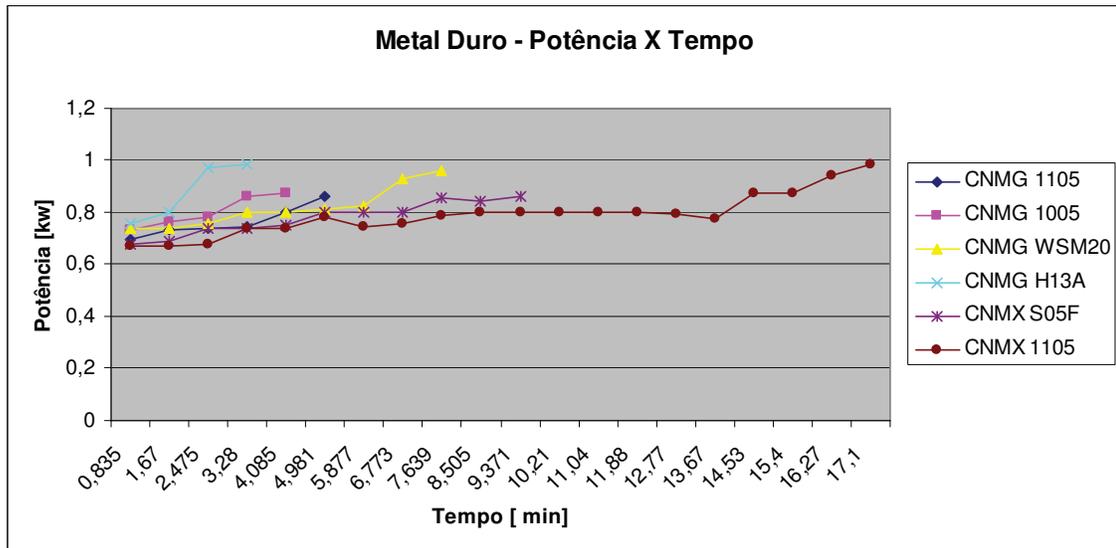


Figura 4.1.7 – Evolução do sinal de potência de corte das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias e classes

Observando-se a figura 4.1.7 nota-se que o sinal de potência de corte apresenta tendência de crescimento ao longo de todos os ensaios. Esse fato é similar ao mostrado na figura 4.1.5 referente ao comportamento da rugosidade das peças usinadas. Isso sugere que os esforços de corte tendem a aumentar com o desgaste da ferramenta que por sua vez danifica a superfície usinada. Por outro lado, a rugosidade das peças próximo ao fim de vida das ferramentas (3 últimos pontos de cada curva na figura 4.1.5) apresenta um crescimento significativo, diferente do sinal de potência onde, em vários casos, ocorre um patamar estável nos 2 últimos pontos. Assim, recomenda-se o sinal de potência para compor um sistema de monitoramento com outros sinais, utilizando técnicas de fusão de sinais. Pois a tendência de crescimento pode auxiliar na detecção do desgaste das ferramentas, mas é necessário um refinamento para tratar, principalmente o período de tempo próximo ao final de vida da ferramenta.

4.2 - Avaliação dos tipos de desgaste apresentados pelas ferramentas de metal duro

No item anterior foi feita uma análise comparativa de desempenho das ferramentas de metal duro com diferentes geometrias, revestimentos e classes. Nesse item será feito uma análise dos tipos de desgaste apresentados pelas ferramentas de metal duro e algumas suposições a respeito dos mecanismos que atuaram.

A figura 4.2.1 mostra a ferramenta CNMG 1105 e detalhes da área desgastada em imagens obtidas por MEV.

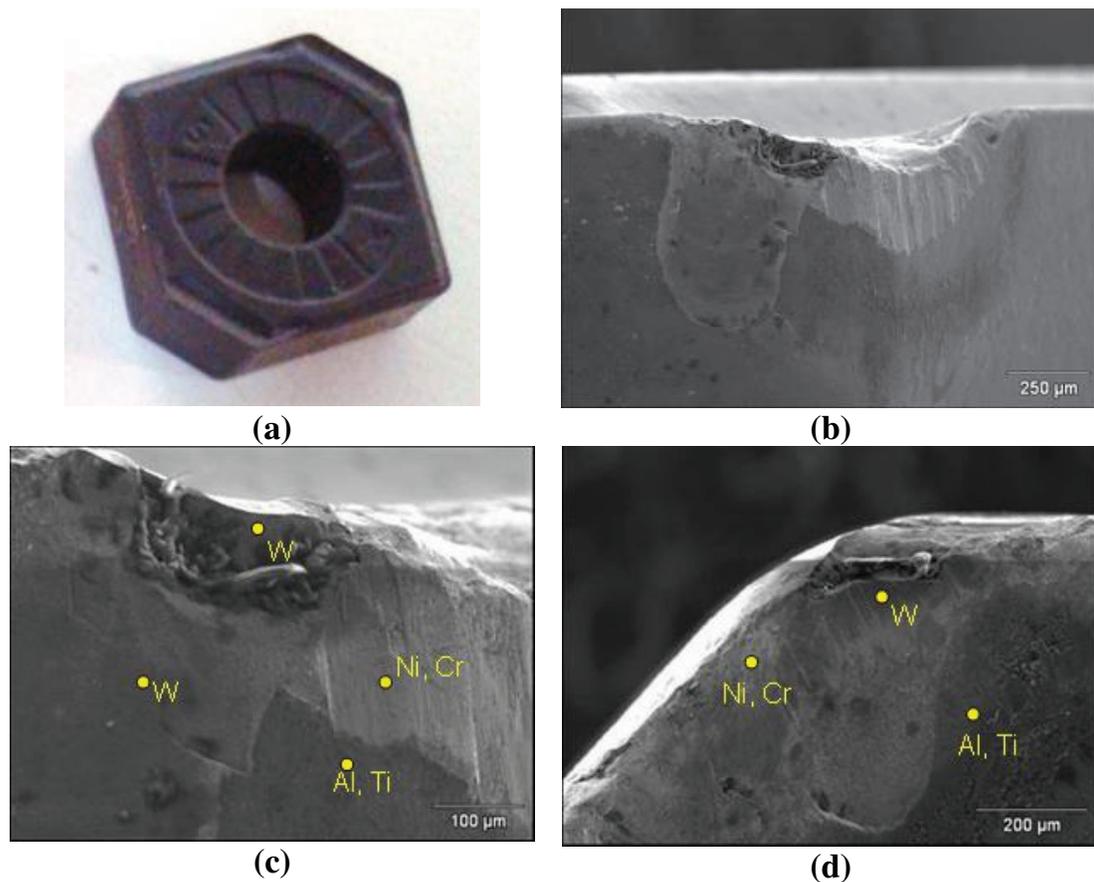


Figura 4.2.1: (a) Imagem da ferramenta – CNMX 12 04 A2 – SM 1105, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

Na figura 4.2.1 observa-se que a ponta da ferramenta está bastante avariada. Na figura 4.2.1 b nota-se que o desgaste é mais pronunciado na aresta numa posição distante da ponta. Nessa mesma figura nota-se que a ponta está avariada e não desgastada. Na figura 4.2.1 c, que é uma ampliação da figura 4.2.1 b, nota-se que no flanco da ferramenta ocorreu a adesão de material da peça e na ponta, como mencionado, está exposto o substrato, caracterizando uma avaria. Na figura 4.2.1 d é mostrada a superfície de saída da ferramenta com material da peça aderido e porções do substrato expostas. Isso vai de encontro à teoria que menciona o severo desgaste em função das elevadas temperaturas e esforços sobre a aresta da ferramenta, bem como a localização dessa maior carga muito próximo à aresta de corte.

A figura 4.2.2 mostra imagens da ferramenta CNMG 1105 após o fim de vida da ferramenta.

