

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA – CCET**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEMEC**

Wanderson Marcasso

**DESGASTE E VIDA DE FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DE UMA LIGA À  
BASE DE NÍQUEL**

SÃO CARLOS -SP

2023

Wanderson Marcasso

**DESGASTE E VIDA DE FERRAMENTA NO TORNEAMENTO DE UMA LIGA À  
BASE DE NÍQUEL**

Dissertação de mestrado  
apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de São  
Carlos, para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo  
Sette Antonialli

São Carlos-SP

2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

Marcasso, Wanderson

Desgaste e vida de ferramenta no torneamento de uma liga à base de níquel / Wanderson Marcasso -- 2023. 86f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Armando Ítalo Sette Antonialli

Banca Examinadora: Armando Ítalo Sette Antonialli, Gustavo Franco Barbosa, Milla Caroline Gomes, Daniel Iwao Suyama, Fabrício Tadeu Paziani

Bibliografia

1. Superliga de níquel. 2. Equação de Taylor. 3. Desgaste. I. Marcasso, Wanderson. II. Título.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Wanderson Marcasso, realizada em 10/07/2023.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama (UNICAMP)

Profa. Dra. Milla Caroline Gomes (UFU)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha esposa Tatiana e aos meus familiares, por todo apoio e companheirismos que me deram nessa etapa.

## **AGRADECIMENTO**

Antes de tudo, minha gratidão é voltada a Deus, que me proporcionou a força e a perseverança necessárias nesta extensa jornada de aprendizado.

Desejo manifestar minha sincera gratidão à minha esposa, Tatiana Oliveira Passos de Araújo. Sua presença fundamental e o apoio incessante em cada etapa desta jornada de aprendizado provaram ser vitais para a concretização deste projeto. O encorajamento e a compreensão dela serviram como uma inabalável coluna de força para mim.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli. Agradeço-lhe por compartilhar generosamente sua vasta inteligência e profundo conhecimento nos processos de fabricação e no âmbito acadêmico, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Walter Tools, minha sincera gratidão pelo suporte integral oferecido em relação ao ferramental utilizado nos experimentos. A qualidade e disponibilidade dos recursos fornecidos foram cruciais para o desenvolvimento do meu trabalho.

À WEB Nordeste, minha profunda gratidão pela disponibilização da matéria-prima indispensável para o desenvolvimento dos experimentos. A contribuição desta empresa foi essencial para a realização desta pesquisa.

À Torneasso Usinagem por disponibilizar suas máquinas ferramentas e sua tecnologia para a execução dos experimentos, fundamentais para essa pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte acadêmico e pela contribuição ao ambiente de pesquisa em que este trabalho foi desenvolvido

*“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”*

(Albert Einstein)

## RESUMO

No campo da usinagem de ligas metálicas, os materiais compostos predominantemente por ligas de níquel, com ênfase no Inconel 718, manifestam obstáculos notáveis, originados da interação de intensas forças de corte e extremas temperaturas na zona de corte. Essa combinação desencadeia desgastes acelerados nas ferramentas de corte. O presente estudo propõe uma investigação meticulosa dos parâmetros padronizados de torneamento, utilizando critérios robustos e amplamente reconhecidos para discernir sua pertinência e potencial de otimização. Centralizamos nossa análise nos multifacetados modos de desgaste, englobando o desgaste de flanco, de cratera e a emergente formação de aresta postiça, durante o processo de usinagem, fazendo uso de insertos comerciais meticulosamente selecionados para esta finalidade. Optou-se pela aplicação do modelo de Taylor, uma abordagem consagrada tanto no meio acadêmico quanto no setor industrial, visando uma avaliação perspicaz do desgaste das ferramentas de corte e interpretando seu comportamento intrínseco na usinagem de ligas de níquel. As conclusões da pesquisa revelaram descobertas preeminentes concernentes à correlação entre os parâmetros de corte e o desgaste das ferramentas, estabelecendo fundamentos sólidos para futuras estratégias orientadas ao prolongamento da durabilidade das ferramentas e ao refinamento da qualidade do produto final usinado.

**Palavras-chave:** Usinagem. Torneamento. Super Ligas de Níquel. Inconel. Modelo de Taylor. Desgaste.

## **ABSTRACT**

In the field of metal alloy machining, materials predominantly composed of nickel alloys, with a focus on Inconel 718, present notable challenges, stemming from the interplay of intense cutting forces and extreme temperatures in the cutting zone. This combination triggers accelerated wear on cutting tools. This study proposes a meticulous investigation of standardized turning parameters, using robust and widely recognized criteria to discern their relevance and optimization potential. We centered our analysis on multifaceted wear modes, encompassing flank wear, crater wear, and the emerging formation of built-up edge, during the machining process, using meticulously selected commercial inserts for this purpose. The application of the Taylor model was chosen, an approach revered both in the academic world and in the industrial sector, aiming for a discerning evaluation of the wear of cutting tools and interpreting their intrinsic behavior in machining nickel alloys. The research conclusions revealed eminent findings regarding the correlation between cutting parameters and tool wear, laying solid groundwork for future strategies aimed at extending tool durability and refining the quality of the final machined product.

**Keyword:** Machining. Turning. Nickel Superalloys. Inconel. Taylor Model. Wear-out.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de Fases Inconel 718 .....	20
Figura 2 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	22
Figura 3 - Orientação esquemática da aresta de corte da ferramenta de torneamento .....	23
Figura 4 - Representação esquemática de desgaste de cratera .....	24
Figura 5 - Representação esquemática de desgaste de flanco .....	25
Figura 6 - Representação esquemática de desgaste de entalhe .....	26
Figura 7 - Comparativo de dureza entre os revestimentos aplicados em ferramentas de usinagem .....	31
Figura 8 - Representação esquemática do processamento de torneamento.....	34
Figura 9 - Centro de torneamento CNC.....	41
Figura 10 - Microscópio óptico ALICONA.....	42
Figura 11 - Porta ferramentas Walter Tools .....	43
Figura 12 - Ferramenta de corte TNMG .....	44
Figura 13 - Inserto de corte utilizado nos estudos .....	44
Figura 14 - Composição Química corpos de prova inconel 718 .....	45
Figure 15 - Preparação do corpo de prova.....	46
Figura 16 - Corpo de prova durante torneamento com 35m/min (vc) .....	51
Figura 17 - 1ª Aresta com 35m/min (vc).....	52
Figura 18 - Imagem confocal esquemática da 1ª aresta com 35m/min (vc).....	53
Figura 19 - 2ª Aresta com 35m/min (vc).....	53
Figura 20 - Imagem esquemática da 2ª aresta com 35m/min (vc).....	54
Figura 21 - 3ª Aresta com 35m/min (vc).....	55
Figura 22 - Imagem confocal esquemática da 3ª Aresta com 35m/min (vc) .....	55
Figura 23 - 1ª Aresta com 45m/min (vc).....	57
Figura 24 - Imagem confocal esquemática da 1ª Aresta com 45m/min (vc) .....	58
Figura 25 - 2ª Aresta com 45m/min. (vc).....	58
Figura 26 - Imagem confocal esquemática da 2ª Aresta com 45m/min (vc) .....	59
Figura 27 - 3ª Aresta com 45m/min (vc).....	60
Figura 28 - Imagem confocal esquemática da 3ª Aresta com 45 m/min (vc) .....	61
Figura 29 - 4ª Aresta com 45m/min (vc).....	62

Figura 30 - Imagem confocal esquemática da 4ª Aresta com 45 m/min (vc) .....	63
Figura 31 - 5ª Aresta com 45m/min (vc).....	64
Figura 32 - 1ª Aresta com 55 m/min (vc).....	65
Figura 33 - Imagem confocal esquemática da 1ªa Aresta com 55 m/min (vc) .....	66
Figura 34 - 2ª Aresta com 55 m/min (vc).....	67
Figura 35 - Imagem confocal esquemática da 2ª Aresta com 55 m/min (vc) .....	68
Figura 36 - 3ª Aresta com 55m/min (vc).....	69
Figura 37 - Imagem confocal esquemática da 3ª Aresta com 55m/min (vc) .....	70
Gráfico 1 - Comparativo de eficiência na lubrificação ..... 38	38
Gráfico 2 - Avaliação de critério de vida útil através de VBB máximo.....	72

## LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1 - Composição química do Inconel 718.....	19
Tabela 2 - Classificação de aplicação de ferramenta de torneamento .....	29
Tabela 3 - Parâmetros de corte para usinagem de Inconel 718 .....	40
Tabela 4 - Parâmetros de torneamento.....	47
Tabela 5 - Comprimentos lineares de torneamento.....	48
Tabela 6 - Tempo de Usinagem .....	71
Tabela 7 - Parâmetros experimentais .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS

3D – Três dimensões  
ap – Profundidade de usinagem  
CO – Corte de Outliers  
APC – Aresta postiça de corte  
CNC – Comando numérico computadorizado  
f – Avanço  
gc – Geometria de corte  
m/min – Metros por minuto  
mm – Milímetros  
mm/rot – Milímetros por rotação  
MQL – Mínima quantidade de lubrificante  
rpm – Rotações por minuto  
 $R^2$  – Coeficiente de determinação  
Tc – Tempo de usinagem  
vc – Velocidade de Corte  
VB – Largura de desgaste de flanco  
VBB – Valor de desgaste de flanco máximo

## **LISTA DE SIGLAS**

ISO - Organização Internacional de Normalização

NBR – Norma Brasileira

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varnothing$  – Diâmetro

$\gamma$  – Gama

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>18</b>
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
3.1. USINAGEM DE LIGAS DE NÍQUEL.....	19
3.2. TIPOS DE DESGASTE.....	21
<b>3.2.1. Desgaste de Cratera .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.2. Desgaste de Flanco .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.3. Desgaste de Entalhe .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.4. Aresta Postiça .....</b>	<b>26</b>
3.4. SELEÇÃO DE FERRAMENTA .....	29
<b>3.4.1. Ferramenta De Metal Duro.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.2. Revestimentos Para Ferramentas de Usinagem de Superligas de Níquel 30</b>	
3.5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TORNEAMENTO .....	31
<b>3.5.1. Velocidade De Corte (vc) .....</b>	<b>31</b>
<b>3.5.2. Avanço De Corte (f).....</b>	<b>32</b>
<b>3.5.3. Profundidade De Usinagem (ap).....</b>	<b>34</b>
<b>3.5.4. Comprimento de Torneamento .....</b>	<b>35</b>
3.6. MODELO DE TAYLOR .....	36
3.7. ESTADO DA ARTE.....	37
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
4.1. MÁQUINA UTILIZADA.....	41
4.2. MEDIÇÃO ÓPTICA .....	42
4.3. PORTA FERRAMENTAS .....	42
4.4. FERRAMENTA DE CORTE.....	43
4.5. CORPOS DE PROVA.....	45
4.6. LUBRIFRIGERAÇÃO .....	47
4.7. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	47
4.8. MODELO DE TAYLOR .....	49

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
5.1. ANÁLISE DE DESGASTE .....	50
<b>5.1.1. Resultados dos Experimentos com 35m/min (vc) .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1.2. Resultados Dos Experimentos Com 45m/Min (vc) .....</b>	<b>56</b>
<b>5.1.3. Resultados Dos Experimentos Com 55 m/min (vc) .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1.4. Dados De Desempenho Das Arestas De Corte .....</b>	<b>70</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>79</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>80</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No atual contexto da metalurgia global, a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e aprimoramento de processos produtivos constituem-se como vetores centrais de inovação. Particularmente, o segmento de usinagem, com ênfase no torneamento, emerge como um locus preeminente de investigação, impulsionado pela necessidade de enfrentar desafios associados às ligas metálicas de vanguarda. O Inconel 718 exemplifica de forma emblemática esta conjuntura. Consoante os estudos seminalmente realizados por Klocke et al. (2015) e Zhang et al. (2015), o processo de usinagem deste material é marcado por uma série de complexidades oriundas de sua resistência e dureza intrínsecas. Tais propriedades resultam, conseqüentemente, em intensificação das forças de corte e incremento das temperaturas operacionais.

Este cenário propicia, como bem observado por Machado et al. (2018), um acelerado desgaste das ferramentas de corte, comprometendo sua eficiência e durabilidade. Entre os fenômenos frequentemente manifestados, destaca-se o desgaste de flanco, a configuração de aresta postiça e o desgaste caracterizado por entalhamento.

Nesta vertente, o presente estudo, fundamentado nas contribuições de Chen et al. (2003) e Grzesik et al. (2018), visa uma meticulosa análise do desgaste de ferramentas de torneamento, especificamente da categoria triangular TNMG classe S-10, elaboradas em metal duro, no contexto da usinagem do Inconel 718. A pretensão ultrapassa os limites de uma mera investigação; busca-se, efetivamente, influenciar o aperfeiçoamento das técnicas de usinagem e a definição ótima dos parâmetros de corte, com foco na maximização da eficácia na produção de componentes em Inconel 718.

Avaliando a temática sob um prisma mais abrangente, os resultados advindos desta pesquisa, alinhados aos postulados de Li. et al. (2002) e Zhenlong et al. (2021), detêm potencial para oferecer perspectivas inovadoras ao universo industrial. Tais descobertas têm como meta promover uma seleção criteriosa de parâmetros de corte e instrumentos de usinagem, conceito previamente corroborado por Bhatt et al. (2010).

Em suma, a essência desta pesquisa transcende a mera identificação; aspira-se a uma profunda compreensão dos mecanismos de desgaste inerentes à usinagem do Inconel 718, objetivando a efetiva otimização dos parâmetros de corte. Neste

âmbito, a pesquisa procura solidificar seu legado na indústria contemporânea, esboçando estratégias para a minimização de custos operacionais e o fomento da competitividade no cenário industrial, enfoque previamente enfatizado por Tayal et al. (2021).

## **2. OBJETIVO**

O estudo buscou avaliar a vida útil da ferramenta de metal duro convencional durante o torneamento da superliga Inconel 718.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos contarão com:

- Identificação dos padrões de desgaste na usinagem, tais como:
  - ✓ Desgaste de flanco
  - ✓ Desgaste de cratera
  - ✓ Formação de aresta postiça
- Análise do comportamento da superliga Inconel 718 sob diferentes condições de corte, com foco especial nas altas velocidades.
- Compreensão da relação entre os parâmetros de corte e o desgaste da ferramenta, buscando otimizar a eficiência e economicidade do processo de usinagem.
- Avaliação da influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta e suas consequências na qualidade do produto final e na durabilidade da ferramenta.
- Definir os parâmetros de corte ideais, com o objetivo de prolongar a vida útil da ferramenta e reduzir os custos na usinagem do Inconel 718.

## **3. REVISÃO DA LITERATURA**

Nesta seção do trabalho, serão abordados temas centrais, a saber: seleção do material, tipos de desgaste, seleção de ferramenta, parâmetros de torneamento, modelo de Taylor e Estado da arte. O objetivo desta seção é fornecer uma visão geral

dos principais elementos considerados no estudo da usinagem de materiais à base de liga de níquel, como o aço Inconel 718. Cada um desses temas será discutido em detalhes, destacando suas implicações para o processo de usinagem e o objetivo geral do estudo.

### 3.1. USINAGEM DE LIGAS DE NÍQUEL

O torneamento do Inconel 718 apresenta consideráveis desafios tribológicos devido à sua elevada resistência mecânica. Sua baixa condutividade térmica contribui para uma maior tendência de aderência (ou soldagem) do material à superfície da ferramenta de corte. A presença de elementos de liga, como o cobalto, molibdênio e titânio, pode levar à formação de microestruturas complexas, como precipitados e fases intermetálicas, que aumentam a dureza do material e tornam sua usinagem ainda mais desafiadora (SHOKRANI et al., 2019; OUTEIRO et al., 2005). Além disso, a alta temperatura na zona de corte pode causar uma reação química entre o Inconel 718 e o meio ambiente, resultando na formação de uma camada de óxido que adere firmemente à superfície da peça e aumenta o atrito entre a ferramenta de corte e a peça, levando a um desgaste acelerado da ferramenta de corte (SHOKRANI et al., 2019).

Tabela 1 - Composição química do Inconel 718

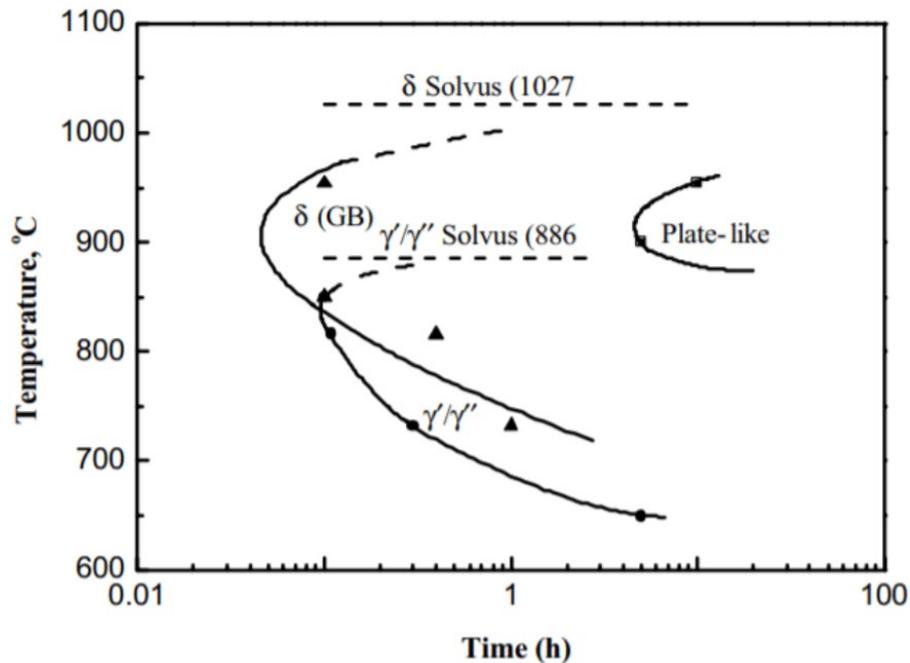
Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co
% Peso	50,0	17,0	Bal.	4,75	2,80	0,65	0,20	1,0
	55,0	21,0		5,50	3,30	1,15	0,80	máx
Elemento	C	Mn	Si	P	S	B	Cu	Pb
% Peso	0,08	0,35	0,35	0,015	0,015	0,006	0,30	0,001
	máx	máx	máx	máx	máx	Máx	máx	máx

Fonte: Adaptada (API SPEC 2020)

A composição química do Inconel 718 é um aspecto importante para compreender as propriedades e comportamentos do material durante a usinagem. A liga possui um alto teor de nióbio, que é responsável pela fase altamente endurecedora  $\gamma''$  ( $Ni_3Nb$ ). Além disso, apresenta baixos teores de tungstênio, molibdênio e tântalo, que são responsáveis pelo endurecimento por solução sólida

nas ligas de níquel, e baixos valores de alumínio e titânio, que são constituintes da fase  $\gamma'$ . Evidencia-se, assim, que o mecanismo mais efetivo de endurecimento desta liga é a precipitação da fase  $\gamma''$  (REED, 2006; FU; DONG; XIE, 2009).

Figura 1 - Diagrama de Fases Inconel 718



Fonte: Adaptada (XIE, et al 2009)

Outro aspecto importante da composição química do Inconel 718 é a presença de ferro em alta concentração e a praticamente ausência de cobalto. Essa particularidade reduz o custo da liga e pode ser uma das razões para a sua ampla utilização em setores críticos, como aeroespacial, de energia e petróleo e gás (REED, 2006). No entanto, a presença de elementos de liga, como o cobalto, pode levar à formação de microestruturas complexas, como precipitados e fases intermetálicas, que aumentam a dureza do material e tornam sua usinagem ainda mais desafiadora (SHOKRANI et al., 2019; OUTEIRO et al., 2006).

### 3.2. TIPOS DE DESGASTE

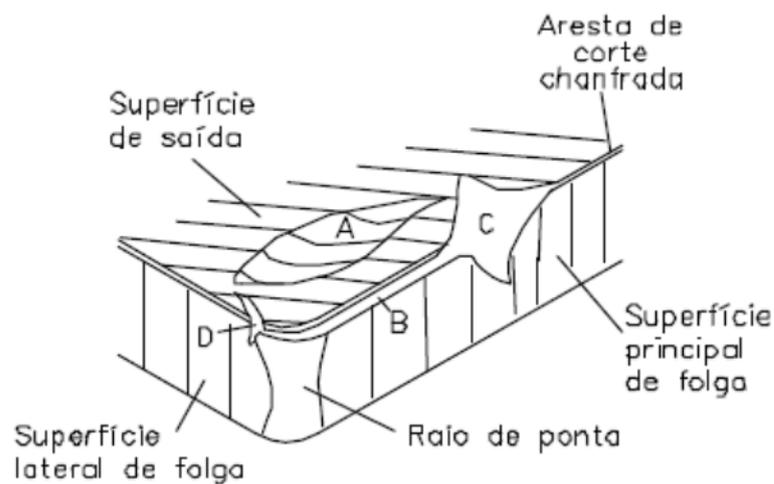
O desgaste de ferramenta é um fenômeno comum em processos de usinagem e está relacionado à perda gradual de material da ferramenta de corte ao longo do tempo. Essa deterioração pode ser influenciada por diversos fatores, como a geometria da ferramenta, as propriedades do material da peça usinada, as condições de corte e os parâmetros de usinagem. Segundo a revisão de literatura de Wang et al. (2022), o desgaste de ferramenta em processos de usinagem de ligas de titânio e níquel pode causar alterações na integridade superficial da peça, como a formação de trincas, tensões residuais e texturas superficiais. Contrastando com outros estudos, Wang et al. (2022) salientam que o desgaste de ferramentas ao usinar ligas de níquel pode resultar na formação de aresta postiça de corte (APC). Esta condição não apenas compromete a integridade superficial da peça usinada, mas também pode precipitar uma falha prematura da ferramenta." Os efeitos negativos do desgaste de ferramenta podem incluir a redução da qualidade da peça usinada, o aumento do tempo de parada da máquina e, conseqüentemente, a diminuição da produtividade e da rentabilidade do processo de usinagem. Diante disso, muitos estudos têm sido conduzidos para entender as causas do desgaste de ferramenta e desenvolver estratégias para minimizá-lo.

