

LUCAS RODRIGUES ABBRUZZINI

**ESTUDOS DE MECANISMOS DE DESGASTE EM
FERRAMENTA DE DIAMANTE
POLICRISTALINO NO TORNEAMENTO DO
INCONEL[®] 718 ENDURECIDO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

LUCAS RODRIGUES ABBRUZZINI

**ESTUDOS DE MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTA DE
DIAMANTE POLICRISTALINO NO TORNEAMENTO DO INCONEL®
718 ENDURECIDO**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título **BACHAREL em ENGENHARIA MECATRÔNICA**.

Orientador: Prof. Dr. Wisley Franco Sales

UBERLÂNDIA

2019

LUCAS RODRIGUES ABBRUZZINI

**ESTUDOS DE MECANISMOS DE DESGASTE EM
FERRAMENTA DE DIAMANTE POLICRISTALINO NO
TORNEAMENTO DO INCONEL® 718 ENDURECIDO**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título **BACHAREL em ENGENHARIA MECATRÔNICA**.

Orientador: Prof. Dr. Wisley Franco Sales

Uberlândia, 12 de dezembro de 2019

Prof. Dr. Wisley Franco Sales

Orientador

Professor

Prof. MSc. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Professor

M.Sc. Matheus Carrara Martins

RESUMO

O Inconel 718 é um material altamente utilizado na indústria aeroespacial, essa utilização é explicada pela necessidade de um material que apresente alta dureza, resistência à oxidação, tenacidade para absorção de extremos gradientes térmicos em condições de alta temperatura, pressão e esforços. Para a usinagem do Inconel, bem como outras ligas de níquel, comumente se utilizam ferramentas de pCBN, porém outras ferramentas, consideradas ultraduras como a de PCD, podem ser uma opção em situações onde se quer obter super acabamentos. O presente trabalho visou verificar a viabilidade dessa opção, bem como quais os mecanismos de desgastes presentes nessa aplicação. Observou-se que os mecanismos de desgaste dominantes foram desgaste abrasivo de flanco e desgaste por adesão e arrancamento (*attrition*). O torneamento com PCD se mostrou favorável para aplicações em que seja esperado rugosidade de $0,8 \mu m$.

Palavras-chave: Usinagem; Inconel; Desgaste; Mecanismos de Desgaste.

ABSTRACT

Inconel 718 is a highly used material in the aerospace industry, it is mainly used when there is a need for a material that has high hardness, oxidation resistance, toughness to absorb extreme thermal gradients under conditions of high temperature, pressure and stress. For Inconel machining, as well as other nickel alloys, pCBN tools are commonly used, but other tools considered ultra-hard such as PCD may be an option in situations where super finishing is desired. The present work aimed to verify the viability of this option, as well as the mechanisms of wear present in this application. The dominant wear mechanisms were found to be abrasive flank wear and attrition wear. PCD turning turned out to be favorable for applications where roughness of 0.8 μm is expected.

Keywords: Machining. Inconel. Tool Wear; Wear Mechanisms.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha esposa pode ter me apoiado durante toda a graduação, por sempre estar ao meu lado me auxiliando nos momentos mais difíceis.

Agradeço também, ao Orientador deste trabalho, o Professor Dr. Wisley Falco Sales, sendo este o principal docente na minha formação nesta instituição, me orientando neste trabalho, e em diversas disciplinas bem como me aconselhando sobre a carreira de engenharia, suas oportunidades e desafios.

Agradeço também ao Professor Éder pelo auxílio nos ensaios, ao discente de doutorado Leonardo e ao discente de mestrado Felipe por todo o auxílio durante o desenvolvimento desse trabalho e da análise de resultados. Assim como a outros alunos do LEPU - UFU pelo apoio e colaboração em especial aos alunos Leandro e Carla.

Agradeço ao Laboratório Multiusuário de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Agradeço também aos alunos das turmas 23^a e 24^a por todo o auxílio prestado nesses 5 anos, e ao professor Werley outro docente de grande impacto na minha formação universitária.

Por fim agradeço a minha família que sempre esteve ao meu lado e me apoiou na busca acadêmica, e a Deus pela saúde, paciência e apoio nesses anos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regiões de Desgaste de ferramentas de corte (LIMA, 2012) adaptado de (EZUGWU, 2005).	11
Figura 2 - Regiões de Desgaste de ferramentas de corte (THAKUR; RAMAMOORTHY; VIJAYARAGHAVAN, 2009).	11
Figura 3 - Ferramenta de PCD DA1000 ao lado da mesma montada e diagrama da ferramenta (SUMITOMO, 2018)	16
Figura 4 - Montagem da Ferramenta no dinamômetro da CNC.	19
Figura 5 - Condicionador de sinais	19
Figura 6 — Montagem com a aplicação de MQL	20
Figura 7 - Pressão no MQL.	20
Figura 8 -Gráfico com as rugosidades Ra média para ensaio inicial e continuação	21
Figura 9 - Gráfico com os desgastes no flanco Direito das ferramentas.	22
Figura 10 -Gráfico com as Pressões referente a Ft, ensaio inicial e continuação.	23
Figura 11 - – Ferramenta 1 e Ferramenta 2 no Ensaio Inicial	24
Figura 12 -Ferramenta 7 e Ferramenta 8 no Ensaio Inicial	24
Figura 13 -Ferramenta 1 no ensaio Continuação flanco Direito e flanco Esquerdo	24
Figura 14 -Ferramenta 5 no ensaio continuação flanco Direito e flanco Esquerdo	25
Figura 15 -Ferramenta 8 no ensaio continuação flanco Direito e flanco Esquerdo	25
Figura 16 - Adesão de material nas ferramentas 3 e 4.	25
Figura 17 -Adesão de material nas ferramentas 5 e 6.	26
Figura 18 -Taxa de Adesão de Material na ferramenta 6.	28
Figura 19 - Imagem realizada pelo MEV da ferramenta 6	29
Figura 20 -Imagem do Cr aderido na ferramenta 6	29
Figura 21 -Imagem do Ni aderido na ferramenta 6	30
Figura 22 -Imagem do Fe aderido na ferramenta 6	30
Figura 23 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 2	31

Figura 24 -Aderência de Ni na ferramenta 2.	32
Figura 25 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 3	32
Figura 26 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 8	33
Figura 27 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 5.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da Liga Inconel 718	15
Tabela 2 - Características da ferramenta DA1000 (SUMITOMO, 2018)	16
Tabela 3 - Condições de corte recomendadas (SUMITOMO, 2018).....	17
Tabela 4 - Condições dos Ensaios.....	18
Tabela 5 - Anova para Ra	26
Tabela 6 -Anova para Ft.....	26
Tabela 7 - Anova para Ks.....	27
Tabela 8 -Anova para Desgaste do Flanco Direito	27
Tabela 9 -Rugosidade Média encontrada nos testes	39
Tabela 10 -Desgastes nas ferramentas após teste e continuação.....	39
Tabela 11 -Valores das Forças no primeiro ensaio	40
Tabela 12 -Valores das Forças na continuação.	40
Tabela 13 -Valores médio das Forças de Usinagem.....	41
Tabela 14 -Valores das variações das forças entre o ensaio inicial e a continuação	41
Tabela 15 -Valores da pressão Ks do Ensaio Inicial	42
Tabela 16 -Valores da pressão total Ks da continuação	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCD	<i>Polycrhistalyne Diamond</i> – Diamante Policristalino
pCBN	<i>Polycrhistalyne Compact Boron Nitrite</i> – Nitrato de Boro Policristalino
Compactado	
CBN	<i>Compact Boron Nitrite</i> – Nitrato de Boro Compactado
CFC	Cúbica de Face Centrada
HSM	<i>High Speed Machining</i> – Usinagem de Alta Velocidade
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
HT/HP	<i>High Temperature /High Pressure</i> – Alta temperatura/Alta Pressão
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i> - Deposição química por vapor
Fer	Ferramenta
Geo	Geometria Utilizada
f	Avanço
a_p	Profundidade de Corte
v_c	Velocidade de corte
F_t	Força Total
K_s	Pressão Específica
EDX	(<i>Energy Dispersive X-Ray</i>)
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Fe	Ferro

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 ESTADO DA ARTE	4
3.1 Inconel® 718	4
3.1.1 Usinagem de Ligas de Níquel	5
3.1.2 Problemas na usinagem de superligas de níquel	5
3.1.3 Usinagem de Inconel 718	6
3.2 Fluidos de Corte em Usinagem	6
3.2.1 MQL – Mínima Quantidade de Lubrificante.....	7
3.2.2 Usinagem com Ferramenta de PCD	7
3.3 Desgaste em Usinagem	9
3.3.1 Mecanismos de Degaste.....	9
3.3.2 Tipos de Degaste	10
3.4 Desgaste em Ferramentas de PCD	12
3.5 ANOVA.....	13
3.5.1 p-Value	13
3.6 Rugosidade	14
4 METODOLOGIA.....	15
4.1 Material Utilizado.....	16
4.1.1 Torno CNC.....	16
4.1.2 Ferramenta de PCD	16
4.1.3 Fluido de corte	17
4.1.4 Microscópios.....	17
4.1.5 Rugosímetro	18
4.2 Parâmetros de Corte	18
4.3 Montagem	18
5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	21
5.1 Medições.....	21
5.2 Desgaste	23
5.2.1 Primeira Rodada de Ensaios	23

5.2.2	Continuação.....	24
5.5	ANOVA.....	26
5.6	Afinidade Química.....	28
5.7	Caracterização do Desgaste	31
6	CONCLUSÃO.....	34
6.1	Sugestão para trabalhos futuros	35
	REFERENCIAS	36
	APENDICE A – TABELAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

O Inconel® é uma das principais ligas metálicas da atualidade tendo importantes aplicações nas indústrias aeroespacial, aeronáutica e petrolífera. Porém, assim como diversas outras superligas de níquel, tem em sua usinagem um desafio tecnológico ainda não superado, principalmente em termos de custos envolvidos.

Usinagem é um processo de fabricação por meio da retirada de material de uma matéria prima. Entre os principais processos de usinagem está o torneamento, onde a matéria prima é colocada sob alta rotação e entra em contato com a ferramenta de corte, normalmente em velocidades de avanço e profundidade que variam de acordo com a necessidade. No torneamento do Inconel® 718, assim como outras superligas de níquel, devido a sua alta dureza e sua capacidade de manter as características sob alta temperatura é necessário a utilização de ferramentas de cortes de alta dureza compatíveis com o processo, como a ponta de diamante policristalino. Porém, devido à alta rotação e as características intrínsecas do processo de torneamento, a temperatura da interface de contato entre a ferramenta e a matéria prima atinge elevados valores quando em alta velocidade o que modifica as características do diamante e aceleram seu desgaste.

Embora a usinagem de superligas a seco (*dry cutting*) seja possível e apresente resultados satisfatórios como na utilização de ferramentas como as cerâmicas pCBN (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*), o PCD (*Polycrystalline Compact Diamond*) e de ferramentas de alta velocidade de avanço (*High Speed Machining - HSM*), suas utilizações não são universais e apresentam limitações em determinadas aplicações. A utilização de PCD por exemplo tem como característica sua vulnerabilidade em altas temperaturas onde elas podem causar a transformação da estrutura cristalina do diamante e por consequência o desgaste acelerado da ferramenta.

Por conta de ser inviável a eliminação completa do fluido, estudos sobre a minimização dos mesmos são de extrema importância, sendo a mais utilizada o método MQL (Menor Quantidade de Lubrificante) onde a pulverização do fluido em pequenas quantidades e alta pressão torna sua utilização ótima e seus danos mínimos.

Fluidos de corte que são largamente utilizados na indústria nos processos de usinagem tem estado em evidência por conta de estudos recentes (últimos 15 anos) que analisam seu impacto negativo ao ser humano e ao meio ambiente, logo é imperativo otimizar técnicas de utilização dele melhorando seu desempenho e minimizando seus impactos negativos.

Ao se estudar a usinagem de algum metal é importante se observar como acontece o desgaste na ferramenta de corte, para que se possa assim se utilizar de recursos como mudança da ferramenta de corte, adição de fluido lubrificante, mudança dos parâmetros de corte por exemplo. Dentro desse estudo é válido a análise dos mecanismos de desgaste encontrado na ferramenta e forças encontradas na usinagem visto que essas podem indicar desgaste maior da ferramenta.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar e comparar o desempenho de ferramentas de diamante policristalino, quando usinando com fluido de corte vegetal aplicado em MQL puro, variando-se parâmetros do processo no torneamento do Inconel® 718 (estado envelhecido).