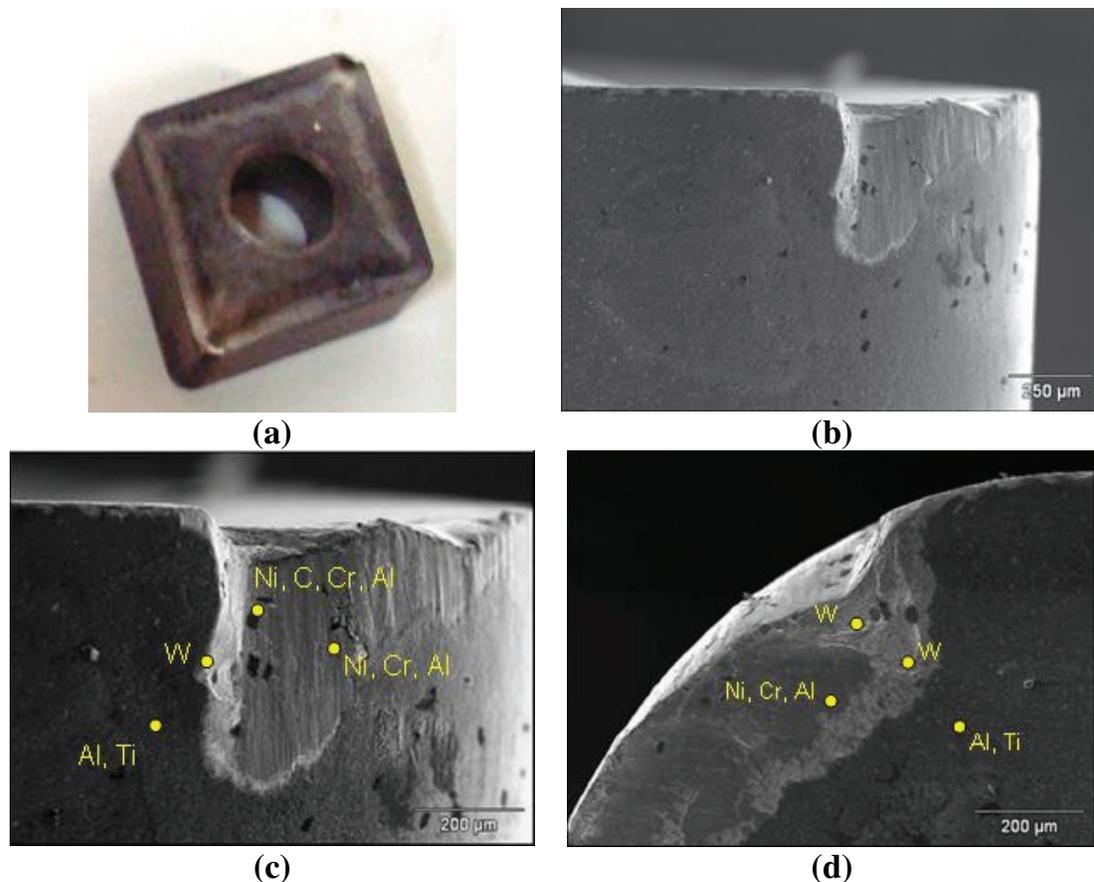


Figura 4.2.2: (a) Imagem da ferramenta – CNMG 12 04 12 - QM 1105, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

Na figura 4.2.2 nota-se apenas a presença de entalhe. Comparando-se as figuras 4.2.1 e 4.2.2, observando-se as diferenças entre as 2 geometrias é possível supor que a ferramenta CNMX, por ser menos robusta (ângulo de saída maior e raio de ponta menor), resistiu menos ao aumento de esforços de corte, gerados pelo desgaste da ferramenta e sofreu avaria. Por outro lado, a ferramenta CNMG, por apresentar uma geometria mais negativa, tanto em termos de ângulo de saída quanto de raio de ponta, resistiu aos maiores esforços, porém teve uma taxa de desgaste mais acentuada. O aspecto da ferramenta CNMG 1105 desgastada foi similar ao da CNMG 1105, a menos da avaria, a saber, grande quantidade de material aderido à superfície tanto de folga quanto de saída, desgaste de entalhe e parcelas do substrato expostas. Desgaste de entalhe e bem próximo da aresta de corte. Típico de usinagem de superligas.

A figura 4.2.3 mostra a ferramenta CNMX S05F, cujo revestimento é composto por tripla camada (TiCN-Al₂O₃-TiN). Novamente, observando-se a figura 4.2.3 nota-se que o desgaste é do tipo entalhe bem característico sem avaria na aresta. Vale lembrar que a vida dessa ferramenta foi de aproximadamente 8 min, quase metade da vida da ferramenta CNMX 1105 (em torno de 15 min). Isso mostra que a taxa de desgaste foi bem mais acentuada, provavelmente porque o TiN resiste a temperaturas menores do que o TiAlN. A camada intermediária de revestimento é o Al₂O₃, bastante resistente à temperatura, porém como a primeira camada se degrada, a segunda é atingida de forma mais severa, já que existe adesão entre as camadas. O mecanismo de desgaste é similar ao das demais ferramentas, adesão seguida de lascamento, próximo à aresta de corte. Vale reparar que na superfície de saída, parte da camada intermediária está exposta.

As demais ferramentas de metal duro testadas apresentaram comportamento similar ao das figuras 4.2.1 a 4.2.3. Por economia de espaço essas figuras serão apresentadas no anexo e os comentários referentes a ele são similares aos feitos até aqui no item de desgaste das ferramentas.

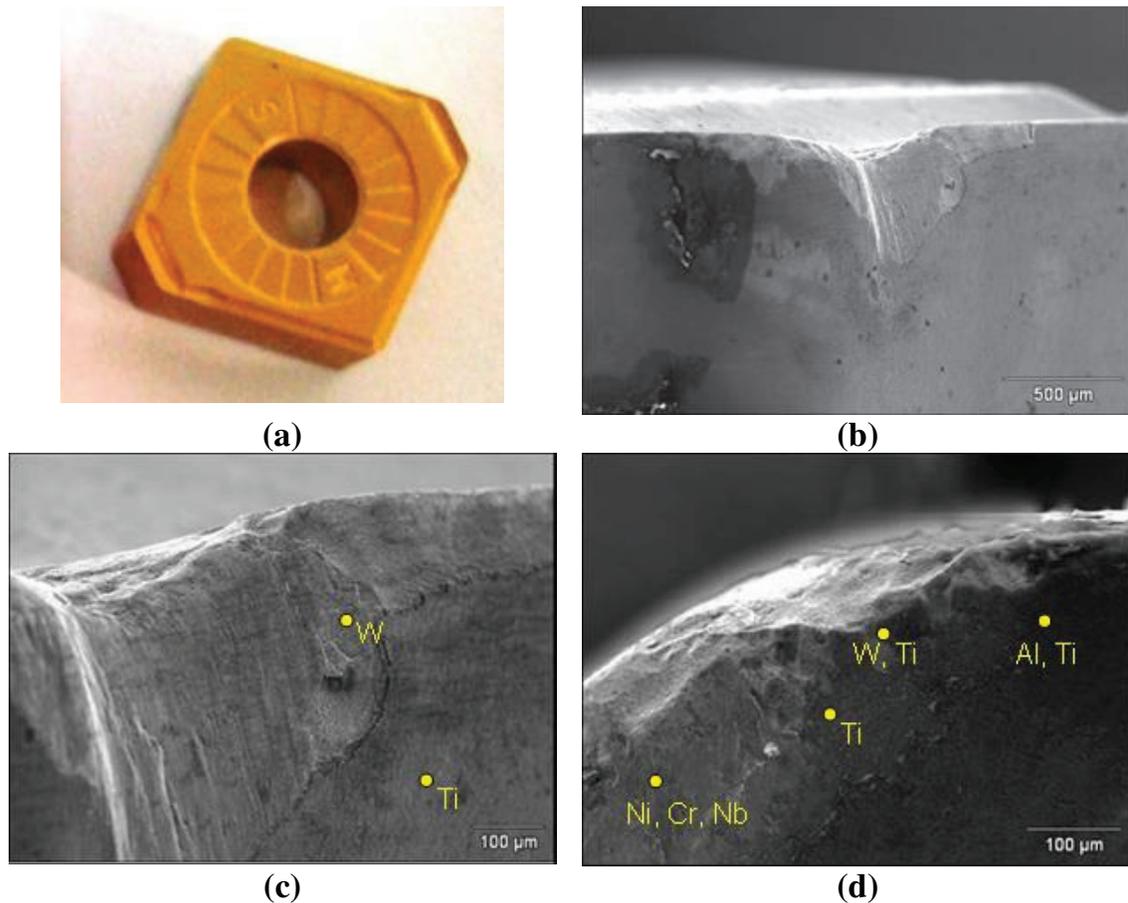


Figura 4.2.3: (a) Imagem da ferramenta – CNMX 12 04 A2 - SM S05F, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

A figura 4.2.4 mostra os cavacos removidos pela ferramenta CNMX 1105. Nota-se a presença de uma rebarba nos cavacos. Esse fato, somado ao alto encruamento do material reforça a tendência de desgaste de entalhe, pois forma-se uma camada de alta dureza na posição em que se situa a profundidade de corte na aresta. Além disso, vale lembrar que as temperaturas são bastante elevadas, o que contribui com o fenômeno da oxidação.



Figura 4.2.4: Ferramenta CNMX 12 04 A2 – SM 1105 v_c : 40m/min, f:0,10mm/volta, a_p :0,5mm

4.3 - Resultados de vida das ferramentas cerâmicas e de CBN

A figura 4.3.1 apresenta os resultados de vida das ferramentas cerâmicas e de CBN testadas. A princípio, baseado na revisão bibliográfica, imaginou-se que essas ferramentas teriam bom desempenho, haja vista que são resistentes ao calor e possuem elevada dureza. Como pode ser observado na figura 4.3.1 o desempenho foi bastante ruim, provavelmente em função da geometria da ferramenta e da aresta.

