

**EDUARDO RAMOS FERREIRA**

**ESTUDO DA TEMPERATURA NA INTERFACE  
FERRAMENTA-CAVACO NO TORNEAMENTO DO  
INCONEL 718 COM FERRAMENTAS  
REFRIGERADAS INTERNAMENTE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

**EDUARDO RAMOS FERREIRA**

**ESTUDO DA TEMPERATURA NA INTERFACE FERRAMENTA-  
CAVACO NO TORNEAMENTO DO INCONEL 718 COM  
FERRAMENTAS REFRIGERADAS INTERNAMENTE**

**Projeto de fim de curso** apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Usinagem e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Co-Orientador: Gustavo H. N. Fernandes



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

A banca examinadora deste trabalho foi composta pelos membros:

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Orientador

M.Sc. Gustavo Henrique Nazareno Fernandes  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Co-Orientador

M.Sc. Pedro Henrique Pires França  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

**Uberlândia, 12 Junho de 2023**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, ao meu pai, Eduardo Carneiro, agradeço todo o incentivo e suporte para minha graduação na UFU. À minha mãe, Maria Cristina Ramos por todo o amparo nos momentos difíceis e à minha irmã Vanessa Ramos toda a parceria e ajuda nos cuidados familiares mesmo de longe.

Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva e ao M.Sc. Gustavo Henrique Nazareno Fernandes por toda dedicação, ensinamentos e atenção nos mínimos detalhes dedicadas neste trabalho.

Ao Grupo de Manufatura Sustentável – GMS do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) por todo o suporte pessoal e de equipamentos para a realização dos ensaios deste projeto.

Às empresas que apoiaram e apoiam o projeto das Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRIs, Mapal do Brasil, NipoTec – Special Tools, Walter Tools, Villares Metals SA, Ceratiziti, Oerlikon Balzers, Petronas, Fuchs, Stellantis Latam.

Às agências de fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG.

E à Universidade Federal de Uberlândia, em especial à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC – UFU), por todo conhecimento e estrutura disposta para a conclusão da minha graduação.

“A persistência é o menor caminho do êxito”. (Charles Chaplin)

FERREIRA, E. R. **ESTUDO DA TEMPERATURA NA INTERFACE FERRAMENTA-CAVACO NO TORNEAMENTO DO INCONEL 718 COM FERRAMENTAS REFRIGERADAS INTERNAMENTE**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG, 2023.

## RESUMO

Usinagem é um processo que envolve alta geração de calor principalmente na interface de encontro da ferramenta com a peça, gerando o cavaco, pois é uma área pequena que concentra a maior parte da energia envolvida no processo de cisalhamento do material. Isso eleva a elevadas temperaturas que são prejudiciais principalmente às ferramentas de corte. Este problema é ainda mais crucial para as superligas, tal como o Inconel 718, pois essas possuem elevada resistência ao cisalhamento, como também apresentam boa fluência, logo, alta energia é empenhada, elevando a temperatura do corte. Até então, a técnica principal utilizada para contornar esse problema consiste em utilizar os Fluidos de Corte Abundante – FCAs. Esta técnica é o padrão ouro utilizada industrialmente pelo menos desde o século XIX. Os problemas do seu uso são relacionados à sustentabilidade – econômica, social e ambiental. Elevada parcela do custo da usinagem se refere ao manuseio dos fluidos de corte, além do mais em sua composição há elementos nocivos à saúde humana, podendo até mesmo causar câncer, fora elementos tóxicos que degradam o meio ambiente, caso sejam descartados de maneira incorreta. Por isso, neste trabalho foi estudada uma nova técnica de refrigeração chamada de Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRIs. As FRIs utilizam um fluido refrigerante circulando internamente às ferramentas de corte por meio de canais internos de refrigeração em ciclo fechado, isto é, sem nenhuma dispersão de fluidos para a atmosfera.

O objetivo principal foi comparar o desempenho das FRIs em termos da temperatura na interface ferramenta-cavaco durante o torneamento do Inconel 718 utilizando ferramentas de metal duro. Para isso, foi utilizado um planejamento

experimental fatorial completo ( $2^5$ ), cuja variável resposta foi a temperatura medida pelo método termopar ferramenta-peça. As variáveis de entrada foram a velocidade de corte ( $V_c = 33$  m/min e 67 m/min), avanço ( $f = 0,103$  mm/rot e 0,297 mm/rot), profundidade de corte ( $A_p = 0,2$  mm e 0,4 mm), revestimento (sem revestimento ou TiNAl) e a atmosfera (FRIs e o processo totalmente a Seco, sem refrigeração).

Os principais resultados mostraram que com o aumento dos parâmetros de corte a temperatura também aumenta, como esperado. O uso do revestimento TiNAl diminuiu a temperatura em até 10 % por cento em relação à ferramenta sem cobertura. Assim como o uso das FRIs reduziu a temperatura em até 16 % quando comparada com a condição a seco. Por fim, as FRIs tiveram um desempenho melhor do que as convencionais, demonstrando alta capacidade de remoção de calor. Futuros estudos se demonstram necessários.

**Palavras-chave:** Ferramenta refrigerada internamente, Inconel 718, usinagem, torneamento.

## ABSTRACT

Machining is a process that involves high heat generation in localized points in small areas at the tool-chip interface. This leads to high temperatures that are detrimental, especially to cutting tools. This problem is even more critical for superalloys such as Inconel 718, as they exhibit high shear strength and good creep resistance, resulting in high energy expenditure and elevated cutting temperatures. Until now, the main technique used to overcome this problem consists of using abundant cutting fluids (FCAs). This technique has been the industry standard since at least the 19th century. However, its use poses sustainability issues - economic, social, and environmental. A significant portion of machining costs is attributed to the handling of cutting fluids, which also contain harmful elements that can pose health risks, including cancer, as well as toxic substances that degrade the environment if improperly disposed. Therefore, this study proposes a new cooling technique called Internally Cooled Tools (ICTs). ICTs utilize a coolant flowing internally through the cutting tools via closed-loop cooling channels, without any fluid dispersion into the atmosphere.

The main objective was to compare the performance of ICTs in terms of the temperature at the tool-chip interface during the turning of Inconel 718 using carbide tools. To achieve this, a complete factorial experimental design ( $2^5$ ) was used, with the response variable being the temperature measured by the tool-workpiece thermocouple method. The input variables were cutting speed ( $V_c = 33$  m/min and 67 m/min), feed rate ( $f = 0.103$  mm/rev and 0.297 mm/rev), depth of cut ( $A_p = 0.2$  mm and 0.4 mm), coating (uncoated or TiAlN-coated), and atmosphere (ICTs and Dry).

The main results showed that with increasing cutting parameters, the temperature also increased, as expected. The use of TiAlN coating reduced the temperature by up to 10 % compared to the uncoated tool. Similarly, the use of ICTs reduced the temperature by up to 16 % compared to the dry condition. Finally, ICTs outperformed conventional techniques, demonstrating a high heat removal capacity. Further studies are deemed necessary.

**Keywords:** Internally cooled tool, Inconel 718, machining, turning.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Zonas de geração de calor no processo de usinagem.....	11
Figura 2: Classificação do ambiente de usinagem quanto às possíveis formas de lubri-refrigeração.....	14
Figura 3: Sistema de refrigeração com CO <sub>2</sub> proposto por Jaeger .....	17
Figura 4: Exemplo de medição por radiação (A) e por condução (B) na usinagem.....	20
Figura 5: Esquema de funcionamento do par termoelétrico .....	22
Figura 6: Circuito do termopar .....	23
Figura 7: Esquema do termopar ferramenta peça .....	24
Figura 8: Esquema de funcionamento e isolamento do sistema termopar ferramenta-peça .....	25
Figura 9: Circuito elétrico do termopar ferramenta-peça com o uso de compensação física .....	27
Figura 10: Linha do tempo do projeto .....	28
Figura 11: Corte transversal à barra de Inconel 718 e seus recortes .....	30
Figura 12: Esquema de funcionamento do refrigerador .....	31
Figura 13: Esquema de funcionamento da adaptação na ferramenta e porta ferramenta .....	32
Figura 14: Esquema de funcionamento do sistema de calibração .....	36
Figura 15: Curva de calibração do sistema Termopar Ferramenta-Peça .....	39
Figura 16: Resultados da temperatura pelo termopar ferramenta-peça .....	41
Figura 17: Gráfico de Pareto para temperatura medida no sistema termopar-ferramenta peça .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das propriedades do Aço ABNT 1045 com Inconel 718 .....	7
Tabela 2: Simulação do fluxo de calor no fresamento .....	13
Tabela 3: Composição e propriedade dos fluidos de corte .....	15
Tabela 4: Composição e propriedades do Inconel 718 .....	29
Tabela 5: Características das ferramentas .....	33
Tabela 6: Propriedades do revestimento da ferramenta .....	34
Tabela 7: Planejamento experimental .....	37
Tabela 8: Valores dos parâmetros de usinagem utilizados .....	38
Tabela 9: Resultados das temperaturas medidas de todos os ensaios .....	40
Tabela 10: Comparação das Temperaturas na Usinagem com Ferramentas Convencionais e as Modificadas .....	42
Tabela 11: Tabela ANOVA para o sistema comparando FRI e convencionais .....	43
Tabela 12: Comparação das Temperaturas na Usinagem com Ferramentas Revestidas e Sem Revestimento .....	46

## LISTA DE SÍMBOELOS E ABREVIATURAS

FRI	Ferramenta Refrigerada Internamente
FCA	Fluido de Corte Abundante
f	Avanço de corte (mm/rot)
$Q_{AMB}$	Calor dissipado para o meio ambiente (W)
$Q_F$	Calor dissipado pela ferramenta (W)
$Q_P$	Calor dissipado pela peça (W)
$Q_C$	Calor dissipado pelo cavaco (W)
$\sigma_{AB}$	Coefficiente de Seebeck (mV/°C)
$F_c$	Componente principal da força de corte (N)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
ddp	Diferença de Potencial (V)
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GMS	Grupo de Manufatura Sustentável
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
$V_{Bmáx}$	Máximo desgaste inicial da ferramenta (mm)
$A_p$	Profundidade de corte (mm)
$Q_1$	Quantidade de calor gerado na zona cisalhamento primária (W)
$Q_2$	Quantidade de calor gerado na zona cisalhamento secundária (W)
$Q_3$	Quantidade de calor gerado na zona cisalhamento terciária (W)
$Q_T$	Quantidade total de calor gerado (W)
Q	Taxa de calor gerada (W)
$T_1$	Temperatura na primeira junta (°C)
$T_2$	Temperatura na segunda junta (°C)
$E_1$	Tensão gerada na primeira junção (V)
$E_2$	Tensão gerada na segunda junção (V)
$\Delta E$	Tensão total gerada no circuito termopar (V)
$W_{atrito}$	Trabalho das forças de atrito do cavaco (J)
$W_{elást.}$	Trabalho das forças de deformações elásticas no corte (J)

$W_{plást.}$	Trabalho das forças de deformações plásticas no corte (J)
$W_{disp.}$	Trabalho das forças de dispersão (J)
$W_{estrut.}$	Trabalho das forças para modificar a estrutura cristalina (J)
$W_{cisal.}$	Trabalho das forças que produzem o cisalhamento (J)
$W_{avanço}$	Trabalho realizado pela componente do avanço (J)
$W_{passiva}$	Trabalho realizado pela componente força passiva (J)
$W_{princ.}$	Trabalho realizado pela componente principal (J)
$W_{Total}$	Trabalho total (J)
$W_{corte}$	Trabalho total de corte (J)
$V_c$	Velocidade de corte (m/min)

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Contextualização.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivo.....</b>	<b>5</b>
1.2.1. Objetivo Geral.....	5
1.2.2. Objetivo Específico.....	5
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Superliga Inconel 718.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Calor e Temperatura na Usinagem.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3. Métodos de Refrigeração no Processo de Usinagem.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4. Métodos de Medição de Temperatura.....</b>	<b>18</b>
2.4.1. Radiação.....	19
2.4.2. Condução.....	20
<b>2.5. Método Termopar Ferramenta-Peça.....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO III - METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1. Preparação do Material.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2. Preparação da Máquina.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3. Máquina e Fluido.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4. Preparação dos Equipamentos de Medição .....</b>	<b>34</b>

<b>3.5. Planejamento estatístico e Procedimento Experimental.....</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1. Curva de Calibração.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2. Análise da Temperatura.....</b>	<b>40</b>
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Contextualização

A usinagem é um processo vital para as indústrias de manufatura devido a sua ampla gama de aplicação, confeccionando peças de diversas formas, com dimensões precisas e confiáveis. Machado et al. (2015) diz que a atividade manufatureira em países industrializados corresponde por 20 % a 30 % do Produto Interno Bruto. Para o autor, a manufatura pode ser entendida como o processo de transformar matérias-primas em produtos acabados, desde simples parafusos até mesmo complexas aeronaves, servindo até mesmo como um indicativo do padrão de vida da população de um determinado país. Em termos técnicos, usinagem pode ser definida como a remoção de material na forma de cavaco gerando formas geométricas e acabamento superficial desejados. Para isso uma ferramenta, por geralmente mais dura do que a peça a ser usinada, é utilizada para vencer a resistência ao cisalhamento do material e, com isso, promover o corte.

A formação do cavaco em si gera muita energia em função do cisalhamento, do atrito, das deformações plásticas e elásticas e também da modificação da estrutura cristalina. Estudos indicam que a maior parte da energia dispendida durante o corte é convertida em calor, principalmente na interface ferramenta-cavaco, Borba Júnior (2020) realizou o estudo da temperatura e energia gerada no processo de furação do ferro fundido cinzento com o auxílio do software *AdvantEdge™*, os resultados obtidos mostraram que a temperatura máxima encontrada no sistema foi na ferramenta e 48 % da energia mecânica do processo foi transformada em calor. O calor gerado fica concentrado em pequenas áreas na região de corte, o que promove elevadas temperaturas. Segundo Fernandes e Barbosa altas temperaturas podem levar a problemas de perda de tolerância dimensional, integridade superficial prejudicada

(rugosidade, tensões, microfissuras), além de prejudicar a vida útil das ferramentas (Fernandes & Barbosa, 2022b).

Altas temperaturas são ainda mais críticas para determinados materiais, tais como as superligas. Ezugwu esclarece que essas ligas possuem uma matriz austenítica que promove o encruamento rápido, conservam altos níveis de resistência em elevadas temperaturas, geralmente possuem baixa condutividade térmica e apresentam tendência de gerar aresta postiça de corte por serem bifásicas. Tais características, principalmente a resistência em altas temperaturas, dificultam a usinagem (Ezugwu et al., 2004). A elevada quantidade de calor gerada durante o corte, reduz a vida útil da ferramenta, pois acelera o processo de desgaste, principalmente de flanco, cratera e entalhe. Muito se estuda sobre ligas metálicas e suas propriedades, a fim de melhorar resistência mecânica. Porém, esse aumento geralmente torna o processo de corte mais difícil, aumentando muito a energia dispendida e o calor gerado no processo. Maior calor, inevitavelmente leva a maiores temperaturas.

Para contornar as adversidades da usinagem de superligas, tais como o Inconel 718, a técnica padrão utilizada industrialmente é com o uso de Fluidos de Corte Abundante. Este método tornou-se o mais comum devido sua facilidade de uso, que consiste em aplicar fluido na região de corte através de um jorro, geralmente em grandes quantidades. Os Fluidos de Corte – FCs desempenham diversas funções, tais como lubrificação, ação anti-oxidante, remoção de cavaco e, principalmente refrigeração. O FC traz como benefício a troca de calor com a ferramenta e a redução da sua temperatura, o que é benéfico para sua vida útil.

Os fluidos de corte são soluções ou emulsões que contém óleo vegetal ou mineral além de diversos aditivos. Byers (2016) esclarece que o número de aditivos presentes podem chegar a mais de dez. Dentre eles, há os biocidas, utilizados principalmente para conter contaminações biológicas que degradam o fluido, como explica Carvalho et al. (2022). Porém tais substâncias são nocivas tanto ao meio ambiente quanto ao operador. Mesmo os fluidos mais avançados, que incluem a utilização de óleos de base vegetal, ainda são prejudiciais de alguma forma (Almeida Carvalho et al., 2022). Além disso, o custo do uso desses fluidos representa entre 7 a 17 % do custo da usinagem (KING et al., 2001).