A avaliação do desgaste de ferramenta é realizada por meio de técnicas de medição, como microscopia eletrônica de varredura, interferometria óptica e análise de rugosidade. Essas técnicas permitem avaliar a intensidade e o tipo de desgaste, além de ajudar a determinar a vida útil da ferramenta de corte. Além disso, o modelo de Taylor tem sido amplamente utilizado na avaliação do desgaste de ferramenta durante processos de usinagem. Esse modelo propõe uma relação matemática entre a vida útil da ferramenta e a quantidade de material removido durante a operação de corte, levando em consideração os parâmetros de corte e as propriedades do material da peça usinada. Dessa forma, a análise da evolução do desgaste da ferramenta ao longo do tempo pode ser feita com base em dados quantitativos, permitindo previsões mais precisas sobre a vida útil da ferramenta e a identificação de tendências de desgaste.

Estudos como o de Niaki, Michel e Mears (2016) têm utilizado o modelo de Taylor para avaliar o desgaste de ferramenta em processos de usinagem. Esse

modelo tem se mostrado efetivo na identificação de tendências de desgaste e na previsão de falhas prematuras de ferramentas de corte. Assim, a utilização do modelo de Taylor pode ser uma ferramenta importante para o desenvolvimento de soluções efetivas para minimizar o desgaste de ferramenta e aumentar a eficiência do processo de usinagem.

Figura 2 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Adaptada (DEARNLEY, TRENT E WRIGHT, 1982)

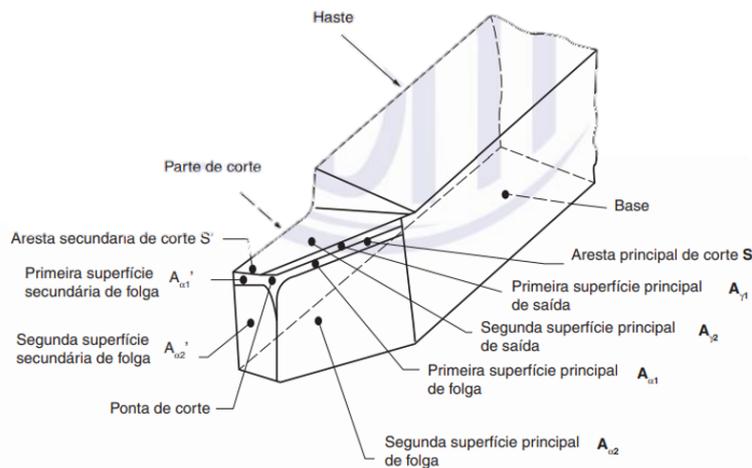
Podemos através da Figura 2, distinguir pelo menos três formas de desgaste:

- 1) De cratera (área A);
- 2) Flanco (área B);
- 3) De entalhe (áreas C e D).

Em síntese, cada modalidade de desgaste em uma ferramenta correlaciona-se a uma região específica, conforme delineado esquematicamente na Figura 3. Por exemplo, na superfície de saída, observa-se predominantemente o desgaste por formação de cratera. Esse tipo de desgaste é causado pelas altas temperaturas geradas na interface entre o cavaco e a ferramenta, resultante da combinação dos mecanismos de desgaste por difusão e adesão. A profundidade e a largura da cratera formada estão diretamente relacionadas à velocidade e avanço utilizados no processo

de corte (FERRARESI, 1970). O aumento do desgaste por cratera pode levar à quebra da ferramenta quando esse tipo de desgaste se encontra com o desgaste frontal (DINIZ et al., 2014).

Figura 3 - Orientação esquemática da aresta de corte da ferramenta de torneamento



Fonte: Adaptada (ABNT NBR-3002-1)

### 3.2.1. Desgaste de Cratera

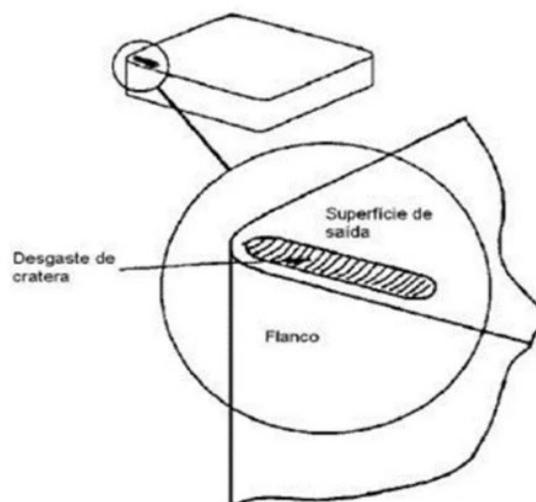
O desgaste por cratera é um fenômeno comum em processos de usinagem do Inconel 718. Esse tipo de desgaste pode ser causado pela presença de partículas duras na superfície da peça ou na interface ferramenta-peça, resultando na formação de microfissuras na superfície da ferramenta de corte (MACHADO et al., 2009). A ocorrência do desgaste por cratera pode levar à quebra prematura da ferramenta e redução da qualidade da peça usinada.

Para minimizar o desgaste por cratera durante o processo de usinagem do Inconel 718, é necessário adotar estratégias específicas. A escolha adequada da ferramenta de corte e da geometria da ferramenta é um fator importante na prevenção do desgaste por cratera. Pesquisas recentes indicam que a utilização de ferramentas revestidas com óxido de alumínio pode atenuar significativamente o desgaste por formação de cratera (THAKUR et al., 2009). Além disso, a otimização dos parâmetros de corte, como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem,

também é uma medida efetiva para minimizar o desgaste por cratera durante o processo de usinagem do Inconel 718 (MACHADO et al., 2009). A utilização de fluidos de corte adequados e a aplicação de técnicas de resfriamento também são medidas efetivas para minimizar o desgaste por cratera (THAKUR et al., 2009).

A avaliação do desgaste por cratera no Inconel 718 é realizada por meio de técnicas de medição, como microscopia eletrônica de varredura e análise de rugosidade. Essas técnicas permitem avaliar a intensidade e o tipo de desgaste por cratera, além de ajudar a determinar a vida útil da ferramenta de corte (SILVA et al., 2021).

Figura 4 - Representação esquemática de desgaste de cratera



Fonte: AMORIM, H, J., 2002

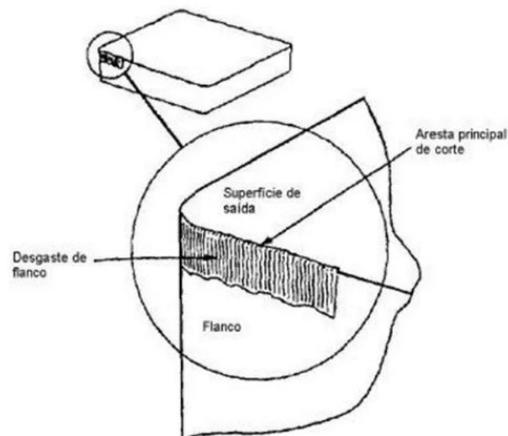
### 3.2.2. Desgaste de Flanco

O desgaste de flanco é um fenômeno comum em ferramentas de corte durante a usinagem, sendo caracterizado pelo desgaste na superfície de saída da ferramenta, conhecida como flanco (DINIZ et al., 2015). Resultante da interação tribológica entre a ferramenta e o material usinado, esse desgaste é influenciado por fatores como propriedades do material, condições de corte e geometria da ferramenta (SHAW, 2005).

A largura de desgaste de flanco (VB) é um critério frequentemente utilizado para determinar a vida útil da ferramenta, pois o aumento excessivo do desgaste de flanco impacta negativamente na qualidade da superfície usinada e na precisão dimensional das peças (TRENT & WRIGHT, 2000).

Estudos, como o de Liu et al. (2020), analisaram os mecanismos e fatores que influenciam o desgaste de flanco, demonstrando a relevância da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Além disso, o material da ferramenta e revestimentos são fatores relevantes no controle do desgaste de flanco (REIS et al., 2019).

Figura 5 - Representação esquemática de desgaste de flanco



Fonte: AMORIM, H, J., 2002

### 3.2.3. Desgaste de Entalhe

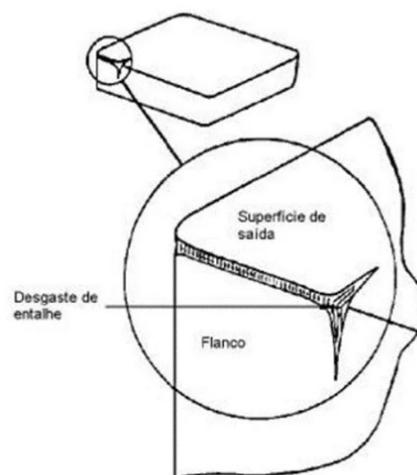
O desgaste por entalhe é um fenômeno de deterioração observado na região da aresta secundária de corte das ferramentas durante a usinagem, caracterizando-se pela formação de um entalhe ou ranhura na superfície da ferramenta, geralmente perpendicular à direção de avanço e na área de contato entre a ferramenta e o cavaco (TRUNG, et al., 2013).

Esse desgaste é resultado de mecanismos como adesão, abrasão e desgaste térmico, associados às interações entre a ferramenta, o cavaco e o material trabalhado (SOARES., 2013). Ocorre com maior intensidade em materiais dúcteis e

de difícil usinagem, como ligas de titânio e inconel, devido à alta adesividade e forças de corte (SARAVANAKUMAR, KUMAR; DAWOOD, 2012).

O desgaste por entalhe pode causar aumento das forças de corte, degradação da qualidade da superfície usinada e falha prematura da ferramenta (TIWARI et al., 2018). Portanto, é crucial monitorar e controlar esse tipo de desgaste para assegurar eficiência e qualidade no processo de usinagem.

Figura 6 - Representação esquemática de desgaste de entalhe



Fonte: AMORIM, H, J., 2002

### 3.2.4. Aresta Postiça

A aresta postiça, também conhecida por sua nomenclatura técnica como Aresta de Corte Construída (APC), é um fenômeno particularmente prevalente durante a usinagem de materiais dúcteis e de difícil usinabilidade, como aços inoxidáveis e ligas à base de níquel (XUANG-TRUONG; MINH-DUC, 2013). A origem deste fenômeno pode ser rastreada até a adesão de fragmentos do material usinado à aresta de corte da ferramenta. Esta aderência induz uma variação transitória na geometria de corte, frequentemente em detrimento da precisão e eficácia do processo (FONTANIVE, 2018).

Esta manifestação da APC não é meramente um inconveniente operacional. De fato, a presença desta aresta construída pode degradar consideravelmente a integridade superficial das peças usinadas. A razão subjacente a este comprometimento advém da remoção heterogênea do material, resultando em

superfícies acabadas caracterizadas por irregularidades, potencialmente demandando etapas adicionais de pós-processamento ou mesmo levando à rejeição de componentes em cenários de tolerâncias rigorosas (XUANG-TRUONG; MINH-DUC, 2013).

Além das implicações diretas sobre a qualidade da peça, a APC carrega consigo consequências secundárias que impactam o processo de usinagem como um todo. Por exemplo, a elevação das forças mecânicas e da temperatura na zona de corte, atribuída à presença da APC, pode desencadear um desgaste acelerado da ferramenta. Esta rápida degradação não somente reduz a vida operacional da ferramenta, mas também pode elevar os custos de produção e afetar a estabilidade do processo (GÓMEZ-PARRA et al., 2018).

Diante deste cenário desafiador, estratégias são necessárias para confrontar e controlar a formação da APC. Ajustes criteriosos nos parâmetros de usinagem, abrangendo variáveis como velocidade de corte, avanço e profundidade, são essenciais. No entanto, além da calibração destes parâmetros, é fundamental uma escolha ponderada de ferramentas e revestimentos. Certos revestimentos, devido à sua composição e propriedades, podem oferecer resistência superior à aderência do material, mitigando a formação da APC. Pesquisas contínuas neste domínio são imperativas para avançar as fronteiras do conhecimento e propiciar soluções robustas à indústria (TIWARI et al., 2018).

### 3.3. CLASSES DE FERRAMENTAS

A usinagem de ligas de níquel é uma atividade desafiadora, exigindo ferramentas de corte de alta qualidade e durabilidade. O processo é complexo e envolve altas forças de corte e temperaturas elevadas na zona de corte, que podem causar um desgaste intenso da ferramenta e prejudicar a qualidade da peça usinada, aumentando os custos de produção.

As classes de metal duro, S-10 e S-40, são frequentemente reconhecidas na literatura especializada como os materiais preferenciais quando se trata da usinagem de superligas à base de níquel, conforme a norma ISO 513 (2004), devido à sua alta resistência ao desgaste e às temperaturas elevadas geradas durante o processo de usinagem. Estas classes eram anteriormente conhecidas como K-10 e K-40 e foram

destacadas por Machado (2009) como as mais indicadas para a usinagem de ligas de níquel.

A escolha adequada da velocidade de corte, profundidade de corte e avanço é crucial para minimizar o desgaste da ferramenta e melhorar a qualidade da superfície usinada, principalmente durante a usinagem de superligas de níquel. Choudhury e El-Baradie (1998) indicam que as ferramentas de metal duro das classes S-10 e S-40 podem ser utilizadas com velocidades de corte de aproximadamente 50 m/min, mas a seleção precisa dos parâmetros de usinagem, juntamente com a geometria da aresta de corte, também é essencial para otimizar o processo de usinagem.

Além disso, estudos adicionais, como os realizados por Mustafa et al. (2022) e Xavier et al. (2017), evidenciam que a geometria da aresta de corte e os parâmetros de usinagem influenciam significativamente no desgaste da ferramenta. Portanto, a escolha adequada do material e da geometria da ferramenta de corte, juntamente com a definição precisa dos parâmetros de corte, é fundamental para prolongar a vida útil da ferramenta e obter peças de alta qualidade e menor custo de produção durante a usinagem de ligas de níquel.

Tabela 2 - Classificação de aplicação de ferramenta de torneamento

Grupo principal de aplicação			Grupo de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Materiais duros para corte		-	
P	azul	<b>Aço:</b> todos os tipos de aço e aço fundido, exceto aço inoxidável, com estrutura austenítica.	P 01 P 10 P 20 P 30 P 40 P 50	P 05 P 15 P 25 P 35 P 45	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
M	amarela	<b>Aço inoxidável:</b> aço inoxidável austenítico e aço austenítico/ferrítico e aço fundido.	M 01 M 10 M 20 M 30 M 40	M 05 M 15 M 25 M 35	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
K	vermelha	<b>Ferro fundido:</b> ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafite esferoidal e ferro fundido maleável.	K 01 K 10 K 20 K 30 K 40	K 05 K 15 K 25 K 35	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
N	verde	<b>Materiais não ferrosos:</b> alumínio e outros materiais não ferrosos, materiais não metálicos.	N 01 N 10 N 20 N 30	N 05 N 15 N 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
S	marrom	<b>Superligas e titânio:</b> ligas especiais, resistentes às altas temperaturas, baseadas em ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio.	S 01 S 10 S 20 S 30	S 05 S 15 S 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>
H	cinza	<b>Materiais com alta dureza:</b> Aço temperado, materiais de aço fundido temperado, aço fundido com coquilha.	H 01 H 10 H 20 H 30	H 05 H 15 H 25	↑ <sub>a</sub>	↓ <sub>b</sub>

<sup>a</sup> A diminuição do número associado à letra de identificação resulta no aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta (ver Tabela 6).

<sup>b</sup> O aumento do número associado à letra de identificação resulta no aumento da tenacidade (ver Tabela 6).

Fonte: Adaptada (ISO 513)

### 3.4. SELEÇÃO DE FERRAMENTA

Neste capítulo, será abordada a importante etapa da escolha da ferramenta de corte para a usinagem de ligas de níquel, com foco no Inconel 718. A seleção adequada da ferramenta desempenha um papel crucial no processo de usinagem, pois influencia diretamente a qualidade das peças usinadas, a produtividade e a vida útil da ferramenta

#### 3.4.1. Ferramenta De Metal Duro

A fabricação de ferramentas de corte envolve a seleção meticulosa de materiais que podem atender às especificidades de usinagem de diferentes ligas metálicas.

Segundo Machado (2009), existia uma preferência por determinadas especificações quando se tratava de usinagem de ligas de níquel. No entanto, com a evolução das normas e padrões, houve uma atualização e padronização conforme estabelecido pela ISO 513 (2004), refletindo as dinâmicas e avanços constantes na indústria de usinagem. No contexto da usinagem de superligas de níquel, Choudhury e EL-BARADIE (1998) salientam que velocidades de corte de 50 m/min são aplicadas ao utilizar ferramentas de metal duro dessas classes específicas. Desenvolvimentos recentes na tecnologia de ferramentas e na otimização dos processos de usinagem possibilitaram melhorias na eficiência de corte ao lidar com tais ligas complexas (THAKUR & GANGOPADHYAY, 2016; KLOCKE et al., 2011). Atualmente, ferramentas revestidas com alto desempenho e geometrias aprimoradas vêm sendo desenvolvidas para enfrentar os desafios inerentes à usinagem de superligas de níquel, como as da série Inconel (EZUGWU et al., 2018).

#### **3.4.2. Revestimentos Para Ferramentas de Usinagem de Superligas de Níquel**

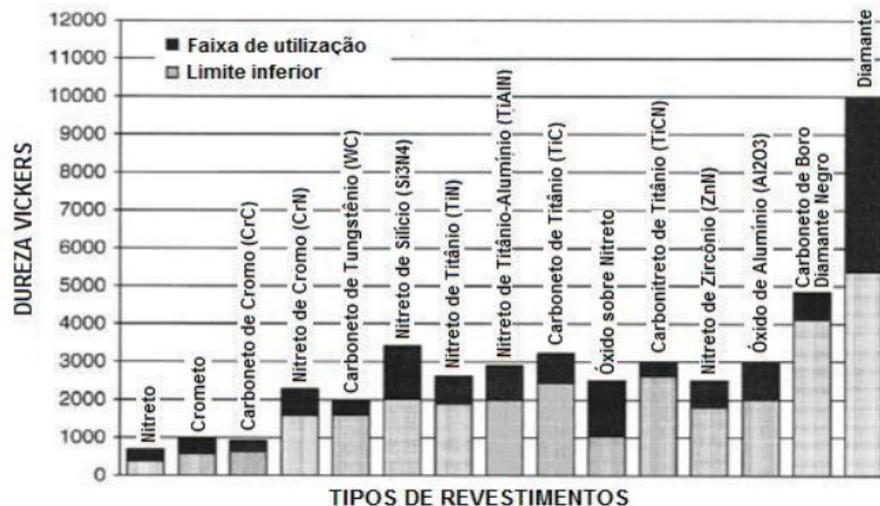
Ao longo das últimas décadas, a aplicação de revestimentos em ferramentas de usinagem tem atraído crescente interesse devido aos notáveis avanços na vida útil dessas ferramentas (ASTAKHOV et al., 2006). Os revestimentos aprimoram as propriedades superficiais das ferramentas, proporcionando maior resistência ao desgaste, redução do atrito e aumento da dureza. Essas melhorias se traduzem em processos de usinagem mais eficientes e produtivos (FOX-RABINOVICH et al., 2011; LIMA et al., 2012).

A evolução na área de revestimentos tem possibilitado o desenvolvimento de novos materiais e técnicas aplicáveis a ferramentas de usinagem, visando atender às exigências de aplicações específicas, como a usinagem de superligas de níquel e outros materiais de difícil usinabilidade (EZUGWU et al., 2018; POLINI et al., 2019).

Esses progressos têm impulsionado a otimização dos processos de usinagem, resultando em maior eficiência energética, menor tempo de inatividade das máquinas e diminuição da necessidade de manutenção das ferramentas (THAKUR & GANGOPADHYAY, 2016; KLOCKE et al., 2015).

Na figura 6 é apresentada faixas de durezas de revestimentos aplicados em ferramentas de corte.