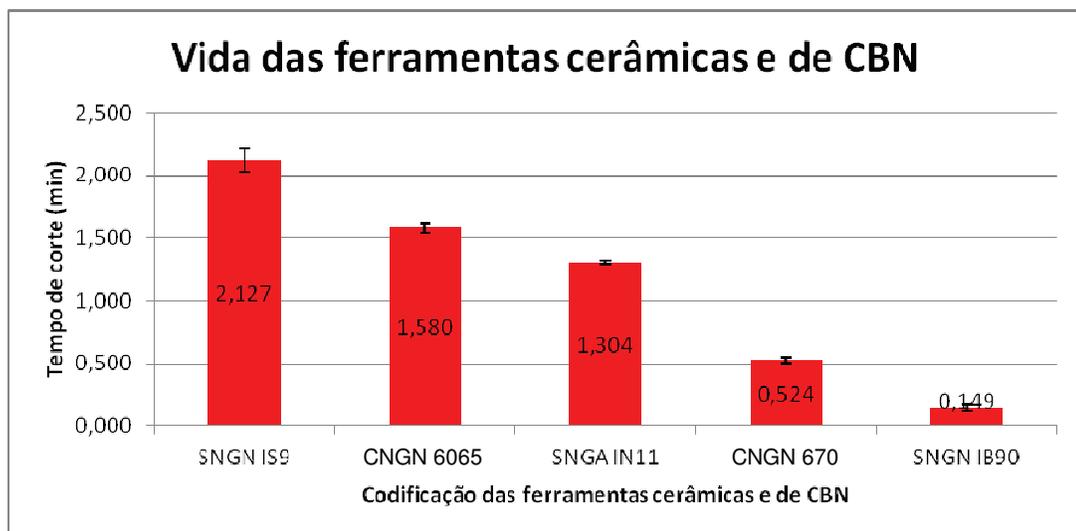


Figura 4.3.1 – Vida das ferramentas cerâmicas e de CBN

Analogamente à figura 4.1.1, na figura 4.3.1 pode-se observar diferentes aspectos, a saber:

1) As ferramentas cerâmicas e de CBN apresentaram baixa dispersão de resultados de vida da ferramenta de corte. Essa característica é interessante já que por ter uma fragilidade maior que o metal duro esperava-se uma dispersão maior, com apresentação de avarias;

2) Dentre as ferramentas cerâmicas, as a base de Si_3N_4 , mais tenazes, apresentaram melhor desempenho, seguidas pela de Al_2O_3 e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$. Aparentemente, ferramentas mais tenazes resistem melhor ao corte do Inconel 713C. Além disso, raios de ponta maiores parecem ter melhor rendimento, pois a ferramenta IS 9 tem raio de ponta de 1,6 mm e apresentou vida maior do que a 6065, que também é à base de Si_3N_4 e possui raio de ponta de 1,2 mm. Por outro lado, a ferramenta IN 11 (à base de Al_2O_3) possui raio de ponta de 1,6 mm, maior do que a da 6065 e mesmo assim apresentou menor vida;

3) Um ângulo de posição menor (IS9 – 75°) melhorou o desempenho da ferramenta em relação a um maior (6065 – 95°);

4) Foram feitos ensaios preliminares com velocidades mais altas, mas o melhor resultado em termos de vida foi com v_c igual a 70 m/min.

Para observação da geometria da aresta foram cortadas várias pastilhas cerâmicas. Na figura 4.3.2 é mostrado um exemplo com geometria típica das ferramentas cerâmicas. Cabe mencionar que o corte das ferramentas cerâmicas é mais complexo devido à fragilidade do material, que acaba lascando.

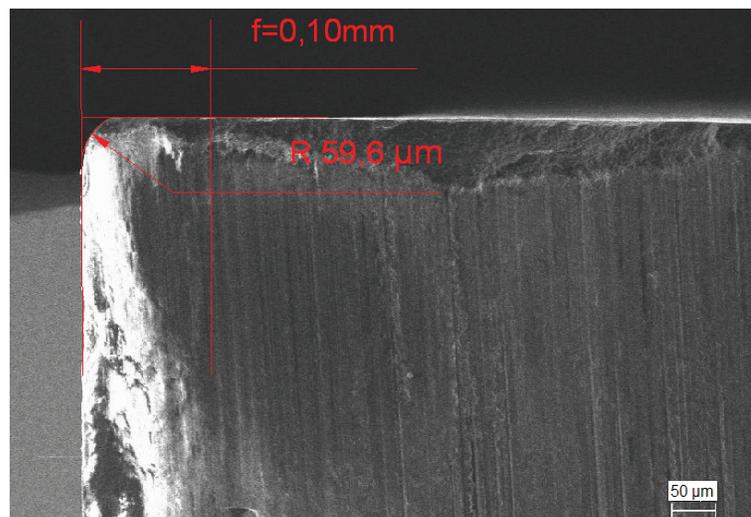


Figura 4.3.2: Ferramenta SNGN 12 04 16E IS9

Analisando-se a figura 4.3.2 nota-se que o raio de aresta da ferramenta cerâmica IS9 é, como esperado, maior (0,06 mm) do que o das ferramentas de metal duro (0,044 mm o maior raio). Além disso, nota-se a ausência de ângulo de saída. Isso ocorre para tentar-se aumentar a robustez da ferramenta, já que seu material é mais frágil que o metal duro.

Similar ao que ocorreu com as ferramentas de metal duro, essa fase plana e ângulo de saída neutro, bem como o maior raio de aresta tende a deformar e encruar bastante o cavaco. Além disso, nota-se uma fase plana na ferramenta CNMG 1105 que praticamente inexiste na ferramenta CNMX 1105. Essa fase plana deforma muito mais o material durante a formação de cavaco. A figura 4.3.3 mostra a microdureza das peças usinadas e dos cavacos.

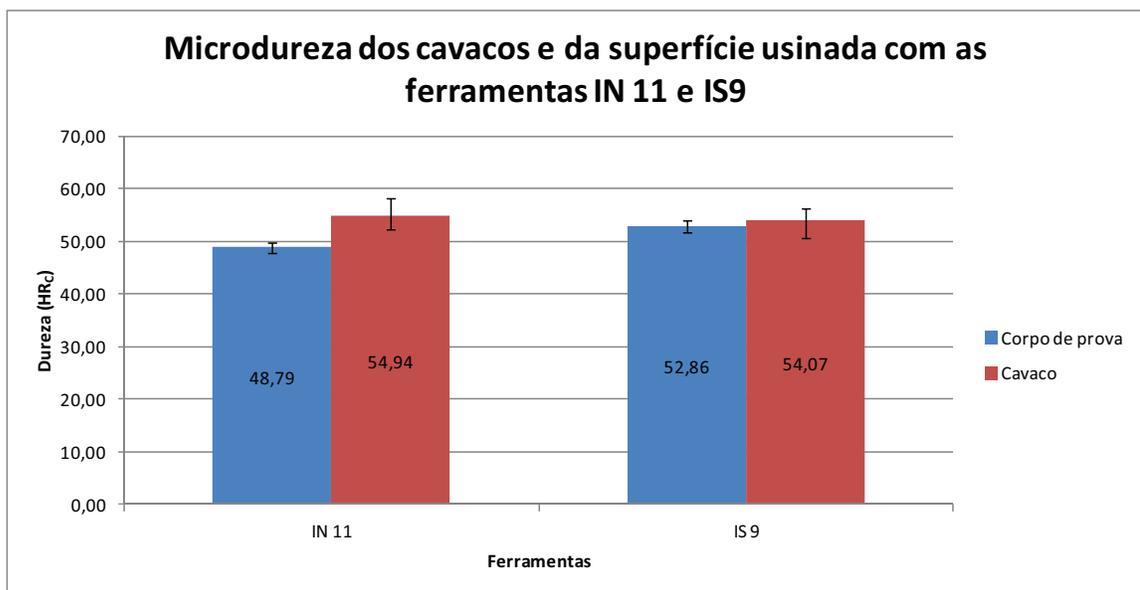


Figura 4.3.3: Microdureza dos cavacos e da superfície usinada com as ferramentas IN 11 e IS 9

Na figura 4.3.3 pode-se observar que a dureza da superfície após a usinagem é similar tanto entre si quanto em relação às superfícies usinadas com metal duro, porém os cavacos removidos apresentaram durezas maiores, provavelmente devido ao encruamento que tem relação com o grau de deformação. Essa maior dureza do cavaco provavelmente incorreu em maior taxa de desgaste, principalmente abrasivo da ferramenta. Lembrando que na figura 4.3.1 observa-se maior vida da ferramenta IS 9.