Devido a isso, pesquisadores vêm buscando a redução no uso desses insumos por outros métodos de refrigeração mais sustentáveis em usinagem (Fernandes & Barbosa, 2022a). Uma técnica que vem sendo bastante explorada, é a Mínima Quantidade de Lubrificante - MQL que tem o intuito de reduzir o uso do fluido através da pulverização de gotículas de óleo na região de corte com o auxílio de ar comprimido. O ar comprimido passa por uma câmara de mistura que por efeito de tudo de venturi, um diferencial de pressão puxa o lubrificante e é aplicado através de um bico com cerca de 1 mm de diâmetro com uma vazão de 50 mL/h à 2 L/h. Diversos outros métodos são apresentados no trabalho de Fernandes e Barbosa, sendo categorizados em usinagem a seco, usinagem molhada e usinagem quase a seco (Fernandes & Barbosa, 2022).

Possivelmente a usinagem totalmente a seco seria um dos métodos mais sustentáveis do ponto de vista ecológico, porém ela carece de poder de lubrificação, refrigeração e de remoção de cavacos. Uma variante, seria o uso do ar comprimido de até 15 bar sobre a zona de corte com o intuito de resfriar, lubrificar e principalmente remover cavaco. Porém, essa técnica também possui uma baixa capacidade de refrigeração e de lubrificação (Machado et al., 2015).

Para contornar o problema da dispersão de fluidos para o meio ambiente, o Grupo de Manufatura Sustentável – GMS da Universidade Federal de Uberlândia – UFU vem desenvolvendo e pesquisando sobre as Ferramentas Refrigeradas Internamente – FRIs, em que trabalhos importantes já foram publicados para elucidar essa nova técnica (Barbosa, 2021; França et al., 2022; Nazareno Fernandes et al., 2023). Esse método consiste em utilizar ferramentas de usinagem adaptadas que possuem dutos internos que permitem o fluxo de certo fluido por dentro dela e depois retornar o líquido para o recipiente inicial dele, ou seja, um circuito fechado sem desperdício, com isso, durante a usinagem a ferramenta troca calor com o fluido pelos dutos, diminuindo a sua temperatura e aumentando a vida útil.

França investigou a temperatura de usinagem no processo de torneamento externo do ferro fundido cinzento com o uso de ferramentas de metal duro com canais internos para refrigeração (França et al., 2022), para medição das temperaturas foram utilizados os métodos do termopar ferramenta-peça e termopar soldado. O trabalho apresentou uma melhoria na usinagem com o sistema refrigerado, reduzindo a temperatura de usinagem em até 21,52 %. Outro trabalho desenvolvido pelo GMS foi

o de (Nazareno Fernandes et al., 2023) que realizou o estudo do torneamento externo do ferro fundido cinzento com o uso de ferramentas refrigeradas internamente e as convencionais utilizando fluido de corte abundante, os resultados mostraram que em altas velocidades de corte a FRI reduz a rugosidade quando comparada ao FCA e também apresentou as FRIs como uma promissora opção de usinagem ecologicamente correta e com desempenho semelhante às demais técnicas.

Contudo, apesar dos bons resultados obtidos até então com as FRIs, por se tratar de uma técnica pouco abordada na literatura, não há trabalhos publicados sobre as ferramentas modificadas para a usinagem de superligas, tal como o Inconel 718. Essa liga é de suma importância, sendo aplicadas em diversos segmentos industriais. (Patel & Smith, 2001) esclarecem que o Inconel 718 representa mais de 50 % de todas as superligas utilizadas mundialmente.

Dessa forma, este trabalho aborda a investigação do comportamento térmico das FRIs, uma alternativa de usinagem mais ecológica, que consiste em um sistema fechado de refrigeração, sem dispersão de fluidos para a atmosfera. O trabalho foi realizado usinando uma superliga de Inconel 718 no processo de torneamento externo. Os testes de torneamento foram realizados seguindo um planejamento fatorial completo do experimento ( $2^5$ ), cuja variável resposta foi a temperatura medida pelo método termopar ferramenta-peça. As variáveis de entrada foram a velocidade de corte ( $V_c = 33$  m/min e  $67$  m/min), avanço ( $f = 0,103$  mm/rot e  $0,297$  mm/rot), profundidade de corte ( $A_p = 0,2$  mm e  $0,4$  mm), revestimento (sem revestimento ou TINAL) e a atmosfera, FRIs e a Seco. Optou-se pela atmosfera a seco a fim de focar as análises em métodos de refrigeração mais ecológicos.

Este trabalho foi estruturado da seguinte forma, na primeira parte, foi abordada uma revisão de literatura, explicando os problemas significativos dos fluidos de corte e alternativas para isso; a segunda seção explica o design, materiais e métodos de FRI; a terceira parte mostra os resultados comparando a usinagem a seco sem refrigeração e a FRI; a última parte contém as conclusões significativas.

## **1.2. Objetivo**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O objetivo principal desse estudo foi avaliar o comportamento térmico das Ferramentas Refrigeradas Internamente (FRIs), com revestimento e sem revestimento em comparação à usinagem a seco. Para mensurar tais temperaturas foi utilizado o método do termopar ferramenta-peça durante o torneamento do Inconel 718.

### **1.2.2. Objetivo Específico**

- Avaliar as temperaturas na usinagem à seco em comparação à ferramenta refrigerada internamente, avaliando também a eficiência de redução de temperatura do sistema modificado;
- Comparar a influência do revestimento, ambiente, velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte sobre a temperatura na interface ferramenta-cavaco.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Superliga Inconel 718

Com o avanço da tecnologia e nas pesquisas, as indústrias aeroespaciais, as nucleares e as petroquímicas, por exemplo, necessitavam de materiais cada vez mais resistentes a condições extremas de trabalho, como elevada temperatura e pressão. Ezugwu explica que a demanda por motores de jatos aeroespaciais aumentou bastante durante o final do século XX e as condições de trabalho dos motores ficaram mais severas devido à alta exigência de potência e velocidade. Dos anos 1910 a 1980 vimos um aumento constante da temperatura dos motores, porém dos anos 1990 até hoje a temperatura dobrou, por esse motivo surgiu a necessidade da criação das superligas metálicas, como o Inconel, para atender as necessidades industriais (Ezugwu et al., 2004). Em decorrência dessas características, atualmente, as superligas de Níquel correspondem a 50 % das peças de motores de aeronaves. Fora isso, existe a necessidade de redução de peso para economia de combustível. Essa simples mudança de material, de aço para superligas, em motores de aeronaves, apresentou uma redução de peso no projeto e cada quilograma a menos resultou em economia de US\$ 150.000 em combustível durante toda a vida útil do avião (Ezugwu et al., 2004). A tabela 1 mostra as propriedades do aço 1045 em comparação com o Inconel 718.

Tabela 1: Comparação das propriedades do Aço ABNT 1045 com Inconel 718  
(Adaptado de Krauss (2015))

Propriedades	Aço ABNT 1045	INCONEL 718
Composição química	Ferro, Carbono (0,45 %)	Níquel, Cromo, Ferro, etc.
Resistência à tração (MPa)	570 - 700	965 - 1035
Dureza (HRC)	20 - 50	20 - 40
Alongamento (%)	16 - 20	15 - 25
Módulo de elasticidade (GPa)	190 - 210	190 - 205
Condutividade térmica (W/m·K)	52 - 54	09 - 11
Coefficiente de expansão térmica	$10.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$13.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Resistência à corrosão	Baixa	Excelente
Resistência à temperatura elevada	Limitada	Excelente
Aplicações típicas	Eixos, Engrenagens	Componentes aeroespaciais, turbinas, peças de alta temperatura
Fonte: Autor		

O Inconel é pertencente a uma família de superligas à base de Níquel-Cromo, tendo o Níquel como o principal elemento. Contém também vários outros elementos tais como Nióbio responsável pela resistência mecânica e à corrosão, o Alumínio que induz a ductilidade à liga, o Titânio que quando ligado com Al, Mn, Sn e V produz ligas de baixa densidade com excelente resistência mecânica e a corrosão (Machado et al., 2015). As composições variam de acordo com a finalidade que cada um terá. A exemplo, o Inconel 718 o mais importante da sua família, é uma liga a base de níquel-ferro-cromo. Possui também um elevado teor de nióbio, o que reforça ainda mais o seu comportamento resistente em elevadas temperaturas devido sua fase endurecedora ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ).

O Inconel 718 apresenta boa soldabilidade, tanto na fase endurecida ou recozida (Jose Tom Tharappel e Jalumedi Babu, 2018). Possui também boa resistência à fadiga e corrosão, o que o torna um material muito desejado para determinadas aplicações de alta exigência, tal como a indústria petroquímica.

Diferentemente do Ferro, que forma as ligas ferrosas, o Níquel mantém a sua estrutura cúbica de face centrada enquanto aquecido (Osmar Custódio de Moura Filho et al., 2015). Apesar da boa soldabilidade, esse material é classificado como de difícil usinabilidade pois apresenta uma matriz austenítica, encruamento rápido, ótima fluência, mantendo a boa resistência mecânica em altas temperaturas, geralmente possuem baixa condutividade térmica e tendência de gerar aresta postiça de corte (Ezugwu et al., 2004).

A baixa usinabilidade significa maior desgaste das ferramentas. Os principais tipos de desgaste que ocorrem durante a usinagem do Inconel 718 são de flanco e entalhe que costumam predominar, com possibilidade de ocorrer também a deformação da aresta de corte em velocidades de corte relativamente baixa, por fim, desgastes por abrasão e difusão também aparecem por causa das elevadas temperaturas de usinagem (Filho et al., 2015, (Marques et al., 2019)). Outra característica marcante do Inconel é a baixa condutividade térmica, o que faz com que o calor fique concentrado na interface ferramenta cavaco. Temperaturas de corte acima dos 1.000 °C foram reportadas na usinagem dessas ligas (Marques, 2015). Ezugwu et al. (2003).

## **2.2. Calor e Temperatura na Usinagem**

Durante anos, estudiosos trabalham para encontrar a porcentagem mais próxima da realidade da distribuição do calor gerado durante a usinagem de peças, trabalho difícil devido à dificuldade em alcançar o ponto de contato entre a ferramenta e a peça. Em 1798, foi notificado o primeiro registro de experiências em usinagem com ênfase em aspecto térmico, tratava do método do calorímetro, realizado por Benjamin Thompson, no qual mede a temperatura da água que envolve a peça em

usinagem, da ferramenta e do cavaco (FERRARESI, 1977). De 1798 até o presente vários métodos de estudo foram desenvolvidos o que aumentou o conhecimento na área.

Segundo Machado et al. (2011) o trabalho das forças de deformação e atrito causadas pela força de usinagem, são convertidos em calor e a partir dele, das massas, geometrias e propriedades térmicas dos materiais são gerados campos de temperatura durante o processo. Ainda segundo o autor as parcelas de trabalho total vindo da transformação de energia durante a usinagem são divididas em 6 categorias:

- Trabalho das forças que produzem deformações elásticas na ferramenta, peça, cavaco e na máquina se transforma em vibrações elásticas amortecidas e convertem em calor;
- Trabalho das forças de dispersão responsáveis pela superação das energias superficiais da peça, pelo deslocamento dos grãos cristalinos para o cavaco e pelo esmagamento de alguns grãos, aumentando a área superficial;
- Trabalho das forças para modificar a estrutura cristalina do metal sob pressão e aquecimento;
- Trabalho das forças que produzem as deformações plásticas, constituídas de um esmagamento e de uma tração parcial, seguidos por um deslizamento cuja tensão supera o limite de escoamento;
- Trabalho das forças que produzem o cisalhamento e os consequentes deslizamentos no cavaco e sobre a superfície usinada;
- Trabalho das forças de atrito de cavaco com a superfície de saída e da peça com as superfícies de folga da ferramenta.

Dessa forma, pode-se concluir que o trabalho total é representado pela seguinte equação 1:

$$W_{corte} = W_{elast.} + W_{disp.} + W_{estrut.} + W_{plast.} + W_{cisal.} + W_{atrito} \quad (1)$$

Apesar de cada uma das seis parcelas possuírem valores bem distintos, de acordo com FERRARESI, 1977, as três primeiras parcelas são muito pequenas comparadas ao total, com isso, para metais, a equação 1 pode ser simplificada em equação 2:

$$W_{corte} \cong W_{plast.} + W_{cisal.} + W_{atrito} \quad (2)$$

Segundo a DIN 6584, realizando trabalhos sobre componentes da força de usinagem, tem-se a seguinte expressão do trabalho total:

$$W_{total} \cong W_{princ.} + W_{avanço} + W_{passiva} \quad (3)$$

Onde:

$W_{princ.}$  = Trabalho realizado pelo componente força principal de corte atuante na direção da velocidade de corte;

$W_{avanço}$  = Trabalho realizado pelo componente da força de avanço atuante na direção da velocidade de avanço;

$W_{passiva}$  = Trabalho realizado pelo componente força passiva, atuante na direção perpendicular ao plano de trabalho.

O trabalho da força passiva é zero devido a direção perpendicular, já o trabalho realizado pela força de avanço é muito baixo, representando cerca de 1 % a 2 %, isso resulta de a velocidade de avanço ser cerca de duzentas a quinhentas vezes menor que a velocidade de corte. Por isso, o trabalho realizado pela força de corte representa praticamente todo o trabalho durante a usinagem (Machado et al. 2011).

Segundo FERRARESI (1977), pode-se constatar empiricamente que mais de 90 % de todo trabalho mecânico de usinagem se converte em calor, resultando na seguinte equação 4:

$$Q = \frac{F_c \cdot V_c}{60} \quad (4)$$

Sendo:

$Q$  = Taxa de calor gerada ( $W$ )

$F_c$  = Componente principal da força de corte ( $N$ )

$V_c$  = Velocidade de corte ( $m/min$ )

Durante o processo de usinagem a geração do calor é distribuída entre cavaco, ferramenta, peça e atmosfera



Na peça, o calor pode ser dividido em três partes, representadas na figura 1, chamadas de zonas de cisalhamento.

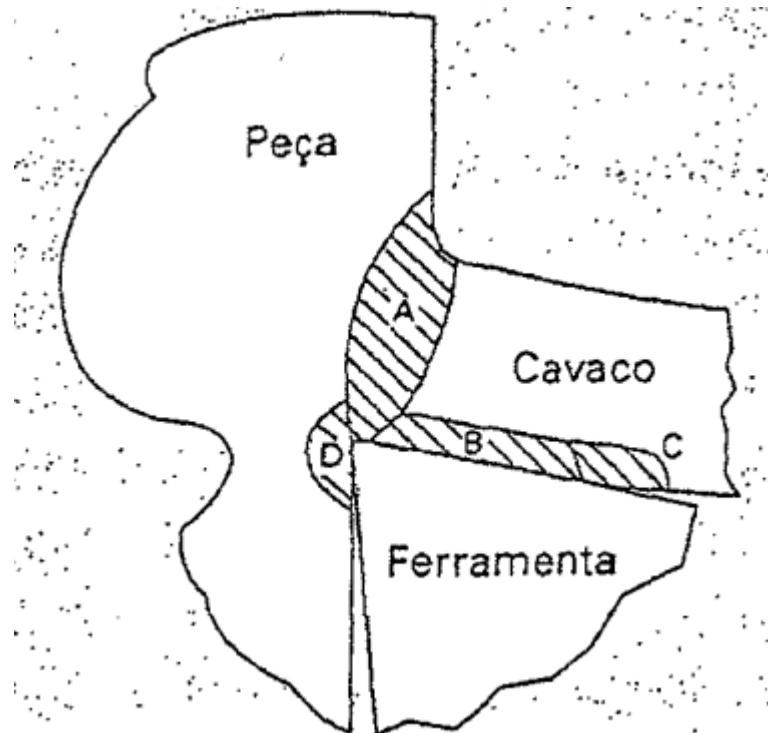


Figura 1: Zonas de geração de calor no processo de usinagem. (MACHADO et al., 2011)

A Zona de Cisalhamento primária (A) representa a região onde se localiza o plano de cisalhamento e é o ponto de maiores tensões e deformações plásticas na peça. De acordo com MACHADO et al. (2011) o aumento da temperatura nessa região pode ser benéfico por reduzir a energia necessária para cisalhar o material da peça.