Figura 7 - Comparativo de dureza entre os revestimentos aplicados em ferramentas de usinagem



Fonte: Adaptado (GRZERIK et al., 2012)

### 3.5. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TORNEAMENTO

Os parâmetros de torneamento são variáveis de processo que afetam diretamente a eficiência, produtividade e qualidade do processo de usinagem. São fatores que controlam a interação entre a ferramenta de corte e a peça em usinagem, incluindo velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem e geometria da ferramenta de corte, que influenciam o desempenho da usinagem, como a rugosidade da superfície, vida útil da ferramenta e a taxa de remoção de material. A seleção adequada dos parâmetros de corte é essencial para garantir um processo de usinagem eficiente, estável e confiável, minimizando o desgaste da ferramenta e maximizando a produtividade (CANTERO et al., 2013; DAS et al., 2020).

#### 3.5.1. Velocidade De Corte (vc)

A otimização dos parâmetros de corte é essencial para maximizar a eficiência e produtividade da usinagem, bem como para reduzir o desgaste da ferramenta de

corte em diferentes materiais e processos de usinagem. Estudos empíricos e numéricos têm se concentrado em técnicas avançadas de simulação e modelagem para avaliar o desempenho do processo de usinagem e identificar as condições ideais para alcançar a qualidade desejada (CANTERO et al., 2021; DAS et al., 2020).

A seleção adequada da velocidade de corte é crucial durante o processo de usinagem do Inconel 718, pois pode afetar o desgaste prematuro da ferramenta de corte, a formação de rebarbas e outras imperfeições na peça usinada (THAKUR et al., 2009). Reduzir a velocidade de corte durante o torneamento do Inconel 718 pode aumentar a formação de tensões residuais na peça usinada devido à redução da dissipação de calor na zona de corte (THAKUR et al., 2009). Por outro lado, o uso de baixas velocidades de corte pode resultar em altas forças de corte e temperaturas na zona de corte, levando ao desgaste prematuro da ferramenta de corte e à diminuição da qualidade do acabamento da peça usinada (SHOKRANI et al., 2019; OUTEIRO et al., 2006). O uso de altas velocidades de corte pode melhorar a eficiência da usinagem do Inconel 718, mas deve ser baseado em uma análise cuidadosa de fatores como geometria da ferramenta de corte, rigidez do sistema de fixação da peça e potência disponível da máquina de usinagem (SHOKRANI et al., 2019; OEZKAYA et al., 2019).

A equação da velocidade de corte é um parâmetro importante na seleção das condições de corte durante o torneamento do Inconel 718. A equação 1 é responsável por determinar a velocidade de corte a ser aplicada ao processo:

$$V_c = \frac{\pi x D x n}{1000} \quad (1)$$

onde  $V_c$  é a velocidade de corte (m/min),  $D$  é o diâmetro da peça (mm) e  $n$  é a velocidade de rotação do eixo-árvore da máquina de usinagem (rpm). A seleção da velocidade de corte adequada deve ser utilizada em conjunto com outras considerações técnicas e científicas para garantir o sucesso do processo de usinagem.

### 3.5.2. Avanço De Corte (f)

O impacto do avanço de corte no processo de usinagem é particularmente crítico na usinagem de ligas superausteníticas, como o Inconel 718, que apresentam alta resistência à deformação plástica e elevada taxa de desgaste da ferramenta de corte (ENZHAO et al., 2020). A escolha inadequada do avanço de corte durante o torneamento do Inconel 718 pode levar a um desgaste prematuro da ferramenta de corte, à formação de rebarbas e outras imperfeições na peça usinada (THAKUR et al., 2009).

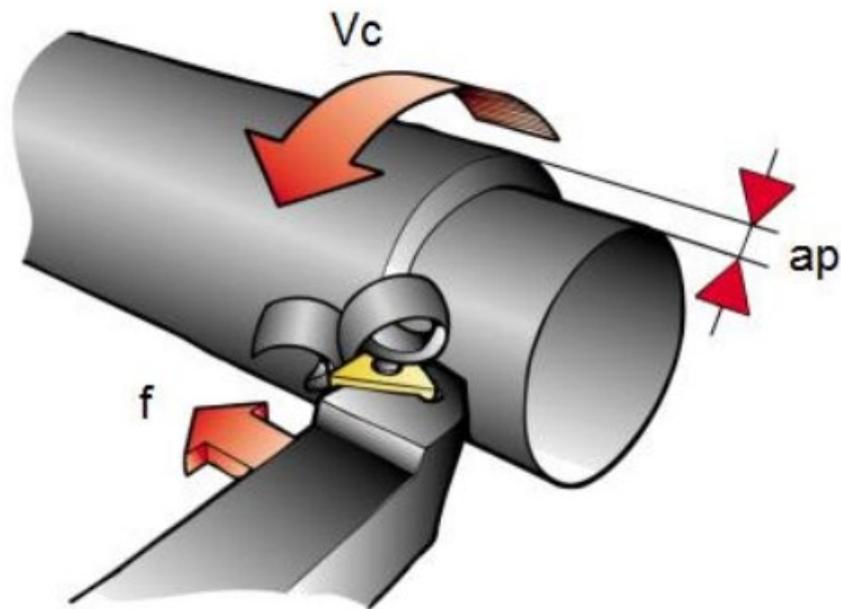
Pesquisas recentes têm se concentrado em estudos empíricos e numéricos para otimizar os parâmetros de corte para diferentes materiais e processos de usinagem, utilizando técnicas avançadas de simulação e modelagem para avaliar o desempenho do processo de usinagem e identificar as condições ideais para alcançar a qualidade desejada (CANTERO et al., 2013; DAS et al., 2020).

A seleção do avanço de corte adequado durante o processo de usinagem do Inconel 718 é crítica para garantir a qualidade da peça usinada e a vida útil da ferramenta de corte. Estudos mostram que valores de avanço de corte muito altos podem levar a um aumento da temperatura na zona de corte, resultando em um desgaste prematuro da ferramenta de corte (THAKUR et al., 2009). Além disso, altos valores de avanço de corte podem causar a formação de cavacos contínuos e longos, levando à quebra da ferramenta de corte (THAKUR et al., 2013).

Por outro lado, valores de avanço de corte muito baixos podem levar a uma redução na taxa de remoção de material e aumento da rugosidade da superfície da peça usinada (SHOKRANI et al., 2019). Portanto, a seleção adequada do avanço de corte deve levar em consideração os fatores específicos do material e do processo de usinagem para garantir a integridade da peça usinada e a vida útil da ferramenta de corte (ENZHAO et al., 2020).

Para determinar o melhor avanço para o torneamento, é importante considerar as recomendações do fabricante da ferramenta de corte e consultar literatura técnica especializada para o material em questão. Experimentos práticos também podem ser realizados para avaliar a influência do avanço na usinagem e na qualidade da superfície usinada.

Figura 8 - Representação esquemática do processamento de torneamento



Fonte: Adaptada (KENNAMENTAL, 2013)

### 3.5.3. Profundidade De Usinagem ( $a_p$ )

A escolha adequada da profundidade de usinagem é um fator crítico na usinagem de materiais, especialmente no caso do Inconel 718, uma liga de níquel super-resistente a altas temperaturas e corrosão. Estudos têm mostrado que valores inadequados de profundidade de usinagem podem resultar em consequências negativas, tais como a diminuição da vida útil da ferramenta de corte devido ao aumento da temperatura na zona de corte e a uma maior probabilidade de ocorrência de fissuras na peça usinada (PAWAR et al., 2019; AUGUSPURGER et al., 2020). Além disso, uma profundidade de usinagem muito baixa pode resultar em uma redução na taxa de remoção de material e aumento da rugosidade da superfície da peça usinada (CAMPOS et al., 2013).

A seleção adequada da profundidade de usinagem no Inconel 718 também está relacionada à qualidade do acabamento da peça usinada. De acordo com Auguspurger et al. (2020), uma profundidade de usinagem muito alta pode resultar em uma superfície de peça usinada rugosa, enquanto uma profundidade de usinagem muito baixa pode resultar em uma superfície de peça usinada com sulcos deixados

pela ferramenta de corte. Portanto, a escolha adequada da profundidade de usinagem é crucial para garantir uma superfície de peça usinada lisa e sem defeitos.

A seleção adequada da profundidade de usinagem no Inconel 718 deve ser realizada com base em uma análise cuidadosa dos fatores que influenciam o processo de usinagem, tais como o tipo de material, geometria da ferramenta de corte e velocidade de corte (SARAVANAKUMAR, KUMAR; DAWOOD, 2012; PAWAR et al., 2019; AUGUSPURGER et al., 2020). A profundidade de usinagem, que é a profundidade do corte realizado pela ferramenta de corte, pode ser obtida a partir do catálogo do fabricante da ferramenta de corte. A utilização de uma profundidade de usinagem correta e adequada permitirá uma usinagem eficiente e de alta qualidade, garantindo a integridade da peça usinada, a vida útil da ferramenta de corte e a qualidade do acabamento da superfície da peça usinada.

#### **3.5.4. Comprimento de Torneamento**

O comprimento de torneamento é um parâmetro fundamental para a produtividade e eficiência da usinagem, uma vez que está diretamente relacionado à taxa de remoção de material e à vida útil da ferramenta de corte (SARAVANAKUMAR, KUMAR; DAWOOD, 2012). Ele é definido como a distância linear percorrida pela ferramenta de corte durante a operação de torneamento em uma única passada (GAIKWAD et al., 2021).

A seleção adequada dos parâmetros de corte é crucial para aumentar o comprimento linear de torneamento e, conseqüentemente, melhorar a produtividade da usinagem. Estudos mostram que a escolha adequada da velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem pode resultar em um aumento significativo no comprimento linear de torneamento (GAIKWAD et al., 2021; SARAVANAKUMAR, KUMAR; DAWOOD, 2012).

No entanto, alguns fatores podem prejudicar o comprimento de torneamento, como a formação de cavacos longos e contínuos, aumentando a probabilidade de quebra da ferramenta de corte (THAKUR et al., 2013). Além disso, o acúmulo de calor na zona de corte pode resultar em um desgaste prematuro da ferramenta de corte e uma diminuição no comprimento de torneamento (GAIKWAD et al., 2021).

É importante ressaltar que o comprimento linear de torneamento é um dado importante para o cálculo de vida útil da ferramenta de corte (SHOKRANI et al., 2019). Portanto, a maximização desse parâmetro é um dos principais objetivos na usinagem do Inconel 718. Para isso, é essencial selecionar adequadamente os parâmetros de corte, levando em consideração as propriedades do material, a geometria da ferramenta de corte e as condições de usinagem. A redução do comprimento pode ocorrer devido a diversos fatores, como desgaste excessivo da ferramenta de corte, altas temperaturas na zona de corte e vibrações durante o processo de usinagem.

A maximização do comprimento linear de torneamento pode levar a uma redução nos custos de produção e a uma maior eficiência na usinagem de materiais super-resistentes como o Inconel 718. Portanto, é fundamental considerar e aplicar corretamente os parâmetros de corte para alcançar a melhor performance na usinagem deste material.

### 3.6. MODELO DE TAYLOR

O modelo de Taylor é uma importante ferramenta matemática utilizada para avaliar a vida útil da ferramenta de corte em operações de usinagem. A relação estabelecida por este modelo envolve a vida útil da ferramenta de corte, a taxa de remoção de material e os parâmetros de corte utilizados durante o processo de usinagem. A equação de Taylor é expressa pela equação 2:

$$T = k \cdot vc^{-x} \quad (2)$$

onde a variável  $T$ , correspondente à vida útil da ferramenta de corte, e pelos parâmetros  $k$  e  $x$ , que são constantes experimentais determinadas para cada material e geometria de ferramenta de corte (TAYLOR, 1907 apud ALTINTAS, 2011).

A aplicação do modelo de Taylor é particularmente relevante na usinagem do Inconel 718, um material super-resistente, onde a seleção adequada dos parâmetros de corte é crucial para garantir a vida útil da ferramenta de corte e a eficiência do processo de usinagem. A utilização deste modelo pode ser uma ferramenta valiosa para a avaliação da vida útil da ferramenta de corte em diferentes combinações de

parâmetros de corte, auxiliando na otimização do processo de usinagem e redução dos custos de produção (HOSSEINKHANI et al., 2020).

Para avaliar a vida útil da ferramenta de corte neste estudo, será utilizado o critério de desgaste máximo de aresta definido pela norma ISO 3685. Esta norma estabelece que o desgaste máximo de aresta permitido é de 0,3 mm, indicando que a ferramenta de corte deve ser trocada quando o desgaste da aresta atingir esse valor (ISO 3685:1993).

O objetivo deste estudo é utilizar o modelo de Taylor para avaliar a vida útil da ferramenta de corte durante a usinagem do Inconel 718, relacionando-o ao critério de desgaste máximo de aresta definido pela norma ISO 3685. Será verificado se os parâmetros de corte selecionados são capazes de garantir que a ferramenta de corte atinja a vida útil desejada antes de atingir o critério de desgaste máximo de aresta de 0,3 mm. Dessa forma, espera-se otimizar o processo de usinagem e reduzir os custos de produção.

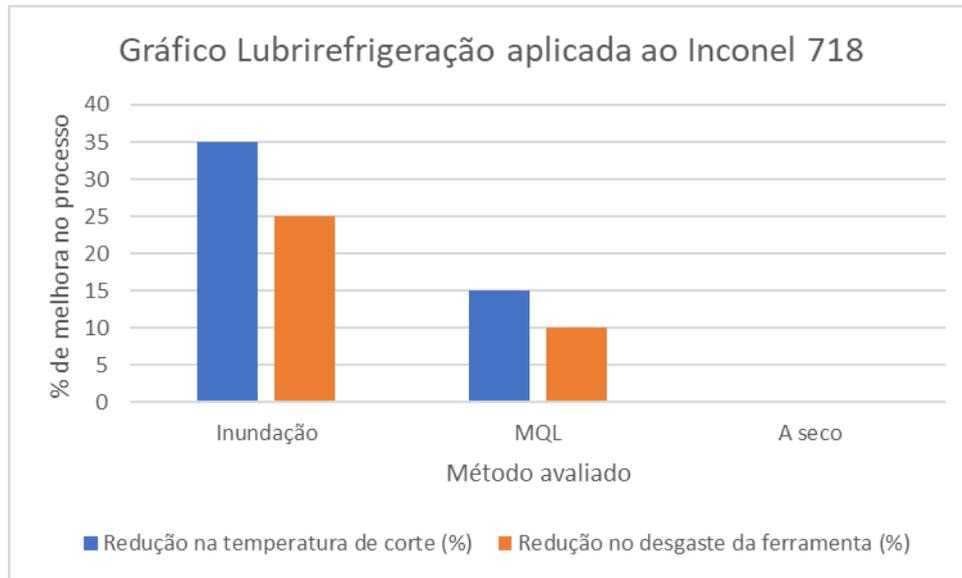
### 3.7. ESTADO DA ARTE

De acordo com a revisão de literatura realizada por Satish, Gaitonde e Kulkarni (2021), a usinagem de superligas de níquel, como o Inconel 718, apresenta desafios significativos devido às elevadas forças de corte e altas temperaturas na zona de corte. Esses desafios resultam em um desgaste acentuado da ferramenta de corte, o qual afeta diretamente a qualidade da peça usinada e os custos de produção. Estudos anteriores, como os de Mustafa et al. (2022) e Xavier et al. (2017), identificaram o desgaste de flanco e a formação de aresta postiça como os principais mecanismos de desgaste observados durante o torneamento do Inconel 718. Esses estudos também destacaram a influência dos parâmetros de usinagem, como a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, no desgaste da ferramenta.

Além disso, pesquisas indicam que a temperatura na zona de corte é um fator importante que afeta o desgaste da ferramenta, sendo influenciada pela velocidade de corte e pela profundidade de corte (EZUGWU, 2005). Estudos de Saleem et al. (2022) e Klocke et al. (2015) demonstraram que o método de lubrificação por inundação, no qual o fluido é aplicado em grande quantidade em toda a superfície da peça e da ferramenta de corte, é mais adequado para a usinagem do Inconel 718 em

comparação com o MQL, que é um método de aplicação de uma pequena quantidade de fluido em jatos diretamente na zona de corte conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 - Comparativo de eficiência na lubrificação



Fonte: Adaptado (SALEEM et al., 2022)

O estudo de Saleem et al. (2022) concluiu que o método de lubrificação por inundação proporcionou uma redução significativa na temperatura de corte e no desgaste da ferramenta de corte, enquanto o método MQL apresentou resultados inferiores. Por outro lado, o método a seco, que envolve a usinagem sem o uso de fluidos de corte, não é recomendado para a usinagem do Inconel 718, pois pode gerar altas temperaturas de corte e aumentar significativamente o desgaste da ferramenta de corte, prejudicando a qualidade da usinagem e a vida útil da ferramenta. A escolha adequada do material da ferramenta e da geometria da aresta de corte também foram apontadas como fatores importantes para prolongar a vida útil da ferramenta (CHOUDHURY et al., 1998; EZUGWU, 1999).

Para aprimorar a compreensão das relações entre os parâmetros de corte e o desgaste da ferramenta, estudos adicionais podem ser realizados para otimizar os parâmetros de corte, como a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte (RUBAIEE, 2022). O desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte e a investigação de revestimentos resistentes ao desgaste também podem contribuir para melhorar ainda mais a vida útil da ferramenta durante a usinagem do Inconel 718

(PINTAUDE et al., 2021). Além disso, a implementação de sistemas de controle adaptativo e técnicas de monitoramento em tempo real do desgaste da ferramenta e do processo de usinagem pode auxiliar na identificação e ajuste dos parâmetros de corte de acordo com as condições específicas de usinagem, possibilitando a otimização contínua do processo de usinagem (D'ADONNA et al., 2017).

Estudos adicionais têm utilizado o modelo de Taylor para investigar de maneira mais precisa e sistemática o desgaste da ferramenta e a qualidade da superfície na usinagem de superligas de níquel, como o Inconel 718. Esse modelo permite prever de forma analítica e teórica a força de corte, o desgaste da ferramenta e a rugosidade da superfície com base nos parâmetros de corte e na geometria da ferramenta (SATICH; GAITONDE; KULKARNI, 2021; XAVIOR et al., 2017). Essas abordagens têm contribuído para a compreensão dos fenômenos envolvidos na usinagem de superligas de níquel e permitem a otimização dos parâmetros de corte e da geometria da ferramenta, resultando em uma redução do desgaste da ferramenta e uma melhoria na qualidade da superfície usinada.

Dessa forma, esses estudos demonstram a utilidade e a importância do modelo de Taylor como uma ferramenta de avaliação da vida útil da ferramenta e da qualidade da superfície em processos de usinagem de superligas de níquel, incluindo o Inconel 718. A utilização desse modelo permite a otimização dos parâmetros de corte e da geometria da ferramenta, contribuindo para a minimização do desgaste da ferramenta e a melhoria da eficiência e produtividade do processo de usinagem. Além disso, o desenvolvimento de materiais e revestimentos resistentes ao desgaste, juntamente com a implementação de sistemas de controle adaptativo, são áreas de pesquisa promissoras para melhorar ainda mais a vida útil da ferramenta e a eficiência da usinagem de superligas de níquel como o Inconel 718.

Tabela 3 - Parâmetros de corte para usinagem de Inconel 718

Tipo de Desgaste	Vc [m/min]	ap [mm]	f [mm/rot]	Material da Ferramenta	Tipo de Desgaste
LIU et al. (2020)	90-120	0.2-0.6	0.1-0.15	Carbeto de tungstênio	Desgaste de flanco, formação de aresta postiça
CHEN, Y. C. e LIAO, Y. S., 2003	80-100	0.2-0.4	0.1-0.2	Carbeto de tungstênio	Desgaste de flanco
LIAO, Y. S., 2003	80-120	0.2-0.4	0.1-0.2	Carbeto de tungstênio	Desgaste de flanco
EZUGWU, E. O., 1999	80-120	0.2-0.6	0.2-0.4	Carbeto de tungstênio	Desgaste de flanco
CHOUDHURY, I.A. et al., 1998	20-30	0.2-0.4	0.15-0.3	Carbeto de tungstênio	Desgaste de cratera
CASTILLO, W.J.G., 2005	60-120	0.2-0.4	0.05-0.25	Cerâmica	Desgaste de flanco, desgaste de cratera

Fonte: Autoria própria

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados detalhes sobre os equipamentos, materiais e métodos utilizados na pesquisa. As informações sobre os equipamentos incluem especificações técnicas da máquina de usinagem utilizada, bem como a geometria e as configurações da ferramenta de corte. Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para desenvolvimentos deste trabalho. Destacando o método de experimento adotado e a condução dos ensaios.

### 4.1. MÁQUINA UTILIZADA

Os ensaios de torneamento foram conduzidos em um centro de torneamento CNC da marca ROMI, modelo GL-240. Esse equipamento é equipado com um motor principal de 11 kW (15 CV) e uma faixa de rotação de 4 a 4500 rpm, conforme apresentado na Figura 4. Esse equipamento foi escolhido por ser capaz de fornecer os parâmetros de corte necessários para a realização dos ensaios, como a profundidade de corte e a velocidade de avanço, além de possuir alta precisão na execução dos cortes. A utilização de um centro de torneamento CNC também possibilitou o controle automatizado das variáveis de corte, garantindo a reprodutibilidade dos ensaios e minimizando possíveis erros experimentais.