2.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer comparativos entre os mecanismos de desgaste encontrados nas ferramentas de corte;
- Avaliar a ocorrência de elementos de Inconel na ferramenta de corte;
- Avaliar as possíveis medidas a serem tomadas para melhorar o desgaste da ferramenta;
- Avaliar a rugosidade obtida na superfície usinada.

3 ESTADO DA ARTE

3.1 Inconel® 718

O Inconel®718 é uma superliga de Níquel-Ferro-Cromo, possui estrutura CFC (Cúbica de Face Centrada) e apresenta como principais características alta resistência mecânica à corrosão e à oxidação, excelente resistência à fluência, endurecível por precipitação e capaz de manter suas características sob alta temperatura. Por tais características é utilizado principalmente em turbinas a jato e em componentes na indústria que trabalham em condições extremas (ULUTAN; OZEL, 2011) (SMITH; PATEL, 2005).

As características das superligas aeroespaciais incluem (EZUGWU et al., 2005).:

- matriz austenítica facilita o rápido endurecimento;
- capacidade de reagir com materiais para ferramentas em condições atmosféricas;
- a tendência de formar arestas e soldar ferramentas de corte;
- presença de carbonetos abrasivos em sua microestrutura

Em geral pode-se afirmar que as ligas à base de níquel são caracterizadas e fortalecidas por alguns elementos de liga que tendem a melhorar sua microestrutura como (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999):

- Matriz de liga (γ): A matriz contínua é uma cúbica de face centrada (CFC) fase austenítica à base de níquel, que geralmente contém uma alta porcentagem de sólidos elementos da solução como cobalto, cromo, molibdênio e tungstênio.
- Gamma prime (γ'): Alumínio e titânio são adicionados em quantidades e proporções mútuas para precipitar frações de alto volume de CFC γ' , que precipita com a austenita.
- Carbonetos: O carbono é adicionado em níveis de 0,05– 0,2% para reagir com reagentes reativos e elementos refratários presentes para formar carbonetos

MC. Durante o tratamento térmico e em serviço, há decomposição gerando carbonetos como $M_{23}C_6$ e M_6C , que povoam os limites do grão.

3.1.1 Usinagem de Ligas de Níquel

O níquel puro apresenta estrutura CFC que não se altera com o aumento da temperatura até alcançar seu ponto de fusão (1.452°C), sendo um metal de dureza considerada baixa à temperatura ambiente. Entretanto, tem como característica, alta taxa de encruamento e como é pobre condutor de calor, ele se mantém com propriedades mecânicas mesmo em altas temperaturas (acima de 1000°C). Com isso, ele se apresenta como um material de difícil usinagem tendo como principais características: baixa taxa de remoção de material e o desgaste acelerado das ferramentas de corte podendo também causar deformações mesmo em baixa velocidade.

Podendo ter forças de usinagem relativamente elevadas mesmo em baixas velocidades pode-se observar alta temperatura na zona de fluxo tendo assim altas taxas de desgaste da ferramenta (MARQUES, 2015).

3.1.2 Problemas na usinagem de superligas de níquel

Superligas de níquel possuem resistência mecânica e oxidação elevadas em alta temperatura e usinabilidade ruim, sendo um dos metais mais difíceis de se usar na indústria metal-mecânica (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1999), essa característica se deve a (MARQUES, 2015):

- Resistência mecânica mantida durante a usinagem mesmo em alta temperatura.
- Possível ocorrência de encruamento que contribui para o surgimento do desgaste do entalhe.
- Devido a presença de carbonetos de alta dureza pode ocorrer desgaste abrasivo da ferramenta.
- O cavaco produzido é tenaz e longo de difícil controle na usinagem.

- Alta temperatura na aresta de corte e grande gradiente de temperatura na ferramenta devido à baixa condutividade térmica.

Em geral os problemas encontrados durante a usinagem das superligas de níquel estão relacionados ao atrito e consequentemente calor na interface cavaca - ferramenta-peça. (EZUGWU et al., 2005).

3.1.3 Usinagem de Inconel 718

Devido à sua alta dureza e propriedade de manter a mesma sobre alta temperatura, Inconel apresenta grande dificuldade de usinagem, sendo que apenas utilizando algumas ferramentas é possível conseguir boas condições de acabamento a um custo viável. E mesmo nesses casos, é importante que sejam usados parâmetros ótimos de usinagem pois a utilização de velocidades acima do indicado pode levar rápido desgaste da ferramenta.

Xavior et al. (2016) fala que ferramentas de CBN e cerâmica apresentam boa usinagem em velocidades de 100 m/min apresentando rugosidade inferior a $1\mu m$, enquanto a ferramenta de Carbide apresentou melhores resultados em testes com velocidade de 60 m/min.

Tanaka, Sugihara e Enomoto (2016) encontrou resultados parecidos para a ferramenta de PCBN-A onde essa também apresentou bons resultados em velocidade de 100 m/min, enquanto para a ferramenta PCBN-B, com maior resistência térmica, foram encontrados melhores resultados em velocidades de 300 m/min. Portanto é possível inferir que a velocidade de corte tem relação com o desgaste da ferramenta e com o acabamento da peça usinada.

3.2 Fluidos de Corte em Usinagem

Fluidos de corte são empregados na usinagem afim de reduzir custo pois diminuem o desgaste e prolongam a vida da ferramenta, melhoram o acabamento da superfície da peça, ajudam na retirada do cavaco e evitam o aquecimento excessivo da peça. Para que se tenha os resultados esperados é necessário que o fluido de corte utilizado tenha propriedades condizentes com a aplicação.

Entre as principais funções dos fluidos de corte pode-se destacar a lubrificação quando se trabalha em baixa velocidade de corte e refrigeração em alta velocidade, remoção de cavacos da zona de corte e proteção contra oxidação da ferramenta (MACHADO et al., 2015; SANTOS; SALES, 2014).

Em baixa velocidade é necessário que o fluido penetre na interface de corte, quando isso ocorre o fluido de corte atua como lubrificante e reduz o atrito da área de contato, essa redução de atrito tem como consequência menor temperatura da interface, possibilita maiores velocidades de corte e melhor acabamento superficial.

Entre os principais métodos de aplicação de fluido estão, jorro, MQL e sistema de alta pressão.

3.2.1 MQL – Mínima Quantidade de Lubrificante

O processo MQL ou Atomização é um processo que se caracteriza pela aplicação de fluido na interface de corte, adicionando o mesmo sob alta pressão misturado com ar comprimido, sendo que o ar comprimido realiza refrigeração e o óleo mesmo que em quantidade pequena (10 a 200ml/h) é suficiente para reduzir o atrito e diminuir a tendência a aderência de materiais (MACHADO et al., 2015).

A aplicação pode ser feita através de canais internos dentro da ferramenta ou externo onde o fluido é aplicado através de um bocal externo, sendo o segundo mais comum em torneamentos (LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2013)

A utilização de MQL tem sido escolhida devido a crescente preocupação das empresas em relação à sustentabilidade e uma menor quantidade de fluido lubrificante leva menor descarte e contaminação. É possível também colocar aditivos no fluido como micro partículas de carbono para melhorar ainda mais a lubrificação.

3.2.2 Usinagem com Ferramenta de PCD

PCD são ferramentas de corte com dureza média de 8.000 HV, com elevada resistência ao desgaste (SANTOS; SALES, 2014). Entre suas principais características estão (BRAGHINI JR, 1998):

- Alta Dureza
- Alta resistência ao desgaste abrasivo

- Alta condutividade térmica
- Resistência a corrosão
- Alta resistência a compressão
- Material Isotrópico
- Difícil usinagem de metais, pois em altas temperaturas como as encontradas na usinagem ocorre grafitação e possível difusão do carbono para o aço.

Existem dois processos principais para a produção de PCD, o primeiro é o de sinterização a alta pressão e temperatura (*HT/HP – High Temperature/High Pressure*) onde ocorre brasagem das partículas de diamante no substrato; e o segundo seria o processo CVD (*Chemical Vapor Deposition*) onde ocorre deposição química a partir da fase vapor sobre um substrato recobrando assim o diamante, sendo possível com isso controlar a espessura da camada de diamante (HINTERMANN; CHATTOPADHYAY, 1993).

Ferramentas de PCD são utilizadas nas indústrias para usinar materiais de baixa a alta durezas, porém são susceptíveis ao rápido desgaste, caso as condições na qual a ferramenta se encontre facilite a transformação alotrópica de diamante para grafite. O diamante, assim como grafite é feito de carbono, a diferença dos dois está na microestrutura. O diamante manterá sua microestrutura até 900° C em condições normais de pressão e meio ou 1400° C em condições de vácuo ou sob gás inerte, porém em condições normais de usinagem a temperatura de 700° C já é suficiente para que a transformação ocorra. Dentre os principais fatores que contribuem para a transformação está a presença de cobalto que age como catalisador da reação de transformação e influência, pois acima de 400°C apresenta coeficiente de expansão diferente do diamante causando rupturas nas ligações do PCD. Esses fatores fazem com que se torne inviável o uso de ferramentas de PCD em temperaturas acima de 700° C e, embora essas temperaturas costumem ocorrer sob altas velocidades de corte e avanço, não ocorre em materiais com boa condutividade térmica com adição de lubrificante (DAVIM, 2015).

Sales, Schoop e Jawahir (2017) utilizaram ferramentas de PCD no torneamento da superliga Ti-6Al-4V (que possui características similares às super

ligas de níquel) onde foi utilizado condições criogênicas de lubrificante. Encontraram a presença de Co e C na camada de adesão da ferramenta, porém esse fenômeno foi minimizado em baixas temperaturas e o tempo de vida da ferramenta foi aumentado em até 4 vezes quando comparado com a condição de aplicação de fluido em condição criogênica ou jorro.

3.3 Desgaste em Usinagem

Desgaste pode ser definido como a perda de material de maneira progressiva devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a superfície usinada ocorrendo assim remoção de material.

3.3.1 Mecanismos de Degaste

Quando se fala em desgaste é importante primeiramente entender quais os principais mecanismos de desgaste sendo que esses mecanismos podem depender da tensão de contato, velocidades relativas da interface de corte, temperaturas e propriedades físicas dos materiais envolvidos, sendo encontrado 4 principais classes (ASM 1989):

- Abrasão;
- Adesão;
- Difusão de Material;
- Deformação Plástica (Alta temperatura ou tensão de compressão);

3.3.1.1 Deformação Plástica

Deformações plásticas podem ocorrer devido à alta tensão de compressão ou devido a altas temperaturas, sendo a primeira mais comum na usinagem de materiais de alta dureza podendo causar deformação plástica da aresta de corte em ferramentas de aço rápido e de metal duro, normalmente em altas velocidade de corte e avanço. A deformação por altas temperaturas por sua vez ocorre em materiais com alto ponto de fusão podendo ocasionar a formação de crateras. (SANTOS; SALES, 2014)

3.3.1.2 Desgaste Difusivo

Ocorre através da transferência atômica e depende da temperatura e dos elementos. Esses mecanismos são mais comuns nas superfícies de saída e de folga e a taxa de desgaste aumenta em altas velocidades de corte e avanço. A área desgastada é lisa quando vista em microscópio.

3.3.1.3 Desgaste por Aderência

Comum em usinagem em baixas velocidades de corte, torna a superfície de saída irregular e contato menos contínuo assim fragmentos microscópicos são retirados da ferramenta. Quando visto no microscópio apresenta aparência áspera.

3.3.1.4 Desgaste por Abrasão

Causado por partículas de alta dureza contidas na peça (óxidos, carbonetos e carbonitreto), ou na ferramenta (arrancadas por desgaste de aderência) ocasionando em perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento. Estes mecanismos são comuns em usinagem de ferramentas revestidas, cerâmicas puras e mistas. Apresenta aparência de riscas/sulcos na ferramenta. (SANTOS; SALES, 2014)

3.3.2 Tipos de Desgaste

Nas figuras 1 e 2 é possível observar 3 formas de mecanismos de desgaste (LIMA, 2012):

- Desgaste de Flanco (Região 1)
- Desgaste de Entalhe (Região 2 e 3)
- Desgaste de Cratera (Região 4)

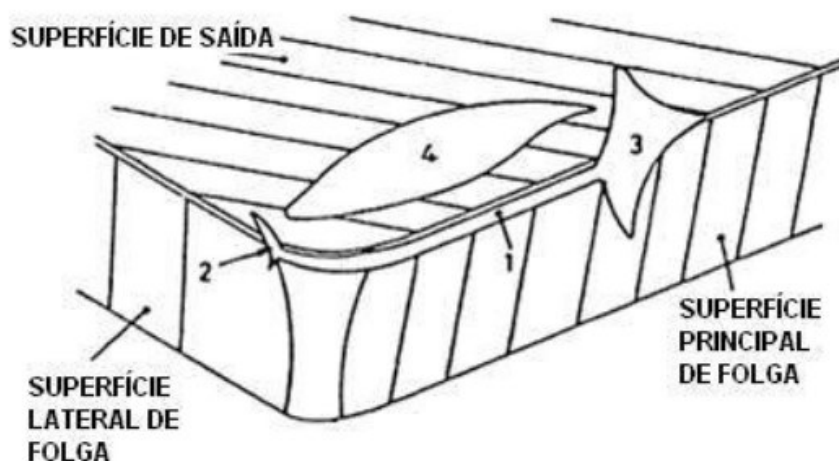


Figura 1 - Regiões de Desgaste de ferramentas de corte (LIMA, 2012) adaptado de (EZUGWU, 2005).