A zona de cisalhamento secundária (B) é representada pela região em que ocorre o contato do cavaco com a superfície da ferramenta. Neste ponto, a velocidade de corte é mais crítica, pois com o aumento da velocidade de corte, a temperatura nessa região também aumenta e por ter o maior contato com a ferramenta durante o processo de usinagem, é uma região crítica de transferência de calor. Geralmente, o limite da velocidade de corte de uma ferramenta é estabelecido devido a interação entre cavaco e ferramenta na zona de cisalhamento secundária. De acordo com

Santos; Sales (2007) maior parte do calor gerado é dissipado pelo cavaco, sendo uma parcela absorvida pela ferramenta.

A zona de cisalhamento terciária (D) corresponde ao contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Esse contato ocorre mesmo sem desgastes na ferramenta por causa da deformação mínima necessária para a formação de cavacos. Essa zona também interfere no aumento da temperatura da peça e da ferramenta. (MACHADO et al., 2011).

Todo o calor gerado é dividido nessas três zonas de cisalhamento, trazendo para a parte prática, temos que todo o calor é dissipado pela peça, pela ferramenta, pelo cavaco e pelo meio ambiente. Dessa forma, temos a seguinte equação 5:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_P + Q_F + Q_C + Q_{AMB} \quad (5)$$

Sendo:

$Q_T$  = Quantidade total de calor gerado ( $W$ )

$Q_1$  = Quantidade de calor gerado na zona cisalhamento primária ( $W$ )

$Q_2$  = Quantidade de calor gerado na zona cisalhamento secundária ( $W$ )

$Q_3$  = Quantidade de calor gerado na zona cisalhamento terciária ( $W$ )

$Q_P$  = Calor dissipado pela peça ( $W$ )

$Q_F$  = Calor dissipado pela ferramenta ( $W$ )

$Q_C$  = Calor dissipado pelo cavaco ( $W$ )

$Q_{AMB}$  = Calor dissipado para o meio ambiente ( $W$ )

Parte do calor gerado durante o processo de corte irá naturalmente para a ferramenta e conseqüentemente elevando sua temperatura. Evidentemente que esse aumento de temperatura irá depender de diversos fatores tais como os materiais da ferramenta e da peça, dos parâmetros de corte, das condições de lubri-refrigeração, etc. Portanto, saber cada distribuição de temperatura para cada diferente processo seria impossível e pouco útil. Porém, entender como essa distribuição ocorre de maneira geral e desta forma buscar otimizar geometria de ferramenta, revestimento,

métodos de refrigeração, etc pode ser bastante eficaz no sentido de proteger as ferramentas do desgaste excessivo.

Por isso, Putz et al. (2017) estudou a distribuição da temperatura de usinagem a partir do método de elemento finitos no fresamento do aço S235. Em sua pesquisa foi utilizada uma ferramenta com 3 insertos e diâmetro de 20 mm, velocidade de corte de 100 m/min e 200 m/min, com profundidade de corte axial de 5 mm e avanço por dente de 0,1 mm/rot. Deste projeto ele concluiu que a maior parte do calor é dispersado no cavaco e a menor parte afeta a ferramenta, a distribuição do calor gerado está descrita na tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Simulação do fluxo de calor no fresamento. (Adaptado de Putz et al. (2017))

	100 m/min		200 m/min	
	Fluxo Calor [W]	Porcentagem	Fluxo Calor [W]	Porcentagem
<b>Fluxo de Calor Total</b>	<b>415,6</b>	<b>100 %</b>	<b>778,3</b>	<b>100 %</b>
Fluxo de Calor na Ferramenta	39,0	9,4 %	78,1	10,00 %
Fluxo de Calor na Peça	109,8	26,4 %	119,7	15,40 %
Fluxo de Calor no Cavaco	266,8	64,2 %	580,5	74,60 %

### 2.3. Métodos de Refrigeração no Processo de Usinagem

A temperatura de usinagem está diretamente ligada à velocidade de corte, quanto maior a velocidade, maior será a temperatura, essa relação foi comprovada no trabalho do França (2021), no qual ele estudou as temperaturas de usinagem do ferro fundido cinzento utilizando o método de medição termopar ferramenta-peça, as variáveis de entrada foram velocidade de corte (84, 132 e 212 m/min) e as condições de refrigeração da ferramenta (inserto comum, inserto modificado circulando água a temperatura ambiente e inserto modificado circulando água gelada). O aumento da velocidade significa um aumento da produtividade, porém, a partir de um determinado valor, a velocidade não pode mais ser aumentada, pois isso reduziria consideravelmente a vida útil da ferramenta, assim como a qualidade da usinagem como um todo. Para reduzir a temperaturas envolvidas no processo diferentes

técnicas podem ser utilizadas. Fernandes e Barbosa fizeram um estudo dessas diferentes técnicas de refrigeração utilizadas em usinagem e puderam classificar pelo menos 14 delas, divididas em usinagem molhada, usinagem quase a seco e usinagem a seco, figura 2 (Fernandes & Barbosa, 2022b).

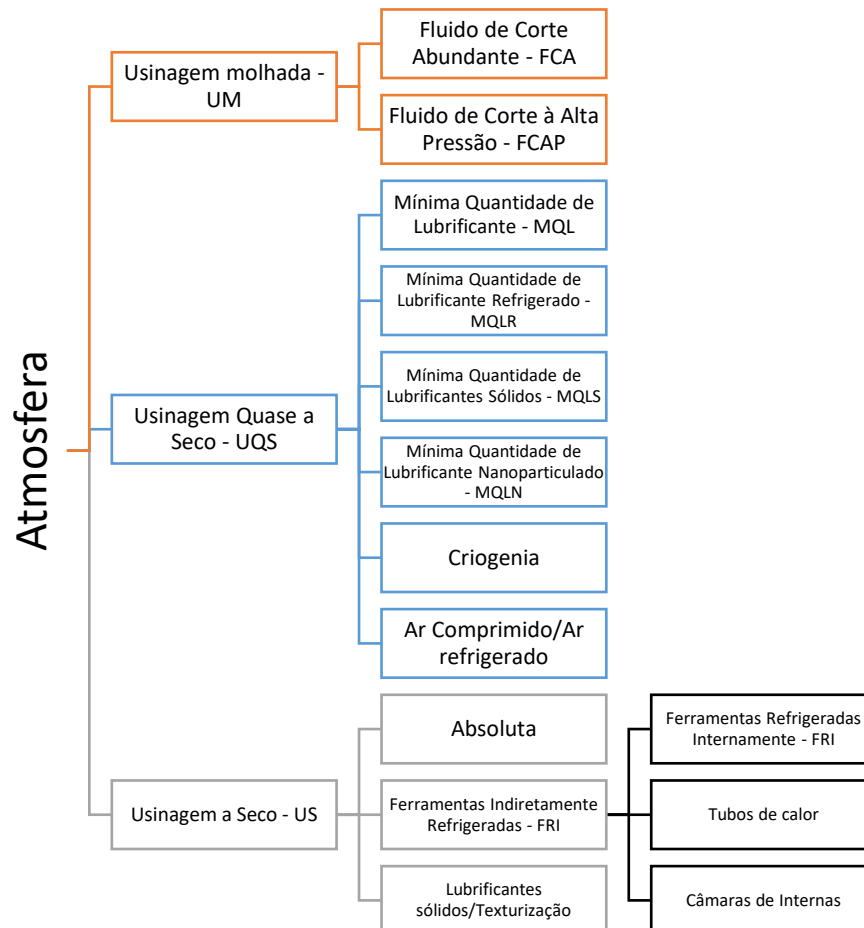


Figura 2 - Classificação do ambiente de usinagem quanto às possíveis formas de lubri-refrigeração (adaptado de (Fernandes & Barbosa, 2022b))

De todos os métodos, o FC é o mais amplamente utilizado pela indústria metal mecânica. FCs são elementos químicos podendo ser minerais ou vegetais. Diniz (1999) classifica os FCs em ar, tipo aquosos e óleos, dessa forma, a tabela 3 abaixo apresenta as composições e propriedades dos fluidos de corte.

Tabela 3: Composição e propriedade dos fluidos de corte. Fonte: LISBOA, MORAES E HIRASHITA (2013).

Classificação dos fluidos de corte	Sólido	Líquido			Gasoso
		Óleos puros	Óleos emulsionáveis	Fluidos químicos	
Principais composições	Grafite e bissulfeto de molibidênio	Óleo mineral e/ou óleo graxo (Agentes EP: cloro, enxofre e fósforo).	Óleos, águas e emulsificadores (Agentes EP, antioxidantes e umectantes).	Água, sais orgânicos e inorgânicos, (Agentes EP, anticorrosivos, antioxidantes, biocidas e umectantes).	Ar, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor.
Principais propriedades	Lubrificação	Lubrificação, Extrema-pressão, Anticorrosão.	Boa refrigeração, Boa antioxidação, Baixa lubrificação, Boa anticorrosão, Extrema-pressão.	Excelente refrigeração, Baixa lubrificação, Boa anticorrosão e antioxidação, Fácil remoção, Extrema-pressão.	Refrigeração.

O método principal de aplicação do FC consiste no jorro abundante, sobre a peça, a ferramenta e a máquina. O fluido de corte desempenha funções importantes no processo de corte, tais como lubrificação, refrigeração, antioxidação e anticorrosão, conforme demonstrado na tabela 3. Tem por finalidade facilitar o cisalhamento da peça e aumentar a vida útil da ferramenta. Dos Santos et al. (2021) estudaram a influência do fluido de corte nas rebarbas da microusinagem do Inconel 718 com o uso de microfresas de metal duro revestidas com TiN de 381  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Nessa microusinagem foi utilizado o método submerso de fluido de corte e apresentou como resultado uma melhora significativa no acabamento da peça usinada, reduzindo as rebarbas do processo.

Contudo, mesmo os FCs apresentando bons resultados técnicos, os mesmos tem problemas. Os FCs possuem em sua composição diversos elementos, dentre eles há poluentes nocivos à saúde e ao meio ambiente, além de serem onerosos para indústria. Durante o corte elevadas pressões são desenvolvidas entre ferramenta e peça, alguns autores chegando a afirmar a existência de uma zona de contato absoluto (Trent; Wright, 2000). Devido a isso, o fluido não alcança a região efetiva de

cutagem o que prejudica seu desempenho como lubrificante. Mesmo assim, há a dissipação do calor por condução através dos elementos periféricos, cavaco, máquina, peça, etc. O fluido de corte, então, por apresentar as características de lubrificação e em conjunto com a refrigeração, se apresenta como uma boa solução para vida útil da ferramenta e tolerâncias dimensionais.

As vantagens do fluido de corte para a peça e ferramenta são atrativas, porém o seu custo é oneroso para as indústrias. De acordo com KING et al. (2001) o custo desses insumos pode representar de 7 % a 17 % do custo de usinagem, porcentagem que tende a aumentar devido a leis ambientais cada vez mais rigorosas e a intensa busca por métodos de produção que reduzam a quantidade de carbono depreendido para a atmosfera. Ademais, há os custos de descarte além da responsabilização das empresas produtoras por todo o ciclo de vida do produto, da manufatura ao descarte.

Outro ponto negativo é a composição dos FCs. Eles comumente possuem biocidas para evitar o crescimento de colônias de bactérias, entre outros microrganismos. De acordo com SHOKRANI et al. (2012) vários dos biocidas utilizados possuem formaldeído, que é uma substância cancerígena. Devido o contato direto e durante bom tempo da vida deles, os operadores de máquinas que usam o fluido de corte frequentemente são acometidos por sintomas alérgicos ou até mesmo em casos piores como câncer.

Frente às adversidades que existem no uso do fluido de corte abundante e a limitação em usinar materiais mais resistentes ou em alta velocidade de corte a seco, pesquisadores tem buscado mais sustentáveis. Por exemplo, em 2003 Jaeger desenvolveu um sistema aberto para refrigerar a zona de corte, e consistia em uma ferramenta com canais internos que entregava o fluido diretamente na região próxima ao contato da ferramenta com a peça, neste modelo o fluido utilizado foi dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

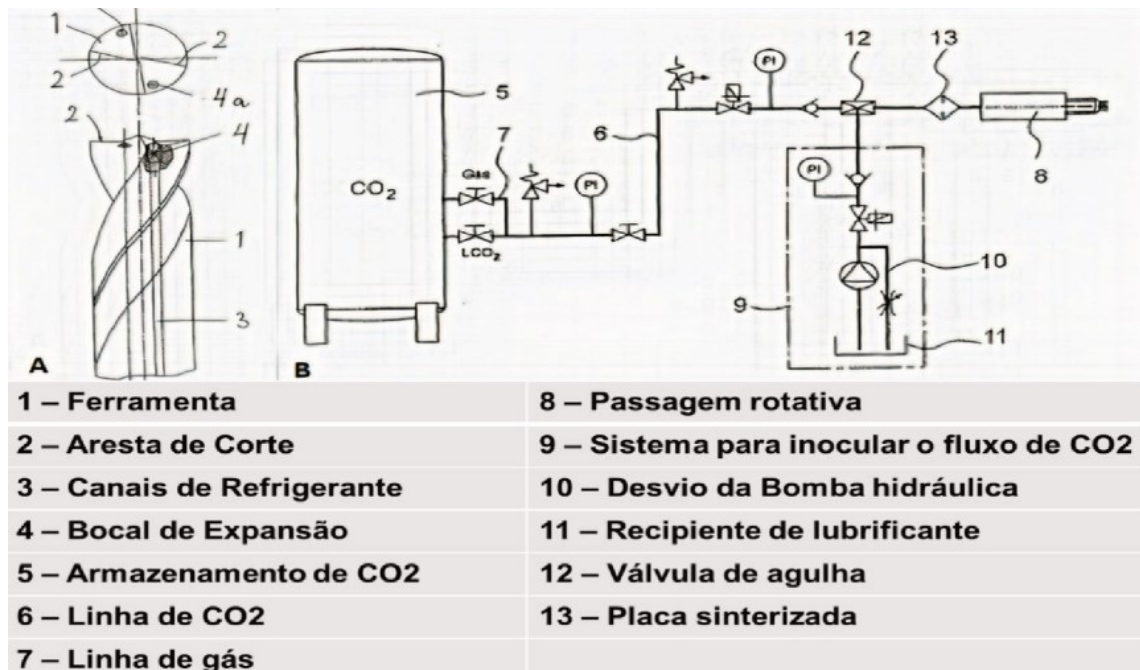


Figura 3: Sistema de refrigeração com CO<sub>2</sub> proposto por Jaeger (2003). (a) Ferramenta com canais internos. (b) Sistema fluxo de CO<sub>2</sub>. Adaptado de: (JAEGER et al., 2003) e (FRANÇA, 2021).

Nos testes realizados concluíram que com o uso do sistema de refrigeração com CO<sub>2</sub> a temperatura da ferramenta se manteve constante e as linhas de produção puderam usinar peças sem uso de fluidos líquidos de corte, mesmo em trabalhos com altos níveis de precisão de fabricação.

Li et al. (2018) propuseram um sistema fechado de refrigeração com o fluido circulando por dentro do calço da ferramenta e este trocando calor com o inserto. Foram estudados três tipos diferentes de insertos: os otimizados que possuem reentrâncias para melhorar a troca de calos, os convencionais e os sem modificações. Neste projeto foi estudada a temperatura na usinagem do aço AISI 1045 utilizando a água como fluido refrigerante e encontraram 22,56 °C, 38,88 °C e 110,31 °C na usinagem com ferramenta otimizada, convencional e sem modificação, respectivamente. Quanto ao desgaste a otimizada apresentou um desgaste de cratera de 19 µm, a convencional de 47 µm e um elevado desgaste na ferramenta comum.

Da Silva (2019), na tentativa de melhorar a usinagem das ligas de Níquel, estudou o torneamento do Inconel 718 a seco comparando com a usinagem

criogênica. Nesse estudo foram utilizadas ferramentas cerâmicas de geometria redonda e foram variados os parâmetros de velocidade de corte e avanço. Porém, os resultados não foram positivos, sendo que a integridade superficial piorou, as forças de usinagem foram maiores devido a influência da refrigeração na zona de corte o que não facilita o cisalhamento e, por fim, ainda houve um aumento de vibração com a criogenia.