A figura 4.3.4 mostra a progressão do desgaste de flanco para as ferramentas cerâmicas e de CBN. Nota-se que as ferramentas IS 9 e 6065, ambas a base de Si_3N_4 , apresentaram desgaste progressivo. Vale lembrar que as cerâmicas à base de Si_3N_4 são consideradas as mais tenazes dentre as cerâmicas. As demais apresentaram taxa de desgaste tão elevada que não foi possível sequer avaliar a progressão do desgaste.

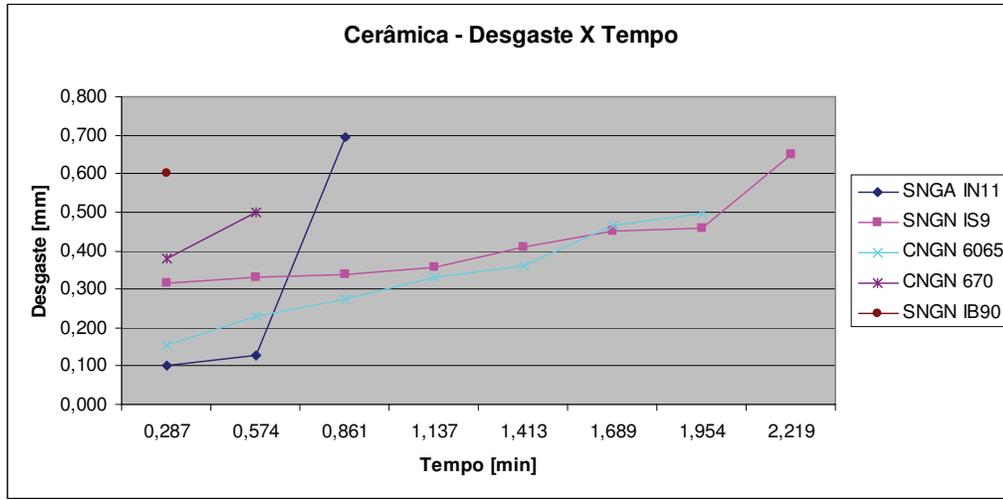


Figura 4.3.4 – Evolução do desgaste das ferramentas cerâmicas e de CBN

A figura 4.3.5 apresenta a evolução da rugosidade média (Ra) ao longo dos ensaios.

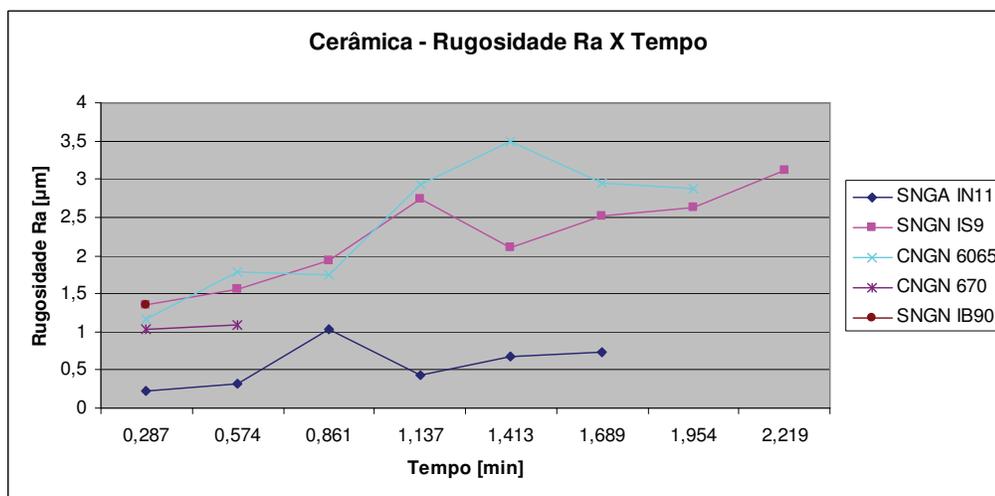


Figura 4.3.5: Rugosidade média (Ra) x Tempo – ferramentas cerâmicas e de CBN

Na figura 4.3.5 nota-se que a rugosidade média obtida nos ensaios com ferramentas cerâmicas foi bem maior do que aquelas com ferramentas de metal duro. Provavelmente as maiores velocidades de corte, que implica em maior calor, aliada à ausência de fluido de corte, fez com que a temperatura na região de corte no torneamento com ferramentas cerâmicas tenha sido bem mais elevada. Isso contribuiu para a maior rugosidade da peça. Além disso, o raio de aresta das ferramentas cerâmicas eram maiores, o que deve ter gerado maior deformação do material usinado, maiores esforços e provavelmente maior vibração do processo, já que a rigidez do sistema não foi alterada.

A figura 4.3.6 mostra a potência de corte ao longo dos ensaios realizados com ferramentas cerâmicas e de CBN.

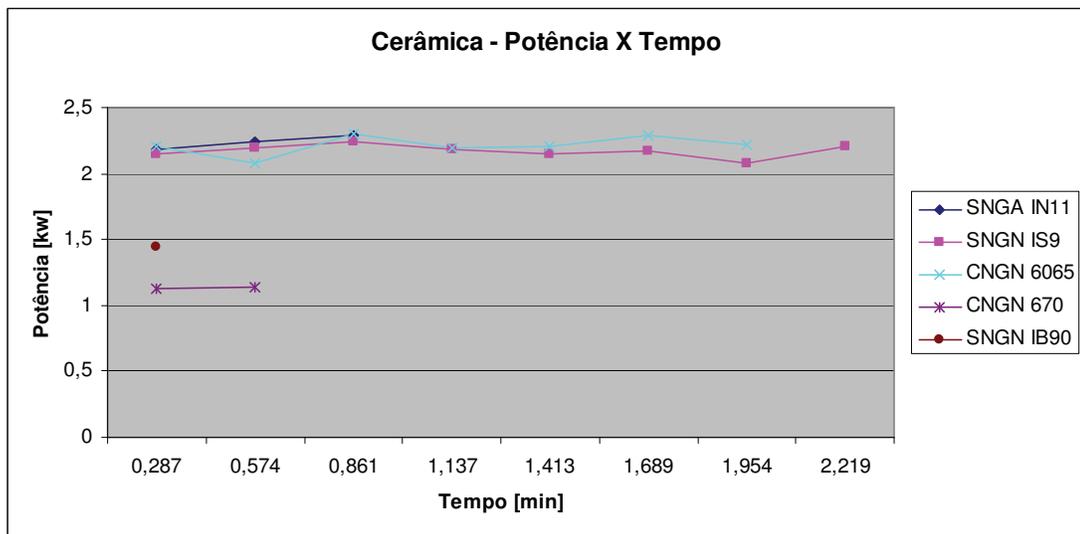


Figura 4.3.6: Potência x Tempo – ferramentas cerâmicas

Na figura 4.3.6 observa-se que a potência de corte na usinagem com ferramentas cerâmicas e CBN foi maior do que a consumida no torneamento com metal duro. Vale lembrar que as velocidades de corte foram maiores, o que consome mais potência. Nota-se que a potência praticamente não variou com o desgaste da ferramenta.

4.4 - Avaliação dos tipos de desgaste apresentados pelas ferramentas cerâmicas e de CBN

No item anterior foi feita uma análise comparativa de desempenho das ferramentas cerâmicas e de CBN. Nesse item será feito uma análise dos tipos de desgaste apresentados por essas ferramentas e algumas suposições a respeito dos mecanismos que atuaram.

A figura 4.4.1 mostra a ferramenta SNGN IS 9 e detalhes da área desgastada em imagens obtidas por MEV.