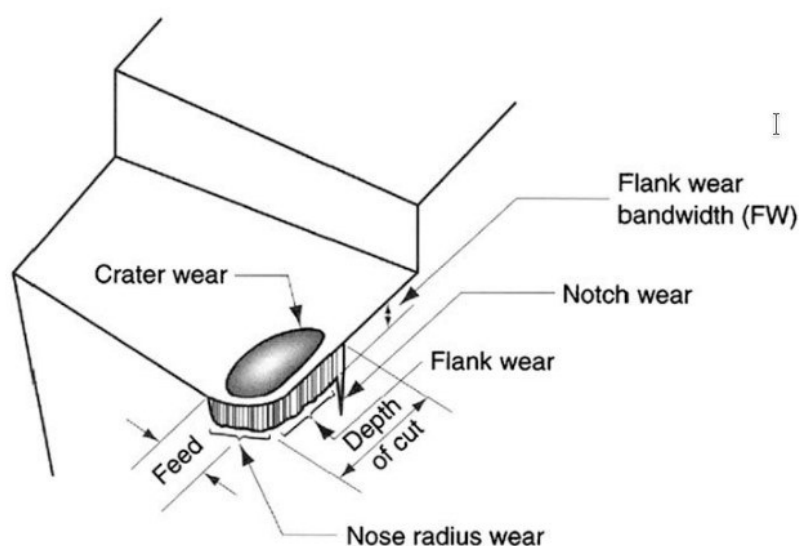


Figura 2 - Regiões de Desgaste de ferramentas de corte (THAKUR; RAMAMOORTHY; VIJAYARAGHAVAN, 2009).

3.3.2.1 Desgaste de Flanco

O desgaste de flanco ocorre principalmente na superfície principal de corte e ocorre devido a fricção entre a ferramenta e a superfície usinada desencadeando abrasão ou adesão de material (HESELWOOD, 1953). Esse desgaste causa a perda de material cortante da ferramenta, sendo esse os mecanismos de desgaste que normalmente limita as ferramentas, sendo adotado como critério de fim de vida (LIMA, 2012). Todo processo de usinagem causa desgaste de flanco resultando em piora do

acabamento superficial e perda das características dimensionais da peça. Este desgaste aumenta em maiores velocidades de corte. (SANTOS; SALES, 2014)

3.3.2.2 Desgaste de Cratera

Ocorre normalmente quando há alta temperatura na interface cavaco-ferramenta, ocorrendo por uma combinação de difusão e adesão na superfície de saída durante o deslizamento do cavaco. A profundidade e a largura da cratera formada na superfície de saída estão relacionadas a velocidade de corte e ao avanço(SANTOS; SALES, 2014).

3.3.2.3 Desgaste de Entalhe

Desgastes de entalhe podem ser considerados tanto um tipo de desgaste, como um mecanismo de desgaste, ocorrendo principalmente em materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento principalmente em regiões onde há condições de escorregamento e envolve mecanismos de abrasão, difusão e aderência. Pode se formar o entalhe em V por rebarbas produzidas nas arestas laterais do cavaco, envolvendo mecanismo de aderência e arrancamento (SANTOS; SALES, 2014).

3.4 Desgaste em Ferramentas de PCD

A ferramenta de PCD é normalmente utilizada na usinagem de ligas de alumínio tendo sua utilização na usinagem de ligas de níquel limitada. Isso ocorre devido à característica das ligas de níquel em manter elevada temperatura de usinagem o que pode ocasionar um desgaste acelerado da ferramenta de diamante pois o mesmo em alta temperatura pode se transformar em carbono e facilmente ser desgastado.

DA SILVA et al. (2013) ao usinar Ti-6Al-4V verificaram desgaste de cavidade na ponta da ferramenta e desgaste de flanco, sendo que o desgaste de flanco ocorreu em menor proporção. O desgaste na ponta da ferramenta aumentou com o aumento da velocidade de corte e aumento do tempo de usinagem sendo que isso fez com que o tempo de fim de vida da ferramenta diminuísse.

MAGALHÃES (2005) chegou a resultados de rugosidade R_a abaixo de $0,8 \mu\text{m}$ ao usinar Ti-6Al-4V. Tais resultados são melhores quando comparados aos conseguidos com a ferramenta de metal duro conseguindo maior tempo de vida. Também comparou as velocidades de corte e conseguiu os resultados obtidos com velocidade de corte maior com a ferramenta de PCD comparado com a de metal duro.

3.5 ANOVA

Análise ANOVA, é uma análise de variância que usa o teste F para verificar se 3 ou mais medidas apresentam estatisticamente igualdade entre as médias. Os dados amostrais são separados em grupos segundo uma característica (fator) que permite distinguir diferentes populações umas das outras. (MINITAB, 2019a)

HIPÓTESE NULA: a média de todas as populações são iguais, ou seja, o tratamento (fator) não tem efeito (nenhuma variação em média entre os grupos).

HIPÓTESE ALTERNATIVA: nem todas as médias populacionais são iguais, ou seja: pelo menos uma média é diferente, isto é, existe efeito do tratamento. (MINITAB, 2019a)

Caso a hipótese nula seja descartada isso quer dizer que há uma diferença entre as populações para aquele grupo medido.

$$F = \frac{\text{variação entre médias da amostra}}{\text{variação dentro das amostras}}$$

3.5.1 p-Value

Para determinar se alguma das diferenças entre as médias é estatisticamente significativa, compare o valor-p com o seu nível de significância para avaliar a hipótese nula. A hipótese nula afirma que as médias da população são todas iguais. Um nível de significância (denotado como α ou alfa) de 0,05 é bem aceito. Um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de concluir que existe uma diferença quando não há diferença real.

Se o valor-p for menor ou igual ao nível de significância, você rejeita a hipótese nula e conclui que nem todas as médias da população são iguais. Use seu conhecimento especializado para determinar se as diferenças (MINITAB,2019c).

3.6 Rugosidade

Rugosidade é uma medida de textura superficial, ou seja, mede a variação do relevo de uma superfície sendo comumente aceito que uma rugosidade R_a inferior a $0,8\mu\text{m}$ é considerado como polimento. Existem 3 principais parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_t .

O R_a é o tamanho médio da rugosidade média de uma superfície e é o mais comum. É determinado a partir da média das distâncias entre os pontos da superfície e a linha de centro ao longo do comprimento de amostragem, porém superfícies com diferentes aspectos podem apresentar o mesmo R_a (SANTOS; SALES, 2014).

O R_q é a medida quadrática dos valores encontrados logo esse representa melhor a natureza de uma superfície, visto que duas superfícies podem ter o mesmo R_a porém apresentar R_q diferentes o que indica que embora haja uma mesma distância média entre vales e pico a linha de centro, essa distância é mais acentuada em uma das medidas logo essa terá um R_q superior.

Outra medida de rugosidade é R_t , esse expressa a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo na direção perpendicular a linha de centro (SANTOS; SALES, 2014), ou seja, representa a diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo na direção vertical.

4 METODOLOGIA

A composição de acordo com a API (UNS N07718) segue na Tabela 1 (SMITH; PATEL, 2005)

Tabela 1 - Composição da Liga Inconel 718

Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co
% Peso	50,0 55,0	17,0 21,0	Bal.	4,75 5,50	2,80 3,30	0,65 1,15	0,20 0,80	1,0 máx
Elemento	C	Mn	Si	P	S	B	Cu	Pb
% Peso	0,08 máx	0,35 máx	0,35 máx	0, 015 máx	0, 015 máx	0, 006 Máx	0,30 máx	0, 001 máx

Primeiramente foi realizado o posicionamento e limpeza da ferramenta. O posicionamento correto garante que haja cilindridade no corte e que ocorra menor nível de vibração. Enquanto a limpeza da ferramenta garante uniformidade na forma da peça a ser trabalhada.

Posteriormente, foram realizados testes utilizando 8 ferramentas diferentes, mensurado as forças de usinagem com o auxílio do dinamômetro e a rugosidade. A rugosidade foi mensurada em 3 pontos separados de 120° C e então verificado a média. Cada ferramenta usinou um percurso de usinagem de 10,0 mm por ensaio sendo que a profundidade de corte (a_p) foi constante para todos os ensaios. Variou-se a velocidade de corte (V_c), avanço (f), quantidade de MQL e a geometria da ferramenta podendo essa ser positiva ou negativa.

Foi então, verificado o desgaste das ferramentas utilizando microscópio óptico, realizou-se a continuação dos testes nas mesmas condições de corte anterior, medições de rugosidade e verificado o desgaste no microscópio óptico seguindo a mesma metodologia do ensaio inicial. Utilizou-se também o microscópio eletrônico de varredura (MEV), para verificar se houve aderência de material além de possibilitar imagens das ferramentas usinadas. Para o MEV a metodologia das fotos foi: Fotos da ponta 100x e 500x, mapa EDX nas de 500x, inclinação da porta amostra de 44.5°.

- Tipo de desgaste encontrado na ferramenta de corte;
- Ocorrência de elementos provenientes do Inconel na ferramenta de corte;

- Afinidade química dos componentes da ferramenta com o fluido e com Inconel
- Rugosidade da superfície usinada;

4.1 Material Utilizado

4.1.1 Torno CNC

O torno utilizado será o ROMI Multiplic 35D que possui uma potência de 11kW, velocidade máxima de 3000 rpm e sistema de refrigeração de corte com reservatório incorporado, motobomba de 10 l/s min - 1,2 bar e motor de 0,16 cv.

4.1.2 Ferramenta de PCD

A ferramenta de PCD utilizada é a ferramenta DA1000 da marca Sumitomo tem geometria de diamante 80° e ponta triangular, possui características conforme a Tabela 2 e condições de corte recomendadas de acordo com a Tabela 3.

Tabela 2 - Características da ferramenta DA1000 (SUMITOMO, 2018)

<i>Tamanho médio de grão (μm)</i>	<i>~0,5</i>
<i>Dureza (Hv)</i>	<i>110~120</i>
<i>Limite de Resistência à Tração (kg/mm^2)</i>	<i>~2,6</i>

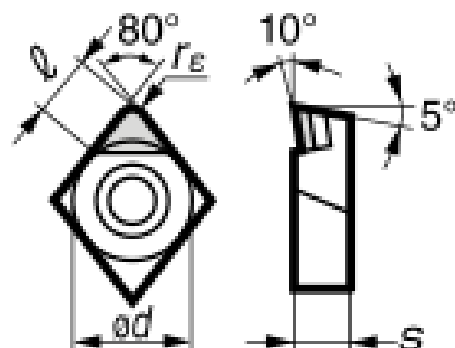


Figura 3 - Ferramenta de PCD DA1000 ao lado da mesma montada e diagrama da ferramenta (SUMITOMO, 2018)

CNMA-120408-NF	Negativa	$r = 0,8$	$\alpha = 6^\circ$	$\beta = 90^\circ$	$\gamma = -6^\circ$
CNMX-120408-NF	Positiva	$r = 0,8$	$\alpha = 5^\circ$	$\beta = 75^\circ$	$\gamma = 10^\circ$

Tabela 3 - Condições de corte recomendadas (SUMITOMO, 2018)

Parâmetro	$v_c(m/min)$	$f(mm/rev)$	$a_p(mm)$
Ligas de Al	~3000	~0,2	~3,0
Ligas de Cu	~1000	~0,2	~3,0
Plásticos Reforçados	~1000	~0,4	~2,0
Madeira	~4000	~0,4	-
Metal Duro	10 ~30	~0,2	~0,5
Carbono	100 ~600	~0,1	~0,2

4.1.3 Fluido de corte

O fluido de corte utilizado é o óleo de origem vegetal aplicado em MQL a vazões de 50 e 150 [ml/min] e pressão constante de 6,0 bar, direcionado na interface ferramenta/peça com 3 saídas de fluido.