#### **2.4. Métodos de Medição de Temperatura**

Uma das principais limitações em um processo de usinagem é a elevada temperatura que a ferramenta está sujeita, principalmente com o aumento da velocidade de corte. Groover (2011) explica em seu livro que tanto elevadas forças de usinagem como de temperaturas são prejudiciais para a vida da ferramenta. Elevadas forças acarretam a quebra da ferramenta, já em altas temperaturas o material da ferramenta coalesce e falha, podendo também levar à quebra. Por isso, o estudo de novas formas de usinagem que permitam reduzir a temperatura da ferramenta são fundamentais. Contudo, para avaliar a eficácias dessas diferentes técnicas, é preciso medi-las.

De acordo com Trent; Wright (2000) é muito difícil determinar de forma precisa a temperatura na interface ferramenta-cavaco, principalmente por dificuldades de acesso a essa região. Mesmo assim, diversos métodos foram propostos e cada um apresenta uma vantagem e desvantagem. Esses métodos presentes na literatura podem se dividir em três categorias principais: os experimentais, os analíticos e os numéricos. Os mais usados para o processo de corte são os numéricos e os experimentais, os analíticos são menos utilizados devido às suas simplificações e considerações adotadas.

Para o método experimentais a técnica utilizada pode ser dividida em duas áreas, por radiação e por condução. Sendo seus princípios debatidos a seguir.



### 2.4.2. Radiação

No método da radiação a energia é transmitida entre os materiais por ondas eletromagnéticas, dessa forma, a transferência pode ocorrer no vácuo (Borgnakke, Claus, 2013). Uma propriedade que todos os corpos possuem é a de emitir e receber radiação, nas palavras de Brehm e Mullin (1989, p. 75), *“Uma propriedade comum a todos os objetos é a capacidade de emitir e absorver radiação eletromagnética”*.

Na medição por radiação infravermelha são utilizadas técnicas termográficas em que não há contato físico com a região analisada, apenas é medida a energia emanada de um determinado corpo. Para medição da radiação, podem ser utilizadas técnicas das câmeras termográficas, ou pirômetros. As câmeras termográficas têm a capacidade de receber radiação e são calibradas, previamente, a partir de um corpo negro, dessa forma, conseguem relacionar a quantidade de radiação medida com uma base anterior e resultar na temperatura da matéria em questão (FREITAS, SOHN e PEREIRA NETO, 2017). Já os pirômetros, assim como as câmeras termográficas, são sensores de temperatura que utilizam como informação a radiação eletromagnética emitida pelo corpo a medir, porém o pirômetro não forma a imagem da região medida, apenas capta pelo sensor a radiação de um ponto específico. Todo corpo, com temperatura superior a 0 K, emite radiação eletromagnética com uma intensidade que depende de sua temperatura. (PIRES, AFONSO E CHAVES, 2006)

As principais vantagens do uso da medição por radiação é a rápida resposta à variação de temperatura, a não necessidade de contato físico e também a facilidade para alcançar pontos de difícil acesso (LIMA, JÚNIOR, 2020). PAGOTTO (2022) estudou a temperatura de usinagem de um corte ortogonal a seco do aço SAE 1045 com ferramenta de metal duro revestido a partir de uma câmera termográfica. No trabalho foram variados os parâmetros de corte avanço, profundidade de corte e velocidade de corte. O projeto indicou que o uso dessas câmeras termográficas apresenta resultados condizentes com a literatura, portanto é mais uma ferramenta possível para análise da usinagem.

Porém há dificuldades para o uso no caso da usinagem, a obstrução causada pela formação do cavaco em cima da peça impede a leitura do instrumento termográfico, prejudicando a leitura. Outro problema é a necessidade de se conhecer a emissividade térmica da região analisada, que varia em função da temperatura. Em

função disso, a técnica de medição com condução é uma possibilidade também muito utilizada, conforme será descrito a seguir.

### 2.4.2. Condução

O método por condução consiste na transferência de energia através da interação entre as moléculas dos materiais (colisões) ou pelo intercâmbio de moléculas, de forma que as moléculas mais energéticas (temperatura mais alta) transferem energia para às menos energéticas (Borgnakke, Claus, 2013). Nele é necessário o contato direto com o material analisado, no ponto de estudo ou nas proximidades. Para usinagem, os métodos de condução utilizados são pelo efeito termoquímico e os de efeito termoelétricos (LONGBOTTOM; LANHAM, 2005).

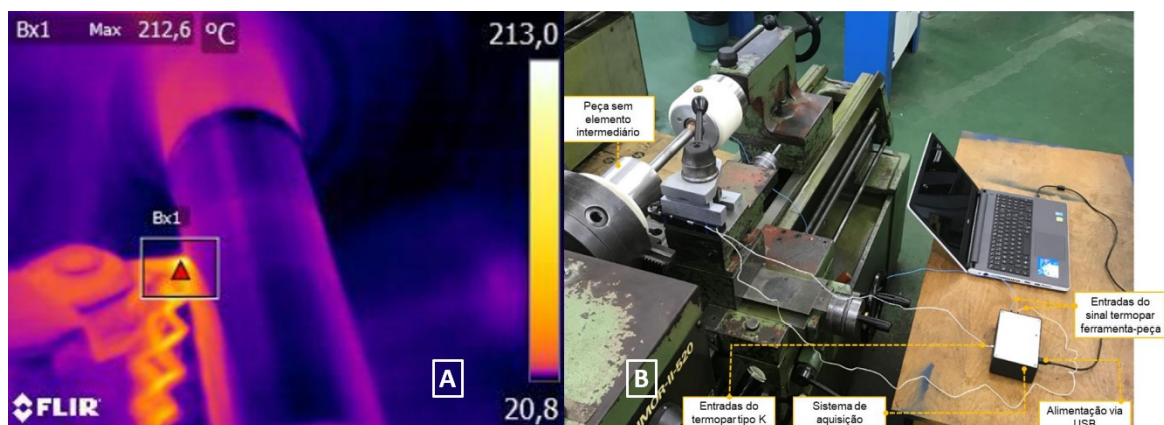


Figura 4: Exemplo de medição por radiação (A) e por condução (B) na usinagem. Fonte: (A) PAGOTTO (2022). (B) LIMA JÚNIOR (2020).

As principais vantagens do uso da medição por condução são a facilidade no uso e o custo baixo, não necessita de equipamentos complexos e caros, assim como ocorre na radiação que necessita das termo câmeras que são equipamentos caros. Porém, na usinagem, há um problema em se alcançar região de contato entre a aresta de corte e a peça. A pressão de corte é elevada, assim como a dinâmica de formação do cavaco é desfavorável. Isso impossibilita instalar o medidor de temperatura por condução na aresta de corte, pois inevitavelmente ele seria arrancado.

O efeito termoquímico consiste na alteração de propriedades, como a coloração ou até mesmo a microestrutura em decorrência da variação de temperatura. Neste caso é muito utilizada a técnica da tinta térmica. Ela é aplicada na região onde deseja saber a temperatura alcançada. Durante a usinagem a temperatura aumenta e a coloração da tinta altera por meio da transformação química sofrida de acordo com a temperatura em que o ponto alcançou, gerando isotérmicas para análise. Portanto, ao final do teste terão faixas de cores diferente no material, cada cor está relacionada a uma temperatura e assim conseguimos encontrar a distribuição do calor pelo material.

Já o efeito termoelétrico consiste na transformação da energia térmica em energia elétrica em forma de corrente e através dela encontrar a temperatura do material. Ele pode-se dividir de três formas: o efeito Thomsom e o Peltier, nesses o transporte de calor ocorre por meio de uma corrente, ou seja, a diferença de temperatura é gerada através da aplicação de um fluxo elétrico; já o efeito Seebeck é caracterizado pela conversão de energia térmica em energia elétrica, este efeito é a base para os termopares.

O efeito Thomsom pode ser descrito como a evolução ou absorção de calor ao passar uma corrente elétrica através de um circuito contendo um único material com uma diferença de temperatura ao longo do comprimento. O efeito Peltier ocorre mediante a criação de uma diferença de temperatura entre as junções pela aplicação de uma diferença de tensão entre os terminais. A principal diferença entre ambos é que no Peltier são necessários dois materiais condutores distintos, já por Thompsom utiliza-se apenas um (Morrison et al., 2020).

Por sua vez, efeito Seebeck ao se conectar dois metais diferentes, cria-se um circuito de forma que, se as junções forem mantidas em temperaturas diferentes, surgirá uma força eletromotriz termoelétrica e uma corrente elétrica "i" circulará pelo chamado "par termoelétrico" ou "termopar". Com o uso de um aparelho de medição no circuito é capaz valores de ddp medidos (PIRES, AFONSO E CHAVES, 2006). Através de uma calibração prévia, é possível correlacionar a temperatura com a ddp gerada. Portanto, a diferença de temperatura entre a junta quente e a junta fria entre dois materiais diferentes (termopares) gera uma diferença de potencial (ddp) que é lida por um multímetro, como mostra o esquema da figura 5:

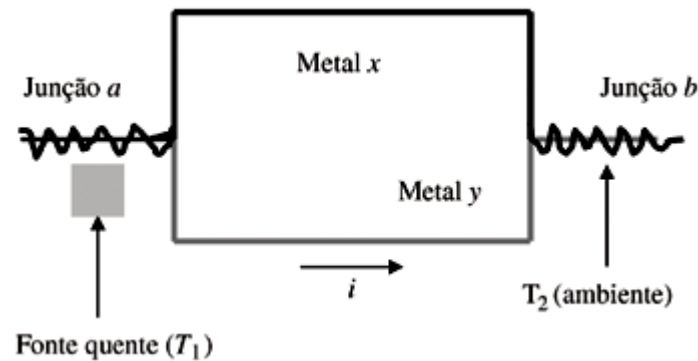


Figura 5: Esquema de funcionamento do par termoelétrico. (PIRES, AFONSO E CHAVES, 2006)

Termopares são fios de metal dissimilares que compartilham de uma mesma extremidade e que geram uma diferença de potencial de acordo com a variação de temperatura entre as duas extremidades. (PIRES, AFONSO E CHAVES, 2006).

Uma das vantagens dos termopares é a sua versatilidade e baixo custo. Por isso, são bastante utilizados em pesquisas de usinagem, podendo ser inseridos tanto no material da peça quanto nas ferramentas, a depender do que se deseja analisar. Por exemplo, Li et al. (2018) investigaram a influência da temperatura durante o fresamento de chapas finas de alumínio ao alternar parâmetros de corte. Os autores utilizaram termopares fixados no interior da peça ao longo da trajetória da ferramenta. O resultado do projeto indicou que a condição ótima de fresamento é com para baixa imersão radial da ferramenta, baixa profundidade de corte, alta velocidade de corte e um avanço por dente igual a, pelo menos, 0,127 mm.

Filho et al. estudaram a temperatura de usinagem do Inconel 718 no processo de torneamento com o uso do método de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) ou por jorro, aplicando em ambos uma quantidade de lubrificante sólido. O trabalho foi realizado como uso do método de medição termopar ferramenta-peça e apresentou que a adição de lubrificantes sólidos não influenciou de maneira significativa na temperatura da interface cavaco-ferramenta. (Osmar Custódio de Moura Filho et al., 2015).

Uma das desvantagens em relação à utilização dos termopares inseridos, está em não conseguir posicionar o termopar muito próximo à aresta de corte, pois a dinâmica do processo, especialmente a saída do cavaco, arranca o termopar da sua posição. Block et al. (1995) inseriu fios isolados na ferramenta e ao iniciar a usinagem

o fio era destruído entrando em contato com o material da peça. Ocorre que as temperaturas mais relevantes para o processo de usinagem são alcançadas na interface ferramenta-cavaco. Para Machado et al. (2011), essas altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta afetam diretamente a cunha cortante da ferramenta e é um dos motivos que restringem a taxa de remoção de material.

A fim de contornar esses problemas e buscar encontrar as temperaturas desenvolvidas na interface ferramenta-cavaco, especialmente na ponta da ferramenta, foi desenvolvido o método do termopar ferramenta-peça. Nele, o princípio dos termopares é utilizado, neste caso o material da ferramenta em contato com o material da peça forma a junção de medição do termopar. O método fornece uma boa repetitividade dos resultados e boa correlação com o desgaste da ferramenta (STEPHENSON., 1993), conforme será discutido na seção seguinte.

## 2.5. Método Termopar Ferramenta-Peça

ABUKHSHIM et al., explicaram que o sistema consiste em dois condutores térmicos de metais distintos e com um ponto em contato por ambos, formando a junta a ser estudada. Pelo efeito Seebeck, ao submeter a junta dos metais à uma temperatura diferente das suas extremidades, uma diferença de potencial é gerada e essa tensão depende apenas da diferença das temperaturas e a natureza físicas do par metálico. A figura 6 representa esse sistema.

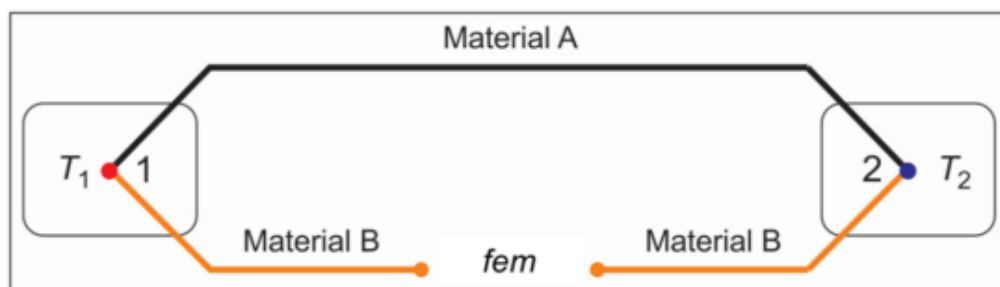


Figura 6: Circuito do termopar. Fonte: LIMA, JÚNIOR (2020)

Na usinagem a junção quente é formada na zona de corte ao estabelecer o contato entre a ferramenta e a peça. Para gerar o sinal elétrico é necessário que o circuito elétrico seja fechado. Um multímetro é utilizado junto a um sistema de aquisição de dados para registrar a diferença de potencial gerada. Para isso, é conectado um fio de cobre à ferramenta e a sua outra extremidade ao multímetro. Já o outro fio de cobre conectado no multímetro para fechar o par deve ser conectado à peça, fechando o circuito.

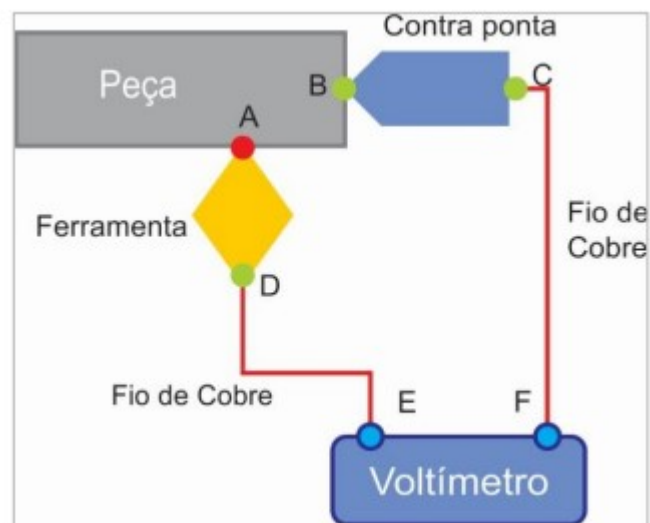


Figura 7: Esquema do termopar ferramenta peça. Fonte: LIMA, JÚNIOR (2020)

Acompanhando a figura 7, temos todo o sistema montado e com o ponto de contato A (junta quente), assim, é gerada uma diferença de potencial entre os pontos C e D devido à característica de cada material, afinal cada um responde com uma ddp diferente à cada temperatura. Com esse potencial gerado uma corrente elétrica é induzida no circuito seguindo o sentido horário ou anti-horário dependendo dos materiais utilizados tanto na ferramenta como na peça.

No caso do torneamento, existe a dificuldade em conectar o fio de cobre na peça, pois a mesma rotaciona. Para contornar esse problema, KAMINESE (2012) explica que a solução mais eficiente é a utilização de um “mancal de mercúrio” em contato com a peça em rotação. Neste modelo, o contra-pontas do torno é modificado

para conter um reservatório de mercúrio em seu interior permitindo então a passagem de corrente elétrica através deste metal. Então, o eixo do contra-pontas transmite corrente elétrica para o mercúrio e este transmite para uma haste metálica, submersa no metal, conectada aos fios de cobre do circuito, dessa forma, fecha o sistema. A figura 8 mostra o esquema de funcionamento do sistema termopar ferramenta-peça, apresentando também o contra-pontas adaptado.