Figura 9 - Centro de torneamento CNC



Fonte: Próprio autor

## 4.2. MEDIÇÃO ÓPTICA

As análises tridimensionais por medição óptica foram realizadas no equipamento Alicona InfiniteFocus SL (Figura 9), disponível no laboratório de metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O Alicona InfiniteFocus SL é um sistema de medição óptica de alta resolução capaz de capturar imagens em 3D de alta qualidade com resolução submicrométrica.

Figura 10 - Microscópio óptico ALICONA



*Fonte: Adaptada (MANUAL ALICONA)*

## 4.3. PORTA FERRAMENTAS

Para garantir a estabilidade e precisão do processo de torneamento, é fundamental a escolha cuidadosa do porta-ferramenta e das configurações específicas de ângulo, especialmente quando se trabalha com materiais de difícil usinagem, como o Inconel 718. Neste estudo, foi utilizado o porta ferramentas de insertos de 16 mm com posição esquerda de usinagem fornecido pela empresa WALTER TOOLS (Figura 10). O ângulo de saída igual a  $-6,0^\circ$ , enquanto o ângulo de posição está estabelecido em  $93^\circ$ .

Figura 11 - Porta ferramentas Walter Tools



*Fonte: Próprio autor*

#### 4.4. FERRAMENTA DE CORTE

A ferramenta de corte utilizada na pesquisa foi fabricada pela empresa WALTER TOOLS, selecionada após uma avaliação criteriosa que envolveu comparações com outras marcas. A escolha da classe de inserto foi baseada no melhor desempenho apresentado em um processo de torneamento realizado em uma empresa local. Os parâmetros de corte utilizados foram estabelecidos dentro das especificações fornecidas pelo fabricante e foram validados através de processos de usinagem seriada.

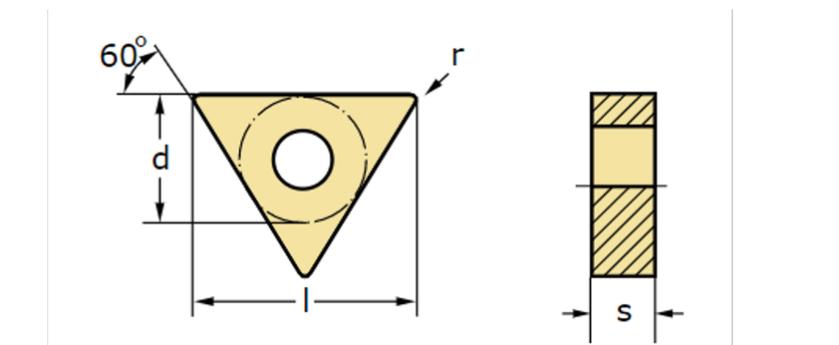
O inserto selecionado é de metal duro classe S10 com revestimento, modelo TNMG 160408 - FM5 - WSM-10S. Possui um formato de geometria triangular com quebra-cavaco negativo, proporcionando melhor controle de cavaco durante o processo de usinagem. Além disso, o inserto é revestido com Tiger-Tec PVD ( $Al_2O_3$ ), um revestimento de alta performance que confere maior resistência ao desgaste e aumento na vida útil da ferramenta. A Figura 12 apresenta o inserto utilizado na pesquisa e a Figura 13 apresenta as dimensões.

Figura 12 - Ferramenta de corte TNMG



Fonte: Próprio autor

Figura 13 - Inserto de corte utilizado nos estudos



Detalhes do produto

Descrição	Símbolo	Valor
Diâmetro do círculo interno	d	9,5 mm
Raio de ponta	r	0,8 mm
Avanço por rotação	f	0,15–0,5 mm
profundidade de corte	$a_p$	0,4–3 mm
Cutting Speed	$v_c$ <b>P</b>	100–170 m/min
	$v_c$ <b>M</b>	110–250 m/min
	$v_c$ <b>S</b>	20–60 m/min

Fonte: Adaptada (CATÁLOG GPS ELIBRARY WALTER TOOLS)

#### 4.5. CORPOS DE PROVA

Corpos de prova, com dimensões de diâmetro  $\varnothing 2''$  e comprimento de 250mm e composição química ilustrada na Figura 14, serão empregados na pesquisa. Estes serão expostos a distintas faixas de velocidade de corte e comprimentos lineares, mantendo-se inalterados a profundidade de usinagem e o avanço. O material é obtido pelo processo de Vacuum Arc Remelting, onde é submetido a ciclos de fusão e refusão em ambiente a vácuo, garantindo assim sua pureza. Após essa etapa, submete-se o material a um tratamento de envelhecimento, procedimento este amplamente adotado em componentes destinados ao setor de petróleo e gás. As condições de usinagem serão mantidas constantes durante cada ensaio, a fim de garantir a reprodutibilidade dos resultados. Será realizado um ensaio para cada combinação de velocidade de corte e faixa de comprimento linear, com a medição regular da vida útil da ferramenta de corte para determinar o efeito da variação do comprimento linear e da faixa de velocidade de corte no desgaste da ferramenta. A análise dos resultados permitirá identificar a relação entre esses parâmetros e a vida útil da ferramenta de corte durante o processo de torneamento do Inconel 718.

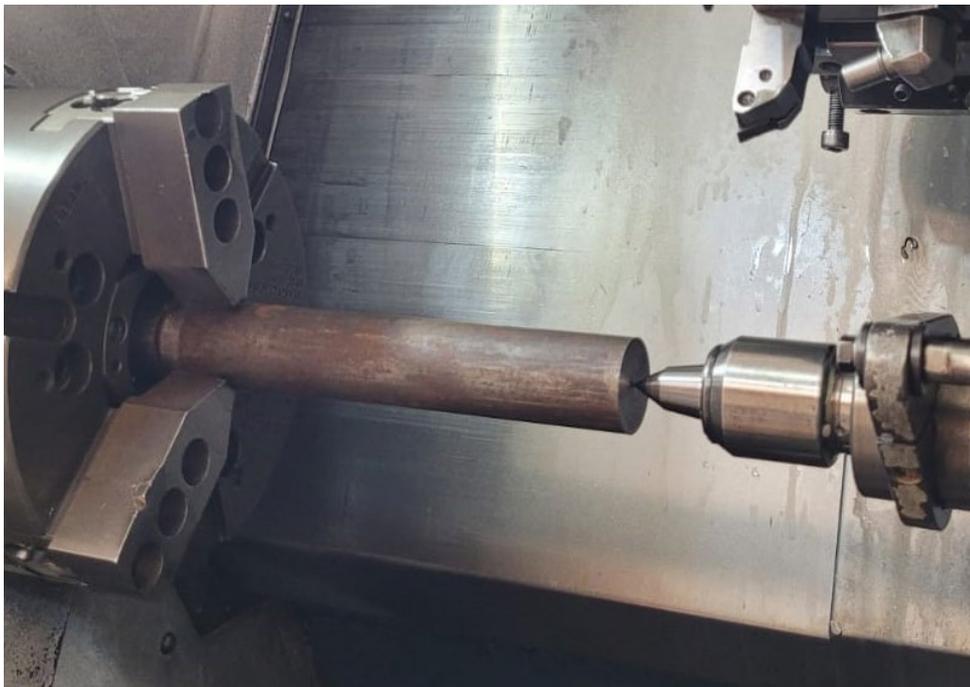
Figura 14 - Composição Química corpos de prova inconel 718

Element	Composition (w/%)
Ni	53.60
Cr	18.20
Nb	5.06
Mo	3.04
Ti	0.97
Al	0.44
C	0.052
B	0.003
Si	0.10
S	<0.002
P	<0.005
Fe	Balance

Fonte: Adaptada (CERTIFICADO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA METALINOX)

Para garantir a precisão dimensional dos corpos de prova durante o processo de torneamento, foi realizada a remoção da camada de óxido superficial presente em seu diâmetro através de uma passada com ap de 1,0mm e avanço de 0,18 mm/rot, na face do material foi realizado o faceamento com profundidade de 1,0mm e avanço de 0,25 mm/rot. Essa etapa é importante para garantir a qualidade do acabamento superficial das peças e a remoção de quaisquer irregularidades que possam afetar os resultados do experimento. Além disso, foi realizada a furação central para fixação na placa e no contraponto rotativo utilizando uma broca de centro de  $\varnothing 5,0$  aprofundado 11,00mm, a fim de garantir a fixação adequada dos corpos de prova durante o processo de usinagem. A figura 15 apresenta o processo de preparação dos corpos de prova. O material utilizado para o estudo foi o Inconel 718, fornecido pela empresa WEB-Nordeste, com designação comercial UNS S 07718, apresentando-se na forma de barras cilíndricas com dimensões de  $\varnothing 50,0 \times 250,0$ mm

Figure 15 - Preparação do corpo de prova



*Fonte: Próprio autor*

#### 4.6. LUBRIFRIGERAÇÃO

A técnica de lubrificação por inundação utilizada nos ensaios consistiu no uso de um fluido de corte líquido, o MVAqua 580, fornecido pela VCI Brasil. Trata-se de um óleo solúvel que, ao ser diluído em água, forma uma emulsão aplicada na região sobre a superfície de saída de corte com o objetivo de reduzir o desgaste da ferramenta e controlar a temperatura gerada durante o processo de usinagem.

O fluido foi armazenado em um reservatório e bombeado para o sistema de lubrificação, sendo distribuído por bicos posicionados no cabeçote da máquina de usinagem, sob alta pressão (15 Bar) e vazão de 120ml/h . Durante a usinagem, o fluido foi continuamente recirculado, coletado em um tanque e filtrado para remoção das partículas geradas durante o processo.

A lubrificação é um método de aplicação de fluidos de corte durante a usinagem de materiais, com o objetivo de combinar as funções de lubrificação e refrigeração para melhorar a eficiência do processo e prolongar a vida útil da ferramenta de corte. Para o Inconel 718, um material super-resistente, a lubrificação é especialmente importante para garantir a qualidade da usinagem e prolongar a vida útil da ferramenta de corte.

#### 4.7. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para realização do ensaio foi ajustado os seguintes parâmetros conforme tabela 4.

- (vc) - Velocidade de corte (m/min)
- (f) - Avanço de corte (mm/rot)
- (ap) - Profundidade de usinagem (mm)

Tabela 4 - Parâmetros de torneamento

(vc)	(f)	(ap)
35,0	0,15	1,5
45,0	0,15	1,5
55,0	0,15	1,5

Fonte: Próprio autor

A variável comprimento linear, que foi utilizada para avaliar a vida útil do inserto, foi determinada pelo intervalo de usinagem, conforme especificado na tabela 3.

Tabela 5 - Comprimentos lineares de torneamento

Comprimento-1	1000,0 mm
Comprimento-2	1500,0 mm
Comprimento-3	1750,0 mm
Comprimento-4	1875,0 mm
Comprimento-5	2000,0 mm

*Fonte: Próprio autor*

Os parâmetros de torneamento adotados derivaram-se de análises provenientes de investigações meticolosas sobre o processo de torneamento seriado, realizadas pela empresa Torneasso Usinagem. Estes parâmetros foram reconhecidos como os mais adequados para tal modalidade de usinagem. A fim de aprimorar a avaliação dos desgastes de flanco, o comprimento linear de usinagem foi estabelecido como a métrica preponderante. Tal padrão uniformiza as interrupções destinadas à mensuração do desgaste de flanco. Esta metodologia otimiza a gestão de pausas estratégicas para inspeções, atenuando a possibilidade de falhas inesperadas e de grande magnitude. É pertinente mencionar que o comprimento máximo sugerido se originou igualmente a partir do mencionado processo de torneamento seriado.

Os procedimentos de torneamento do Inconel 718 foram iniciados com a menor velocidade de corte de 35 m/min e o menor comprimento de torneamento proposto, utilizando uma única aresta de corte para avaliação dos desgastes sofridos durante o processo. Posteriormente, uma nova aresta de corte foi utilizada para cada medida de comprimento proposto, mantendo os mesmos parâmetros de corte.

Após a conclusão de todas as avaliações com as diferentes combinações de velocidade de corte e comprimento de torneamento, a velocidade de corte foi alterada e o processo de torneamento foi reiniciado com o primeiro comprimento linear proposto, repetindo-se o mesmo procedimento até a última faixa de velocidade de corte e comprimento de torneamento proposto. Ao término de cada avaliação, o inserto utilizado foi identificado e submetido à análise por microscopia óptica para

identificar e classificar os tipos de desgaste ocorridos em cada uma das arestas de corte.

#### 4.8. MODELO DE TAYLOR

O modelo de Taylor, reconhecido por sua precisão na análise do desgaste da aresta de corte em ferramentas durante a usinagem, foi o escolhido para a avaliação no presente estudo. Este modelo estabelece que a taxa de desgaste da aresta de corte  $T$  é intrinsecamente influenciada pela velocidade de corte  $v_c$  e pelos coeficientes específicos  $K$  e  $x$ .

Para a efetiva aplicação deste modelo, é imperativo proceder com uma meticulosa análise da superfície da aresta de corte, preferencialmente utilizando microscopia eletrônica de alta definição. Durante esta análise, quantifica-se as dimensões da região desgastada, fornecendo os parâmetros necessários para a determinação da taxa de desgaste.

O emprego do modelo de Taylor transcende a mera determinação da vida útil da ferramenta; ele possibilita discernir as condições ótimas de usinagem que maximizam a vida útil e minimizam o desgaste. Esta capacidade intrínseca de analisar e otimizar o desgaste qualifica o modelo como uma ferramenta inestimável para avaliar a eficiência da usinagem. Conseqüentemente, identifica-se e ajusta-se os parâmetros ideais de corte, catalisando uma melhoria no desempenho das ferramentas e uma redução nos custos associados à produção.

Importa elucidar que a equação proposta por Taylor estabelece uma relação matemática entre a taxa de desgaste e a velocidade de corte. Os coeficientes  $K$  e  $x$  são susceptíveis a variações, dependendo de variáveis como a natureza do material da ferramenta, a composição da peça em usinagem, entre outras condições. Através de técnicas de regressão estatística, adaptamos a equação ao conjunto de dados experimentais, fornecendo uma representação fidedigna do comportamento observado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Proporcionar informações detalhadas sobre o desgaste da ferramenta de corte é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de usinagem mais eficientes e econômicas para superligas de níquel, como o Inconel 718. Nesse contexto, a análise das imagens obtidas pelo microscópio óptico ALICONA permitiu a observação de características evidentes de desgaste, tais como o desgaste no raio ponta, o desgaste de entalhe na superfície de folga e a adesão na superfície de saída.

Os resultados obtidos evidenciaram uma redução considerável da vida útil dos insertos em velocidades de corte extremas, como na menor faixa de velocidade de corte de 35 m/min e na maior velocidade de corte proposta de 55 m/min.

Na condição de velocidade de corte mais baixa, os esforços excessivos, aliados com altas temperaturas evidenciadas visualmente, causaram a interrupção dos experimentos antes mesmo de se alcançar o menor comprimento linear proposto. Já na condição de maior velocidade de corte, foi possível alcançar a menor medida de comprimento linear proposto com dificuldade, sendo interrompidas as avaliações antes da quebra catastrófica da ferramenta de corte. Não foi possível atingir a segunda medida de comprimento linear proposto na segunda avaliação, sendo necessária a interrupção para evitar a quebra catastrófica da ferramenta.

Entre todos os comprimentos lineares propostos, os melhores resultados de avaliação foram obtidos na condição de velocidade de corte de 45 m/min. Porém, mesmo nessa condição, não foi possível atingir somente o último e mais longo comprimento linear proposto.

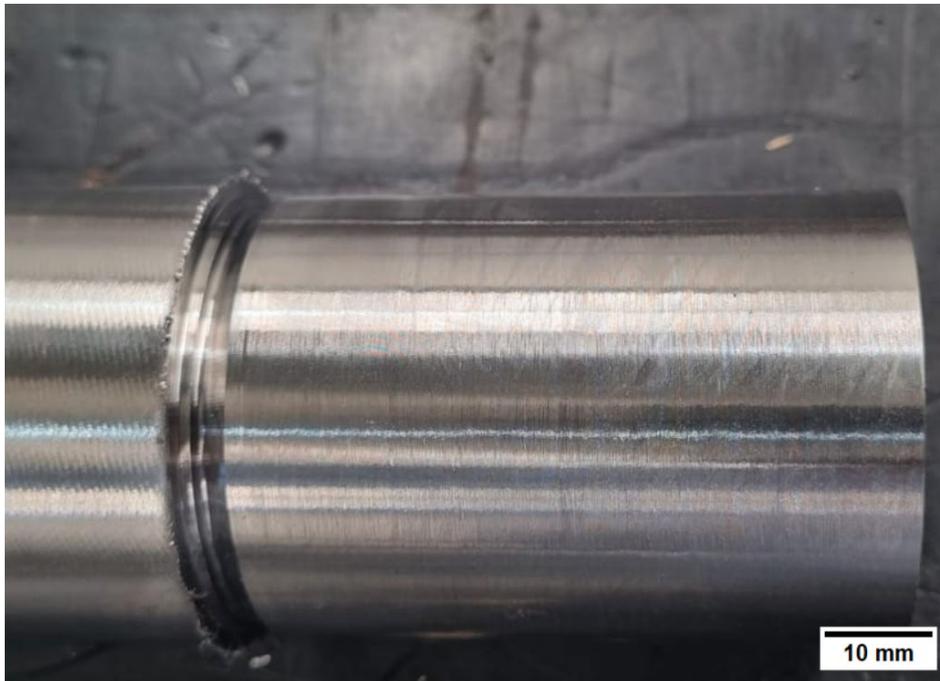
### 5.1. ANÁLISE DE DESGASTE

Através das imagens obtidas pelo medidor óptico ALICONA, foi possível identificar com precisão as áreas específicas de desgaste geradas nas arestas de corte das ferramentas durante o processo de usinagem.

Ao analisar as imagens geradas pelo medidor óptico ALICONA, é possível identificar pontos críticos de desgaste nas ferramentas de corte utilizadas nos experimentos. Na Figura 16, podemos observar que os esforços de corte foram

suficientes para deslocar o porta-ferramenta, fazendo com que a ferramenta de corte penetrasse no corpo de prova, gerando um canal. Esse incidente foi grave o bastante para exigir a interrupção do processo de torneamento, a fim de evitar maiores danos.

Figura 16 - Corpo de prova durante torneamento com 35m/min (vc)



*Fonte: Próprio autor*

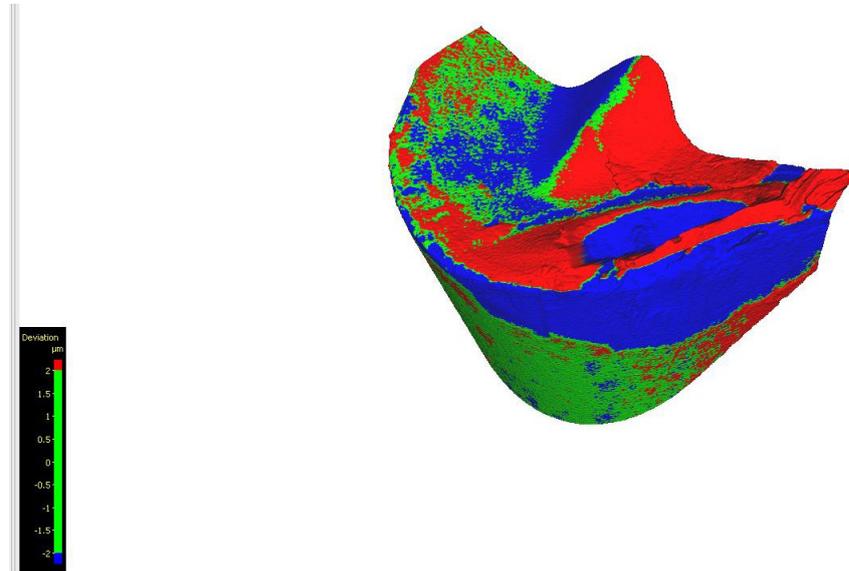
O desgaste de flanco é um fenômeno comum na usinagem e se intensifica em baixas velocidades de corte, desgaste de flanco tem origem do contato abrasivo entre ferramenta e peça, como pode ser observado na figura 17 com a redução significativa de volume (destacado em azul). Xavier et al. (2017) e Saleem et al. (2022) investigaram o desgaste de flanco durante a usinagem do Inconel 718 e apontaram a baixa velocidade de corte como uma das principais causas desse tipo de desgaste. Xavier et al. (2017) realizaram experimentos de torneamento com diferentes velocidades de corte e profundidades de corte, verificando que a taxa de progressão do desgaste de flanco aumentava significativamente em baixas velocidades de corte.

É importante destacar que o desgaste de flanco pode afetar negativamente a qualidade da usinagem e reduzir a vida útil da ferramenta de corte. Saleem et al. (2020) realizaram estudos de microscopia eletrônica de varredura em amostras

usinadas com diferentes velocidades de corte, observando que o desgaste de flanco é mais acentuado em baixas velocidades de corte.