4.1.4 Microscópios

Foram utilizados dois microscópios: o microscópio ótico Olympus SZ61 presente no Laboratório de Ensino e Pesquisa e Usinagem com zoom 6.1:1 e ampliação de 4.5x (OLYMPUS, 2019); O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo Zeiss EVO MA10 opera em alto vácuo ou no modo VP (pressão variável). Equipado com detectores de elétrons secundários (SE), elétrons retro espalhados (BSD) e um detector de espectroscopia de energia dispersiva por Raio-X (EDS) da marca Oxford modelo 51-ADD0048 (FEQ, 2019). O MEV foi utilizado para realizar a caracterização do desgaste e verificar adesão de material na ferramenta.

4.1.5 Rugosímetro

O rugosímetro utilizado é da marca Taylor Hobson, modelo S100 Series, que possui erro de até (2% + 0.004 μm) na medição do Ra (HOBSON, 2019).

4.2 Parâmetros de Corte

Após análise bibliográfica em livros e periódicos decidiu-se pelos parâmetros de usinagem conforme disposto abaixo. Tais parâmetros foram escolhidos a partir de comparação da usinagem de Inconel com outras ferramentas bem como da usinagem utilizando ferramenta PCD em outras superligas. O objetivo dessa escolha é obter baixa rugosidade por um tempo de usinagem que torne o processo economicamente viável. Na Tabela 4 mostra-se as condições em que serão realizados os testes experimentais.

$$a_p = 0,1 \text{ [mm]}$$

Tabela 4 - Condições dos Ensaios

Fer	Geo	$f(\text{mm/rev})$	$v_c(\text{m/min})$	$MQL(\text{ml/min})$
1	N	0,03	75	50
2	P	0,05	75	50
3	P	0,03	150	50
4	N	0,05	150	50
5	P	0,03	75	150
6	N	0,05	75	150
7	N	0,03	150	150
8	P	0,05	150	150

4.3 Montagem

Nas Figuras 4 a 7 mostram-se a montagem da ferramenta no dinamômetro, o condicionador de sinais e montagem do MQL na máquina e sistema de medição de pressão no dispositivo MQL, respectivamente.

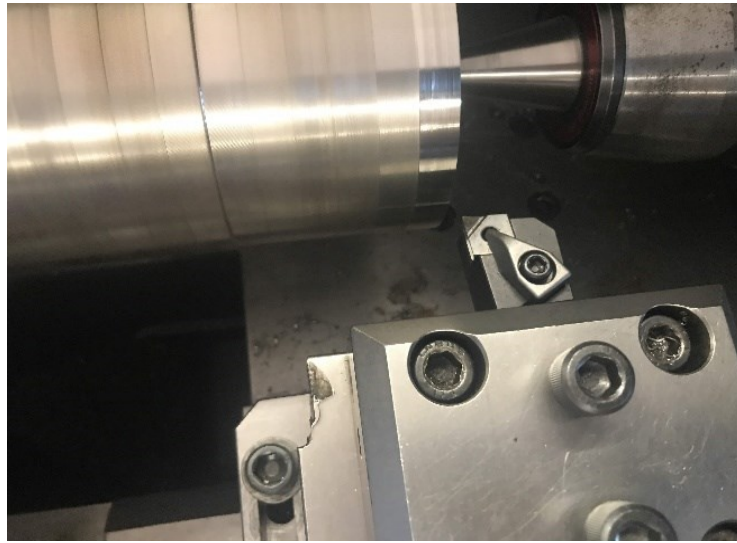


Figura 4 - Montagem da Ferramenta no dinamômetro da CNC.



Figura 5 - Condicionador de sinais

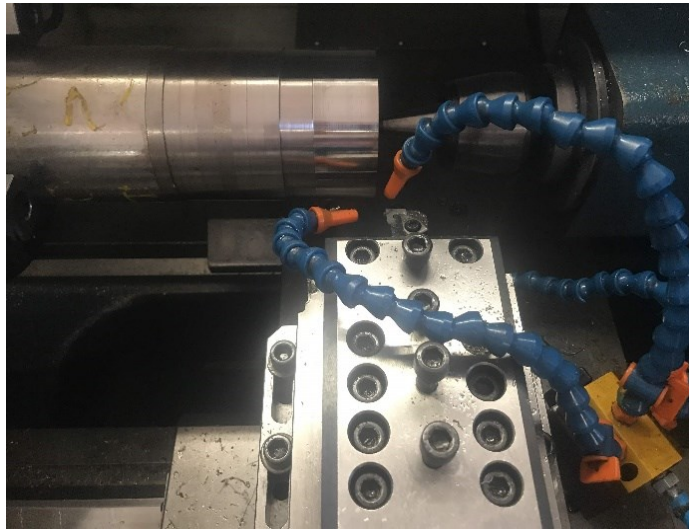


Figura 6 — Montagem com a aplicação de MQL.



Figura 7 - Pressão no MQL.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Medições

Os melhores R_a encontrados foram nas condições 5, 6, 7 e 8 (Figura 8). Em todos os 4 casos houve quantidade de MQL de 150 ml/min. Sendo que o avanço e a velocidade de corte variaram em todas as condições. É possível perceber também que a condição de ensaio da ferramenta 1 obteve bons valores de rugosidade na continuação.

As ferramentas com melhor resultado foram as ferramentas 5 e 8. Ambas com geometria positiva, o que pode indicar que essa ferramenta oferece uma melhor condição de contato.

Em relação ao desgaste, as ferramentas 2, 3 e 8 (Figura 9) apresentaram menor desgaste sendo todas as 3 de geometria positiva. Isso pode indicar uma melhor condição de contato dessas ferramentas. As outras condições de corte são diferentes em todas as 3 ferramentas.

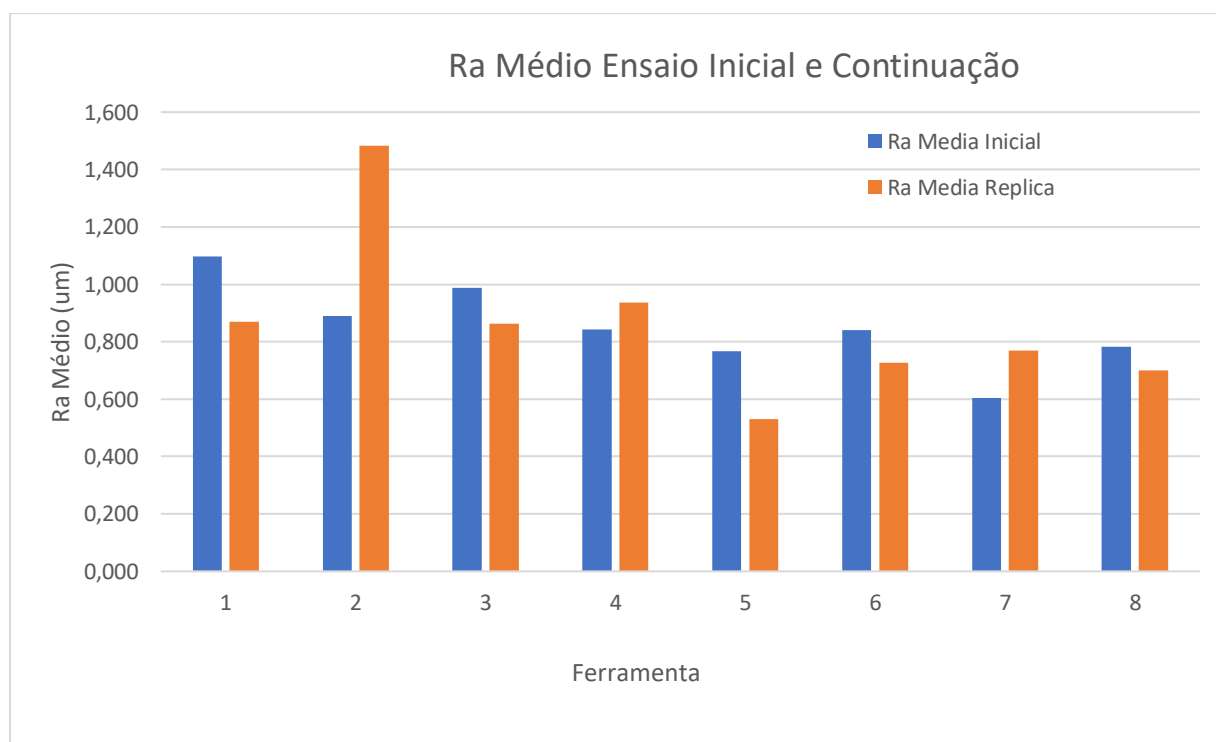


Figura 8 -Gráfico com as rugosidades R_a média para ensaio inicial e continuação

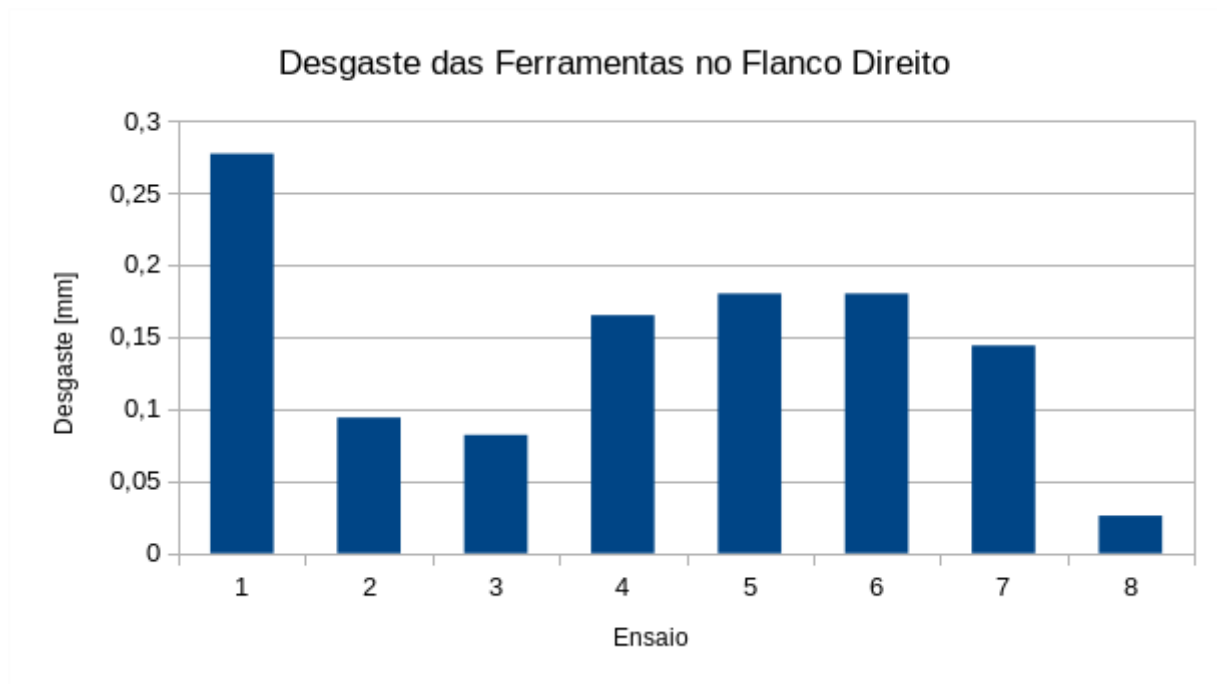


Figura 9 - Gráfico com os desgastes no flanco Direito das ferramentas.

Em relação às forças de corte é possível perceber que em geral são bem baixas e que houve um aumento considerável das forças dentre o primeiro ensaio inicial e na continuação, isso pode ser explicado devido ao desgaste da ferramenta nos ensaios continuação. É possível perceber que uma diminuição da força de corte no eixo Z, porém como é muito pequena e tem pouca variação, tal diminuição da força pode se dar por erro de medição e vibração da ferramenta de corte.

Embora as forças de corte sejam baixas, as pressões de corte são altas (acima de 3000 Mpa nos ensaios de continuação), as quais podem ter sido a causa do desgaste abrasivo na ferramenta bem como influenciado na adesão de material, visto que essas altas pressões de corte podem levar também a temperaturas elevadas.