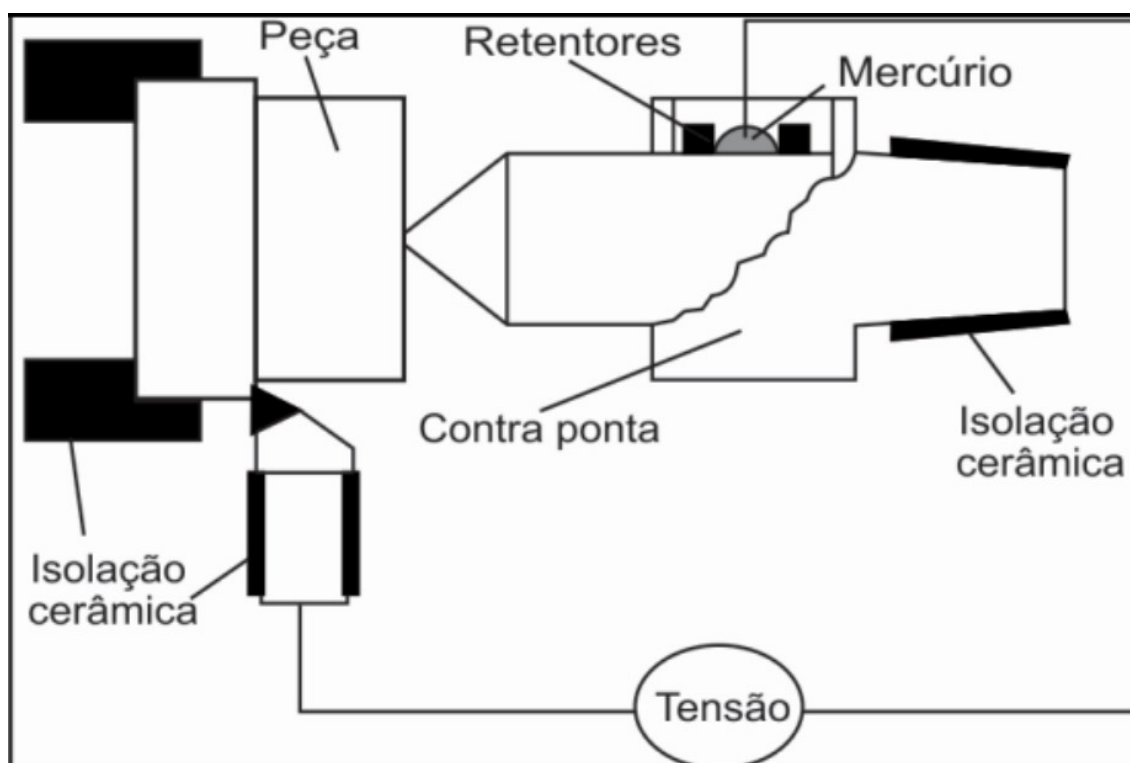


Figura 8: Esquema de funcionamento e isolamento do sistema termopar ferramenta-peça. (Adaptado Lima Júnior, 2020).

No método termopar ferramenta-peça todo o sistema deve ser isolado para que não ocorra interferências elétricas externas ao circuito fechado de análise. Logo, a peça, o porta ferramentas etc devem ser isolados eletricamente. Conforme apresentado na figura 8 acima, o isolamento é realizado por componentes cerâmicos por ser mais efetivo, neste projeto foi utilizado a combinação de lixas que possuem compostos cerâmicos em associação à fita isolante, de forma uniforme para manter o centro da barra estável.

Em um circuito fechado formado por dois materiais metálicos diferentes, com suas junções em duas temperaturas diferentes, uma força eletromotriz. Essa tensão  $\Delta E$  total do circuito é equivalente à soma das tensões geradas em cada junção termoelétrica e por se tratar de um circuito fechado, pode-se aplicar a lei de Kirchhoff, conforme equação 6:

$$\Delta E = E_1 + E_2 \quad (6)$$

As tensões geradas no circuito só dependem da temperatura e do coeficiente de Seebeck ( $\sigma$ ), dessa forma temos a equação 7:

$$\Delta E = \sigma_{AB} T_1 + \sigma_{BA} T_2 \quad (7)$$

$$\Delta E = \sigma_{AB} T_1 - \sigma_{AB} T_2 \quad (8)$$

$$\Delta E = \sigma_{AB} (T_1 - T_2) \quad (9)$$

Por fim, reorganizando a equação 9, isolando  $T_1$ , obtém-se a equação 10 para calcular a temperatura desejada na junção 1.

$$T_1 = T_2 + \frac{\Delta E}{\sigma_{AB}} \quad (10)$$

O valor de  $\Delta E$  é obtido através da calibração prévia do termopar, onde cada valor de tensão possui uma temperatura correspondente. As junções secundárias no decorrer do circuito elétrico podem influenciar na força eletromotriz, por isso, é importante tratá-las. Kaminise, Guimarães E Da Silva (2014) propuseram uma alternativa para minimizar a influência dessas junções. Os autores adicionaram um novo par de elementos ao sistema, composto pelos materiais da peça e da contraponta, conforme exposto na figura 9:



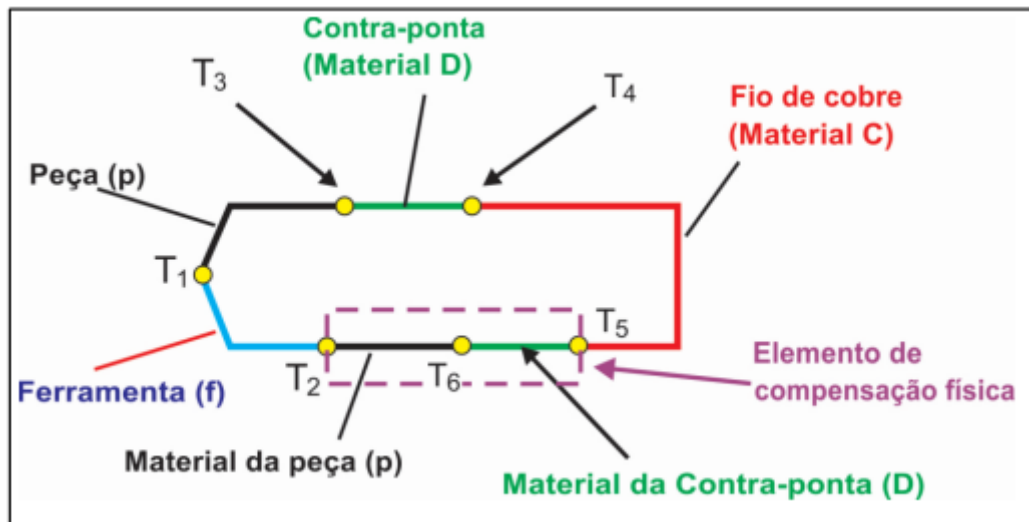


Figura 9: Circuito elétrico do termopar ferramenta-peça com o uso de compensação física. Fonte: FRANÇA (2022) adaptado de KAMINISE (2012).

Com a aplicação desses materiais é formado uma compensação física às tensões geradas nas junções secundárias. Dessa forma, para o cálculo das temperaturas durante a usinagem com o uso das compensações físicas, a equação 10 continua a mesma, que representa o circuito básico de um termopar:

$$T_1 = T_2 + \frac{\Delta E}{\sigma_{AB}} \quad (10)$$

Existem algumas limitações no método: a temperatura medida é uma média dos valores na interface de contato; o contato durante a usinagem não é estável; apenas quando tanto a ferramenta quanto a peça são condutores de eletricidade, o método é aplicável e, por fim, as junções secundárias podem influenciar no sinal gerado. De acordo com Lima Junior apesar dessas restrições, a sua aplicação é considerada confiável, simples e de custo relativamente baixo (Lima Junior, 2020).

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Toda essa pesquisa foi realizada no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia. Para garantir a análise, primeiramente foi feita a preparação dos materiais e máquina, durante a usinagem foi feita a aquisição dos dados de temperatura e, por fim, esses dados foram tratados, trazendo os resultados da pesquisa. A linha do tempo abaixo mostra a sequência lógica do trabalho:

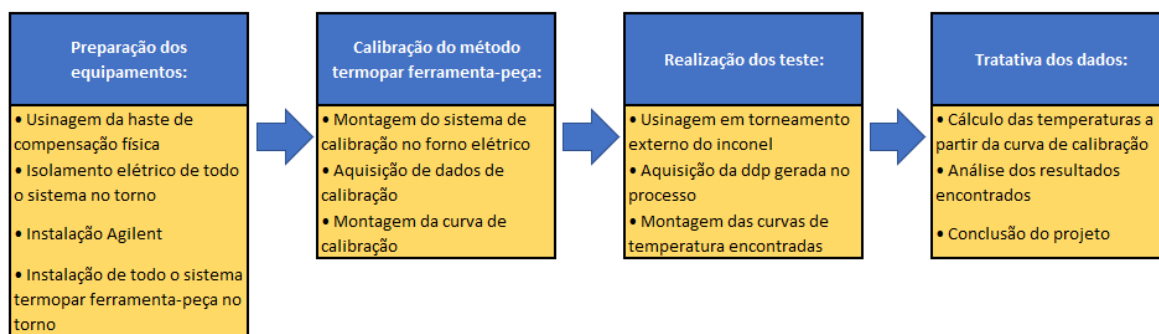


Figura 10: Linha do tempo do projeto. Fonte: Autor.

### 3.1. Preparação do Material

Foi utilizada uma barra cilíndrica de Inconel 718® VAT718 fornecida pela empresa Villares Mettals S.A. com 300 mm de comprimento e 140 mm de diâmetro. A liga foi submetida a tratamento térmico de precipitação e envelhecimento. A tabela 4 mostra a composição e algumas propriedades mecânicas do material.

Tabela 4: Composição e propriedades do Inconel 718

Composição		Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	C	Co		
Inconel 718		52.90	18.48	18.8	5.11	2.94	0.98	0.54	0.032	0.04		
Propriedades Mecânicas												
Liga Metálica	Resistência à Tração (Mpa)	Limite de Escoamento (0.2 %) (MPa)		Deformação em 50 mm (%)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Dureza (HRC)				
Inconel 718	1,240	1,036		12		211		40				
Propriedades Físico - Químicas												
	Densidade ( $g/cm^3$ )	Ponto de Fusão ( $^{\circ}C$ )		Calor Específico (J/kg.K)		Coeficiente Expansão Térmica médio		Condutividade térmica ( $W/m.K$ )		Resistência Elétrica ( $n\Omega m$ )		Temperatura de Curie ( $^{\circ}C$ )
Inconel 718	8.19	1,260 ~ 1,336		435		13.0		11.4		1,25		-112
Fonte: adaptado de ASM Internacional (1990)												

Ainda na preparação do material, retirou-se uma haste para ser utilizada no método do termopar ferramenta peça para compensação física. Para isso, primeiramente, foi realizado o corte através de eletroerosão (*Electrical Discharge Machining – EDM*) de uma chapa transversal da barra com 5 mm de espessura (figura 11 A) e após, em uma cortadora metalográfica, foi confeccionada a haste (figura 11 B) de contato com a ferramenta para fechar o circuito do sistema Termopar Ferramenta – Peça. Por fim, a peça foi isolada eletricamente em sua base para não ter contato com o torno, causando interferências na aquisição de dados.

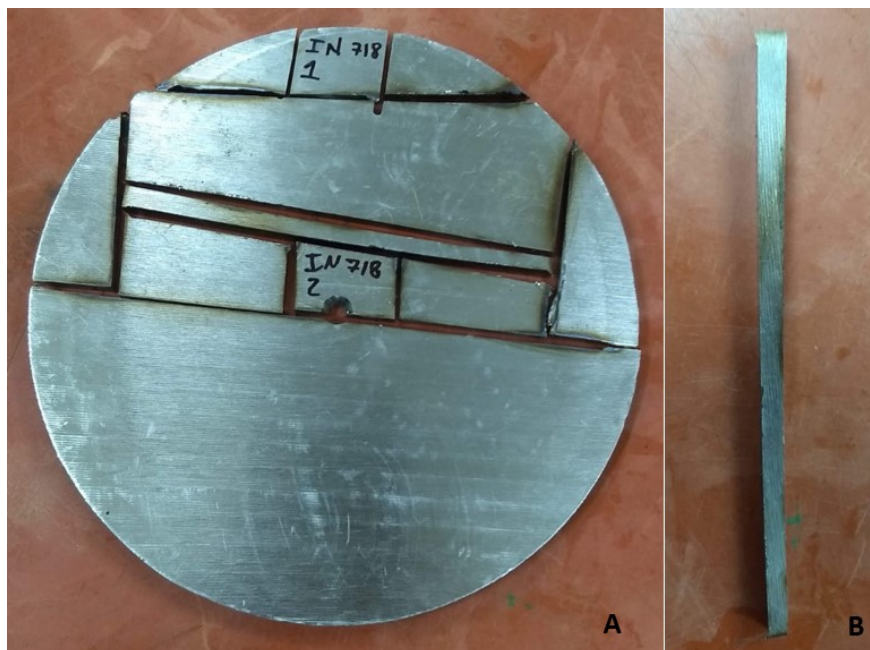


Figura 11: Corte transversal à barra de Inconel 718 e seus recortes (A). Haste de Inconel 718 utilizada no sistema termopar ferramenta-peça para compensação física (B).

### 3.2. Preparação da Máquina

A principal proposta do uso das ferramentas refrigeradas internamente é a eliminação do descarte de fluidos de corte ao meio ambiente, para isso, o sistema de refrigeração consiste em um ciclo fechado, por onde circula o fluido refrigerante dentro das ferramentas. O sistema completo consiste em um refrigerador da marca Prosdócimo de 146 W (circuito primário), que foi adaptado de forma que a sua serpentina interna fique imersa no reservatório do fluido (circuito secundário) para resfriá-lo e manter a temperatura em torno dos  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O fluido, agora em baixa temperatura, é bombeado por uma bomba centrífuga para os dutos que levam o líquido à ferramenta de corte, onde a energia de usinagem eleva novamente a temperatura, necessitando retornar ao reservatório, fechando o ciclo. A figura 12 esquematiza o funcionamento do refrigerador.

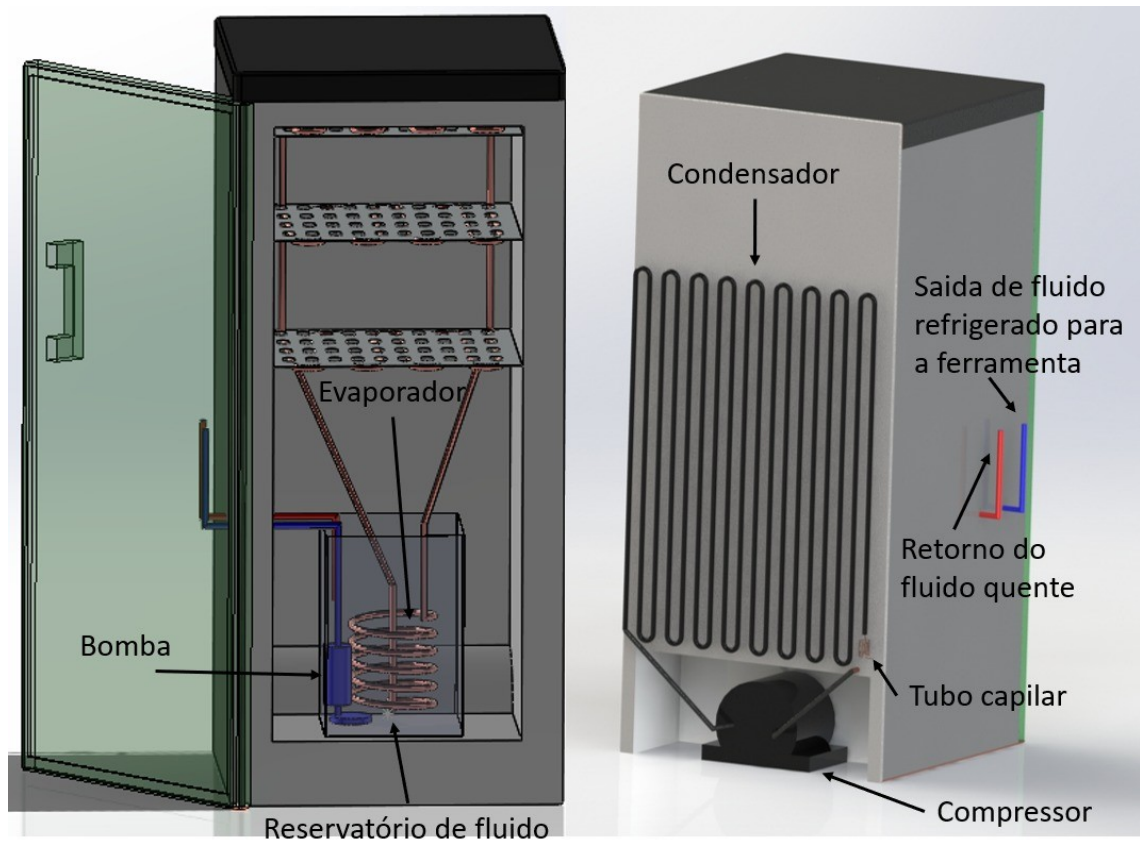


Figura 12: Esquema de funcionamento do refrigerador.