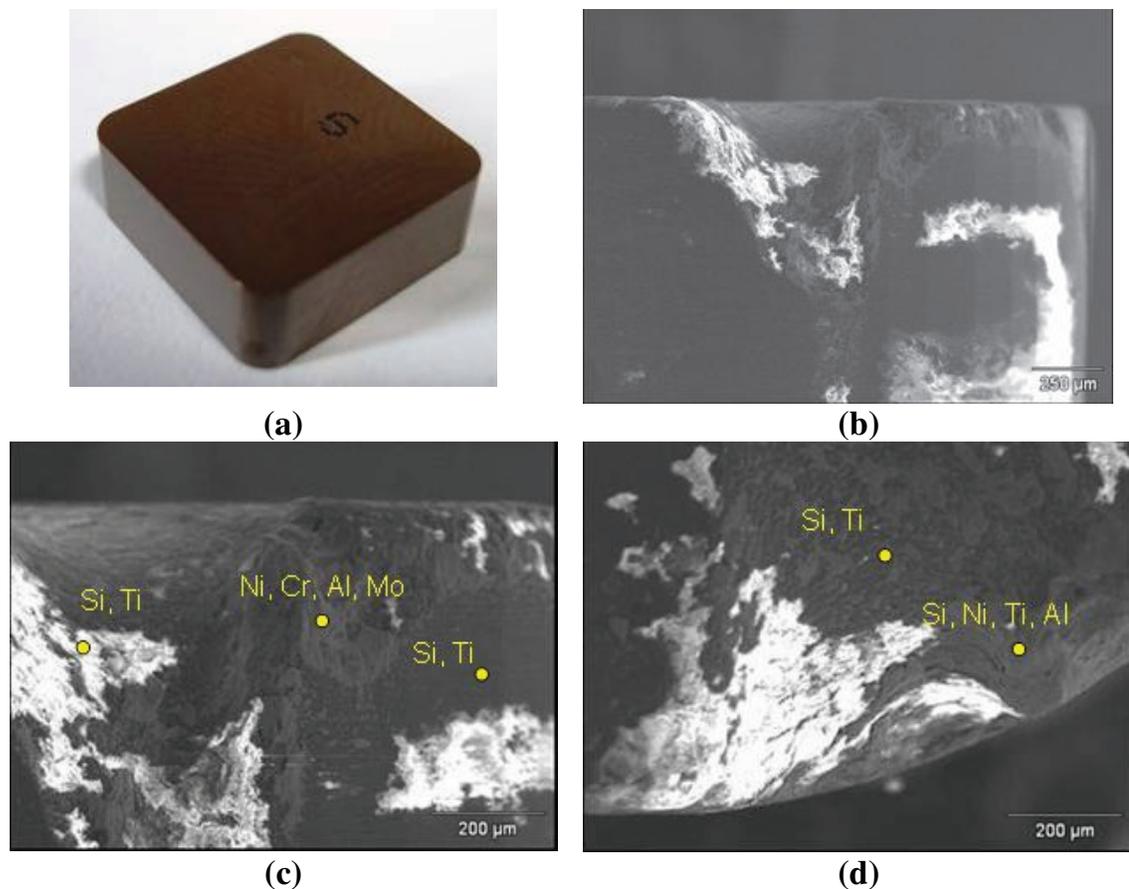


Figura 4.4.1: (a) Imagem da ferramenta – SNGN 12 04 16E IS9 ($a_p = 0,5\text{mm}$ $f = 0,15\text{mm/volta}$), (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

Nota-se na figura 4.4.1 que o desgaste pode ser, da mesma forma que nas ferramentas de metal duro, considerado de entalhe. Tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída é encontrado material aderido e substrato exposto.

A figura 4.4.2 mostra a ferramenta CNGN 6065, que apresentou o segundo melhor desempenho dentre as ferramentas testadas.

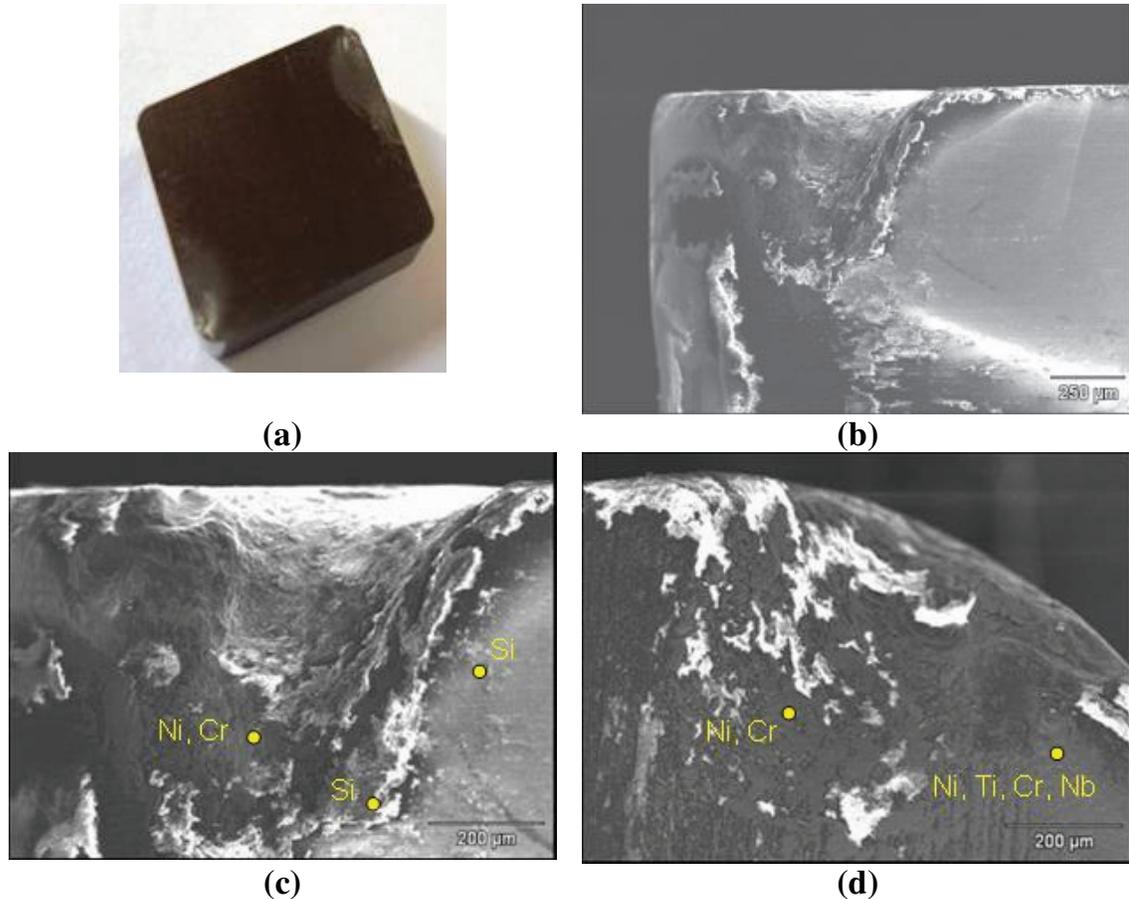


Figura 4.4.2: (a) Imagem da ferramenta – CNGN 12 04 12E 6065 ($a_p = 0,5\text{mm}$ $f = 0,15\text{mm/volta}$), (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

Na figura 4.4.2 observa-se a aparência da ferramenta CNGN 6065 desgastada é similar à da SNGN IS 9, com material aderido tanto na superfície de folga quanto de saída e substrato exposto. A diferença entre as duas ferramentas foi a taxa de desgaste, maior para a CNGN 6065. O desgaste também pode ser considerado de entalhe.

A figura 4.4.3 mostra imagens da ferramenta SNGA IN11 após o fim de vida da ferramenta.

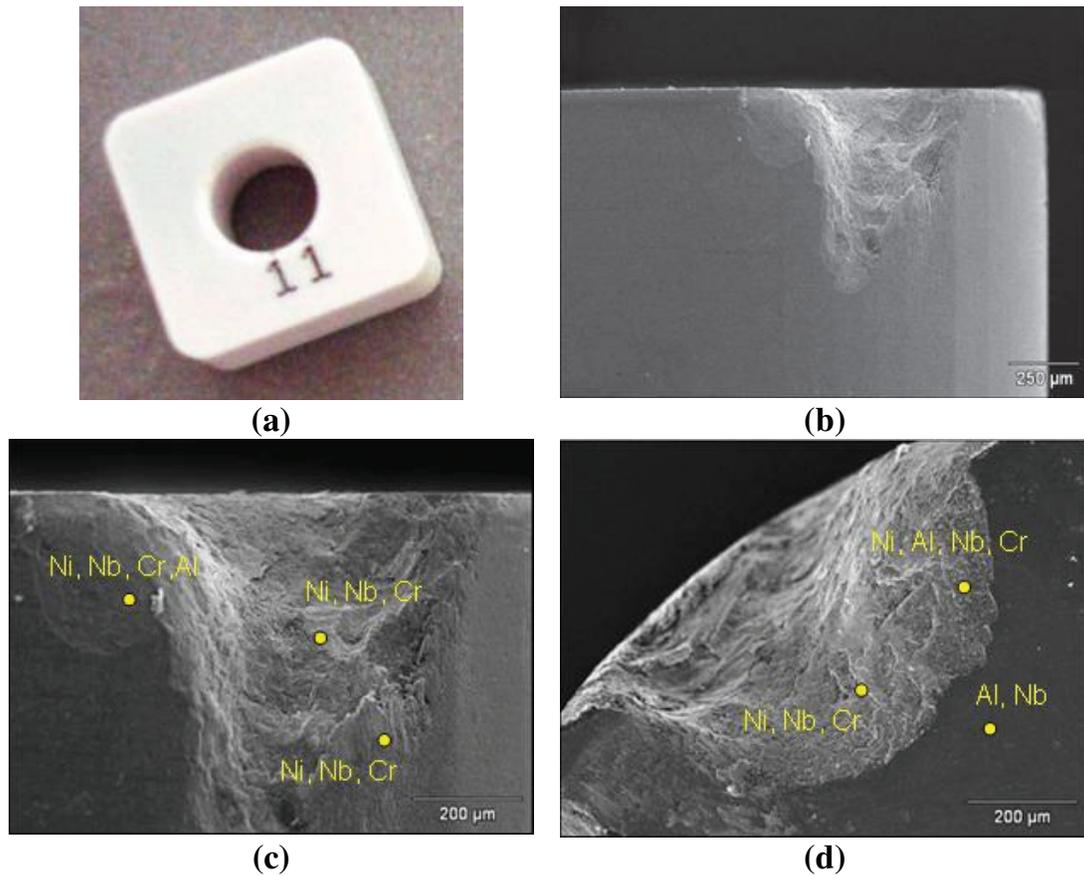


Figura 4.4.3: (a) Imagem da ferramenta – SNGA 12 04 16E IN11 ($a_p = 0,3\text{mm}$ $f = 0,10\text{mm/volta}$), (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