### 5.1.1. Resultados dos Experimentos Com 35m/min (vc)

Figura 17 - 1ª Aresta com 35m/min (vc)



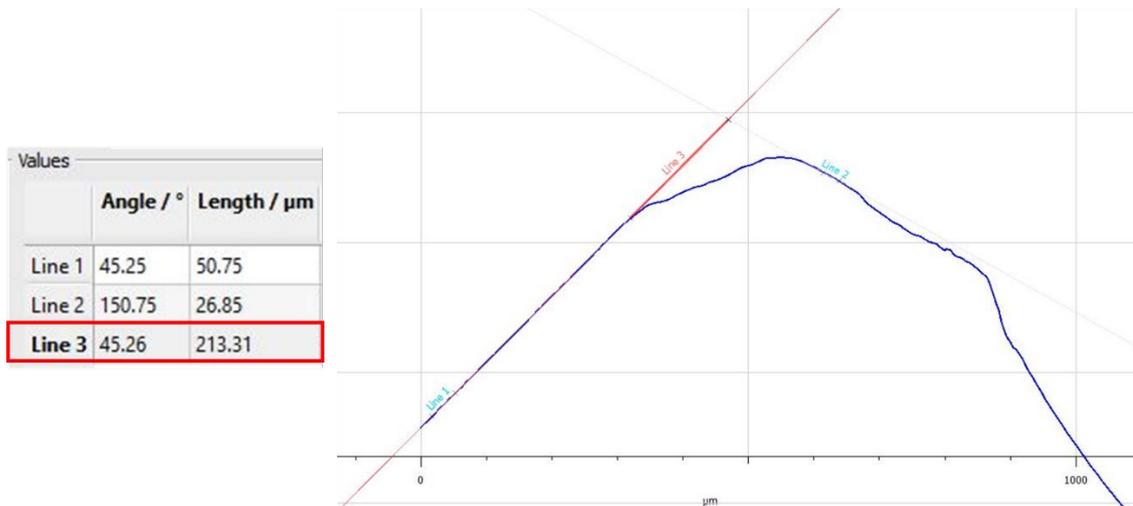
*Fonte: Próprio autor*

A avaliação da vida útil de ferramentas de corte é uma etapa crucial em processos de usinagem. Isso se deve ao fato de que a substituição precoce da ferramenta pode gerar prejuízos econômicos e afetar a qualidade do produto final.

Para garantir a segurança e qualidade dos processos de usinagem, utilizamos as técnicas estabelecidas, como a ISO 3685, que define o limite máximo de desgaste em 0,3 mm.

Na Figura 18, é apresentada a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos na norma. A análise da imagem indica que a área de desgaste ficou minimamente abaixo dos limites estabelecidos, mesmo assim foi necessária a interrupção do processo de torneamento para evitar a quebra catastrófica do inserto. No entanto, é importante destacar que o comprimento linear atingido pela 1ª aresta de corte com 35 m/min de velocidade de corte foi de apenas 400 mm.

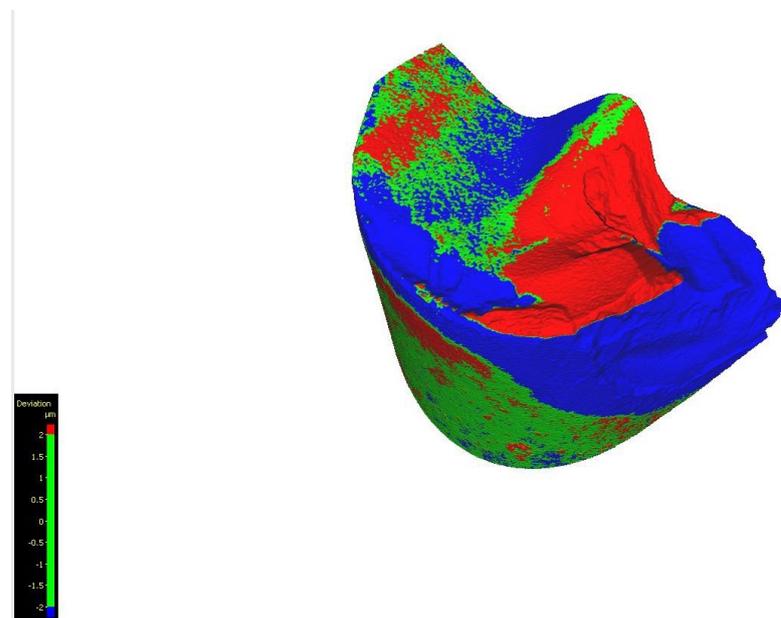
Figura 18 - Imagem confocal esquemática da 1ª aresta com 35m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Ao analisar a 2ª aresta de corte utilizada no processo de torneamento com velocidade de corte de 35m/min, podemos observar que a mesma apresentou um desgaste semelhante à 1ª aresta de corte. Foi constatada a formação de desgaste de cratera na superfície de saída e desgaste de flanco na superfície de folga da ferramenta de corte, o que levou a uma significativa redução em seu volume (destacado em azul) indicado na Figura 19.

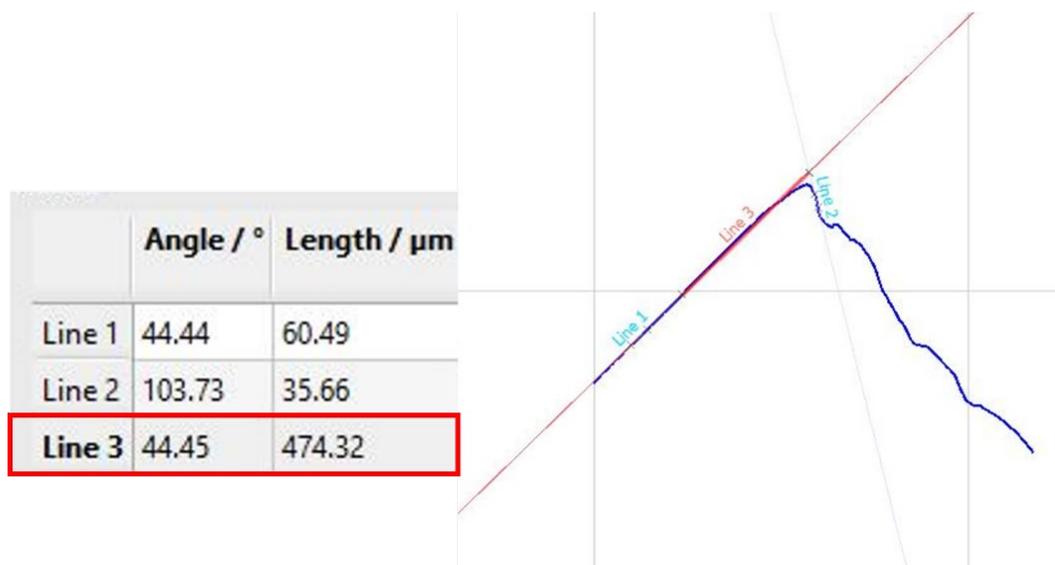
Figura 19 - 2ª Aresta com 35m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 20, é apresentada a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos na norma NBR ISO 3685-1993. A análise da imagem indica que a área de desgaste ficou bem acima dos limites estabelecidos de 0,3mm de desgaste, sugerindo que a ferramenta chegou ao fim de sua vida útil. A interrupção do processo de torneamento foi necessária para evitar a quebra catastrófica do inserto. É importante destacar que o comprimento linear atingido pela 2ª aresta de corte com 35 m/min de velocidade de corte foi de apenas 450 mm.

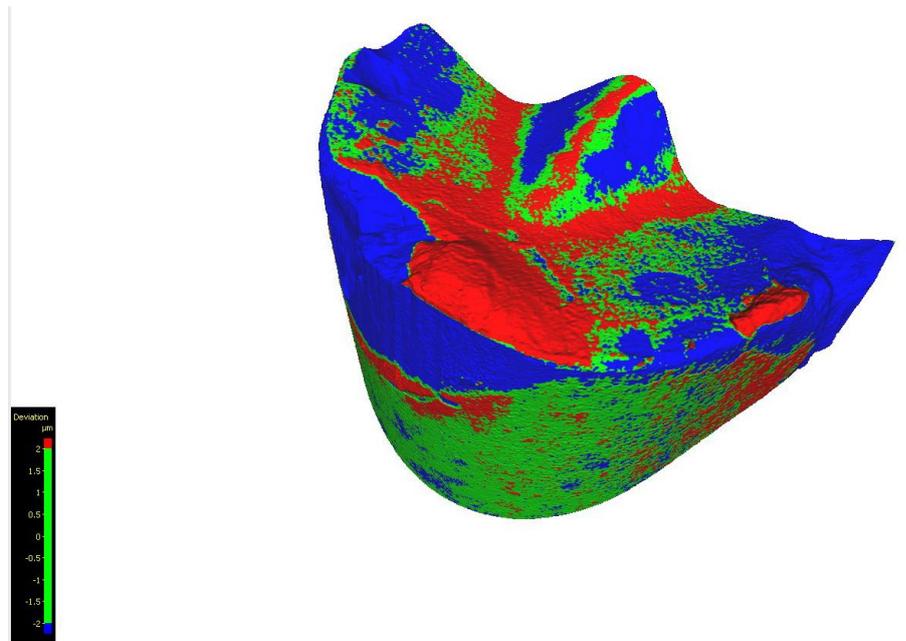
Figura 20 - Imagem esquemática da 2ª aresta com 35m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Ao analisar a 3ª aresta de corte utilizada no processo de torneamento com velocidade de corte de 35 m/min, foi constatado desgaste semelhante às 1ª e 2ª arestas de corte. Verificou-se a formação de desgaste de cratera na superfície de saída e desgaste de flanco na superfície de folga da ferramenta de corte, o que levou a uma significativa redução em seu volume (destacado em azul) na Figura 21.

Figura 21 - 3ª Aresta com 35m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 22, é apresentada a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos na norma NBR ISO 3685-1993. A análise da imagem indica que a área de desgaste ficou acima do limite máximo estabelecido de 0,3mm, assim como ocorreu com as 1ª e 2ª arestas de corte. A interrupção do processo de torneamento também foi necessária para evitar a quebra catastrófica do inserto por conta do desgaste excessivo. É importante destacar que o comprimento linear atingido pela 3ª aresta de corte com 35 m/min de velocidade de corte foi de apenas 400 mm.

Figura 22 - Imagem confocal esquemática da 3ª Aresta com 35m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

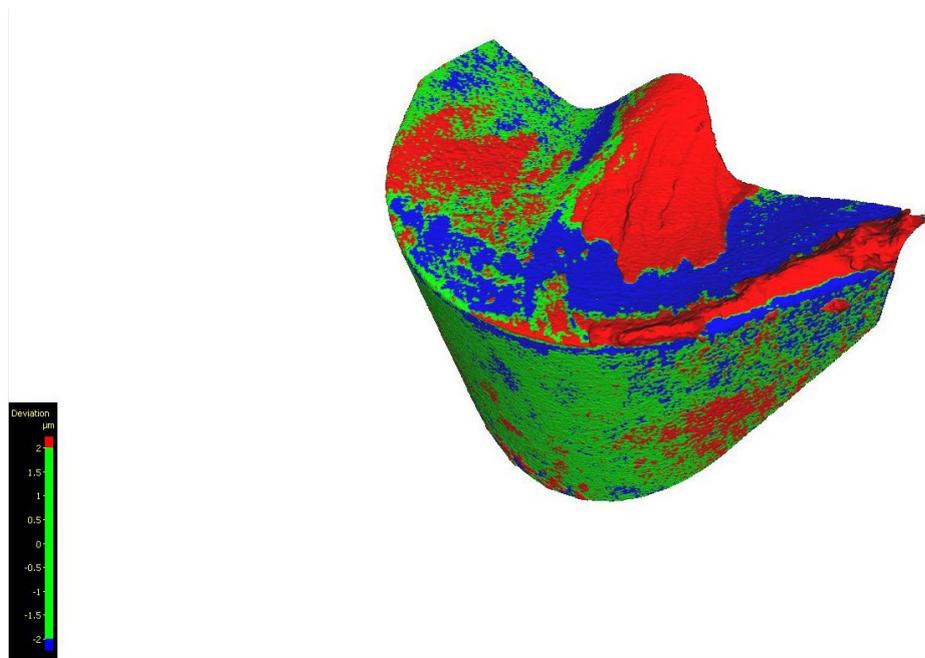
### 5.1.2. Resultados Dos Experimentos Com 45m/Min (vc)

Durante o experimento de torneamento com a 1ª aresta de corte e velocidade de corte de 45 m/min, observou-se uma maior conservação da ferramenta em comparação aos casos anteriores. A análise da superfície de saída revelou a presença de áreas com material aderido (destacado em vermelho) formando um APC. No entanto, a formação de desgaste de flanco foi extremamente discreta, não resultando em impactos relevantes no processo de torneamento, conforme ilustrado na Figura 23.

Esses achados são consistentes com estudos anteriores conduzidos por diversos pesquisadores. Por exemplo, Da Silva, Coelho e Catai (2004) observaram que velocidades de corte mais altas podem contribuir para uma melhor conservação da ferramenta, reduzindo o desgaste de flanco. Da mesma forma, o estudo de DEARNLEY et al., (1982) demonstrou que a formação de material aderido na superfície de saída pode ocorrer em diferentes condições de usinagem, sendo influenciada por fatores como lubrificação inadequada ou altas temperaturas de corte.

Portanto, a observação de um desgaste discreto de flanco e a presença de material aderido na superfície de saída na 1ª aresta de corte indicam uma boa performance da ferramenta durante o processo de torneamento com velocidade de corte de 45 m/min.

Figura 23 - 1ª Aresta com 45m/min (vc)



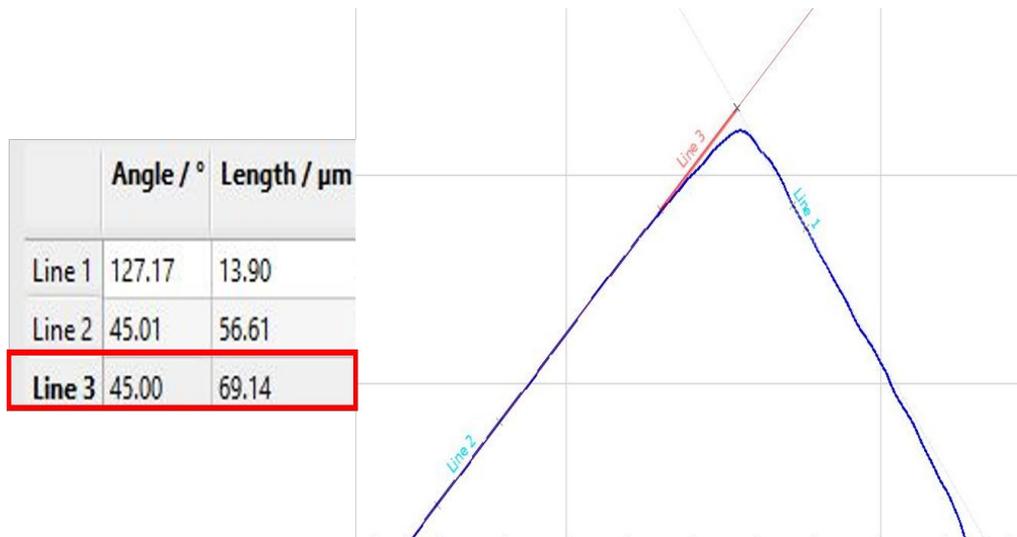
Fonte: Próprio autor

Seguindo os critérios da NBR ISO-3685-1993. Na Figura 24, é possível observar a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos por essa norma. A análise da imagem revela que a área de desgaste se manteve abaixo dos limites estabelecidos, cumprindo com sucesso a proposta de vida útil da ferramenta, que era atingir um comprimento linear de 1000 mm.

Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores que ressaltam a importância da seleção adequada dos parâmetros de corte para a conservação da ferramenta. Por exemplo, Thakur et al. (2009) enfatizaram que a utilização de velocidades de corte apropriadas contribui para a redução do desgaste e, conseqüentemente, para uma maior vida útil das ferramentas de corte. Além disso, a adoção de materiais de alta qualidade e técnicas avançadas de revestimento têm se mostrado eficazes na diminuição do desgaste e no aumento da vida útil das ferramentas de corte (ZHANG et al., 2019).

Portanto, os resultados obtidos na análise da Figura 24 evidenciam o cumprimento dos critérios estabelecidos pela norma NBR ISO-3685-1993, demonstrando a eficácia da seleção adequada dos parâmetros de corte na conservação da ferramenta e na obtenção de uma vida útil satisfatório.

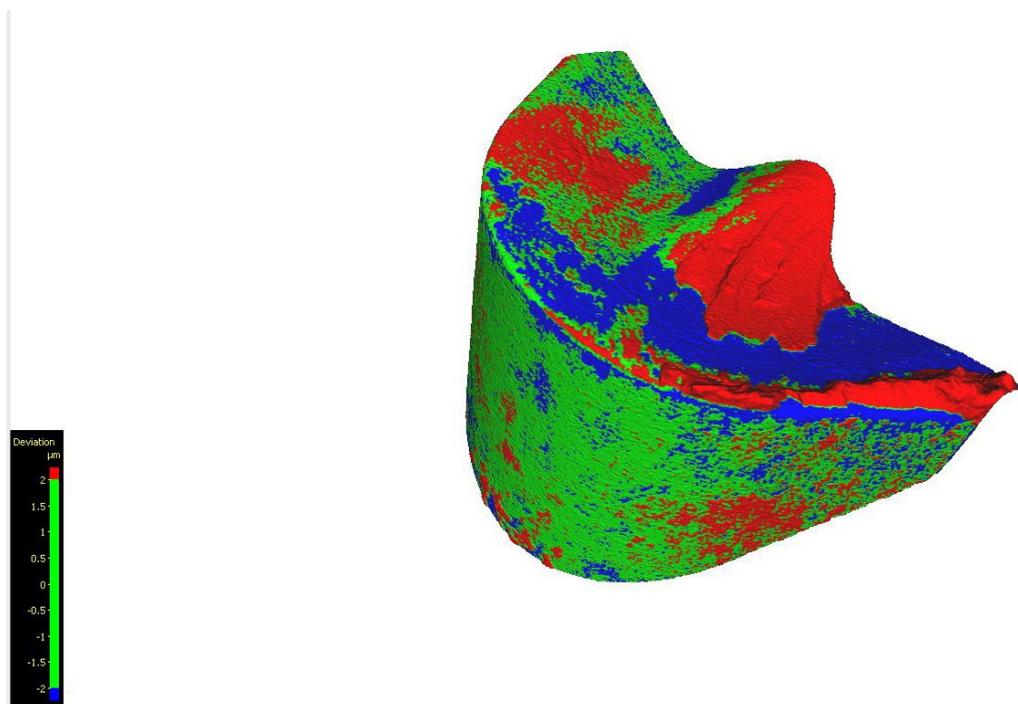
Figura 24 - Imagem confocal esquemática da 1ª Aresta com 45m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Durante o experimento de torneamento com a 2ª aresta de corte e velocidade de corte de 45 m/min, foi observado que a conservação da ferramenta se manteve em condições semelhantes à 1ª aresta. A análise da superfície de saída revelou a presença de áreas com material aderido (destacado em vermelho), indicando um nível insignificante de desgaste.

Figura 25 - 2ª Aresta com 45m/min. (vc)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 25, apresenta-se a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR ISO 3685-1993. A análise da imagem revela que a área de desgaste se manteve abaixo dos limites estabelecidos, evidenciando o cumprimento da proposta de vida útil da ferramenta, que era atingir o comprimento linear de 1500 mm.

Figura 26 - Imagem confocal esquemática da 2ª Aresta com 45m/min (vc)



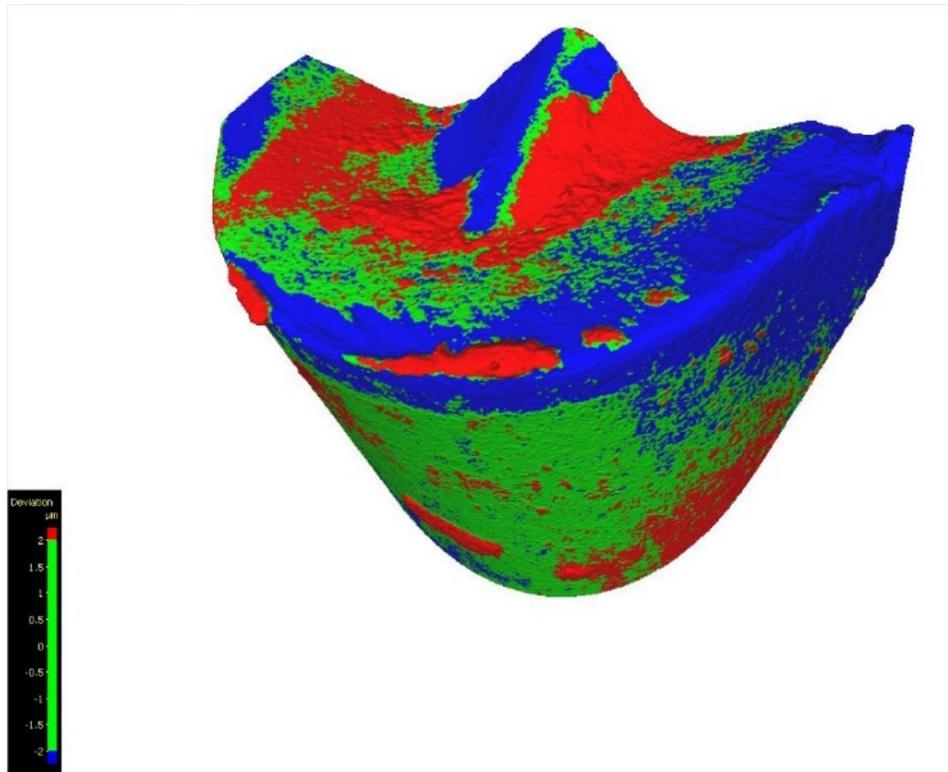
Fonte: Próprio autor

Ao analisar a 3ª aresta na Figura 26, é possível observar um aumento considerável no desgaste de flanco na superfície de folga da ferramenta, acompanhado pelo início da perda de volume (indicado em azul). Além disso, nota-se a presença de material levemente aderido na superfície de saída (indicado em vermelho) e o início da formação de desgaste de entalhe entre a superfície de saída e a superfície de folga da ferramenta.