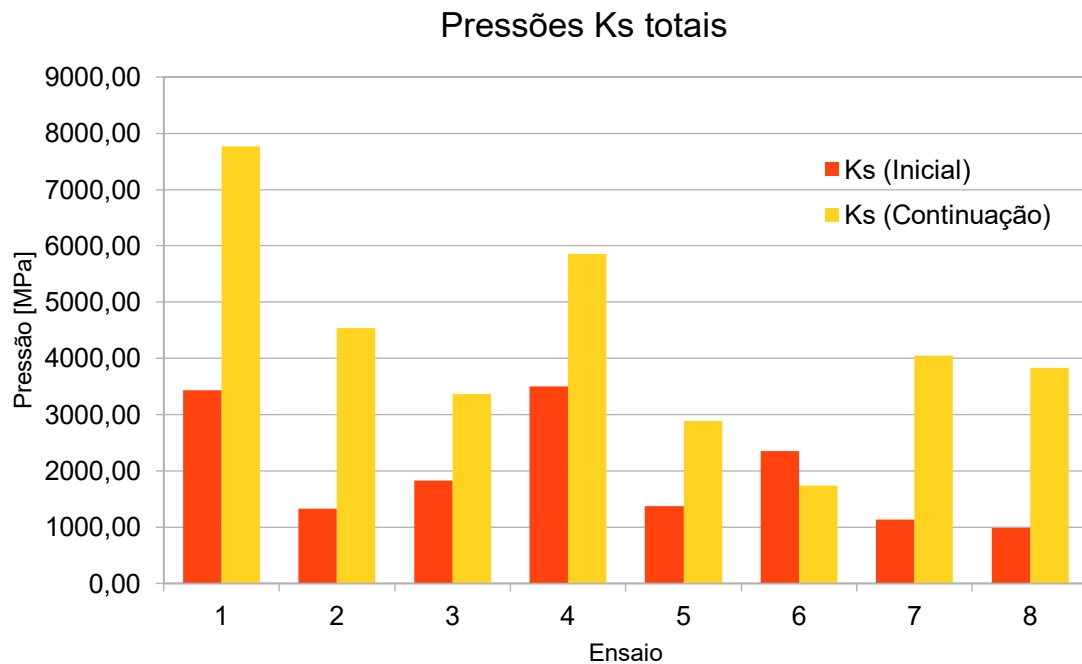


Figura 10 -Gráfico com as Pressões referente a Ft, ensaio inicial e continuação.

5.2 Desgaste

5.2.1 Primeira Rodada de Ensaios

Nas figuras 11 e 12 é possível perceber que houve desgaste nos ensaios iniciais, embora esse desgaste seja leve ele torna as condições de continuação do ensaio diferentes das iniciais e as áreas envolvidas nos cortes são também diferentes o que pode influenciar nas forças e potencias de corte.

Na figura 14 é possível perceber que houve desgaste de entalhe, enquanto na figura 13 é possível observar que houve desgaste de flanco acentuado. Na figura 14 é possível perceber também que há desgaste de flanco proeminente consumindo quase totalmente a superfície de corte.

Nas figuras 23 a 26 são visualizados os desgastes envolvendo adesão de material, sendo mais acentuado na figura 16 e 17.

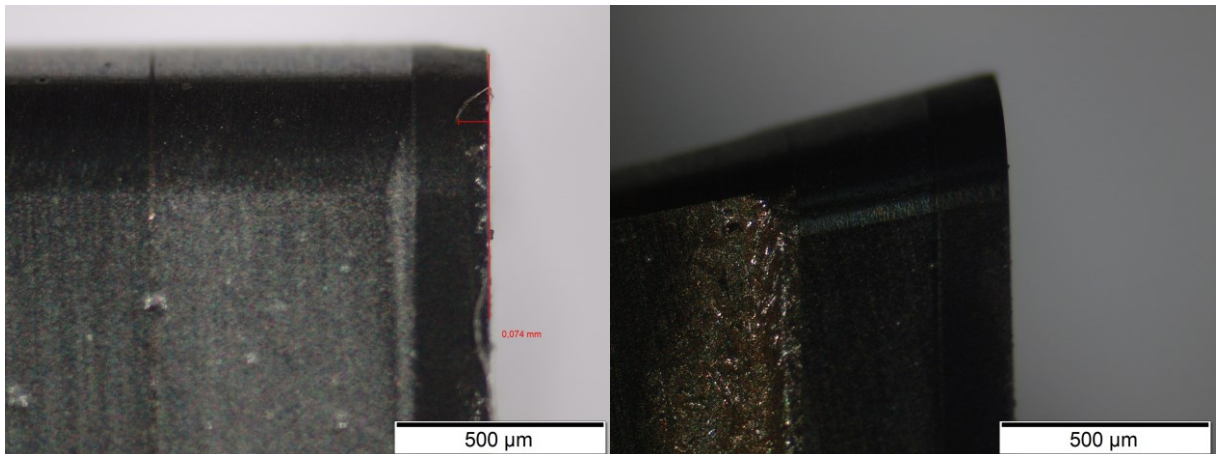


Figura 11 - – Ferramenta 1 e Ferramenta 2 no Ensaio Inicial

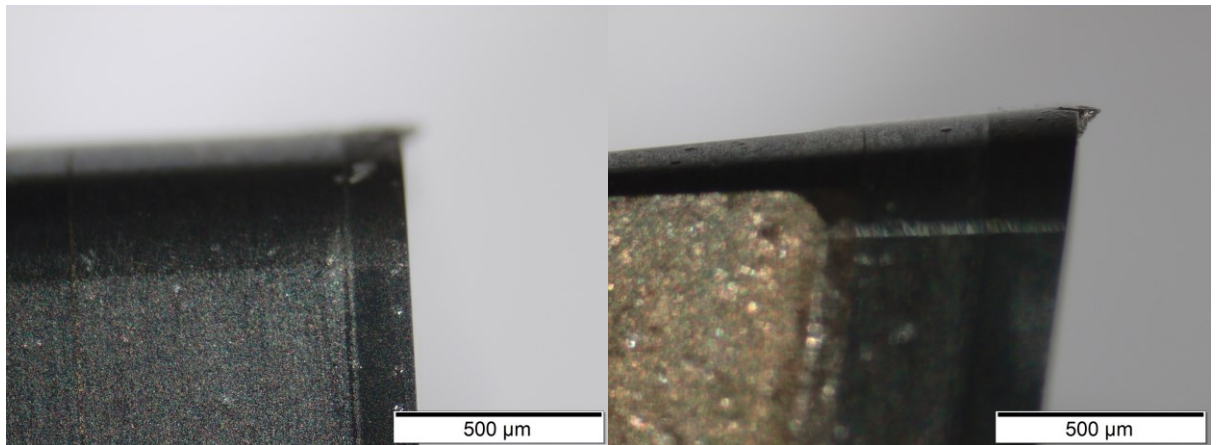


Figura 12 -Ferramenta 7 e Ferramenta 8 no Ensaio Inicial

5.2.2 Continuação

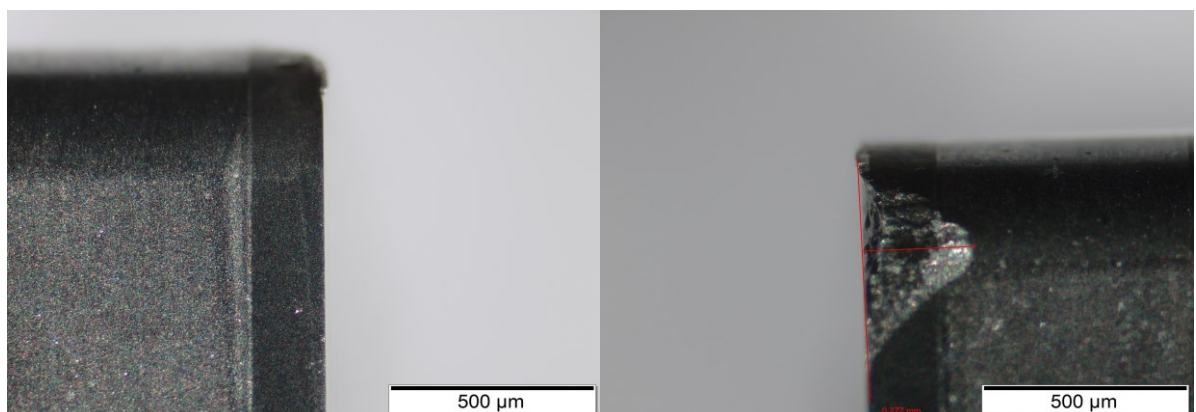


Figura 13 -Ferramenta 1 no ensaio Continuação flanco Direito e flanco Esquerdo

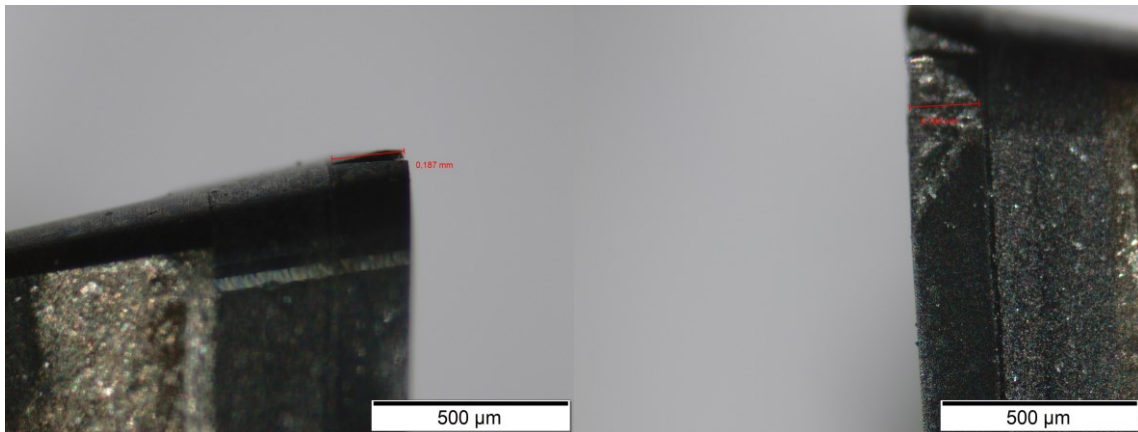


Figura 14 -Ferramenta 5 no ensaio continuação flanco Direito e flanco Esquerdo

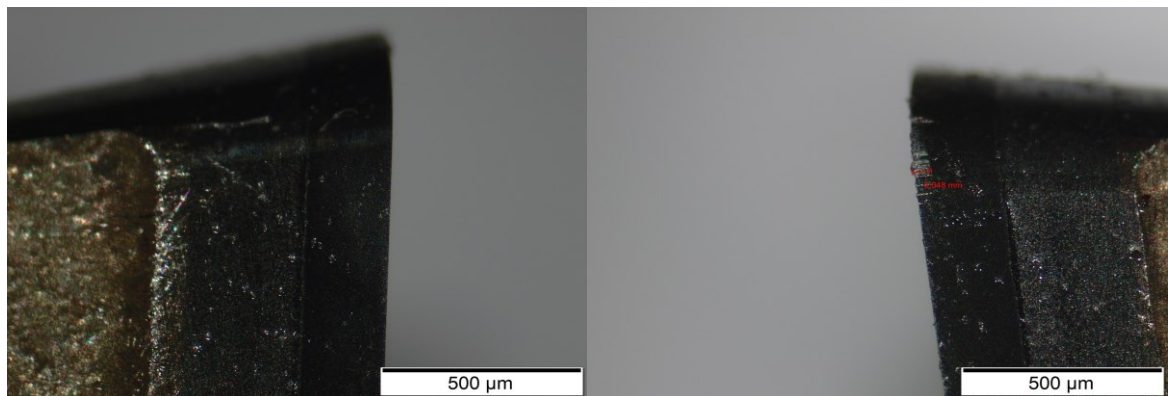


Figura 15 -Ferramenta 8 no ensaio continuação flanco Direito e flanco Esquerdo

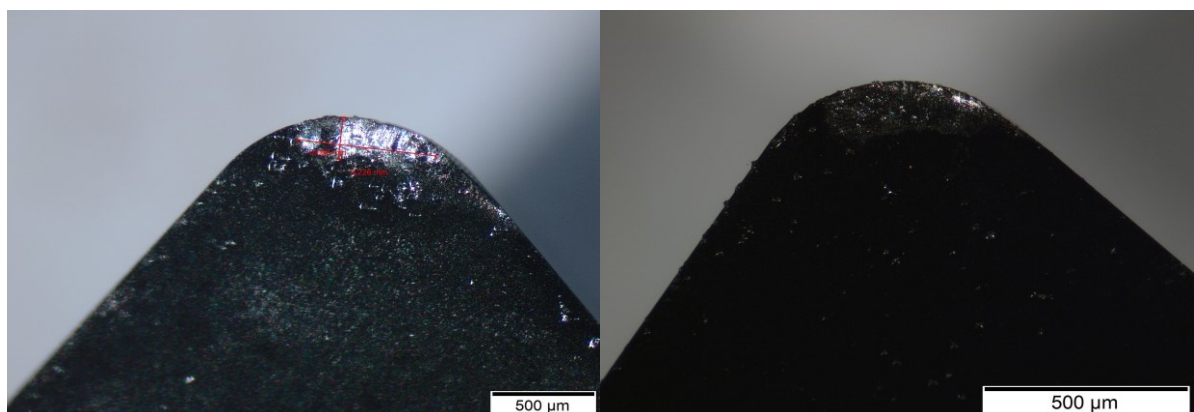


Figura 16 - Adesão de material nas ferramentas 3 e 4.