Na figura 4.4.3 pode-se observar que novamente a aparência é similar e existe material aderido tanto na superfície de folga quanto de saída. Porém, no caso da ferramenta IN 11, à base de Al_2O_3 , o desgaste de entalhe se apresenta melhor definido, provavelmente devido à maior dureza dessa cerâmica.

A figura 4.4.4 apresenta a ferramenta de CBN após o fim de vida.

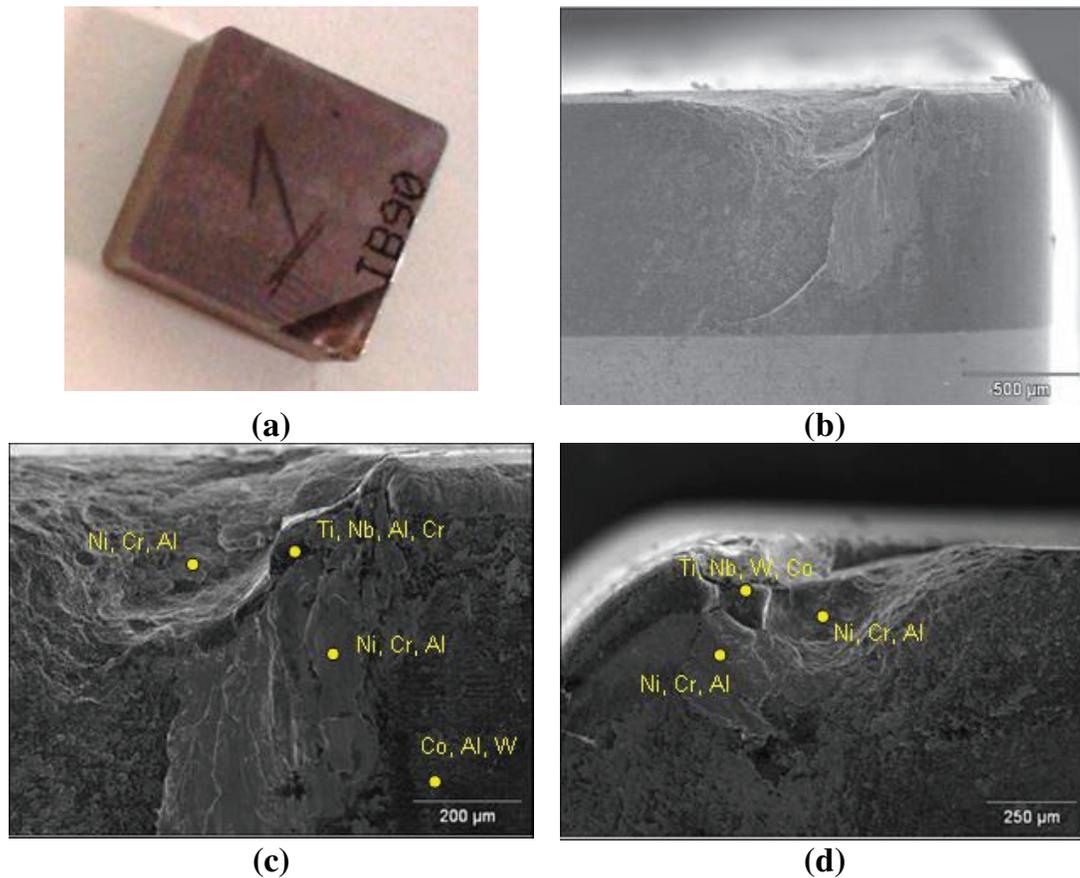


Figura 4.4.4: (a) Imagem da ferramenta - SNGN 12 04 08T IB90, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

A ferramenta de CBN apresentou desempenho bastante ruim, a despeito de sua maior dureza. Nota-se na figura 4.4.4 que o aspecto é similar à figura 4.4.2: material aderido na superfície de saída e de folga e porções de substrato exposto.

Os resultados obtidos com ferramentas cerâmicas e de CBN não foram bons, daí estarem sendo menos explorados. Vale lembrar que tanto a entrada quanto a saída do corte foram chanfradas para diminuir o impacto da entrada e o alívio súbito dos esforços atuantes na ferramenta.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentro das condições de corte utilizadas nos ensaios pode-se concluir que:

- 1) A ferramenta CNMX 1105 apresentou o melhor desempenho dentre as ferramentas testadas. Aliás, do ponto de vista econômico foi a única que apresentou desempenho aceitável;
- 2) A geometria da ferramenta, da aresta e o revestimento influenciam o desempenho da mesma no torneamento do Inconel 713C. Ângulos de saída positivos somados a um maior raio de aresta, revestimento mais resistente a temperaturas elevadas e menor raio de ponta melhoram o desempenho da ferramenta no torneamento do Inconel 713C;
- 3) O Inconel 713C sofre encruamento significativo durante a usinagem, fato que afeta a taxa de desgaste da ferramenta no torneamento;
- 4) O ângulo de posição não teve influência no desempenho da ferramenta, já que a profundidade de corte utilizada foi baixa e o corte se deu basicamente com o raio de ponta;
- 5) O revestimento de TiAlN PVD apresentou desempenho superior ao TiCN-Al₂O₃-TiN CVD;
- 6) O revestimento da ferramenta teve influência no desempenho da mesma e relação direta com a temperatura em que o mesmo se degrada;
- 7) O desgaste se dá de forma gradativo no torneamento do Inconel 713C com ferramentas de metal duro;
- 8) Com ferramentas de metal duro a rugosidade média (Ra) medida nas peças torneadas ao longo dos ensaios foi bastante baixa, com valores comparáveis à obtida em processos de retificação;
- 9) Não foi possível identificar-se nenhuma tendência nos valores de rugosidade média com o desgaste da ferramenta;
- 10) A vida das ferramentas de metal duro foi determinada pelo desgaste das mesmas, não pela rugosidade da peça;
- 11) No torneamento com ferramentas de metal duro o sinal de potência de corte apresenta tendência de crescimento ao longo de todos os ensaios. Assim, recomenda-se o sinal de

potência para compor um sistema de monitoramento com outros sinais, utilizando técnicas de fusão de sinais;

12) Todas as ferramentas de metal duro apresentaram desgaste mais pronunciado na aresta numa posição distante da ponta, desgaste de entalhe. Em todos os ensaios ocorreu adesão de material da peça e na ponta, com posterior exposição do substrato. A superfície de saída da ferramenta também apresentou material da peça aderido e porções do substrato expostas;

13) Tanto as ferramentas cerâmicas quanto as de CBN apresentaram desempenho ruim no torneamento do Inconel 713C;

14) Dentre as ferramentas cerâmicas, as a base de Si_3N_4 , mais tenazes, apresentaram melhor desempenho, seguidas pela de Al_2O_3 e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$;

15) O desgaste das ferramentas cerâmicas e de CBN também foi de entalhe e tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída foi encontrado material aderido e substrato exposto;

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

16) Utilizar ferramentas cerâmicas no torneamento longitudinal externo do Inconel 713C com fluído de corte;

17) Empregar velocidades de corte maiores para ferramentas cerâmicas com um sistema mais rígido;

18) Utilizar ferramentas de metal duro com a combinação do revestimento de Al_2O_3 e geometria CNMX, hoje ainda não disponível no mercado.

19) Explorar a empregabilidade das ferramentas de CBN no torneamento longitudinal externo de superliga a base de níquel.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, P. **New developments in the theory of the metal-cutting process** *Patl Transactions of the Asme.* 348p. 1960 *Apud* BIERMANN, D.; WEINERT, K.; TERWEY, I.; DENKENA, B.; HAUBROCK, J. Comportamento de ferramentas complexas com arestas de corte preparadas **Máquinas e Metais**, v. 47 (546), p 34-45, 2011.