Esses resultados indicam a progressão do desgaste de flanco, que é um fenômeno comum durante a usinagem. O desgaste de flanco ocorre devido aos altos esforços e temperaturas gerados na área de contato entre a ferramenta e o material. A formação de desgaste de entalhe entre as superfícies de saída e folga da ferramenta

é um indício de um desgaste mais severo e pode comprometer a integridade da ferramenta, aumentando o risco de quebra ou falha.

Figura 27 - 3ª Aresta com 45m/min (vc)



*Fonte: Próprio autor*

Na Figura 27, apresenta-se a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR ISO 3685-1993. A análise da imagem revela que a área de desgaste se aproximou dos limites estabelecidos, indicando um crescente grau de desgaste com o aumento do comprimento linear. A 3ª aresta percorreu um comprimento de 1750 mm.

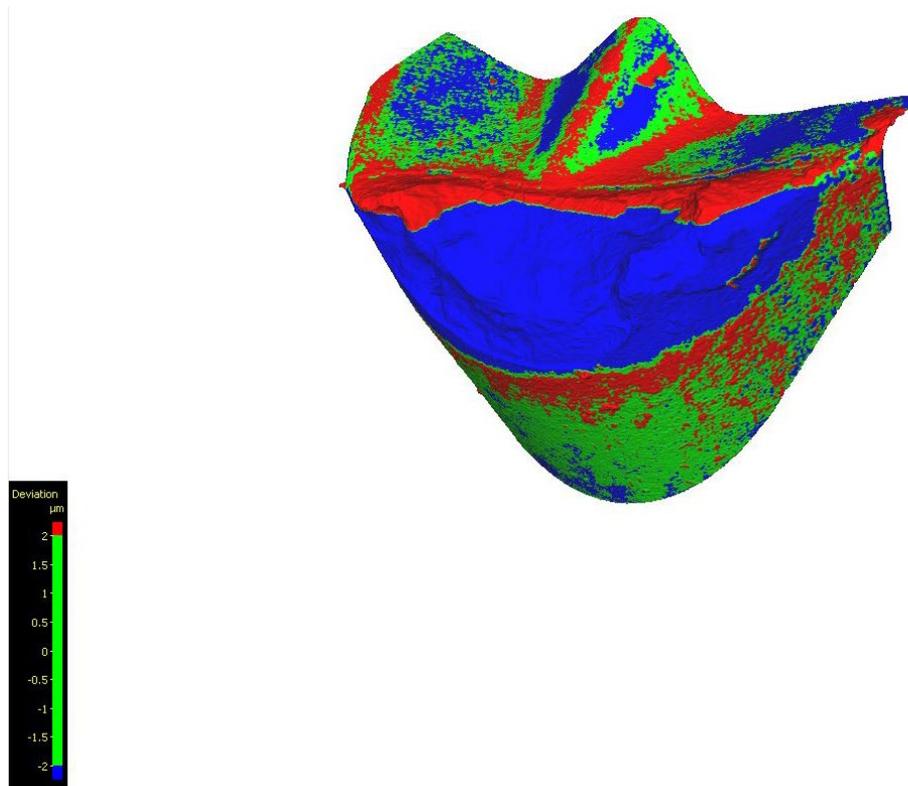
Figura 28 - Imagem confocal esquemática da 3ª Aresta com 45 m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Ao analisar a 4ª aresta de corte utilizada no processo de torneamento com velocidade de corte de 45 m/min, foi constatado um desgaste extremamente elevado no inserto. Verificou-se a formação de um desgaste acentuado de flanco na superfície de folga da ferramenta de corte, o que resultou em uma significativa redução em seu volume, como pode ser observado no destaque em azul na Figura 28.

Figura 29 - 4ª Aresta com 45m/min (vc)



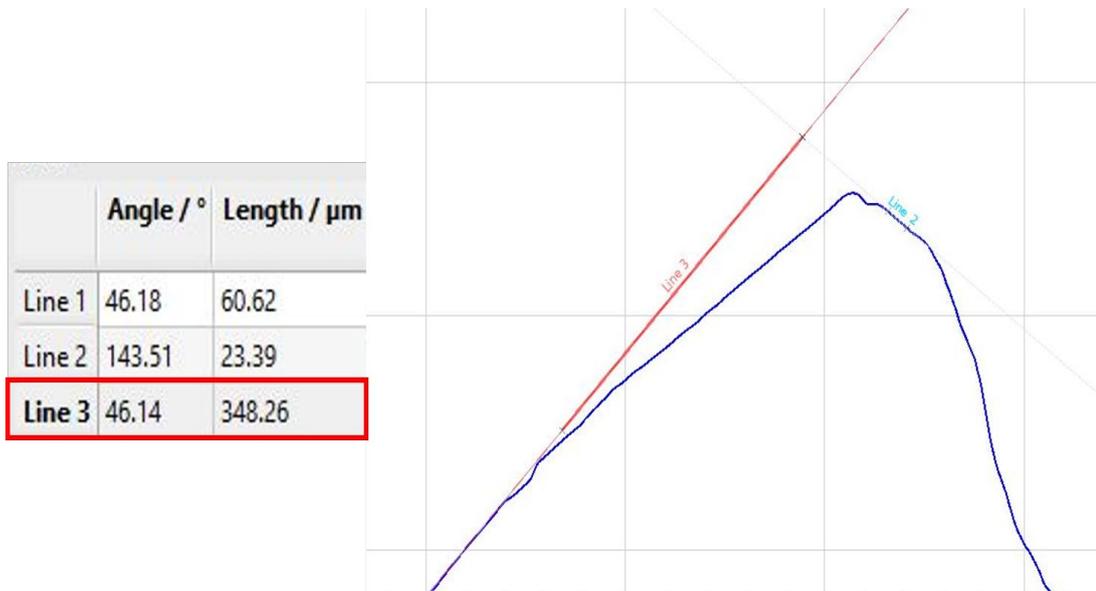
*Fonte: Próprio autor*

Na Figura 29, é apresentada a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos na norma NBR ISO 3685-1993. A análise da imagem revela que a área de desgaste excedeu o limite máximo estabelecido de 0,3 mm, indicando o fim da vida útil da ferramenta de corte.

Essa constatação é de extrema importância, pois indica que a ferramenta atingiu seu limite de desgaste aceitável e não é mais adequada para uso em processos de usinagem. O desgaste excessivo da aresta de corte compromete a qualidade da usinagem, resultando em menor precisão dimensional, rugosidade superficial e possíveis danos à peça usinada.

É fundamental ressaltar que o comprimento linear atingido pela 4ª aresta de corte com 45 m/min de velocidade de corte foi de 1875 mm.

Figura 30 - Imagem confocal esquemática da 4ª Aresta com 45 m/min (vc)

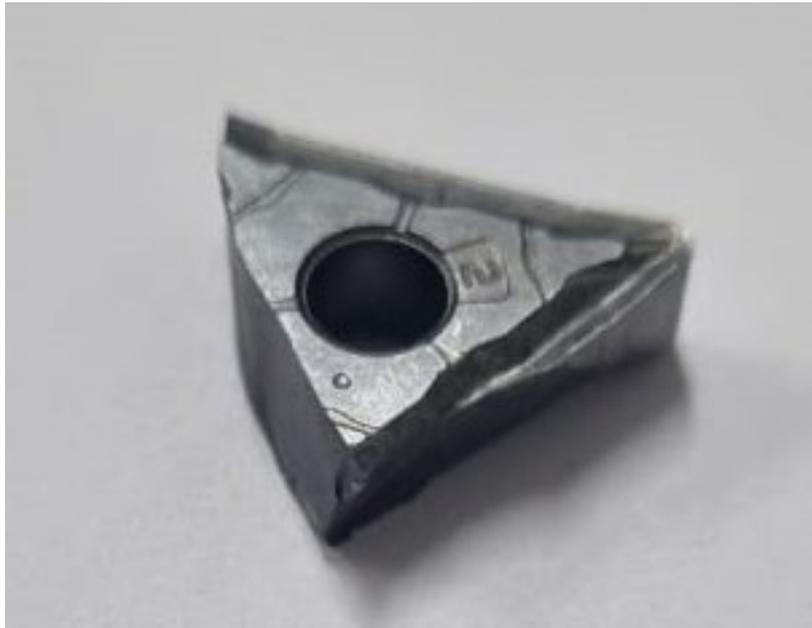


Fonte: Próprio autor

Durante a tentativa de atingir o último comprimento linear proposto de 2000 mm, foi registrada a quebra catastrófica do inserto, resultando em danos significativos à sua estrutura. Essa ocorrência comprometeu a integridade do inserto, tornando impossível sua fixação adequada no porta-ferramenta, conforme ilustrado na Figura 30.

A quebra catastrófica do inserto é uma situação indesejada na usinagem, pois acarreta interrupção do processo, perda de produtividade e aumento de custos.

Figura 31 - 5ª Aresta com 45m/min (vc)



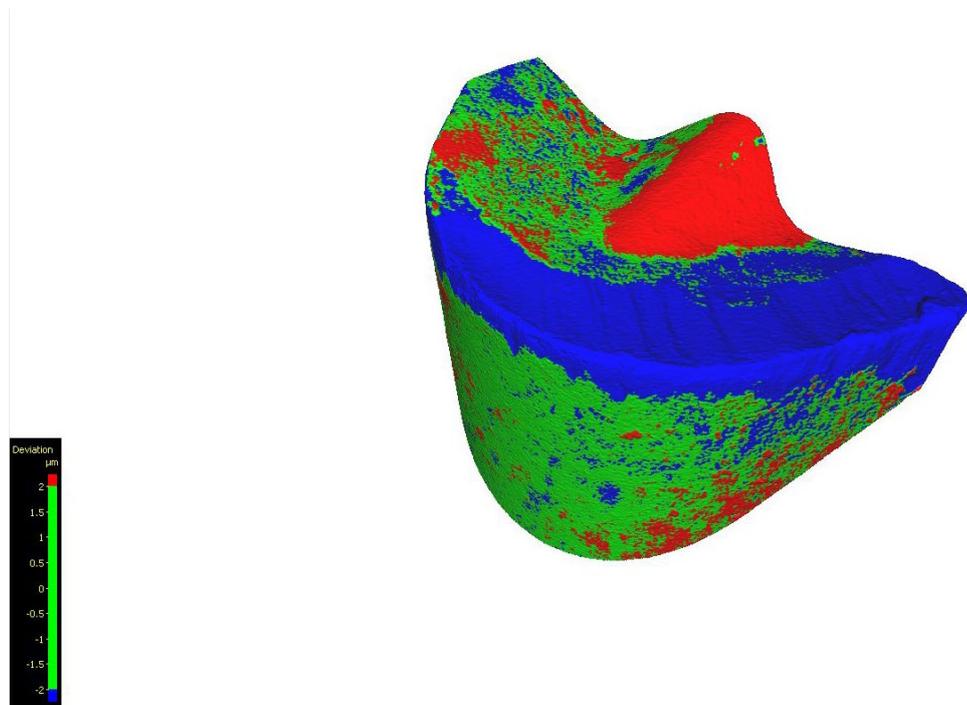
*Fonte: Próprio autor*

### **5.1.3. Resultados Dos Experimentos Com 55 m/min (vc)**

Durante o experimento de torneamento com a 1ª aresta de corte e uma velocidade de corte de 55 m/min, foram observados sinais de um desgaste acentuado de flanco na superfície de folga da ferramenta, assim como uma redução significativa de volume (indicado em azul) em toda a aresta de corte que teve contato com o material. Essas características são resultado do acúmulo de temperatura gerado durante o processo de usinagem, conforme ilustrado na Figura 32.

O desgaste de flanco é um fenômeno comum na usinagem devido às altas temperaturas e esforços mecânicos envolvidos na interação entre a ferramenta e o material. O aumento da velocidade de corte pode contribuir para o aumento da geração de calor, levando a um maior desgaste de flanco. O desgaste de flanco compromete a geometria da aresta de corte e pode afetar negativamente a qualidade da usinagem, resultando em uma vida útil reduzida da ferramenta.

Figura 32 - 1ª Aresta com 55 m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 33, é exibida a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR ISO 3685-1993. Ao analisar a imagem, pode-se observar que a área de desgaste se manteve dentro dos limites estabelecidos pela norma. No entanto, durante o experimento, tornou-se evidente a necessidade de interromper o processo para evitar uma quebra catastrófica da ferramenta.

A intervenção para interromper o procedimento foi motivada pela observação visual da condição crítica da ferramenta de corte. O desgaste acumulado ao longo da aresta de corte indicou que seria impossível continuar o processo sem comprometer a integridade da ferramenta. O comprimento linear alcançado pela aresta de corte foi de 800 mm antes da interrupção do procedimento.

Figura 33 - Imagem confocal esquemática da 1ª Aresta com 55 m/min (vc)

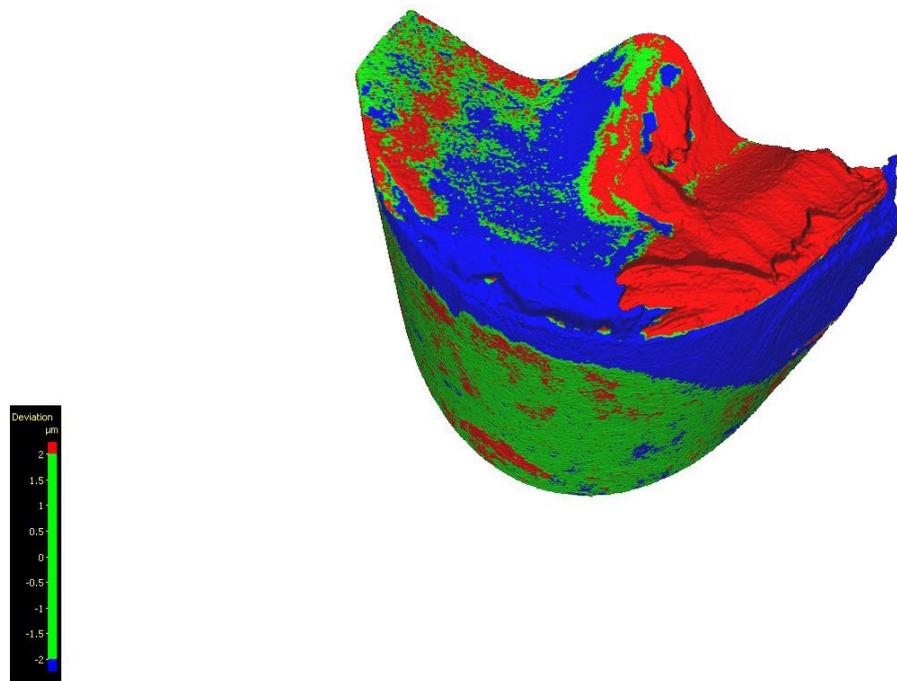


Fonte: Próprio autor

Durante o experimento de torneamento com a 2ª aresta de corte e uma velocidade de corte de 55 m/min, foram observados sinais de um desgaste acentuado de flanco na superfície de folga, semelhante ao que ocorreu na 1ª aresta de corte. Além disso, foi identificada uma leve aderência de material na superfície de saída, resultando na formação de uma aresta postiça, conforme ilustrado na Figura 33.

A aderência de material na superfície de saída é uma consequência direta das altas temperaturas e das forças de atrito presentes na interface entre a ferramenta de corte e o material. Esses fatores contribuem para o desgaste e a deterioração da geometria da ferramenta, afetando negativamente o desempenho e a vida útil da ferramenta de corte.

Figura 34 - 2ª Aresta com 55 m/min (vc)

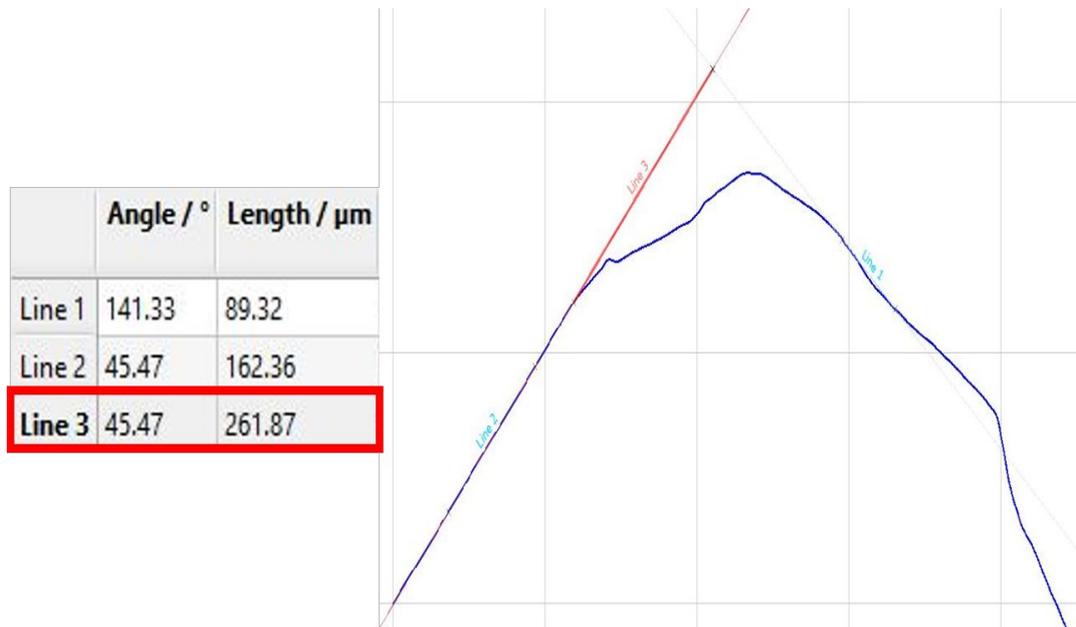


*Fonte: Próprio autor*

A Figura 34 apresenta a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR ISO 3685-1993. A análise da imagem revela que a área de desgaste da ferramenta se manteve levemente abaixo dos limites estabelecidos pela norma. No entanto, durante o experimento, foi necessário interromper o processo de usinagem devido à iminente quebra catastrófica da ferramenta.

A intervenção para interromper o procedimento foi baseada na observação visual da condição crítica da ferramenta de corte. O acúmulo de desgaste ao longo da aresta indicou que seria inviável prosseguir com o processo sem comprometer a integridade da ferramenta e prejudicar a qualidade da usinagem. O comprimento linear alcançado pela aresta de corte foi de 900 mm antes da interrupção do procedimento.

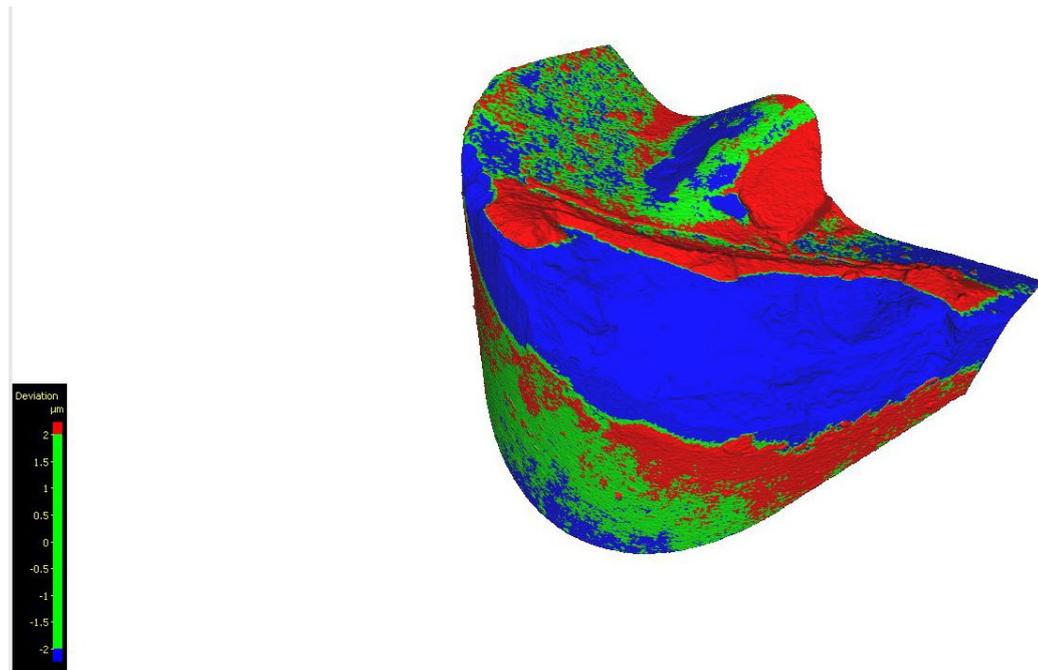
Figura 35 - Imagem confocal esquemática da 2ª Aresta com 55 m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

Durante a análise da 3ª aresta de corte utilizada no processo de torneamento com velocidade de corte de 55 m/min, foi constatado um desgaste significativamente elevado no inserto. Observou-se a formação de um desgaste de flanco acentuado na superfície de folga da ferramenta de corte, resultando em uma considerável redução em seu volume, principalmente próximo ao raio de ponta, como indicado no destaque em azul na Figura 35. Em decorrência desse desgaste excessivo, foi necessário interromper o processo de usinagem devido à geração excessiva de rebarbas.