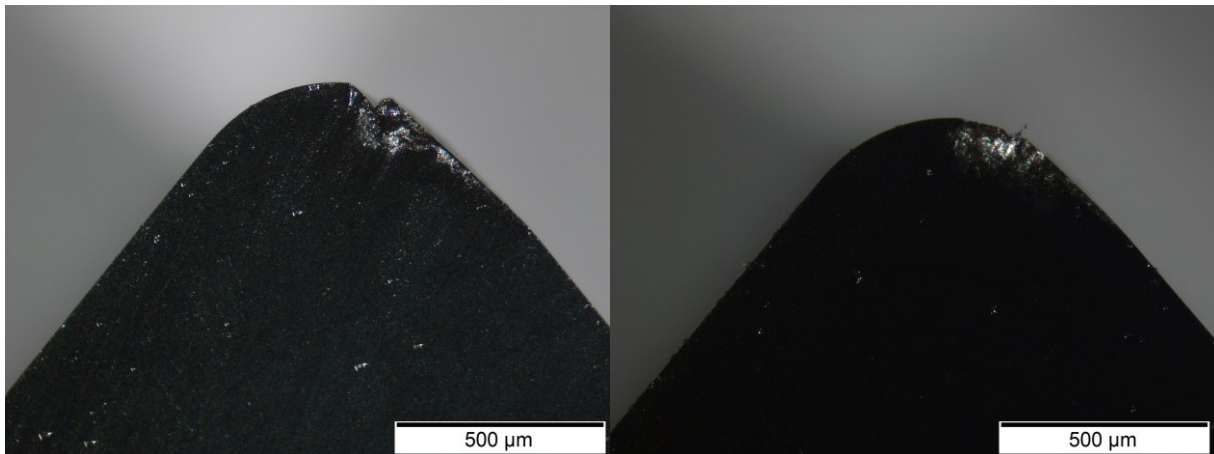


Figura 17 -Adesão de material nas ferramentas 5 e 6.

5.5 ANOVA

Para a ANOVA foi utilizado os valores de graus de liberdade para realizar o teste para F_t , R_a , R_q , K_s .

Tabela 5 - Anova para R_a

Fator	SS	df	MS	F	p
(1)Tipo	0,000584	1	0,000584	0,00670	0,936241
(2)f	0,098701	1	0,098701	1,13202	0,310143
(3)Vc	0,152751	1	0,152751	1,75194	0,212483
(4)MQL	1,025156	1	1,025156	11,75778	0,005633

Tabela 6 -Anova para F_t

Fator	SS	df	MS	F	p
(1)Tipo	52,9482	1	52,94818	1,866371	0,199170
(2)f	1,6384	1	1,63840	0,057752	0,814505
(3)Vc	0,4108	1	0,41082	0,014481	0,906386
(4)MQL	99,3570	1	99,35704	3,502238	0,088102

Para o R_a se encontrou um valor de p menor que 0,1 ou seja, um nível de incerteza menor que 1%, e um valor de F acima de 11, o que demonstra que há variância entre as medidas e que esse valor é estatisticamente significativo logo pode-se concluir que o MQL interfere nas medidas.

Tabela 7 - Anova para Ks

Fator	SS	df	MS	F	p
(1)Tipo	4619204	1	4619204	1,929644	0,192277
(2)f	8064634	1	8064634	3,368952	0,093594
(3)Vc	404810	1	404810	0,169107	0,688805
(4)MQL	7235185	1	7235185	3,022455	0,109991

Para F_t e Ks os p-value encontrados foram muito altos, logo não são estatisticamente significativos.

Para o desgaste apenas a velocidade de corte e o tipo da geometria apresentam um p-value significativo logo apenas essas medidas podem ser consideradas de influencia nos resultados, para ambas os resultados de F-value está acima de 10 , logo pode-se excluir a hipótese nula, ou seja tanto a velocidade de corte quanto a geometria da ferramenta podem influenciar no desgaste de flanco.

Tabela 8 -Anova para Desgaste do Flanco Direito

Source	SS	df	MS	F-Value	P-Value
(1) Tipo	0,018432	1	0,018432	16,64	0,027
(2)f	0,005941	1	0,005941	5,36	0,103
(3)Vc	0,012324	1	0,012324	11,13	0,045
(4)MQL	0,000968	1	0,000968	0,87	0,419

5.6 Afinidade Química

Utilizando o MEV foi possível perceber que houve aderência de material na ferramenta de corte, na Figura 18 apresenta essa aderência na ferramenta 6, embora essa aderência tenha variado em cada ferramenta os resultados da tabela apresentam um resultado médio e próximo ao encontrado nas outras ferramentas.

Nas Figuras 19 a 22 mostram-se avaliações das superfícies desgastadas no EDX (*Energy Dispersive X-Ray*), nas figuras 29 a 31 é visualizado a adesão de Cromo, Níquel e Ferro respectivamente. Na figura 28 é possível perceber locais de adesão de material e abrasão.

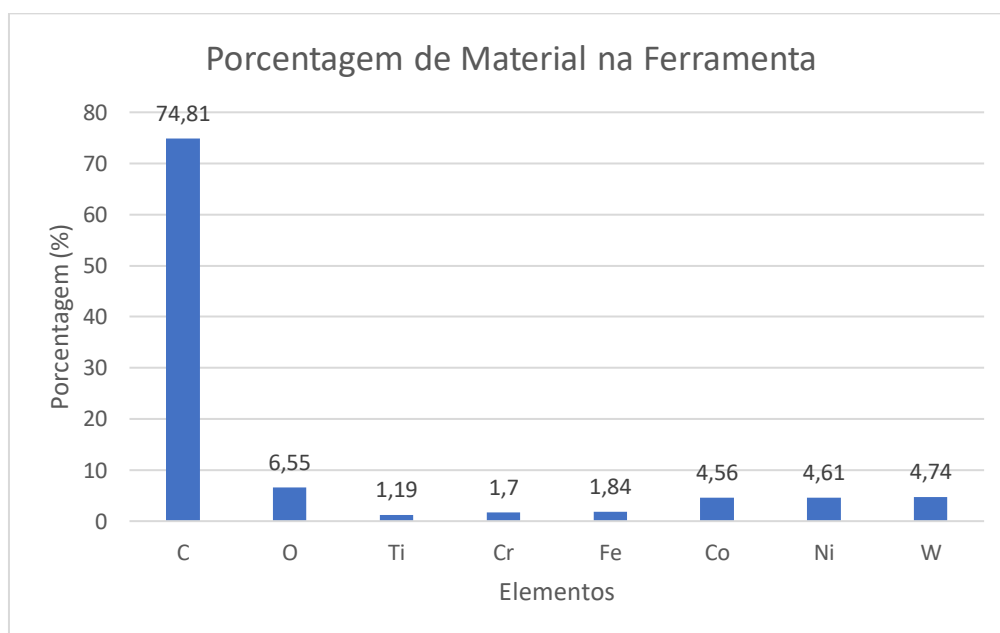


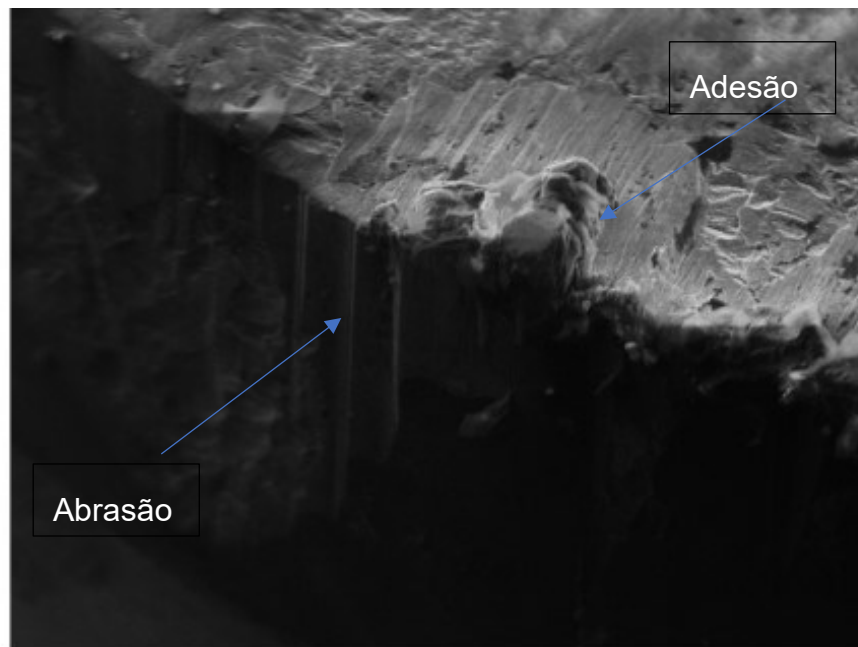
Figura 18 -Taxa de Adesão de Material na ferramenta 6.

É possível perceber que houve aderência de Fe, Ni e Cr, principalmente além de O, como o W e o Co como fazem parte do substrato da ferramenta não representam necessariamente aderência.

A aderência do O, pode ser explicada pela contaminação do ambiente bem como sua afinidade com Fe e Cr causando assim a presença de óxidos na ferramenta.

Essa aderência demonstra que os principais materiais presentes no Inconel usinado (Ni, Cr e Fe) foram aderidos a ferramenta, isso pode ser explicada pela alta

pressão de usinagem e afinidade química entre o Carbono da ferramenta com os principais elementos do Inconel.