ANTONIALLI, A. Í. S. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V.** 2009. 137p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

AZEVEDO, C.R. F., MOREIRA, M. F., HIPPERT Jr, E. Superligas à base de Níquel (Inconel 713C) **Instituto de Pesquisa Tecnológicas**, publicação IPT 2767. São Paulo, 2001.

BARBOSA, L. M.; SANTOS, F. M. F. Influência da geometria de corte na rebarba do aço ABNT 1008. **Máquinas e Metais**, v 47 (538), p 122 – 131, 2010.

BIERMANN, D.; WEINERT, K.; TERWEY, I.; DENKENA, B.; HAUBROCK, J. Comportamento de ferramentas complexas com arestas de corte preparadas **Máquinas e Metais**, v. 47 (546), p 34-45, 2011.

CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. Machinability of nickel-base alloys: a general review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, p 278 – 284, 1998

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 5 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 254 p.

DINIZ, A. E., NORITOMI, P. Y. Influência dos parâmetros de corte na rugosidade. **Máquinas e Metais.** São Paulo, v. 35 (391), p. 92 - 101, 1998.

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, p 681-688, Jan. 2003

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J. Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. **Jornal of Materials Processing Technology**, v.153-154, p. 145 – 1050, 2004.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of eroengine alloys. **Jornal of Materials Processing Technology**, v.134,(2), p. 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 jan. /mar. 2004

EZUGWU, E. O., WANG, Z. M. Performance of PVD and CVD coated tools when machining nickel-based, Inconel 718 alloy, in N Narutaki, et al. (Eds), **Progress of Cutting and Grinding**, vol 111, 1996, pp 102-107 *apud* EZUGWU, E. O., WANG, Z. M., MACHADO, A. R., The Machinability of Nickel-Based Alloys: A Review. **Journal of Materials Processing Technology**, 86, p. 1–16, 1999.

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

FARIA, J. C. **Estudo da usinagem em torneamento da superliga a base de níquel Nimonic 80A**. 2007. 89p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

FERRARESI , D **Fundamentos da Usinagem dos Metais** Ed. Edgard Blucher Ltda - 9º reimpressão – 1995

HOGMARK, S.; JACOBSSON, S.;LARSSON, M. Design and evaluation in tribological coatings. **Wear**, v 246, p. 20 – 33, 2000.

ISCAR. **Ferramentas para Torneamento**. Vinhedo, 2004. 520 p.

JINDAL, P. C.; SANTHANAM, A. T.; SCHLEINKOFER, U.; SHUSTER, A. F. Performance of PVD TiN, TiCN and TiAlN coated cemented carbide tools in turning. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials** v 17, n 1-3, p 163-170, 1999.

KOVACEVIC, R.; CHERUKUTHOTA, C.; MAZURKIEWICZ, M. High pressure waterjet cooling lubrication to improve machining efficiency in milling. **J. Mach. Tools Manufact.** Vol. 35, No. 10, pp. 1459-1473, 1995

LI, X.S. E LOW, I.M. Cutting Forces of Ceramic Cutting Tools, **Key Engineering Materials, Trans Tech Publications**, Switzerland, Vol. 96, pp. 81-136, 1994.

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.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte. **Máquinas e Metais**. v. 37 (419), p. 134 – 151, 2000.

MARQUES, D. C. **Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni**. 2007. 113p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

METALS HANDBOOK – Volume 1 - **Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys**. ASM International, 1990.

MILLER, S., Advanced materials means advanced engines. **Interdisciplinary Sci. Rev.** **21** (2) (1996), pp 117-129. *apud* EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of eroengine alloys. **Jornal of Materials Processing Technology**, v.134,(2), p. 233 – 253, 2003.

NOVASKI, O. DÖRR, J. Usinagem sem refrigeração. **Máquinas e Metais**, v. 35 (398), p 18-27, 1999.

OXLEY, P. L. **Mechanics of machining: na analytical approach to assessing machinability** Ellis Horwood Publishers - 1989

PALDEY, S.; DEEVI, S. C. Single layer and multilayer wear resistant coatimgs of (Ti, Al)N: a review **Materials Science and Engineering**, p. 01 – 22, 2003.

PAWADE, R. S., SUHAS, S. J., BRAHMANKAR, P. K., RAHMAN, M. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718, **Journal of Materials Processing Technology** v.192–193, p139–146, 2007.

PRENGEL, H. G., PFOUTS, W. R., SANTHANAM, A. T. State of the Art in Hard Coatings for Carbide Cutting Tools, **Surface and Coatings Technology**, vol 102, pp. 183-190, 1998.

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

RODRIGUES, M. A. **Investigação sobre o fresamento da liga a base de níquel – Inconel 625 depositada em forma de revestimento metálico.** 2006. 183p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RODRIGUES, M. A. **Uma contribuição para o estudo das deformações residuais proporcionadas pelo processo de usinagem por fresamento.**2009. 227p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ROSA, S. N. **Influência do teor de titânio no torneamento do ferro fundido vermicular.** 2009. 114p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo Principal.** São Paulo, 2008. 1157 p.

SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem.** São Paulo, 2005. 600 p.

SCHÜTZE, A.; QUINTO, D.T. 2003. Pulsed plasma-assisted PVD sputter-deposited alumina thin films. **Surface and Coatings Technology**, v.162, n.2-3, p.174-182.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles.** New York: Oxford University Press, 1984. 594p.

SHUANGQUN, Z.; XIE, X.; SMITH, G. D.; PATEL, S. J. Gamma prime coarsening and age-hardening behaviors in a new nickel base alloys. **Materials Letters**. V. 58 p. 1784 - 1787, 2004.

SILVA, A. L. V. C., MEI, P. R. **Aços e ligas especiais.** 2 ed. São Paulo: editora Edgard Blücher, 2006. 646p.

SILVA, L. R., COELHO R. T., CATAI R. E. Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga "waspaloy", Rem: **Revista Escola de Minas**, vol.57 no.2 Ouro Preto Abr./Jun. 2004

SIMIS, C. T.; STOLOFF, N. S.; HAGEL, W. C. **The Superalloys**. New York: John Wiley & Sons, 1972. 614 p.

SIMIS, C. T.; STOLOFF, N. S.; HAGEL, W. C. **Superalloys II**. New York: John Wiley & Sons, 1987. 615 p.

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

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

VIVANCOS, J.; LUIS, C. J.; COSTA, L.; ORTIZ, J. A. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. **Journal of Materials Processing Technology**, v.155-156, n.1-3, p.1505-1512, 2004.

WALDORF, D. J. **An evaluation of ploughing models for orthogonal machining Transactions of the Asme**, 550p. 1999 *Apud* BIERMANN, D.; WEINERT, K.; TERWEY, I.; WALTER. **Competência Concentrada na Usinagem**. Sorocaba, 2009. 128 p.

WALTER. **Competência Concentrada na Usinagem**. Sorocaba, 2009. 128 p.

WITTING, H. Torneamento de superligas. **Máquinas e Metais**, v. 38 (440), p 156 – 165, 2002.

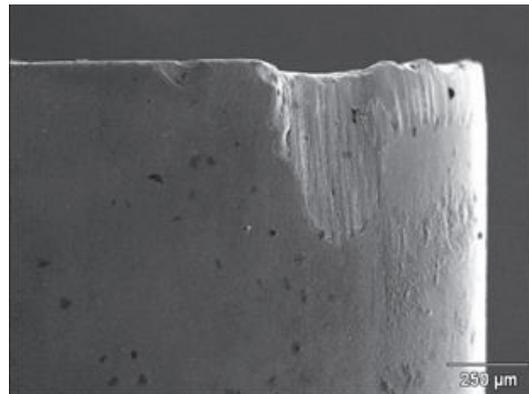
ZHAN, G., MITOMO, M., XIE, R. AND KURASHIMA, K. The deformation mechanisms of superplastic flow in fine-grained beta- silicon nitride ceramics. **Acta Materialia**, Vol. 48, pp. 2373-2382, 2000.

ZITNANSKY, M.; ZRNIK, J.; MARTINKOVIC, M., Developing processes of property improvement of nickel base superalloys, **Journal of Materials Processing Technology**. 78, 1998, p. 204-209.