Figura 36 - 3ª Aresta com 55m/min (vc)

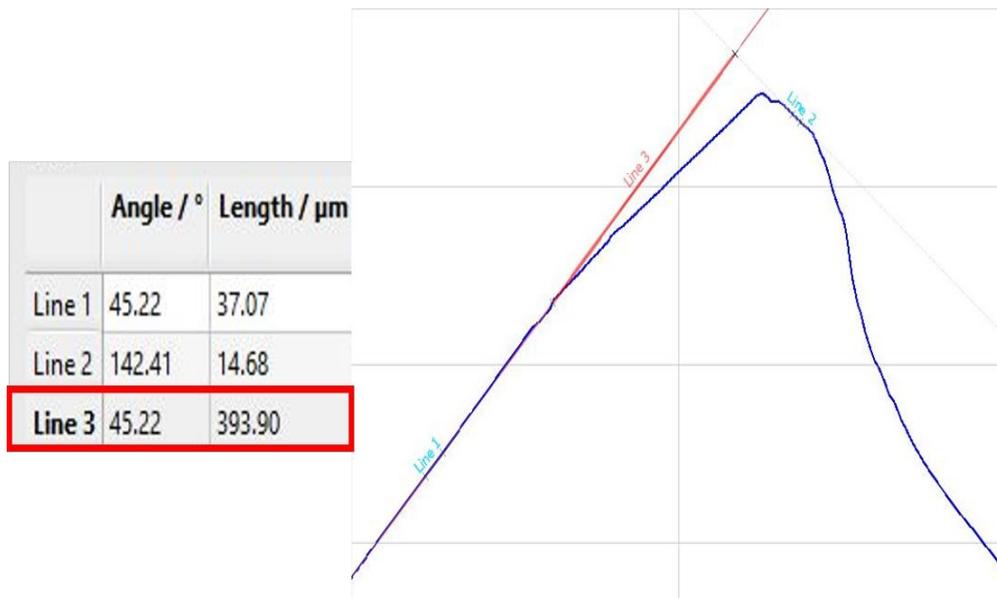


Fonte: Próprio autor

A Figura 36 apresenta a visão confocal da aresta de corte, seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR ISO 3685-1993. A análise da imagem revela que a área de desgaste da ferramenta excede os limites estabelecidos pela norma de 0,3 mm, indicando o fim da vida útil da aresta. No entanto, durante o experimento, foi necessária a interrupção do processo de usinagem devido à iminente quebra catastrófica da ferramenta.

A intervenção para interromper o procedimento foi baseada na observação visual da condição crítica da ferramenta de corte, bem como na acumulação de rebarbas na superfície usinada do material. O acúmulo de desgaste ao longo da aresta indicou que seria inviável prosseguir com o processo sem comprometer a integridade da ferramenta e prejudicar a qualidade da usinagem. O comprimento linear alcançado pela aresta de corte foi de 800 mm antes da interrupção do procedimento.

Figura 37 - Imagem confocal esquemática da 3ª Aresta com 55m/min (vc)



Fonte: Próprio autor

#### 5.1.4. Dados De Desempenho Das Arestas De Corte

Durante os experimentos, a avaliação dos dados coletados na tabela 6 revelou que a velocidade de corte de 45 m/min obteve os melhores resultados em termos de desempenho em comparação com as velocidades de corte de 35 m/min e 55 m/min. Essa conclusão é embasada na análise dos parâmetros associados a cada aresta de corte específica.

A tabela 6 apresenta informações relevantes, como as velocidades de corte, o comprimento linear máximo torneado e o tempo de vida útil de cada aresta. Esses dados são essenciais para a compreensão dos resultados obtidos.

Ao analisar a tabela, verificou-se que a velocidade de corte de 45 m/min proporcionou um desempenho mais favorável em comparação com as outras velocidades testadas. Essa velocidade resultou em um maior comprimento linear máximo torneado e em uma vida útil mais longa para cada aresta de corte, indicando uma maior eficiência e durabilidade da ferramenta.

Em contrapartida, as velocidades de corte de 35 m/min e 55 m/min demonstraram um desempenho inferior. Nessas condições, foram observados comprimentos lineares máximos torneados menores e tempos de vida útil das arestas

mais curtos, indicando um desgaste mais rápido das ferramentas e uma menor eficiência de corte.

Para determinar o tempo de usinagem em cada aresta utilizaremos a Equação 4;

$$Tc = \frac{lm}{I} (min) \quad (4)$$

Onde Tc é o tempo de usinagem (min), lm é o comprimento linear total usinado e I é o comprimento usinado por minuto.

Sendo assim os valores são informados na tabela 6.

Tabela 6 - Tempo de Usinagem

Velocidade de corte (m/min)	Comprimento real torneado (mm)	Tempo de usinagem (min)
35	400	12,57
35	450	13,28
35	400	12,57
45	1000	23,17
45	1500	34,55
45	1750	40,44
45	1875	43,39
55	800	15,14
55	900	17,08
55	800	15,14

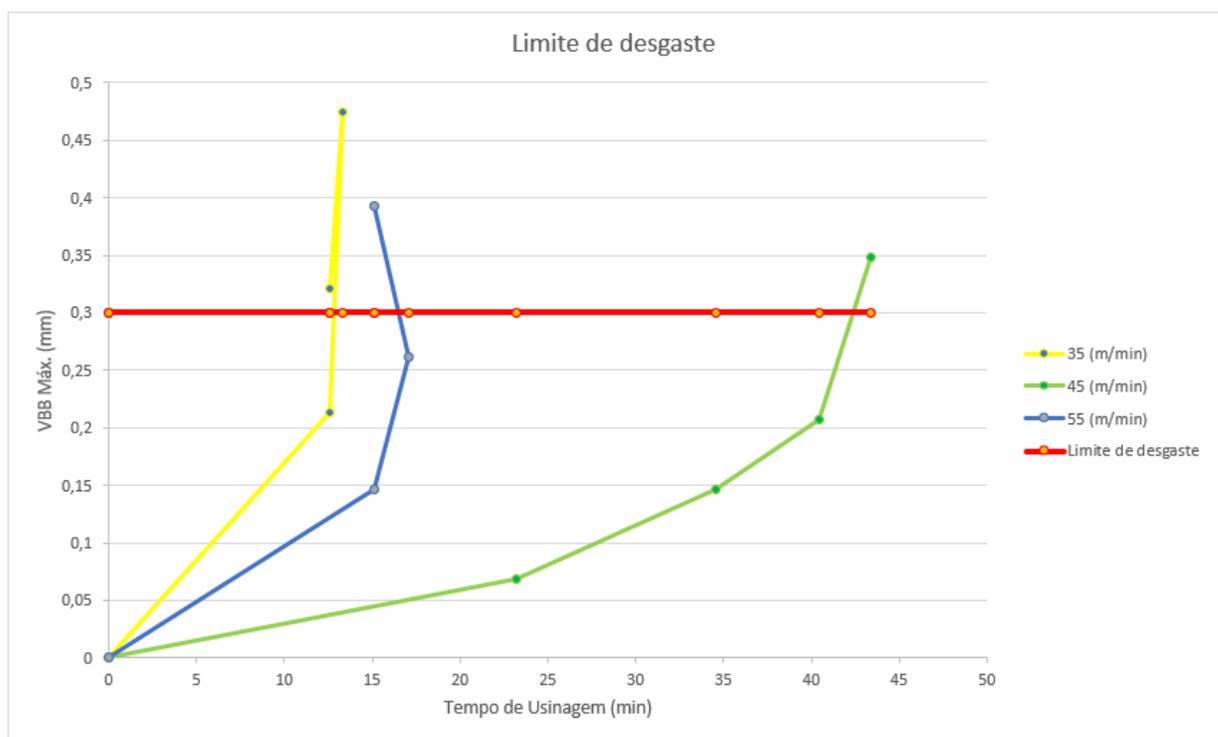
*Fonte: Próprio autor*

De acordo com os critérios de avaliação de desgaste estipulados pela norma NBR ISO 3685-1993, determinamos que a ferramenta de corte atinge o fim de sua vida útil quando o desgaste da aresta de corte alcança 0,3 mm. Tal parâmetro de

desgaste máximo pode ser observado no Gráfico 2, onde é representado o Valor de desgaste de flanco máximo (VBB máximo).

Ao analisar os resultados experimentais, constatou-se que as amostras usinadas com uma velocidade de corte de 45 m/min mantiveram-se, na sua grande maioria, dentro dos limites estabelecidos pela norma. Esta observação sugere que a velocidade de corte de 45 m/min pode ser considerada a mais eficiente para maximizar a vida útil da ferramenta de corte, sem exceder o limite de desgaste estipulado.

Gráfico 2 - Avaliação de critério de vida útil através de VBB máximo



Fonte: Próprio autor

Dentro do campo da análise de usinagem, o Modelo de Taylor, uma equação empírica, desempenha um papel crucial. Esta equação estabelece uma correlação entre a vida útil da ferramenta de corte ( $T$ ) e a velocidade de corte, sendo comumente expressa como  $T = K \cdot (vc)^{-x}$ . Aqui,  $K$  e  $x$  são constantes que dependem tanto do material da peça quanto do material da ferramenta de corte (EZUGWU & WANG, 2016; HUANG, et al., 2005).

Para a elaboração de um gráfico em que a vida útil da ferramenta é representada no eixo Y e a velocidade de corte no eixo X, é necessário a coleta de

dados experimentais durante a usinagem. Este processo envolve a medição do tempo de vida útil da ferramenta até que ela atinja um critério de falha pré-estabelecido, como um desgaste específico, em várias velocidades de corte (KALPAKJIAN & SCHMID, 2018; AGARWAL et al., 2021).

Após a obtenção dos dados experimentais, pode-se determinar os coeficientes  $K$  e  $x$ , que melhor ajustam a equação de Taylor a estes dados, por meio de um procedimento conhecido como regressão logarítmica. Este método começa com a linearização da equação  $T = K \cdot vc^{-x}$ , aplicando o logaritmo decimal a ambos os lados, resultando na seguinte expressão:

$$\log(T) = \log(K) - x \cdot \log(vc) \quad (5)$$

Ao plotar  $\log(T)$  em função de  $\log(vc)$  e ajustando uma linha reta a estes dados, a inclinação dessa linha será o negativo do coeficiente  $x$ , e o intercepto com o eixo  $\ln(T)$  será  $\ln(K)$ . Portanto, o coeficiente  $K$  é determinado pela aplicação da função exponencial ao intercepto  $y$ , e  $x$  é obtido como a negativa da inclinação da reta ajustada (ZARETALAB et al., 2020).

Desta forma, transforma-se um problema de regressão não linear, intrínseco à equação de Taylor na forma original, em um problema de regressão linear mais tratável. Assim, os parâmetros  $K$  e  $x$  podem ser estimados a partir dos dados experimentais utilizando técnicas de regressão linear.

Os resultados desta regressão fornecerão as estimativas de  $\log(K)$  e  $-x$ , que correspondem ao intercepto e à inclinação da linha ajustada, respectivamente. A partir destas estimativas, é possível recuperar os parâmetros originais  $K$  e  $x$ , aplicando as transformações inversas:  $K = e^{(\text{intercepto } y)}$  e  $x = -(\text{inclinação da linha})$ .

Através dos dados obtidos pelos experimentos e aplicados na equação de Taylor  $T = K \cdot vc^{(-x)}$  chegamos aos seguintes resultados:

$$T = K \cdot vc^{(-x)} \quad (1)$$

$$(vc1 - T1) = (45 - 40,44)$$

$$40,44 = K \cdot 45^{(-x)} \rightarrow (\text{solução 1})$$

$$(vc2 - T2) = (55 - 15,14)$$

$$15,14 = K \cdot 55^{(-x)} \rightarrow (\text{solução 2})$$

Podemos dividir a solução 1 pela solução 2 para eliminar K:

$$\frac{40,44}{15,14} = \frac{45^{(-x)}}{55^{(-x)}}$$

$$2,67 = \left(\frac{45}{55}\right)^x \rightarrow (\text{solução 3})$$

Aplicando o logaritmo de base 10 em ambos os lados da equação, temos:

$$\log_{10}(2,67) = x \cdot \log_{10}\left(\frac{45}{55}\right)$$

$$x = \frac{\log_{10}(2,67)}{\log_{10}\left(\frac{45}{55}\right)}$$

$$x \approx 4,9 \rightarrow (\text{solução 4})$$

Depois de encontrar x, podemos substituí-lo na solução 1 ou solução 2 para encontrar o valor de K. Substituindo x na solução 1, teremos:

$$40,44 = K \cdot 45^{(-4,9)}$$

Isolando K, temos:

$$K = \frac{40,44}{45^{(-4,9)}}$$

Calculando encontramos:

$$K \approx 5,01 \cdot 10^9 \rightarrow (\text{Solução 5})$$

Ao analisar a durabilidade da ferramenta de usinagem, decidimos excluir os dados do experimento realizado com uma velocidade de corte de 35m/min. Esta decisão foi tomada porque esses valores apresentaram uma anomalia no ponto de corte, levando-nos a aplicar um Corte de Outliers (CO) nos resultados. Esses dados atípicos poderiam comprometer a análise.

A literatura em usinagem alerta para a possibilidade da equação de Taylor não ser adequada na representação de dados em baixas velocidades de corte (THIELE & MELKOTE, 1999; ZARETALAB et al., 2020). Mesmo com a variação entre os dados experimentais e os propostos na literatura sendo de aproximadamente 20%, a análise conduziu à conclusão de que os dados obtidos a 35m/min não contribuem de forma significativa para uma avaliação precisa da performance da ferramenta de usinagem.

Ao comparar os resultados da curva de vida útil obtidos experimentalmente (gráfico 3) com aqueles previstos pela equação de Taylor, é possível identificar uma correlação expressiva entre os modelos. Os tempos de usinagem levantados em ambiente experimental exibem uma correspondência notável com os valores projetados pela referida equação.

Essa concordância evidencia a adequação da equação de Taylor como ferramenta preditiva no contexto da usinagem, corrobora a validade da aplicação de modelos matemáticos na previsão de vida útil de ferramentas e ressalta a importância do estabelecimento de parâmetros precisos para o processo de usinagem (THIELE & MELKOTE, 1999; ZARETALAB et al., 2020).

Assim, os achados corroboram a robustez da equação de Taylor como ferramenta analítica no campo da usinagem, reforçando sua relevância e utilidade na otimização de processos de produção e na previsão de vida útil de ferramentas de corte (AOUCI et al., 2010).

Entretanto, é importante considerar as limitações do método, particularmente em cenários de baixas velocidades de corte, onde pode haver divergências entre a

previsão do modelo e os dados observados (THIELE & MELKOTE, 1999; ZARETALAB et al., 2020).

### 5.1.5. Avaliação dos Parâmetros Adotados

Portanto, a análise cuidadosa dos parâmetros de usinagem e suas respectivas implicações é vital para garantir a eficiência e a qualidade do processo, particularmente ao trabalhar com materiais desafiadores como o Inconel 718.

Em um estudo anterior conduzido por Vale e Hassui (2008), foi realizado um experimento com o objetivo de avaliar o desgaste de ferramentas de metal duro durante o processo de torneamento da superliga de níquel Inconel 713C. A metodologia adotada nesse estudo apresenta similaridades com a metodologia aplicada no presente trabalho, permitindo uma comparação direta dos resultados obtidos.

Com base nas informações disponibilizadas por Vale e Hassui (2008), foram selecionadas faixas de velocidades de corte consideradas mais adequadas para o processo de torneamento em questão. Essas faixas foram estabelecidas entre 70 e 75 m/min e serviram como referência para as avaliações realizadas neste estudo.

Ao adotarmos as faixas de velocidades de corte propostas por Vale e Hassui (2008), buscamos estabelecer uma base comparativa sólida, o que nos possibilitou realizar uma análise detalhada do desgaste das ferramentas de metal duro durante o torneamento da superliga de níquel Inconel 713C.

Tabela 7 - Parâmetros experimentais

vc (m/min)	T (min)
75	2,42
70	2,05

Fonte: Adaptado (VALE; HASSUI, 2008)

Através dos dados obtidos pelos experimentos de Vale e Hassui (2008) e aplicados na equação de Taylor  $T = K \cdot vc^{(-x)}$  chegamos aos seguintes resultados:

$$T = K \cdot vc^{(-x)} \quad (1)$$

$$(vc1 - T1) = (75 - 2,42)$$

$$2,42 = K \cdot 75^{(-x)} \rightarrow (\text{solução 1})$$

$$(vc2 - T2) = (70 - 2,05)$$

$$2,05 = K \cdot 70^{(-x)} \rightarrow (\text{solução 2})$$

Podemos dividir a solução 1 pela solução 2 para eliminar K:

$$\frac{2,42}{2,05} = \frac{75^{(-x)}}{70^{(-x)}}$$

$$1,1805 = \left(\frac{75}{70}\right)^x \rightarrow (\text{solução 3})$$

Aplicando o logaritmo de base 10 em ambos os lados da equação, temos:

$$\log_{10}(1,1805) = x \cdot \log_{10}\left(\frac{75}{70}\right)$$

$$x = \frac{\log_{10}(1,1805)}{\log_{10}\left(\frac{75}{70}\right)}$$

$$x \approx 2,45 \rightarrow (\text{solução 4})$$

Depois de encontrar x, podemos substituí-lo na solução 1 ou solução 2 para encontrar o valor de K. Substituindo x na solução 1, teremos:

$$2,42 = K \cdot 75^{(-2,45)}$$

Isolando K, temos:

$$K = \frac{2,42}{75^{(-2.45)}}$$

Calculando encontramos:

$$K \approx 9,50 \cdot 10^4 \rightarrow (\text{Solução 5})$$

Ao conduzir a interpretação dos resultados obtidos, percebemos que, a despeito das constantes K e x demonstrarem valores consideravelmente superiores em relação ao estudo de Vale e Hassui (2008), nosso experimento alcançou um rendimento notável em termos de tempo de usinagem.

Essa incongruência aparente entre os valores das constantes pode ser atribuída às distinções nas propriedades dos materiais que constituem as ferramentas aplicadas em cada experimento. Na nossa investigação, as ferramentas adotadas foram revestidas com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, substância que se evidenciou pelo excelente desempenho na usinagem de superligas de níquel, como o Inconel. Apesar dos nossos valores para k e x sugerirem um desgaste de ferramenta mais pronunciado, é crucial considerar outros elementos que possam impactar o desempenho durante o processo de usinagem.

Um argumento coerente para a obtenção de rendimentos otimizados no tempo de usinagem, mesmo com k e x mais altos, encontra-se na implementação de estratégias de corte apropriadas. A ajustagem criteriosa das velocidades de avanço e profundidade de corte, somada à emprego de técnicas eficientes de refrigeração, pode ter mitigado o desgaste da ferramenta, desencadeando um aprimoramento no rendimento.

Adicionalmente, é provável que a escolha de materiais de elevada qualidade para as ferramentas de corte, os quais apresentam propriedades de resistência ao desgaste, tenha desempenhado um papel crucial para o alcance de nossos resultados positivos. A seleção ponderada de geometrias de ferramenta e tratamentos superficiais também pode ter contribuído para o avanço do desempenho e rendimento

durante o tempo de usinagem. Especificamente, a velocidade de corte de 45m/min demonstrou uma performance exímia no torneamento do Inconel 718. Verificamos que em suas menores variações (35 e 55m/min), ocorreu um decréscimo notável no tempo de usinagem, de maneira análoga ao constatado nas faixas de 70 e 75m/min sugeridas por Vale e Hassui (2008).

Por fim, é importante destacar que a maximização do rendimento no tempo de usinagem é uma tarefa complexa, englobando a interação de variáveis múltiplas como as propriedades do material da peça, as configurações de corte, as estratégias de usinagem e as características inerentes da ferramenta. Assim, uma comparação simplificada dos valores das constantes  $k$  e  $x$  não se mostra adequada para uma avaliação precisa do desempenho integral do processo de usinagem.

## **6. CONCLUSÕES**

Este estudo evidenciou que a precisão na definição dos parâmetros de usinagem pode ser o divisor entre o sucesso e o fracasso de um processo produtivo, ressaltando a sensibilidade de tais parâmetros a variações mínimas.

### **6.1. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE 35 m/min**

A operação de torneamento do Inconel 718, realizada com uma velocidade de corte de 35m/min, exemplifica um cenário em que o ajuste inadequado dessas variáveis pode resultar em resultados negativos. Nessas condições, observou-se uma concentração acentuada de esforços na área de contato entre a aresta de corte e o material, provocando vibrações indesejáveis e aumento da rugosidade superficial culminando na necessidade de interrupção prematura do processo.