Para atender o novo sistema, as ferramentas de corte convencionais de metal duro da classe S, ISO SNMG12041 NRT WS10, foram modificadas para FRIs com dutos internos, confeccionados por *EDM*, onde circula o refrigerante. O porta-ferramenta DSSNR2525X12-P, marca Walter Tools, também foi adaptado com canais internos, pois é por ele que a ferramenta é alimentada com o fluido. A figura 13 representa as modificações e o trajeto do fluido.

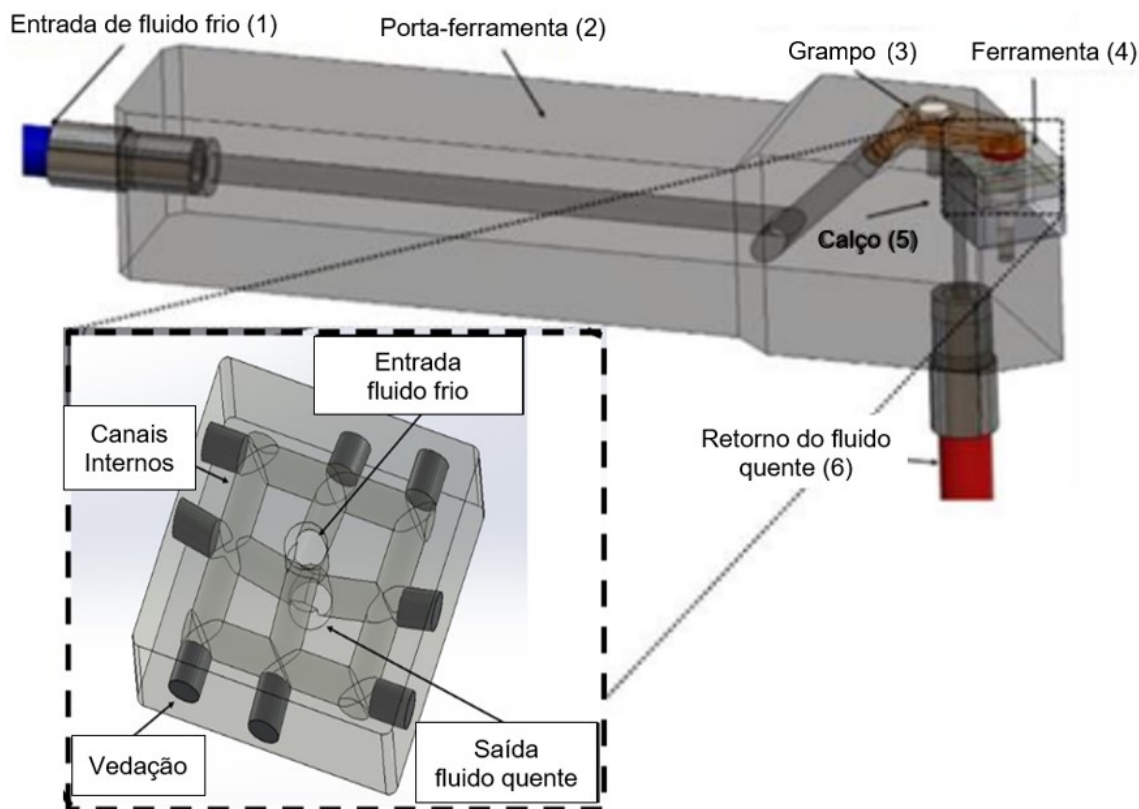


Figura 13: Esquema de funcionamento da adaptação na ferramenta e porta ferramenta.

Nesse esquema é possível compreender o caminho do fluido que entra pela Entrada de Fluido Frio (1), segue por dentro do Porta-Ferramenta (2), alimentando a ferramenta (4) pelo grampo (3), por fim, passa pelo Calço (5) e saindo pelo Retorno do Fluido Quente (6) para retornar ao reservatório no refrigerador, onde troca calor com a serpentina do refrigerador submersa no fluido e é bombeado novamente para os dutos até o porta-ferramenta, iniciando novamente o ciclo.

A ferramenta de corte ISO SNMG12041 NRT WS10 utilizada tanto da forma convencional, à seco, quanto modificada, FRI, é comercializada sem revestimento por padrão de fabricação. Contudo, neste trabalho optou-se por revestir parte dos inserts para estudar o comportamento do revestimento TINAL na usinagem do Inconel 718, além quando da utilização dos sistemas refrigerados internamente. As características das ferramentas estão descritas na tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Características das ferramentas.

<b>Ferramenta</b>	SNMG12041 NRT WS10	SNMG12041 NRT WS10
Ferramenta Refrigerada Internamente (FRI)	Não	Sim
Revestimento	TiNAl	TiNAl
Arestas de corte	8	8
Ângulo da ferramenta [°]	90	90
Diâmetro do círculo inscrito [mm]	12,7	12,7
Comprimento da aresta de corte [mm]	12,9	12,9
Diâmetro do furo de fixação [mm]	5,76	5,76
Largura da ferramenta [mm]	4,76	4,76
Raio da ponta [mm]	0,8	0,8

Neste trabalho foram utilizadas ferramentas de metal duro com ou sem o revestimento. As ferramentas com cobertura possuíam uma camada de TiNAl na superfície que era adicionada ao material do inserto pelo processo de decomposição física de vapor (PVD). De acordo com ÁVILA (2003) este revestimento confere um bom desempenho em operações de usinagem, é um nitreto à base de Ti e Al, a estequiometria destes compostos pode variar em uma ampla margem, permitindo diferentes produtos para diversas aplicações. É um revestimento bastante utilizado na usinagem das superligas de Níquel.

Tabela 6: Propriedades do revestimento da ferramenta (Fonte: Portifólio Balzers - BALINIT FUTURA NANO).

<b>BALINIT FUTURA NANO</b>	
Material de revestimento	TiAlN
Tecnologia de revestimento	Arc
Cor do revestimento	cinza-violeta
Dureza do revestimento H [Gpa]	33 +/-3
Coefficiente de atrito (a seco) em oposição ao aço	~0.6
Tensão intrínseca [Gpa]	~0.6
Temp. máx de operação [°C]	900
Temperatura do processo [°C]	500
Comentário geral: Todos os dados fornecidos são valores aproximados, que dependem da aplicação, ambiente e condições de testes.	

### 3.3. Máquina e Fluido

Todo o trabalho foi realizado com o sistema instalado e estudado em um torno IMOR MAX II, da fabricante ROMI S.A., que atendeu aos parâmetros exigidos, alcançando as velocidades de corte e avanços necessários.

O fluido utilizado no sistema de refrigeração interno da ferramenta era uma mistura entre água e uma solução à base de monoetilenoglicol, em uma concentração de 90 % água e 10 % monoetilenoglicol e foi mantido à temperatura de -5 °C no reservatório de 60 litros dentro do refrigerador adaptado para a pesquisa.

### 3.4. Preparação dos Equipamentos de Medição

Para a aquisição dos dados de temperatura, foi utilizado o equipamento Agilent 34901A, com 1  $\mu$ V de resolução e margem de erro de 0,3 °C, conectado a um



computador. O sistema utilizado para análise foi Termopar Ferramenta-Peça, com isso, 2 portas para termopar foram utilizadas no equipamento.

Uma entrada se refere ao termopar formado pelo contato da usinagem, para isso, uma haste de Inconel 718 é fixada na lateral da ferramenta e em sua outra ponta o fio de cobre vai ao Agilent, esse circuito é fechado com o fio de cobre conectado no contra-ponta adaptado do torno, que consiste em conter um pequeno reservatório de TEFLON para armazenar mercúrio que fica em contato tanto com o eixo do contra-ponta de aço SAE 1050, como com uma haste do mesmo material, o que não gera interferência à captura de tensões. A outra conexão utilizada é realizada por um termopar tipo K que é conectado no ponto de fixação da haste na ferramenta, medindo a temperatura  $T_2$ , de forma a garantir a 11:

$$\text{Temperatura (x)} = 30,809x + 211,7 \quad (11)$$

Para utilizar os dados de tensão fornecidos pelo Agilent na fórmula de temperatura do sistema Termopar Ferramenta-Peça é necessário encontrar a curva de calibração. Para simular as temperaturas de usinagem e calibrar o sistema, foi utilizado um forno elétrico que aquece uma barra de metal duro e revertida com TINAL, igual à ferramenta usada nos ensaios.

O sistema de calibração foi montado totalmente isolado eletricamente e construído da seguinte forma. Uma ponta da barra de metal duro revestido foi fixada à uma barra de Inconel 718 por pressão, formando a junção de referência ( $T_2$ ), na outra ponta foi fixado um cavaco do mesmo material da peça, formando a junta quente do sistema. Tanto na junta quente, como na de referência, foram conectados termopares tipo K para medir a temperatura nas conexões. Para fechar o circuito, simulando corretamente o sistema Ferramenta-Peça, foram conectados fios de cobre tanto no cavaco como na pequena barra de Inconel 718 e suas extremidades foram diretamente ao Agilent. Conforme apresentado na figura 14 abaixo:

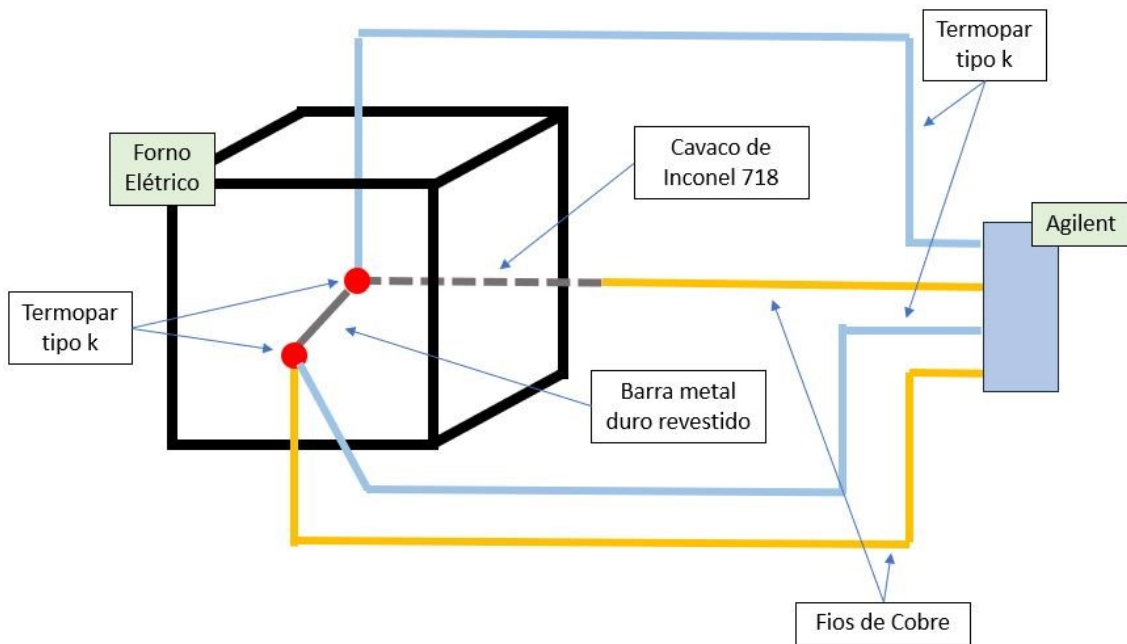


Figura 14: Esquema de funcionamento do sistema de calibração.

### 3.5. Planejamento estatístico e Procedimento Experimental

Foi utilizado um planejamento experimental fatorial completo ( $2^5$ ) para avaliar a temperatura na interface ferramenta-cavaco, sendo esta a variável resposta. Para isso, foram realizados testes com três variáveis quantitativas, sendo elas a velocidade de corte ( $V_c$ ), o avanço de corte ( $f$ ) e a profundidade de corte ( $A_p$ ); e duas qualitativas, a ferramenta (revestida ou não) e o ambiente (processo de usinagem foi a seco ou com FRI). A tabela 7 mostra o planejamento experimental utilizado, enquanto a tabela 8 mostra os níveis das variáveis estudadas.

Tabela 7: Planejamento experimental

Teste	Ambiente	Revestimento	Profundidade de Corte (Ap) [mm]	Avanço de Corte (f) [mm/rot]	Velocidade de Corte (Vc) [m/min]
1	Seco	Sem	0,2	0,103	33
2	Seco	Sem	0,2	0,103	67
3	Seco	Sem	0,2	0,297	33
4	Seco	Sem	0,2	0,297	67
5	Seco	TINAL	0,2	0,103	33
6	Seco	TINAL	0,2	0,103	67
7	Seco	TINAL	0,2	0,297	33
8	Seco	TINAL	0,2	0,297	67
9	FRI	Sem	0,2	0,103	33
10	FRI	Sem	0,2	0,103	67
11	FRI	Sem	0,2	0,297	33
12	FRI	Sem	0,2	0,297	67
13	FRI	TINAL	0,2	0,103	33
14	FRI	TINAL	0,2	0,103	67
15	FRI	TINAL	0,2	0,297	33
16	FRI	TINAL	0,2	0,297	67
17	Seco	Sem	0,4	0,103	33
18	Seco	Sem	0,4	0,103	67
19	Seco	Sem	0,4	0,297	33
20	Seco	Sem	0,4	0,297	67
21	Seco	TINAL	0,4	0,103	33
22	Seco	TINAL	0,4	0,103	67
23	Seco	TINAL	0,4	0,297	33
24	Seco	TINAL	0,4	0,297	67
25	FRI	Sem	0,4	0,103	33
26	FRI	Sem	0,4	0,103	67
27	FRI	Sem	0,4	0,297	33
28	FRI	Sem	0,4	0,297	67
29	FRI	TINAL	0,4	0,103	33
30	FRI	TINAL	0,4	0,103	67
31	FRI	TINAL	0,4	0,297	33
32	FRI	TINAL	0,4	0,297	67
Fonte: Autor					

Tabela 8: Valores dos parâmetros de usinagem utilizados.

Variáveis	Níveis	
	(-)	(+)
Velocidade de corte (Vc) [m/min]	33	67
Avanço de corte (f) [mm/rev]	0,103	0,206
Profundidade de Corte (Ap) [mm]	0,2	0,4
Ferramenta (revestimento)	Sem Revestimento	TINAL
Ambiente	FRI	Seco
Fonte: Autor		

Os dados de temperatura de usinagem foram capturados a cada meio segundo pelo equipamento Agilent, ou seja, 2 Hz de frequência, e cada um dos ensaios teve duração de 40 segundos de usinagem.

A condição de vida útil da ferramenta, desgaste de flanco não superior a  $VB = 0,1$  mm foi adotada para que o desgaste não interfira nos resultados a medição foi aferida a cada passe conforme instrui a norma (Tool-Life Testing with a Single-Point Turning Tools, 1993)

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1. Curva de Calibração

Para alcançar os objetivos desse trabalho e conseguir analisar as diferenças de potenciais criadas pelo sistema termopar ferramenta-peça, foi utilizada a seguinte curva de calibração indicada abaixo e na figura 15:

$$\text{Temperatura (x)} = 30,809x + 211,7 \quad (11)$$

Onde: x é a diferença de potencial em milivolts [mV]

A faixa de temperatura estudada para a calibração do sistema no forno elétrico foi de 100 °C até 1000 °C, capturando o valor da diferença de potencial medido pelo Agilent a cada 50 °C de incremento da temperatura.