Electron Image 1

Figura 19 - Imagem realizada pelo MEV da ferramenta 6

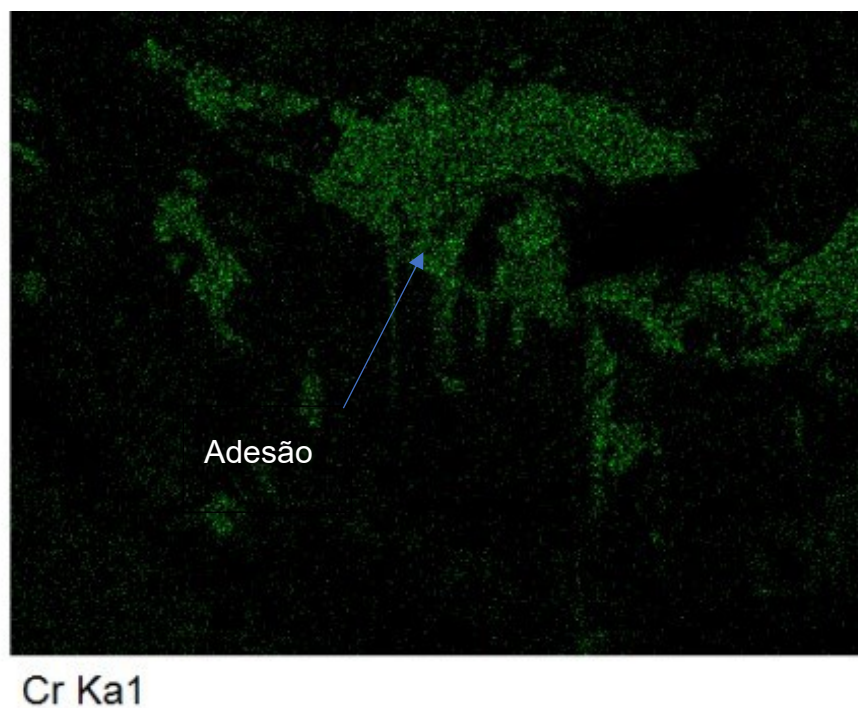


Figura 20 -Imagem do Cr aderido na ferramenta 6

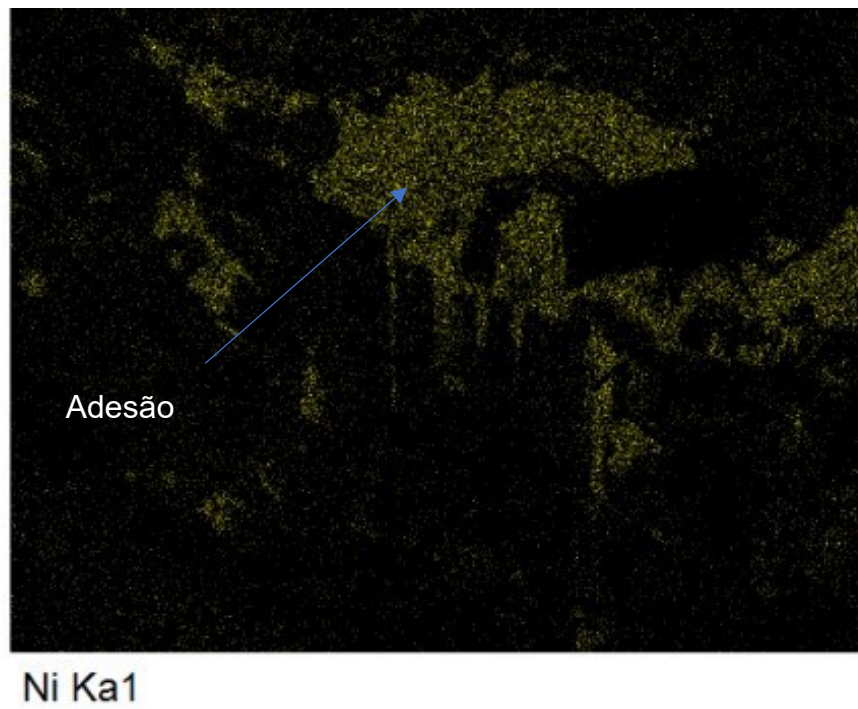


Figura 21 -Imagem do Ni aderido na ferramenta 6



Figura 22 -Imagem do Fe aderido na ferramenta 6

5.7 Caracterização do Desgaste

Ao observar o desgaste das ferramentas por meio do MEV verifica-se pelas Figuras 23 a 26 que o principal tipo de desgaste encontrado é o de flanco, causado por abrasão, caracterizado por microsulcos nas ferramentas, bem proeminente nessas figuras, porém em menor escala na figura 26 que representa a ferramenta 8.

Na figura 23 também há um desgaste de cratera que pode ter sido causado devido à pressão de corte. O EDX mostrou que há adesão de Cr e Ni (Figuras 24 e 25) no local da cratera, logo o desgaste pode ter sido causado por *attrition*.

Na figura 27 é possível perceber desgaste de entalhe, na ponta da ferramenta em forma de V esse é bem comum na usinagem de materiais resistentes a alta temperatura. Devido à alta pressão e temperatura de usinagem pode ter ocorrido *attrition* e difusão, ou devido à alta temperatura o diamante pode ter atingido o ponto de reorganização da microestrutura se transformando em grafite e consequentemente havendo desgaste demasiado.

Na ferramenta 6 da figura 28 é possível perceber desgaste de flanco causado por abrasão, mas também há grande adesão de materiais logo, a abrasão pode ter sido influenciada por adesão (*attrition*).

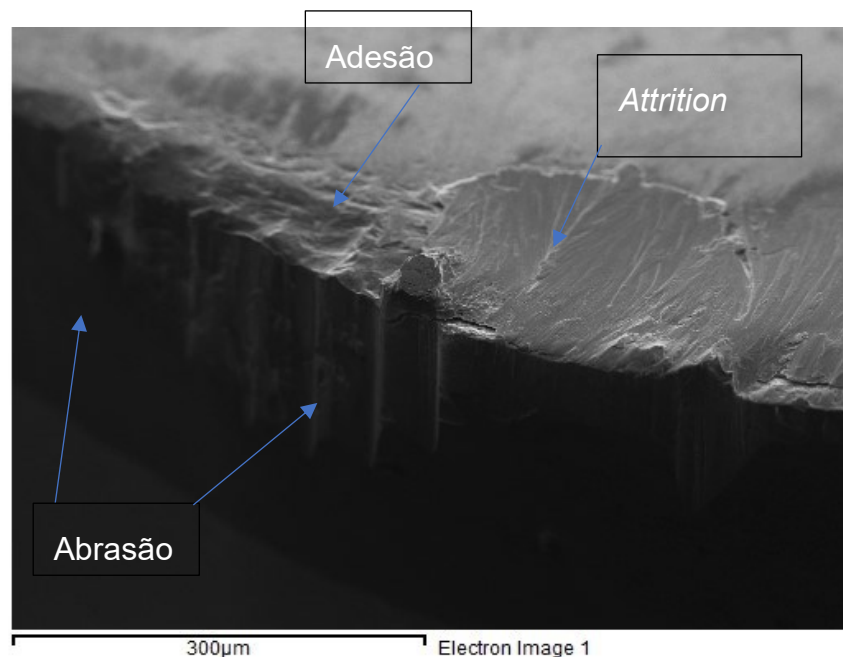


Figura 23 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 2

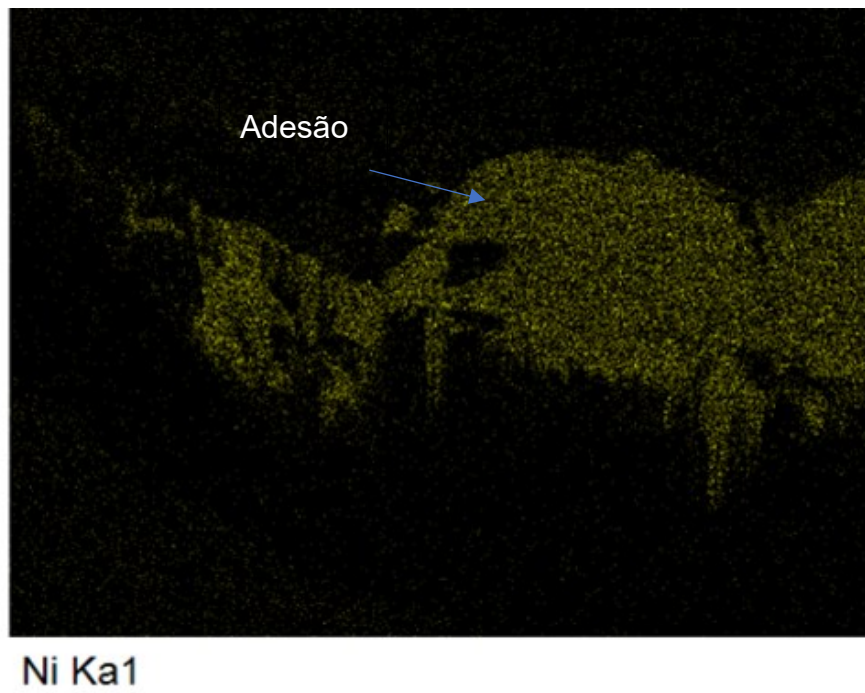


Figura 24 -Aderência de Ni na ferramenta 2.

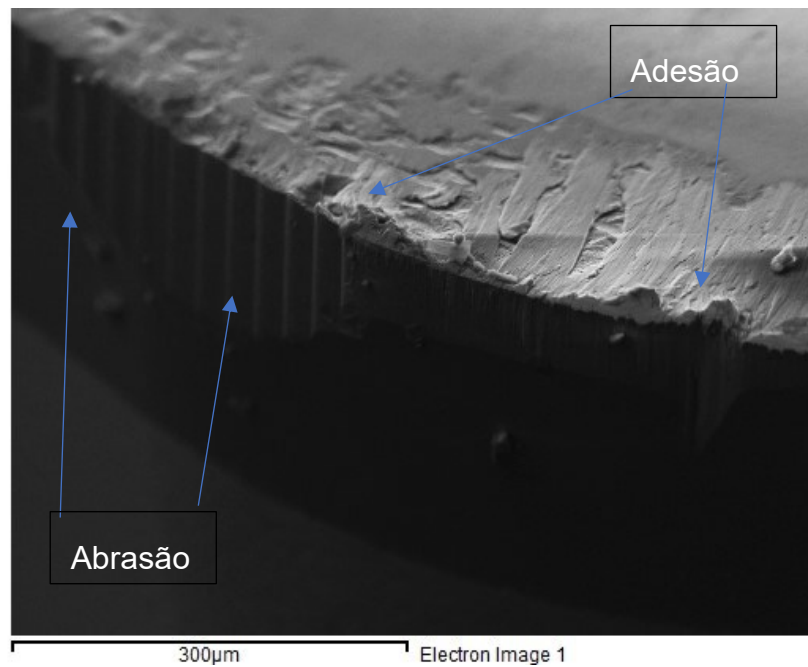


Figura 25 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 3

Na figura 26 também é possível observar uma superfície sem grandes relevos o que pode indicar difusão de material seguido de attrition, embora nesse caso não haja cratera, e sim uma superfície com aparência riscada.

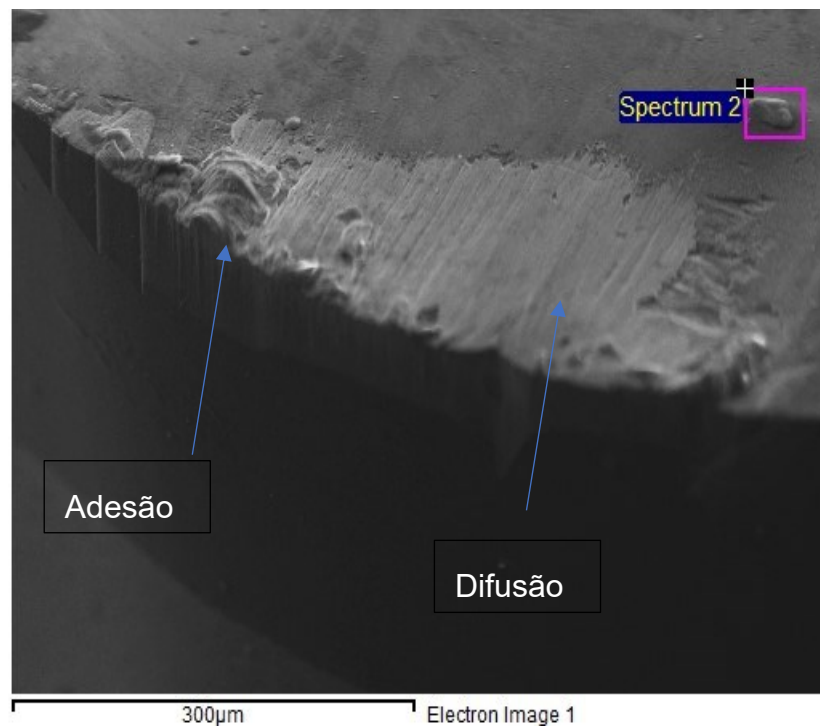


Figura 26 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 8

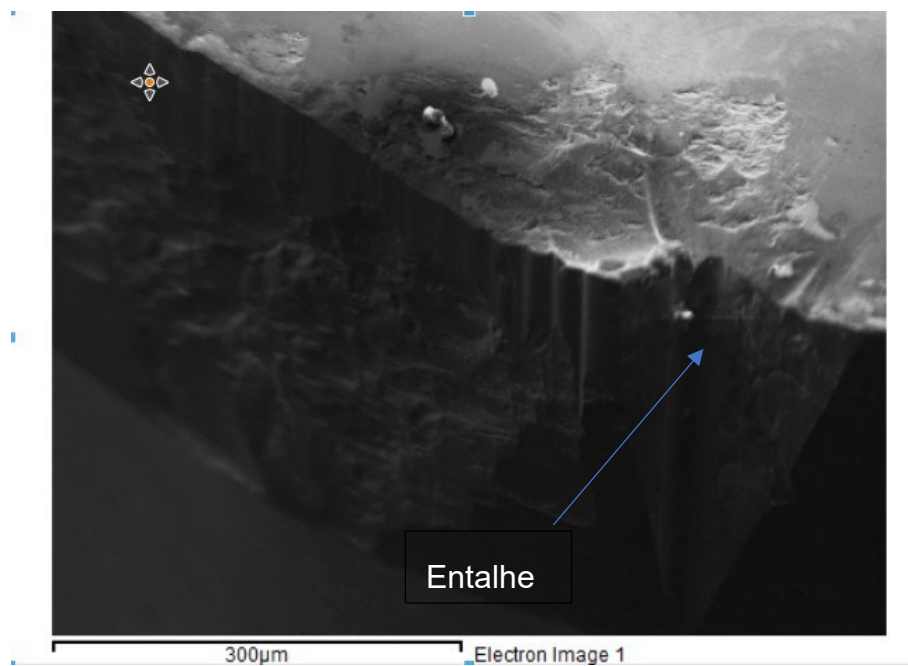


Figura 27 -Imagem realizada com o MEV do desgaste da Ferramenta 5.