### **6.2. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE 45 m/min**

Contrastando com essa experiência, a operação com velocidade de corte de 45m/min se demonstrou significativamente mais eficiente para o torneamento do Inconel 718. Este ajuste permitiu a manutenção da estabilidade ao longo de todo o

processo, beneficiando-se de um padrão favorável na formação de cavacos quebrados, os quais, ao serem expulsos, carregavam consigo uma parcela substancial do calor gerado, aliviando a temperatura na zona de corte. Essas características se refletiram em uma performance otimizada, evidenciada por tempos de usinagem favoráveis e um volume de material removido satisfatório.

### 6.3. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE 55 m/min

Operando a uma velocidade de corte de 55m/min, o processo de torneamento exibiu um início promissor. No entanto, conforme a operação progredia, tornou-se evidente a formação de cavacos em "Fita". Esta forma de cavaco contribui para a retenção de calor na zona de corte, intensificando a temperatura no ponto de contato entre a aresta de corte e o material. Tal fenômeno desencadeou a necessidade de interromper o processo precocemente.

## 7. TRABALHOS FUTUROS

No contexto dos experimentos conduzidos nesta investigação, adotamos uma estratégia metodológica centrada em parâmetros de torneamento e critérios de seleção de insertos, com base em referências estabelecidas pela prestigiada empresa Torneasso Usinagem. Cabe salientar, porém, que nos situamos em um período de incessantes inovações tecnológicas, nas quais as modalidades e ferramentas de usinagem se reinventam constantemente.

De acordo com as diretrizes iniciais fornecidas pela Torneasso Usinagem, a recomendação era para a adoção do inserto TNMG 160408 - NF - WSM-10. Contudo, em consonância com atualizações subsequentes provenientes do fabricante, verificou-se uma migração para o modelo TNMG 160408 - FM5 - WSM-10S. Esta mudança não se restringiu a uma simples renomeação: refletiu uma alteração substancial na técnica de aplicação da cobertura, incorporando um inovador processo de deposição.

Intrigantemente, essa evolução culminou em uma performance subótima da ferramenta. Nossas análises quantitativas revelaram que, sob as condições de corte

definidas, o comprimento alvo de 2000mm, previamente alcançável com facilidade pelo inserto original, tornou-se inatingível.

Frente a tais resultados, surgem questões imperativas: Quais aspectos inerentes teriam sido determinantes para esta redução de performance? Seria possível que as modificações no protocolo de deposição da cobertura tenham comprometido adversamente a eficiência do inserto reformulado?

Diante desses desafios, propõem-se diretrizes para futuras investigações. É crucial a realização de estudos mais detalhados, visando decifrar os potenciais efeitos da recente técnica de aplicação da cobertura no desempenho do inserto. Esta sondagem pode proporcionar esclarecimentos quanto à natureza e extensão de tais impactos sobre a eficiência operacional. Além disso, considerando o vasto leque de insertos disponíveis no mercado, sugere-se a expansão das análises para abarcar uma gama mais ampla de categorias de insertos e, simultaneamente, avaliar distintos protocolos de aplicação de coberturas. Com estes esforços, almeja-se gerar insights mais precisos e robustos, visando orientar decisões mais fundamentadas na esfera da usinagem industrial.

## 8. REFERÊNCIAS

AGARWAL, G.; KHARE, M. K. Multi-objective optimisation of cutting parameters in machining processes: a review. **Materials Today: Proceedings**. Vol. 46, part 11, p. 5535-5543. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320369790?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023

ALTINTAS, Y. **Machining of Titanium Alloys**. In: Davim, J.P. Machining of Titanium Alloys. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. p. 1-30

ANTHONY XAVIOR M.; MANOHAR, M.; JEYAPANDIARAJAN, P.; MADHUKAR, P. M. Tool Wear Assessment During Machining Of Inconel 718. **Procedia Engineering**. Vol. 174, p. 1000-1008. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817302527>. Acesso em: 25 jun. 2023.

AOUICI, M.A. H. ;YALLESE, B. FNIDES, T. Mabrouki. Machinability investigation in hard turning of hardened AISI H11 steel with coated carbide tools. **MECHANIKA**, 183(1), 69-75. 2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/50894993\\_Machinability\\_in\\_hard\\_turning\\_of\\_AISI\\_H11\\_hot\\_work\\_steel\\_with\\_CBN\\_tool](https://www.researchgate.net/publication/50894993_Machinability_in_hard_turning_of_AISI_H11_hot_work_steel_with_CBN_tool). Acesso em: 25 jun. 2023.

AUGSPURGER, T., SCHRAKNEPPER, D. & BERGS, T. Experimental investigation of specific cutting forces and estimation of the heat partitioning under increasing tool wear in machining nickel-based super alloy IN 718. **Prod. Eng. Res. Devel.** 14, 491–498 (2020). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-020-00971-y>. Acesso em: 25 jun. 2023.

BHATT, A; ATTIA, H. VARGAS, R.; THOMSON, V. Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. **Tribology International**, Volume 43, Issues 5–6, 2010, 1113-1121. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X09003909?via%3Dihub>. 22 jun. 2023

OEZKAYA, E.; BUCKER, M.; STRODICK, S.; BIERMANN, D. A thermomechanical analysis leading to a novel flank face design providing longer tool lives for tools used in the drilling of Inconel 718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 102, p. 2977-2992. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-03417-7>. Acesso em: 25 ago. 2023.

CAMPOS.P,H,S.; FERREIRA, J.R.; DE PAIVA, A.P.; BALESTRASSI, P.P.; DAVIM, J.P. Modelagem Da Rugosidade E Da Vida Da Ferramenta No Torneamento Do Aço Duro Abnt 52100 Com Cerâmica Mista Wiper Utilizando Metodologia De Superfície De Resposta. **Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecânica**. Vol.19. Nº 1 p. 71-86. (2013) Disponível em: <https://pedro.unifei.edu.br/Artigos%20Publicados/2015IBERO.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

- CANTERO, J.L.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; MIGUÉLEZ, M. H.; MARÍN, N. C. Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718. **Wear**. Vol..297, 1-2, p. 885-894. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164812003420?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jun 2023
- CHEN, Y.C.; LIAO, Y.S. Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy. **Journal of Materials Processing Technology**. 140. 2003. 269–27. Disponível em: <http://ntur.lib.ntu.edu.tw/bitstream/246246/86973/1/24.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2023
- CHOUDHURY, I. A., & EL-BARADIE, M. A. Machinability assessment of Inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology. **Journal of Materials Processing Technology**, 77(1-3), 319-326. (1998).. Disponível em: [https://www.academia.edu/7910877/Machinability\\_assessment\\_of\\_inconel\\_718\\_by\\_factorial\\_design\\_of\\_experiment\\_coupled\\_with\\_response\\_surface\\_methodology](https://www.academia.edu/7910877/Machinability_assessment_of_inconel_718_by_factorial_design_of_experiment_coupled_with_response_surface_methodology). Acesso em: 12 jun. 2023
- CHOUDHURY, S.K., & BARTARYA, G. " State of the art in hard turning". **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 53, p. 1-14. Fev. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695511001696?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- D'ADONNA, D.M.; RAYKAR, S. J. NARKE, M. M. High Speed Machining of Inconel 718: Tool Wear and Surface Roughness Analysis **Procedia**. Vol. 62, p. 269-274. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117301488?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- DA SILVA, L. R.; COELHO, R. T.; CATAI, R. E. Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga "waspaloy. **Metalurgia & Materiais**. Vol. 57(2), p. 109-114. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/Z4VXCcwLxCqymW6TbMQbTfQ/?lang=pt>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- DAVIM, J. P., & RUBIO, J. C. An experimental study of cutting forces in hard turning with active vibration control. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 47(2), 247-253. 2007. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/261870721\\_An\\_experimental\\_study\\_of\\_cutting\\_force\\_system\\_during\\_turning\\_of\\_a\\_reinforced\\_polymer\\_composite](https://www.researchgate.net/publication/261870721_An_experimental_study_of_cutting_force_system_during_turning_of_a_reinforced_polymer_composite). Acesso em: 08 jun. 2023.
- DEARNLEY, P. A., TRENT, E.M., Wear mechanisms of coated carbides tools. **Metals technology**. V. 09, p. 60 – 75, fevereiro 1982. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/030716982803285909>. Acesso em: 22 jul. 2023
- DINIZ, A. E.; MACHADO, A. R.; CORRÊA, J. G. Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. **The International Journal of Advanced**

**Manufacturing Technology**, v. 87, p. 3157-3168, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-8704-3>. Acesso em: 15 jun. 2023

EZUGWU, E. O., & WANG, Z. M. Machining performance and optimization of coated carbide tools when turning Ti-6Al-4V. **Procedia CIRP**, 45, 168-171. (2016).

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 5ª ed. São Paulo: Edgard Blucher. (2003). 754 p.

FONTANIVE, F. **Análise da influência dos parâmetros de processo no fresamento de Inconel 718 sobre o desgaste e a qualidade superficial**. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/3661/Dissertacao%20Fernanda%20Fontanive%20FINAL.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 25 jun. 2023.

FU, S. H.; DONG, J. X.; XIE, X. S. Alloy design and development of INCONEL718 type alloy. **Materials Science and Engineering: A**. vol. 499, 1-2, p. 215-220. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150930800659X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023.

GAIKWAD, A., BHADURI, E., & PUJARI, P. K. Multi-objective Optimization of CNC Turning Process Parameters for AA7075 Using TOPSIS Coupled with Grey-Taguchi Method. **Procedia CIRP**, 94, 285-290. 2021. Disponível em: [https://gypress.com/journals/IJHIT/vol8\\_no4/9.pdf](https://gypress.com/journals/IJHIT/vol8_no4/9.pdf). Acesso em: 25 jun. 2023.

GRZESIK, W.; NIEŚŁONY, P.; HABRAT, W.; SIENIAWSKI, J.; LASKOWSKI, P. Investigation of tool wear in the turning of Inconel 718 superalloy in terms of process performance and productivity enhancement. **Tribology International**, vol. 118, p. 337-346. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X17304656?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jun. 2023.

ENZHAO, C.; JUN, Z.; XUCHAO, W.; SHIPING, S. Desempenho de corte, mecanismos de falha e propriedades tribológicas da ferramenta cerâmica reforçada com GNPs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti(C,N) no torneamento de alta velocidade do Inconel 718. **Ceramics International**. Vol. 46, Part. B, p. 18859-18867. 2020 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884220311500>. Acesso em: 25 ago. 2023.

HELERBROCK, R. **"Albert Einstein"**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/biografia/albert-einstein.htm>. Acesso em 24 de agosto de 2023.

HOSSEINKHANI, K., Tool life prediction model for the machining of Inconel 718. **Journal of Manufacturing Processes**, 54, 228-238. (2020). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-4494/4/1/16>. Acesso em: 24 ago. 2023.

HUANG, Y., et al. Modeling of Cutting Forces Under Hard Turning Conditions Considering Tool Wear Effect. *J. Manuf. Sci. Eng.* May 2005, 127(2): 262-270. 2005. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-abstract/127/2/262/476447/Modeling-of-Cutting-Forces-Under-Hard-Turning?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ISO 3685:1993. Tool-life testing with single-point turning tools. Geneva: **International Organization for Standardization**. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/9151.html>. Acesso em: 15 jun. 2023

ISO 513. (2004). Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined. cutting edges--Designation of the main groups and groups of application. International Organization for Standardization. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/35207.html>. Acesso em: 15 jun. 2023

KLOCKE, F., KUCHLE, A. Cutting tool materials and tools. In: KALPAKJIAN, S.; E SCHMID, S. *Manufacturing Processes*. 6ª ed., Springer. Berlin, Heidelberg, pp. 95–196. 2011. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-11979-8\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-11979-8_4). Acesso em 25 jun. 2023.

KLOKE, F.; LUNG, D.; BINDER, M.; SEIMANN, M. High speed machining of nickel-based alloys. **International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems**. Vol. 8, No.1-2. P. 3-18. 2015. Disponível em: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJMMS.2015.071687>. Acesso em: 22 jun. 2023.

LI, L.; HE, N.; WANG, M.; WANG, Z. G. High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 129, p. 127-130. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013602005903?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jun. 2023

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, A. A.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B.; RUFFINO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher. 2009.

MUSTAFA, G.; ANWAR, M. T.; AHMED, A.; NAWAZ, M.; RASHEED, T. Influence of Machining Parameters on Machinability of Inconel 718—A Review. **Advanced Engineering Materials**. Vol.24, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.202200202>. Acesso em: 25 jun. 2023

NIAKI, F. A.; MICHEL, M. MEARS, L. State of health monitoring in machining: Extended Kalman filter for tool wear assessment in turning of IN718 hard-to-machine alloy. **Journal of Manufacturing Processes**. Vol. 24, p. 361-369. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S152661251630072X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023.

OUTEIRO, J. C., UMBRELLO, D., & PINA, J. C. Finite element modelling of machining of AISI 316L: Numerical methodology and experimental validations. **Computational Materials Science**, 143, 196-207. 2006 Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695505003081?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023

PAWAR, P., PAWADE, R., & JOSHI, S. Effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using CBN tool: Taguchi approach and ANOVA. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 41(2), 85. (2019). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581731576X?via%3Dihub>. Acesso em: 16 jun. 2023.

PINTAUDE, G. " Strategies for the Development of Wear-Resistant Coatings: A Review. **Review Articles**. Vol. 26. 2021. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/si/a/CbTzgTtcksJZYc3sjTtzyN/?lang=en>. Acesso em: 25 jun. 2023.

REED, R. C. **The Superalloys: Fundamentals and Applications**. Cambridge University Press. 2006. 372 p.

REIS, M.C.B.; PEREIRA, N. F. S.; SANTOS, A. J.; CÂMARA, M. A.; FARIA, P. E.; RODRIGUES, P. C. M.; RUBIO, J. C. C. **Influência do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento**. **Matéria** (Rio J.) vol. 24. 2019. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rmat/a/3NHFGdJDyXnWV4vP8y3xzWg/?lang=pt>. Acesso em: 25 jun. 2023

RUBAIEE, S.; DANISH, M.; GUPTA, M. K.; AHMED, A.; YAHYA, S., M.; YILDIRIM, M., B., SARIKAYA, M.; KORKMAZ, M., E. Key initiatives to improve the machining characteristics of Inconel-718 alloy: Experimental analysis and optimization. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 21, p. 2704-2720. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.060>. Acesso em: 25 jun. 2023.

SALEEM, M.Q.; MEHMOOD, A. Eco-friendly precision turning of superalloy Inconel 718 using MQL based vegetable oils: Tool wear and surface integrity evaluation. **Journal of Manufacturing Processes**, 73, 112-127. 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542201599X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023.

SARAVANAKUMAR, K.; KUMAR.M,R. P.; DAWOOD, A. K. S. Optimization of CNC Turning Process Parameters on INCONEL 718 Using Genetic Algorithm.

**Engineering Science and Technology: An International Journal**. Vol. 2 No.4.

2012. Disponível: [https://www.researchgate.net/profile/Saravanakumar-Krishna-samy/publication/333340016\\_Optimization\\_of\\_CNC\\_Turning\\_Process\\_Parameters\\_on\\_INCONEL\\_718\\_Using\\_Genetic\\_Algorithm/links/5ce7b0d2458515712ebdc35f/Optimization-of-CNC-Turning-Process-Parameters-on-INCONEL-718-Using-Genetic-Algorithm.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Saravanakumar-Krishna-samy/publication/333340016_Optimization_of_CNC_Turning_Process_Parameters_on_INCONEL_718_Using_Genetic_Algorithm/links/5ce7b0d2458515712ebdc35f/Optimization-of-CNC-Turning-Process-Parameters-on-INCONEL-718-Using-Genetic-Algorithm.pdf). Acesso em: 25 jun. 2023.

SATISH, G., J; GAITONDE, V.N.; KULKARNI, N. V. Traditional and non-traditional machining of nickel-based superalloys: A brief review. **Materials Today: Proceedings**. Vol. 44, p. 1448-1454. 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320393068?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2023.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V. & NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 101, 79-101. (2019). Disponível em: [https://www.academia.edu/2167083/Environmentally\\_conscious\\_machining\\_of\\_difficult-to-machine\\_materials\\_with\\_regard\\_to\\_cutting\\_fluids](https://www.academia.edu/2167083/Environmentally_conscious_machining_of_difficult-to-machine_materials_with_regard_to_cutting_fluids). Acesso em: 08 jun. 2023

SILVA, L. R. R.; CAMPOS, F.A.R.; SALES, W. F.; MACHADO, A. R. Evaluation of the tool wear in the turning process of INCONEL 718 using PCD tools. **Procedia Manufacturing**. Vol 53, p. 276-285. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978921000986?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun 2023.

SOARES, R. M. **Avaliação do comportamento dos desgastes de ferramentas para torneamento da superliga inconel 718**. TCC (Engenharia Mecânica) Universidade de Caxias do Sul. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1837>. Acesso em: 24 ago. 2023.

STEPHENSON, D. A., & AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 3th. ed. Boca Raton, Florida. CRC Press, 2016. 930 p.

TAYAL, A.; KALSI, N. S.; GUPTA, M. K. Machining of superalloys: A review on machining parameters, cutting tools, and cooling methods. **Materialtoday: Proceedings** vol. 43, part 2, 2021. 1839-1849. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320384522?via%3Dihub>. Acesso em: 22 jun. 2023

TAYLOR, F. W. **On the art of cutting metals**. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 28, 1907. p. 31-350.

THAKUR, G.D. et al.,. Influence of minimum quantity lubrication on the high speed turning of aerospace material superalloy Inconel 718. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**. Vol. 13, No. 2-3, p. 203-214. 2013. Disponível em: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJMMM.2013.053223>. Acesso em: 25 jun. 2023.

THAKUR, D. G., RAMAMOORTHY, B., & VIJAYARAGHAVAN, L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. **Materials & Design**, 30(5), 1718-1725. (2009). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306908003506?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jun. 2023.

THIELE, J. D., & MELKOTE, S. N. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 94(2-3), 216-226, (1999). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013699001119>. Acesso em: 08 jun. 2023.

VALE, R. T. S.; HASSUI, A. Análise da usinabilidade da liga à base de níquel Inconel 713C no torneamento com ferramentas de metal duro e fluido de corte integral. (Dissertação) Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo,

2008. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/1069466c-16c7-47bb-99fb-e59af9338c19/Hassui-2008-analise%20da%20usinabilidade%20da%20liga-resumo%20SIICUSP.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023

WANG, R.; YANG, D.; WANG, W.; WEI, F. LU, Y.; LI, Y. Tool Wear in Nickel-Based Superalloy Machining: An Overview. **Processes**. Vol. 10, p. 2380. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2380>. Acesso em: 25 jun. 2023.

WANG, X., ZHENG, K. N., ZHANG, D., & SUN, J. F. Effect of the tool edge radius on the wear development during turning Inconel 718. **Wear**, 406, 23-37. (2018). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-010-2703-6>. Acesso em: 17/06/2023

XIE, X.; XU, C.; WANG, G.; DONG, J.; CAO, W.-D.; KENNEDY, R. "TTT diagram of a newly developed nickel-base superalloy–Allvac R 718plusTM," in 6 th **International Special Emphasis Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives**. pp. 193–202, TMS, 2005. Disponível em: <https://www.kennametal.com/pt/resources/catalogs-literature/tooling-systems-metalworking-catalogs.html>. Acesso em: 20 ago. 2023.

XUANG-TRUONG, D.; MINH-DUC, T. Effect of cutting condition on tool wear and surface roughness during machining of Inconel 718. **International Journal of Advanced Engineer Technology**. Vol.4 (3), p. 108-112. 2013. Disponível em: <http://technicaljournalonline.com/ijeat/VOL%20IV/IJAET%20VOL%20IV%20ISSUE%20III%20JULY%20SEPTEMBER%202013/Vol%20IV%20Issue%20III%20Article%2028.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023.

ZARETALAB, A., SHARIFI, M. & TAGHIPOUR, S. Modelagem estocástica baseada em condição de usinagem da vida útil da ferramenta de corte. **Int J Adv Manuf Technol**. Vol. 111, p. 3159–3173. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-06225-6>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ZHANG, J., LUO, M., LI, Y., & GU, Y. Experimental study on hard turning of Inconel 718 with coated carbide tool. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 82(1-4), 581-595. (2016). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/282461439\\_Experimental\\_Study\\_on\\_the\\_Machinability\\_of\\_Inconel\\_718\\_Alloy\\_Using\\_Coated\\_Carbide\\_Tool](https://www.researchgate.net/publication/282461439_Experimental_Study_on_the_Machinability_of_Inconel_718_Alloy_Using_Coated_Carbide_Tool). Acesso em: 08 jun. 2023.

ZHENLONG, P.; ZHANG, X.; ZHANG, D. Performance evaluation of high-speed ultrasonic vibration cutting for improving machinability of Inconel 718 with coated carbide tools **Tribology International**. Vol. 115, 2021, 106766, ISSN 0301-679X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X20305910?via%3Dihub>. Acesso em 22 jun. 2023