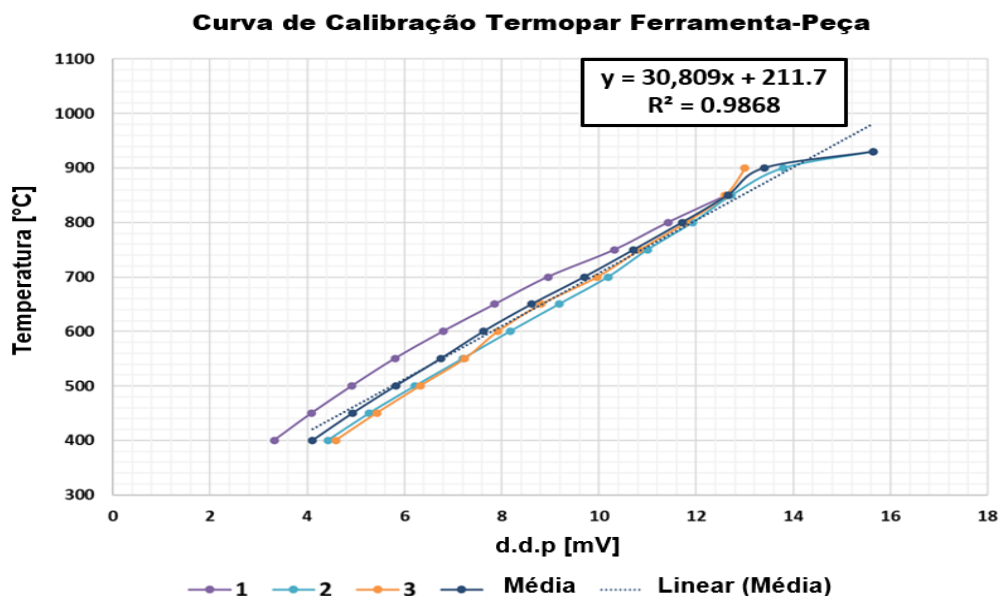


Figura 15: Curva de calibração do sistema Termopar Ferramenta-Peça

## 4.2. Análise da Temperatura

Todos os ensaios de usinagem foram realizados no início de vida útil da ferramenta ( $V_B = 0,1$  mm). A tabela 9 abaixo apresenta todas as condições estudadas e os resultados de temperatura calculados pelo termopar ferramenta-peça:

Tabela 9: Resultados das temperaturas medidas de todos os ensaios

Teste	Ambiente	Revestimento	Profundidade de Corte ( $A_p$ ) [mm]	Avanço de Corte (f) [mm/rot]	Velocidade de Corte ( $V_c$ ) [m/min]	Temperatura [°C]	Desvio Padrão
1	Seco	Sem	0,2	0,103	33	714	6,19
2	Seco	Sem	0,2	0,103	67	922	6,37
3	Seco	Sem	0,2	0,297	33	817	3,23
4	Seco	Sem	0,2	0,297	67	1033	8,26
5	Seco	TINAL	0,2	0,103	33	703	5,84
6	Seco	TINAL	0,2	0,103	67	863	5,83
7	Seco	TINAL	0,2	0,297	33	747	5,97
8	Seco	TINAL	0,2	0,297	67	960	5,88
9	FRI	Sem	0,2	0,103	33	650	8,93
10	FRI	Sem	0,2	0,103	67	822	8,89
11	FRI	Sem	0,2	0,297	33	763	3,75
12	FRI	Sem	0,2	0,297	67	887	10,39
13	FRI	TINAL	0,2	0,103	33	624	5,67
14	FRI	TINAL	0,2	0,103	67	825	18,21
15	FRI	TINAL	0,2	0,297	33	725	14,27
16	FRI	TINAL	0,2	0,297	67	906	7,47
17	Seco	Sem	0,4	0,103	33	774	10,68
18	Seco	Sem	0,4	0,103	67	947	9,32
19	Seco	Sem	0,4	0,297	33	836	5,37
20	Seco	Sem	0,4	0,297	67	1080	6,63
21	Seco	TINAL	0,4	0,103	33	735	5,09

22	Seco	TINAL	0,4	0,103	67	919	4,39
23	Seco	TINAL	0,4	0,297	33	814	4,32
24	Seco	TINAL	0,4	0,297	67	978	5,86
25	FRI	Sem	0,4	0,103	33	743	9,22
26	FRI	Sem	0,4	0,103	67	847	16,49
27	FRI	Sem	0,4	0,297	33	766	8,02
28	FRI	Sem	0,4	0,297	67	956	8,42
29	FRI	TINAL	0,4	0,103	33	678	16,23
30	FRI	TINAL	0,4	0,103	67	897	11,89
31	FRI	TINAL	0,4	0,297	33	757	6,89
32	FRI	TINAL	0,4	0,297	67	926	10,47

Fonte: Autor

A figura 16 abaixo traz os resultados obtidos na pesquisa em ordem crescente de temperatura e separados pelo ambiente e revestimento da ferramenta:

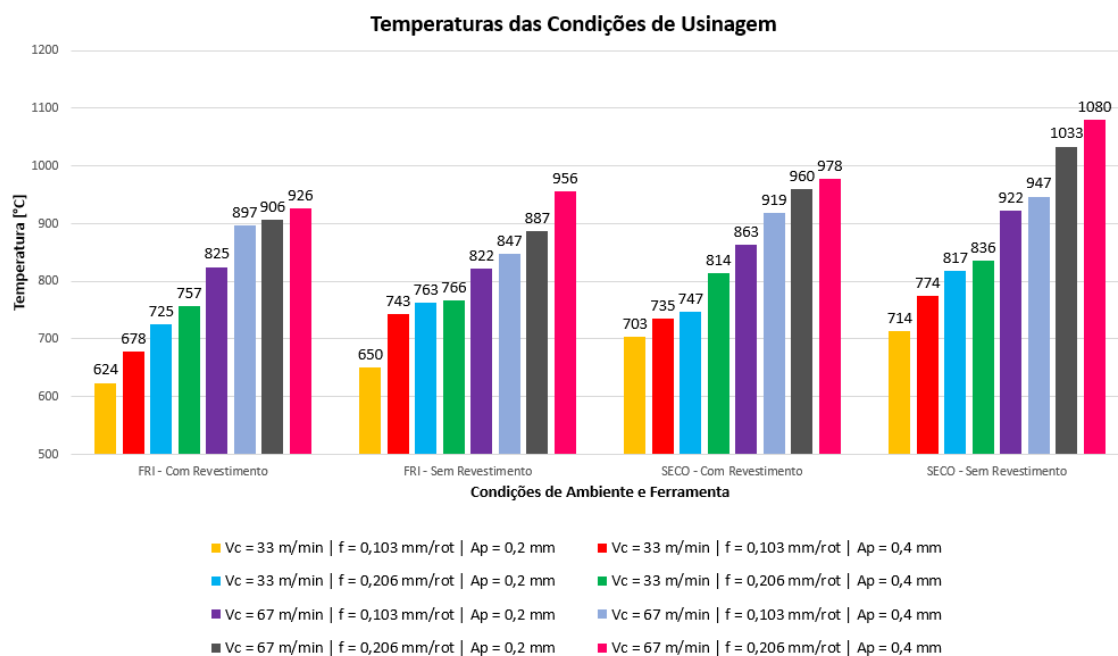


Figura 16: Resultados da temperatura pelo termopar ferramenta-peça

A tabela 10 abaixo contém a comparação das temperaturas encontradas na usinagem com ferramentas convencionais e as ferramentas refrigeradas internamente.

Tabela 10: Comparação das Temperaturas na Usinagem com Ferramentas Convencionais e as Modificadas.

<b>Comparação FRI e Convencionais</b>				
Teste	Temperatura [°C]		Diferença	
	Com FRI	Sem FRI	[°C]	[%]
Testes 13 e 05	624	703	79	12,70 %
Testes 29 e 21	678	735	57	8,30 %
Testes 15 e 07	725	747	21	3,00 %
Testes 31 e 23	757	814	57	7,50 %
Testes 14 e 06	825	863	38	4,60 %
Testes 30 e 22	897	919	22	2,50 %
Testes 16 e 08	906	960	54	5,90 %
Testes 32 e 24	926	978	52	5,60 %
Testes 09 e 01	650	714	64	9,80 %
Testes 25 e 17	743	774	31	4,20 %
Testes 11 e 03	763	817	54	7,10 %
Testes 27 e 19	766	836	70	9,20 %
Testes 10 e 02	822	922	100	12,20 %
Testes 26 e 18	847	947	100	11,80 %
Testes 12 e 04	887	1033	146	16,50 %
Testes 28 e 20	956	1080	124	13,00 %
Média	798	865	67	8,40 %
Fonte: Autor				

A tabela 11 contém a ANOVA para o sistema utilizado, e a figura 17 apresenta um gráfico de Pareto com as variáveis significativas, comparando as ferramentas refrigeradas internamente com as ferramentas convencionais.



Tabela 11: Tabela ANOVA para o sistema comparando FRI e convencionais.

Temperatura - FRI x Seco					
	SS	df	MS	F	p-valor
<b>Velocidade de Corte (Vc)</b>	266462,5	1	266462,5	462,5693	0,000000
<b>Avanço (f)</b>	51934,2	1	51934,2	90,1558	0,000000
<b>Profundidade de Corte (Ap)</b>	14959,7	1	14959,7	25,9695	0,000026
<b>Atmosfera</b>	35681,0	1	35681,0	61,9408	0,000000
<b>Ferramenta</b>	7849,7	1	7849,7	13,6268	0,001040
<b>Error</b>	14977,3	26	576,0		
<b>Total SS</b>	391864,3	31			

Fonte: Autor

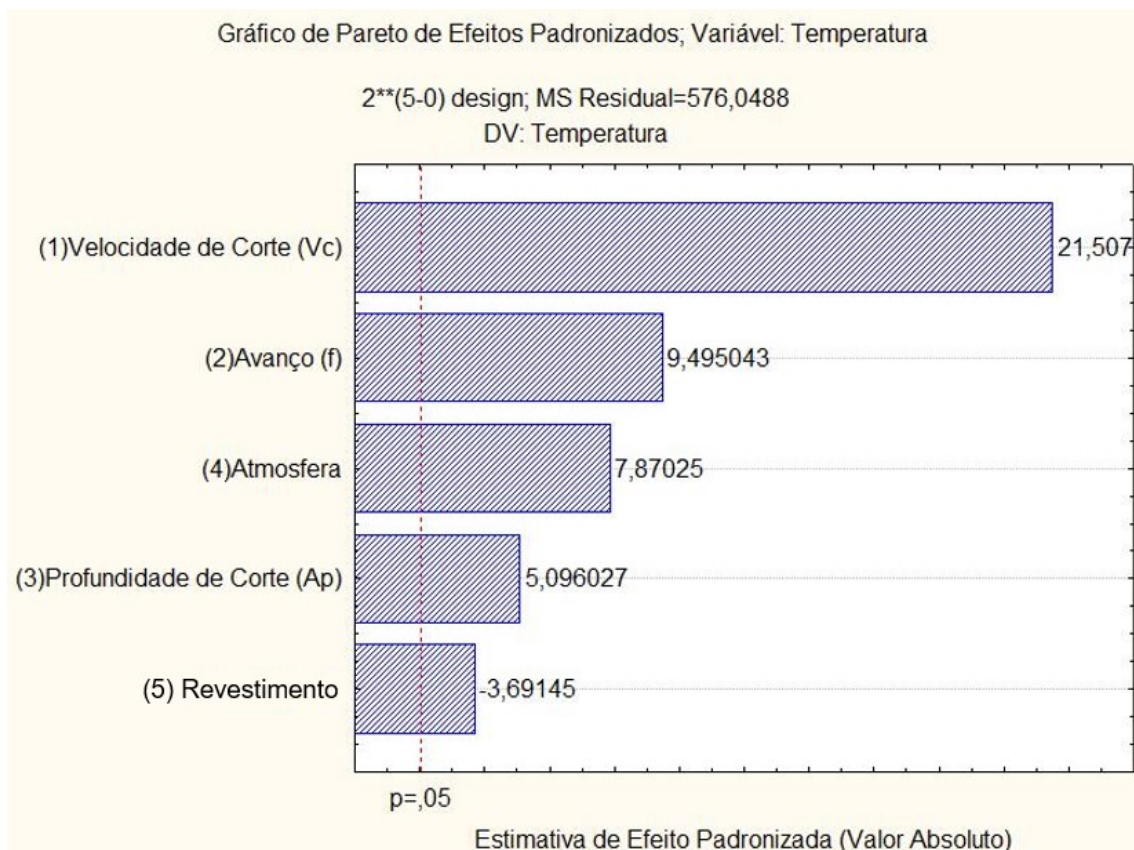


Figura 17: Gráfico de Pareto para temperatura medida no sistema termopar-ferramenta peça.

Os resultados foram os esperados e estão de acordo com o que temos de relato na literatura, isto é, verificou-se que com o aumento dos parâmetros de corte, ou seja, maior energia mecânica utilizada para o corte, os valores de temperatura na interface ferramenta-cavaco aumentaram (Klocke, 2011; Machado et al., 2015; Trent & Wright, 2000). Isso se comprova pelo teste número 20 (sem revestimento,  $V_c = 67$  m/min,  $f = 0,297$  mm/rot,  $A_p = 0,4$  mm e atmosfera seca) que obteve a maior temperatura,  $1080$  °C, com os maiores parâmetros de corte. Por sua vez, o teste de número 13 (com revestimento TINAL,  $V_c = 0,33$  m/min,  $f = 0,103$  mm/rot,  $A_p = 0,2$  mm e com ferramentas refrigeradas internamente) obteve a menor temperatura,  $624$  °C, na zona de corte com os menores parâmetros de corte.

A partir dos resultados extremos de maior e menor temperatura já podemos observar que o uso de FRI foi benéfico, a tabela 10 reafirma esse benefício ao comparar as temperaturas encontradas a seco e com FRI, indicando maiores temperaturas na usinagem convencional a seco. A máxima diferença de temperatura entre as atmosferas foi para os testes 04 e 12. Esse valor ficou em  $146$  °C, aumento de  $16,5$  %. A menor diferença de temperatura foi  $22$  °C para os testes 22 e 30, que representou um aumento de  $2,5$  %. A diferença média de temperatura, considerando todos os ensaios foi de  $67$  °C, o que representa que a temperatura da usinagem a seco é  $8,4$  % maior que a utilizando ferramentas refrigeradas.

Esses resultados demonstraram a eficácia das FRIs em relação a usinagem a seco. Tal fato era evidentemente esperado uma vez que na usinagem a seco não há nenhum método auxiliar de refrigeração. Mesmo sabendo-se que o padrão de usinagem do Inconel 718 é com a utilização dos FCA (De Bartolomeis et al., 2021; Mahesh et al., 2021; Roy et al., 2018), neste trabalho optou-se por se comparar a seco dado seu apelo ecológico e das FRIs. A variável atmosfera foi a terceira mais significativa, conforme mostra do diagrama de pareto da Figura 17. Passando-se do nível FRI (-) para a seco (+) percebe-se que há um aumento da temperatura.

Foi possível notar pelos experimentos que fixando os parâmetros de corte e variando apenas a atmosfera, sendo FRI ou seca, em todos os ensaios as ferramentas refrigeradas internamente resultaram em menores temperaturas na ferramenta. O que é justificado pelo fluxo contínuo do fluido refrigerado por dentro da ferramenta, o que mantém a troca de calor gerado pelo cisalhamento com o fluido sempre nas mesmas

condições, ou seja, o líquido sempre chega à ferramenta na mesma temperatura baixa.

Resultados semelhantes foram encontrados por França et al. (2022). Os autores utilizaram testes de usinagem com FRI e ferramentas convencionais (a seco) no torneamento de ferro fundido cinzento, com o objetivo de medir a temperatura através do mesmo método termopar ferramenta-peça. Os autores encontraram uma redução de até 21,52 % na temperatura no contato da ferramenta com a peça. Barbosa (2021) fez torneamento de aço D6 endurecido utilizado para isso ferramentas de PCBN (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*) comparando as atmosferas a seco com as FRIs. Apesar de ter estudado a variação de temperatura por método de termocamera, mesmo assim o autor encontrou uma redução substancial na temperatura de usinagem quando utilizado as FRIs, principalmente na ferramenta.