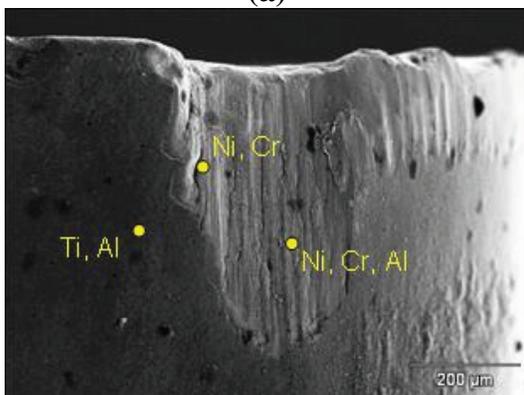
ANEXO A – Imagem das ferramentas desgastadas



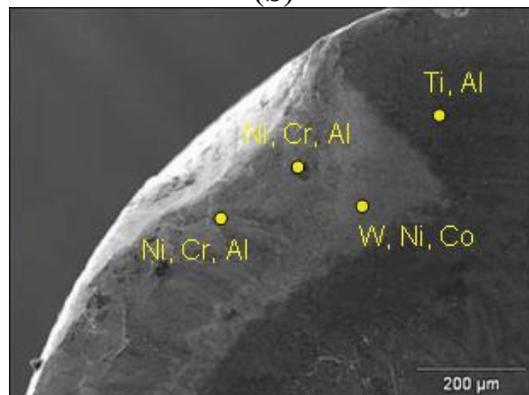
(a)



(b)



(c)

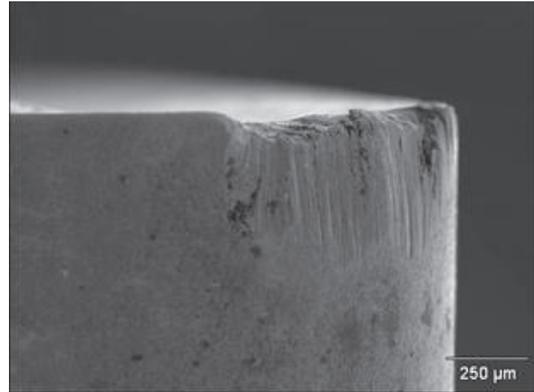


(d)

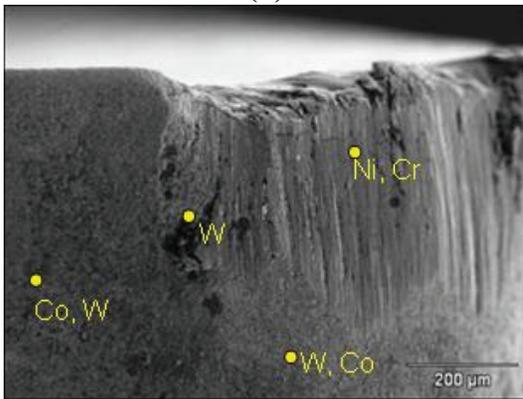
1) Imagem da ferramenta – CNMG 12 04 12 – QM 1005, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.



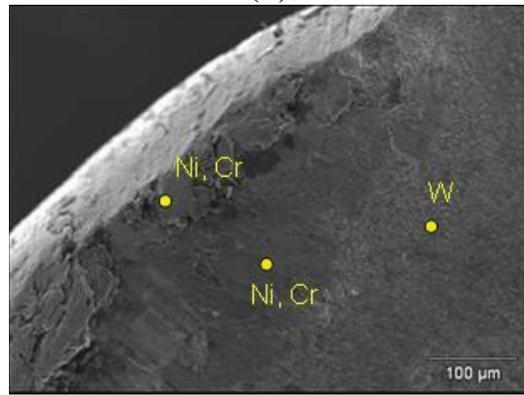
(a)



(b)



(c)

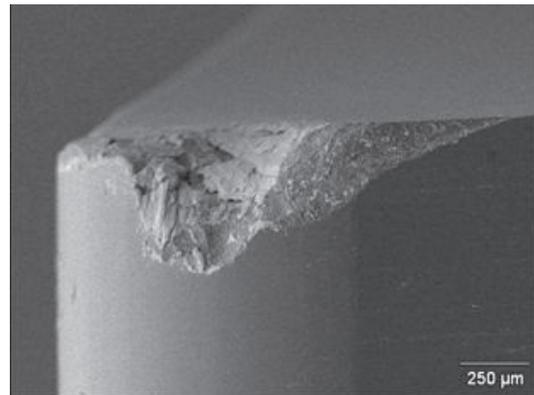


(d)

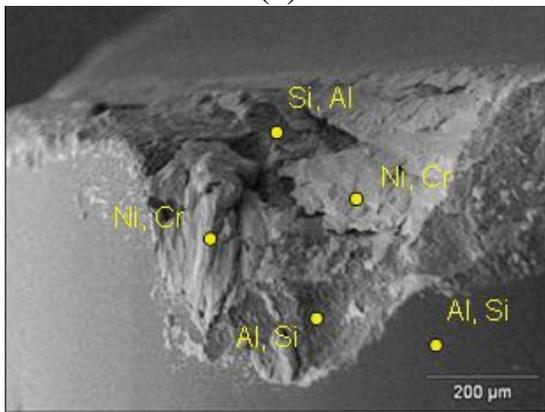
2) Imagem da ferramenta – CNMG 12 04 12 – QM H13A, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.



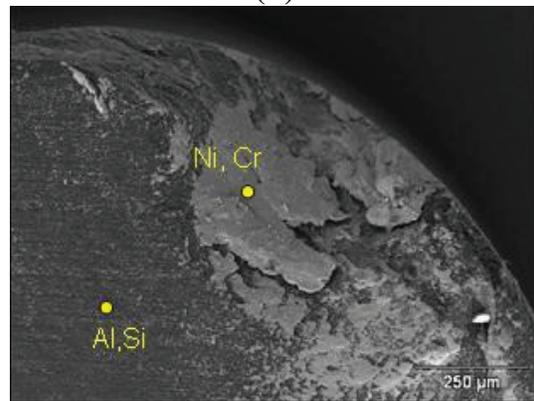
(a)



(b)



(c)

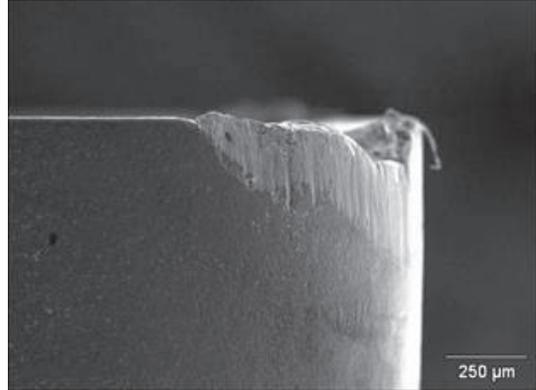


(d)

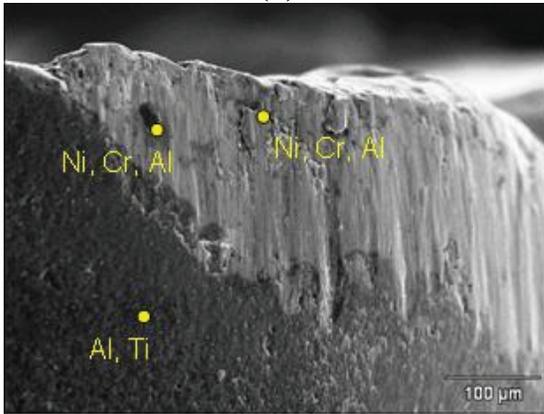
3) (a) Imagem da ferramenta – CNGN 12 04 12 T01020 670, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.



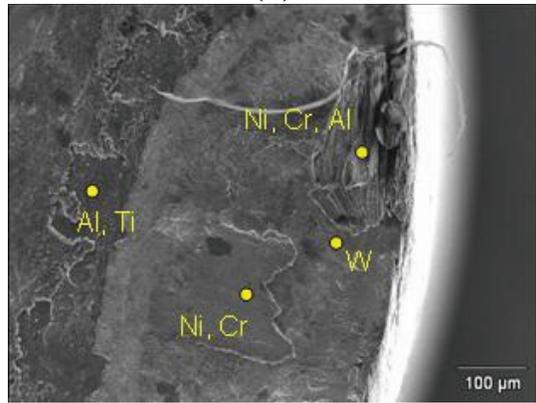
(a)



(b)



(c)



(d)

4) (a) Imagem da ferramenta – CNMG 120408-NM4 WSM20, (b) visão geral da aresta desgastada, (c) detalhes da superfície de folga, (d) detalhes da superfície de saída.

ANEXO B – Imagem dos cavacos gerados



1) Ferramenta CNMG 12 04 12 – QM 1105 v_c : 40m/min, f :0,10mm/volta, a_p :0,5mm



2) Ferramenta SNGN 12 04 16E – IS9 v_c : 70m/min, f :0,10mm/volta, a_p : 0,5mm



3) Ferramenta SNGA 12 04 16E – IN11 v_c : 70m/min, f :0,10mm/volta, a_p : 0,5mm