6 CONCLUSÃO

Após as análises é possível constatar que os principais tipos desgastes encontrados foram de flanco, que já era esperado visto que esse é o principal tipo de desgaste em usinagem. Embora haja alta temperatura e pressão e o Inconel seja um material resistente em alta temperatura, não houve desgaste demasiado e apenas uma das ferramentas apresentou desgaste de entalhe.

Foi possível encontrar elementos do Inconel na ferramenta de corte, sendo os principais o Ni, Cr e Fe, essa adesão pode ser explicada pela alta pressão de usinagem. Houve também presença de Oxigênio que ocorre devido a contaminação do ambiente e sua afinidade com Fe e Cr principalmente.

Os valores de R_a abaixo de $0,8 \mu m$ podem significar uma possibilidade de utilização da ferramenta em aplicações industriais, porém para isso são necessários ensaios futuros para analisar o tempo de vida da ferramenta.

Em relação aos parâmetros de corte não é possível estabelecer uma relação entre velocidade ou avanço e melhores condições de corte, porém tanto o avanço de 0,3 e 0,5 [mm] bem como as velocidades de 75 e 150 [m/min] podem ser considerados bons valores. Sendo interessante prosseguir com ensaios de velocidade de 50 e 200 [m/min] para verificar possíveis diferenças. Porém é possível perceber que o MQL em 150 [ml/min] e que a geometria positiva, apresentam melhores resultados de desgaste e rugosidade.

Em geral o acabamento encontrado pode ser considerado bom e a ferramenta pode ser uma possibilidade viável para usinagem de Inconel em aplicações que requerem R_a inferior a 0,7, pendente ensaio de fim de vida para verificar o tempo de desgaste da ferramenta

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros é interessante realizar os ensaios sem a utilização do dinamômetro visto que sua utilização pode diminuir a rigidez do sistema suporte-ferramenta diminuindo assim a rugosidade final e possivelmente alterando o tempo de vida da ferramenta.

Outro ensaio importante é o ensaio de fim de vida para que possa ser avaliado qual o tempo de vida da ferramenta conseguindo assim uma melhor estimativa de custos da utilização e viabilidade em aplicações industriais.

É interessante também aumentar o range da velocidade de corte e avanço para verificar se há interferência de ambos no resultado final.

REFERENCIAS

ASM HANDBOOK, Volume 16-Machining, ASM International Handbook Committee, *ASM International, Electronic* (1989) ISBN: 978-1-61503-145-0

BRAGHINI JR, A. *Investigação do desgaste de ferramentas de PCBN e metal duro no fresamento de todo de aços endurecidos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 1998.

DA SILVA, R. B. MACHADO, A. R.; EZUGWU, E. O. . Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier B.V., v. 213, n. 8, p. 1459–1464, 2013. ISSN 09240136. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.008>>.

DAVIM, J. P. *Traditional Machining Process*. [S.l]: Springer, 2015.

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 12-13, p. 1353–1367, 2005. ISSN 08906955.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z.; MACHADO, A. R. The machinability of nickel-based alloys: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999.

FEQ, UFU; Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura. Disponível em: < <http://www.ppgeq.feq.ufu.br/en/node/245>>.

HESELWOOD, C. Metal machining. *Journal of the Franklin Institute*, v. 256, n. 5, p. 479, 1953. ISSN 00160032.

HOBSON, TAYLOR; *Surtronic® S-100 series*. Disponível em: <https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/product%20downloads/hand%20held%20surtronic/surtronic_s100_lowres_en.pdf>

HINTERMANN, H.; CHATTOPADHYAY, A. Low pressure synthesis of diamond coatings. *CIRP Annals*, 1993.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*, 2013.

LIMA, F. d. F. Estudo do desgaste de ferramentas de metal duro e cerâmicas no torneamento do Inconel® 751 e Inconel® 718. 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/4192>>.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Metais*. [S.l.]: Editora Edgard Blucher, 2015.

MAGALHÃES, C. A.; FERREIRA, J. R. Torneamento da liga ti-6al-4v em operação de acabamento com ferramentas de metal duro e PCD. FEIRA E CONGRESSO, COBEF, Anais cobef/2005/COF_013003214 , p.10, Joinville, Santa Catarina, 2005.

MARQUES, A. *Torneamento de Inconel 718 com Aplicação de lubrificantes solidos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

MINITAB. *Entendendo Análise de Variância ANOVA e o teste F*. 2019a. Disponível em: <<https://blog.minitab.com/pt/entendendo-analise-de-variancia-anova-e-o-teste-f>>.

MINITAB, E. *Interpret the key results for One-Way ANOVA* 2019b. Disponível em: <<https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/key-results/>>.

OLYMPUS ; SZ61/SZ51 Stereo Microscope. Disponível em: <[https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/stereo/sz61/#!cms\[tab\]=%2Fmicroscopes%2Fstereo%2Fsz61%2Fresources](https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/stereo/sz61/#!cms[tab]=%2Fmicroscopes%2Fstereo%2Fsz61%2Fresources)>

SALES, W. F.; SCHOOP, J.; JAWAHIR, I. Tribological behavior of pcd tools during superfinishing turning of the ti6al4v alloy using cryogenic, hybrid and flood as lubricoolant environments. *Tribology International*, 2017.

SANTOS, S.; SALES, W. *Aspectos Tribológicos da usinagem dos materiais*. [S.l.]: Ed. Artliber, 2014.

SMITH, G. D.; PATEL, S. J. The role of niobium in wrought precipitation-hardened nickel-base alloys. *The Minerals, Metals and Materials Society*, 2005.

SUMITOMO. *SUMIDIA DA1000 - Super Hard Grade for Machining of Aluminum-Alloy Excellent Performance, High Accuracy, High Efficiency*. 2018. Disponível em: <http://www.sumitomotool.com/fileadmin/user_upload/content/E-102_DA1000_6P_PC_CS5_customer.pdf>. Acesso em: 17 de maio de 2018.

TANAKA, H.; SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. High speed machining of Inconel 718 focusing on wear behaviors of pCBN cutting tool. *7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting*, 2016.

THAKUR, D. G.; RAMAMOORTHY, B.; VIJAYARAGHAVAN, L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning.

Materials and Design, Elsevier Ltd, v. 30, n. 5, p. 1718–1725, 2009. ISSN 02641275. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.011>.

ULUTAN, D.; OZEL, T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011.

XAVIOR, M. A. et al. Machinability studies on Inconel 718. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016.

APENDICE A – TABELAS

Tabela 9 -Rugosidade Média encontrada nos testes

FER	R_a	R_a Cont.	R_t	R_t Cont	R_1	R_q Cont.
1	1,097	0,870	10,900	7,233	1,433	1,133
2	0,890	1,483	7,767	11,867	1,200	1,900
3	0,987	0,863	9,733	11,000	1,333	1,200
4	0,843	0,937	7,167	6,967	1,100	1,133
5	0,767	0,053	7,967	3,833	1,033	0,753
6	0,840	0,727	6,533	7,500	1,067	1,293
7	0,603	0,077	5,567	8,167	0,767	1,113
8	0,783	0,070	5,967	5,000	0,967	0,940

Tabela 10 -Desgastes nas ferramentas após teste e continuação.

Fer	Flanco Esquerdo	Flanco Direito
1	0,054	0,277
2	0,047	0,094
3	0,049	0,082
4	0,037	0,165
5	0,187	0,180
6	0,079	0,180
7	0,122	0,144
8	0,034	0,048

Tabela 11 -Valores das Forças no primeiro ensaio

Fer	F_x	D_x	F_y	D_y	F_z	D_z	F_t
1	8,9389	4,1674	5,1376	3,8149	0,1181	0,1149	10,3101
2	3,9761	2,0990	0,1544	0,0798	0,4245	0,1660	3,9791
3	5,4839	1,9978	0,1668	0,0871	0,0830	0,0499	5,4865
4	10,5044	2,2819	0,1628	0,0698	0,4020	0,0279	10,5057
5	4,1036	2,3056	0,1707	0,0838	0,5473	0,1334	4,1071
6	7,0493	3,7319	0,1785	0,0810	0,4009	0,0843	7,0516
7	3,4083	1,4322	0,1647	0,0740	0,3796	0,0545	3,4122
8	2,9442	1,8990	0,1717	0,0716	0,5748	0,0490	2,9492

Tabela 12 -Valores das Forças na continuação.

Fer	F_x	D_x	F_y	D_y	F_z	D_z	F_t
1	18,9619	7,3323	13,5491	6,2843	0,0794	0,0791	23,3055
2	13,6179	6,8402	0,4005	0,1833	0,3627	0,0711	13,6238
3	10,0796	4,1120	0,1908	0,0745	0,0643	0,0643	10,0994
4	17,5788	9,6415	0,2312	0,0889	0,3400	0,0693	17,5804
5	8,8633	4,9292	0,2041	0,0848	0,0853	0,0546	8,6556
6	5,2013	3,7843	0,1675	0,0827	0,0585	0,0480	5,2040
7	12,1370	5,5939	0,1882	0,0774	0,4187	0,0605	12,1385
8	11,4998	5,8031	0,1762	0,0752	0,1821	0,0421	11,5011

Tabela 13 -Valores médio das Forças de Usinagem

Fer	$F_x(\text{avg})$	$D_x(\text{avg})$	$F_y(\text{avg})$	$D_y(\text{avg})$	$F_z(\text{avg})$	$D_z(\text{avg})$	$F_t(\text{avg})$
1	13,9504	5,7499	9,3434	5,0496	0,0988	0,0970	16,8078
2	8,7970	4,4696	0,2775	0,1316	0,3936	0,1186	8,8015
3	7,7818	3,0549	0,1788	0,0808	0,0737	0,0571	7,7930
4	14,0416	5,9617	0,1970	0,0794	0,3710	0,0486	14,0431
5	7,9563	4,3306	0,1913	0,0829	0,2431	0,0695	7,8536
6	4,3048	2,6083	0,1661	0,0784	0,2191	0,0513	4,3081
7	7,7727	3,5131	0,1765	0,0757	0,3992	0,0575	7,7754
8	7,2220	3,8511	0,1740	0,0734	0,3785	0,0456	7,2252

Tabela 14 -Valores das variações das forças entre o ensaio inicial e a continuação

Fer	ΔF_x	ΔD_x	ΔF_y	ΔD_y	ΔF_z	ΔD_z	ΔF_t
1	10,023	3,1649	8,4115	2,4694	-0,0387	-0,0358	12,9954
2	9,6418	4,7412	0,2461	0,1035	-0,0618	-0,0949	9,6447
3	4,5957	2,1142	0,024	-0,0126	-0,0187	0,0144	4,6129
4	7,0744	7,3596	0,0684	0,0191	-0,062	0,0414	7,0747
5	4,7597	2,6236	0,0334	0,001	-0,462	-0,0788	4,5485
6	-1,848	0,0524	-0,011	0,0017	-0,3424	-0,0363	-1,8476
7	8,7287	4,1617	0,0235	0,0034	0,0391	0,006	8,7263
8	8,5556	3,9041	0,0045	0,0036	-0,3927	-0,0069	8,5519

Tabela 15 -Valores da pressão Ks do Ensaio Inicial

FER	F_x	F_y	F_z	F_t
1	2979,63	1712,53	39,37	3436,70
2	1325,37	51,47	141,50	1326,37
3	1827,97	55,60	27,67	1828,83
4	3501,47	54,27	134,00	3501,90
5	1367,87	56,90	182,43	1369,03
6	2349,77	59,50	133,63	2350,53
7	1136,10	54,90	126,53	1137,40
8	981,40	57,23	191,60	983,07

Tabela 16 -Valores da pressão total Ks da continuação

FER	F_x	F_y	F_z	F_t
1	6320,63	4516,37	26,47	7768,50
2	4539,30	133,50	120,90	4541,27
3	3359,87	63,60	21,43	3366,47
4	5859,60	77,07	113,33	5860,13
5	2954,43	68,03	28,43	2885,20
6	1733,77	55,83	19,50	1734,67
7	4045,67	62,73	139,57	4046,17
8	3833,27	58,73	60,70	3833,70