Analisando o gráfico de Pareto, comprova-se que com o aumento dos parâmetros de usinagem, a temperatura também aumenta. No torneamento do Inconel 718 a velocidade de corte e o avanço são os parâmetros que mais influenciam no resultado. Isso ocorre devido ao aumento da energia mecânica gerada ao cisalhar um volume maior de material, pois aumentando o avanço aumenta-se a área de contato com a ferramenta e aumentando a velocidade de corte mais material é removido da peça no mesmo intervalo de tempo, o que requer mais energia gasta, gerando mais calor também.

LIMA JÚNIOR (2020) mostrou em seu estudo de usinagem do aço-ferramenta AISI D6, que compara a usinagem criogênica com a convencional, que o aumento da temperatura de corte é diretamente influenciado pelo aumento da velocidade de corte, apresenta também que o uso da refrigeração criogênica influencia menos na temperatura de usinagem que o impacto causado pelo aumento de velocidade de corte. Marques (2015) utilizou o mesmo método do termopar ferramenta peça também para tornar o Inconel 718. O autor utilizou diversas diferentes atmosferas de lubrificrefrigeração e variando a velocidade de corte de 20 m/min até 70 m/min, viu que a temperatura variou de ~ 550 até 900 °C. Ainda, segundo o autor, Itakura et al., (1999) também utilizando o método do termopar ferramenta peça no torneamento do Inconel 718, encontrou para uma velocidade de 30 m/min 717 °C, e para 100 m/min uma temperatura de 1.046 °C.

Quanto ao revestimento vemos uma influência mais baixa, porém inversamente proporcional, ou seja, ao usar sem revestimento (nível -1) atingimos uma temperatura superior ao caso de quando usamos com ferramentas revestidas com TINAL (nível +1).

Tabela 12: Comparação das Temperaturas na Usinagem com Ferramentas Revestidas e Sem Revestimento.

Comparação Com e Sem Revestimento				
Teste	Temperatura [°C]		Diferença	
	Com revest.	Sem revest.	[°C]	[%]
Testes 13 e 09	624	650	26	4,20 %
Testes 29 e 25	678	743	65	9,50 %
Testes 15 e 11	725	763	38	5,30 %
Testes 31 e 27	757	766	9	1,20 %
Testes 14 e 10	825	822	-3	-0,40 %
Testes 30 e 26	897	847	-50	-5,50 %
Testes 16 e 12	906	887	-19	-2,10 %
Testes 32 e 28	926	956	30	3,20 %
Testes 05 e 01	703	714	11	1,50 %
Testes 21 e 17	735	774	39	5,30 %
Testes 07 e 03	747	817	71	9,50 %
Testes 23 e 19	814	836	23	2,80 %
Testes 06 e 02	863	922	59	6,80 %
Testes 22 e 18	919	947	28	3,10 %
Testes 08 e 04	960	1033	74	7,70 %
Testes 24 e 20	978	1080	102	10,40 %
Média	816	847	31	3,80 %
Fonte: Autor				

Isso é justificado pelo fato da condutividade térmica do TINAL ser maior que a do carboneto de tungstênio, pois a presença do Alumínio na composição melhora essa propriedade. Afinal a condutividade térmica do Alumínio é de  $237 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  e a do Tugstênio de  $178 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Isso explica o calor dispersar mais fácil com o Tinal pela ferramenta, pelo meio ambiente e pelo próprio fluido refrigerante, reduzindo a temperatura no ponto crítico que é a ponta da ferramenta em contato com a peça.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de uma nova técnica de refrigeração em usinagem, as Ferramentas Refrigeradas Internamente. Para isso mediu-se a temperatura na interface ferramenta-cavaco através do método de medição termopar ferramenta-peça durante o torneamento cilíndrico externo de uma superliga a base de Níquel - Inconel 718. O planejamento fatorial experimental foi um completo (2<sup>5</sup>), sendo um total de 32 testes diferentes. Como variável de resposta foi avaliada a temperatura. As variáveis de entrada foram: velocidade de corte ( $V_c = 33$  m/min e 67 m/min), avanço de corte ( $f = 0,103$  mm/rot e 0,297 mm/rot), profundidade de corte ( $A_p = 0,2$  mm e 0,4 mm), atmosfera (FRI ou seco com ferramentas convencionais) e o revestimento (TINAL ou sem revestimento). Os principais resultados encontrados foram:

- A temperatura máxima encontrada foi de  $1.080 \pm 7$  °C com as seguintes condições: sem revestimento,  $V_c = 67$  m/min,  $f = 0,297$  mm/rot,  $A_p = 0,4$  mm e atmosfera seca. Já a menor temperatura foi de  $624 \pm 6$  °C nas condições: TINAL,  $V_c = 0,33$  m/min,  $f = 0,103$  mm/rot,  $A_p = 0,2$  mm e com ferramentas refrigeradas internamente. Isso ocorreu como esperado, já que a temperatura mais alta ocorreu no ensaio de usinagem mais agressivo, ou seja, com os maiores parâmetros de corte e sem refrigeração. Já a menor temperatura ocorreu nos menores parâmetros de usinagem e com o uso da ferramenta refrigerada, o que mostra uma melhora em relação às convencionais.

- Velocidade de corte, avanço e condição da atmosfera (refrigerada ou não) foram as variáveis mais significativas (nessa ordem), todas elas influenciaram diretamente no aumento da temperatura, ou seja, com o aumento daquelas, esta

aumentou. Destaca-se a velocidade de corte, que foi a variável mais significativa de todas, conforme esperado.

- Ainda é possível notar a influência, apesar de pequena, que o revestimento teve nos experimentos. Devido o TINAL ser um composto com excelente condutividade térmica, ou seja, bom dissipador de calor, o seu uso colaborou para a redução da temperatura da interface ferramenta-cavaco. Essa redução de temperatura chegou até 10,4 %, depende das condições de usinagem.

- O uso das ferramentas refrigeradas internamente se apresentou como favorável se comparada à usinagem a seco. As FRIs apresentaram uma redução em média de 8 % na temperatura da zona de corte em relação à usinagem a seco, em determinadas condições essa redução de temperatura chegou à 11 %. Como na usinagem com os seguintes parâmetros:  $V_c = 67$  m/min,  $f = 0,297$  mm/rot,  $A_p = 0,2$  e sem revestimento, por exemplo.

Conclui-se que as FRIs comportam como o esperado, reduzem a temperatura em sua superfície e mantém a da peça a ser usinada mais elevada. Portanto, o uso dessa nova técnica de usinagem é benéfico e promissor para o meio da manufatura, além disso, reduz o uso de fluidos de cortes que são, em sua grande maioria, nocivos ao meio ambiente e à saúde. Conclui-se também que o uso do revestimento TiNAl dissipa mais calor da ferramenta, contribuindo ainda mais para o resultado esperado neste projeto.

Para colaborar com essa pesquisa é necessário realizar trabalhos futuros comparando outros métodos de usinagem e outras formas de refrigeração do processo. Dessa forma, é fundamental realizar trabalhos de pesquisa no processo de torneamento, furação e fresamento, com o uso de fluidos de corte abundante, com o processo de criogenia, pelo método de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) e a seco também.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUKHSHIM, N. A.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, n. 7– 8, p. 782–800, 2006.

ASM International, *ASM Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 1990.

ÁVILA, R.F., (2003), “Desempenho de Ferramentas de Metal Duro Revestidas com TiN, TiCN e TiAlN (PAPVD) no Torneamento do Aço BNT 4340 Temperado e Revenido”. Tese de doutorado, UFMG, Programa de PG em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte – MG, 29.04.2003.

BALINIT FUTURA NANO, Alto desempenho para conformação de metais e componentes de precisão. Disponível em: <[https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/portfolio/solucoes-de-superficie-balzers/revestimentos-a-base-de-pvd-e-pacvd/balinit/a-base-de-tialn/balinit-futura-nano/?tab=especificacoes\\_4](https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/portfolio/solucoes-de-superficie-balzers/revestimentos-a-base-de-pvd-e-pacvd/balinit/a-base-de-tialn/balinit-futura-nano/?tab=especificacoes_4)>. Acesso em: 20/05/2023

BAZON, V.T. Estudo da Aplicabilidade de Ferramentas Refrigeradas Internamente na Usinagem do Ferro Fundido Cinzento. 2020. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BLACK, S. C. E. et al. Temperature measurement in grinding. *Proceedings of the Thirty-First International Matador Conference*. Anais...Manchester: 1995.

BORBA JUNIOR, Marcelo. Simulação de distribuição de temperaturas na furação do ferro fundido cinzento utilizando o software Advantedge. 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

BREHM, John J.; MULLIN, William J. *Introduction to the structure of matter: A course in modern physics*. New York: Editora J. Wiley, 1989.

BYERS, Jerry P. *Metalworking fluids*. [S. l.]: crc Press, 2016. E-book

DA SILVA, D. A. Análise da Integridade Superficial do Inconel 718 Torneado Sob Condições Criogênicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2019.

DE SOUSA, José Aécio G.; SALES, Wisley Falco; MACHADO, Alisson R. A review on the machining of cast irons. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S. l.], v. 94, n. 9–12, p. 4073–4092, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1140-1>

Denise Prazeres Lopes Pires, Júlio Carlos Afonso, Francisco Artur Braun Chaves. A termometria nos séculos XIX e XX. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 28, issue 1 (2006), pp: 101-114. Published by Sociedade Brasileira de Física

DIN 6584. Terms of the cutting technique; forces, energy, work, power STANDARD by Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard), 10/01/1982

DONTAMSETTI, S. K.; FISCHER, G. W. Factors affecting surface roughness in finish turning of gray cast iron. *MATERIAL AND MANUFACTURING PROCESS*, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 689–725, 1988.

DOS SANTOS TORRES, Camila; SCHAEFFER, Lírio. 7. Sinterização do compósito metal duro WC-Co. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, [S. l.], v. 4, n. 3, 2009.

dos Santos, A. G., da Cunha, D. F., da Silva, M. B., Jackson, M. J., & Ziberov, M. (2021). Avaliação da influência do fluido de corte na formação de rebarbaS no microfresamento DE INCONEL 718 e aço Inoxidável duplex UNS S32205 / Evaluation of the cutting fluid influence in the burr formation when micro milling INCONEL 718 and UNS S32205 duplex stainless steel. *Brazilian Journal of Development*, 7(6), 56931–56944. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-209>

EZUGWU et al., EZUGWU, E. O., BONNEY, J., and YAMANE, Y., 2003, “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 134(2) , pp. 233–253.

FERNANDES, G. H. N.; MARTINS, P. S. ; MAIA, L. H. A. ; GOMES, M. S. ; PEDRO RODRIGUES LOPES ; SILVA, A. A. ; SANTOS, I. B. ; SIQUEIRA, B. S. A STUDY ABOUT THE EFFECTS OF EMULSIFIABLE OIL CONCENTRATION OVER THE ROUGHNESS ALUMINUM - AL-SI (10 ~ 12 %) PARTS. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017, Curitiba., [S. l.], 2017.

FERRARESI, Dino. Fundamentos da usinagem dos metais. [S. l.]: Editora blucher, 2018. E-book.

FIOCCHI, A. A.; SANCHEZ, L. E. A.; INGRACI NETO, R. R.; SCALON, V. L. PortaFerramentas Com Sistema Interno De Transferência De Calor Com Fluido Em Mudança De Fase Para Resfriamento De Ferramenta De Corte. BR 102013018189-7 A2. Depósito: 17/07/2013. Publicação: 27/09/2016. 2016.Brasil.

(FIRM), Sandvik Coromant. Modern metal cutting: a practical handbook. [S. l.]: Sandvik Coromant, 1994. E-book.

FRANÇA, Pedro Henrique Pires. Estudo Da Temperatura Em Ferramentas De Usinagem Com Canais De Refrigeração Internos No Torneamento Do Ferro Fundido



Cinzento. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.283>

Fundamentos da termodinâmica / Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag; coordenação e tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. – São Paulo: Blucher, 2013.

Ghani, M. U., Abukhshim, N. A., Sheikh, M. A., 2008. "An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.39, p. 874-888.

GROOVER, MIKELL P. Introdução aos Processos de Fabricação. Rio de Janeiro, 1ª Ed. LTC, 2016.

KAMINISE, A. K. Estudo Da Influência Do Material Do Porta-Ferramenta Sobre Temperaturas De Usinagem No Torneamento. 2012.122 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

KAMINISE, A. K. GUIMARÃES G., and da SILVA M. B., "Development of a tool-work thermocouple calibration system with physical compensation to study the influence of tool-holder material on cutting temperature in machining," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 73, no. 5, pp. 735–747, 2014.

KING, Nathan et al. Wet versus dry turning: a comparison of machining costs, product quality, and aerosol formation. [S. l.]: SAE Technical Paper, 2001.

KRAUSS, G. (2015). Steels: Processing, Structure, and Performance. ASM International.

LI, T.; WU, T.; DING, X.; CHEN, H.; WANG, L. Experimental study on the performance of an internal cooled turning tool with topological channel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.98, p. 479–485, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2278-1>

LIMA JÚNIOR, Edmilson Dantas de. Medição da temperatura de corte no torneamento do aço-ferramenta AISI D6 temperado e revenido auxiliado por LN2. 2020. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

LISBOA, MORAES E HIRASHITA. "Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências". XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2013.

LONGBOTTOM, J.M. and LANHAM, J.D. (2005), "Cutting temperature measurement while machining – a review", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 77 No. 2, pp. 122-130. <https://doi.org/10.1108/00022660510585956>

MACHADO, Álisson Rocha et al. Teoria da usinagem dos materiais. [S. l.]: Editora Blucher, 2015. E-book.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos Materiais, 2ª ed. revisada, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 2011, 397p. MACHADO, A. R.; WALLBANK, J. The effect of extremely low lubricant volumes in machining. Wear, [S. l.], v. 210, n. 1–2, p. 76–82, 1997.

MARQUES, A. et al. Performance assessment of MQSL: Minimum quantity solid lubricant during turning of Inconel 718. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, [S. I.], v. 231, n. 7, p. 1144– 1159, 2017.

MARQUES A., “TORNEAMENTO DE INCONEL 718 COM APLICAÇÃO DE LUBRIFICANTES SÓLIDOS,” Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

Morrison, Kelly e Fasil Kidane Dejene. “Imagem Térmica do Efeito Thomson.” Física, American Physical Society, 2 de setembro de 2020.

PAGOTTO, Carlos Renato. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NO TORNEAMENTO CONVENCIONAL A SECO DO AÇO ABNT 1045 ATRAVÉS DE CÂMERA TERMOGRÁFICA. South American Development Society Journal, [S.I.], v. 8, n. 24, p. 131, dez. 2022. ISSN 2446-5763.

SANTOS, M. C.; ARAÚJO FILHO, J. S.; BARROZO, M. A. S.; JACKSON, M. J.; MACHADO, A. R. Development and application of a temperature measurement device using the toolworkpiece thermocouple method in turning at high cutting speeds. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 89, n. 5–8, p. 2287–2298, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9281-1>

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais. 1. Ed., Artliber, 2007, 248 p. SECO TOOLS. 2021. Disponível em: <https://www.toolsunited.com/App/EN/Article/ArticleDetailsPage/ea6faba7-f0c5-4c65-a0ba3d6be9737f3a?SearchMode=toolsUnited&classificationType=GTC>

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. International Journal of Machine Tools & Manufacture Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 57, p. 83– 101, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002>

STANDARD, ASTM. E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM International., West Conshohocken, PA, [S. I.], v. 11, n. November, p. 1–21, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0407-07.2>

STEPHENSON, D. A. Tool-work thermocouple temperature measurements— theory and implementation issues. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 115, n. 4, p. 432–437, 1993. <https://doi.org/10.1115/1.2901786>

STEPHENSON, D. A. Assessment of Steady State Metal Cutting Temperature Models Based on Simultaneous Infrared and Thermocouple Data, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, 1991, pp. 121-128. <https://doi.org/10.1115/1.2899668>

STOLL, A.; JAEGER, W. Method and tool for the machining of workpieces with cooling. WO2003026843A1. Publicação: 03/04/2003. 2003.Alemanha.

SUN, X. et al. Design and analysis of an internally cooled smart cutting tool for dry cutting. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, [S. I.], v. 226, n. 4, p. 585–591, 2012.

TRENT, Edward Moor; WRIGHT, Paul K. Metal cutting. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2000. E-book.

WRIGHT, P. K.; EM, TRENT. Metallographic methods of determining temperature gradients in cutting tools. [S. l.], 1973.