

PEDRO HENRIQUE PIRES FRANÇA

**ESTUDO DA TEMPERATURA EM FERRAMENTAS
DE USINAGEM COM CANAIS DE REFRIGERAÇÃO
INTERNOS NO TORNEAMENTO DO FERRO
FUNDIDO CINZENTO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2021

PEDRO HENRIQUE PIRES FRANÇA

ESTUDO DA TEMPERATURA EM FERRAMENTAS DE USINAGEM COM CANAIS DE REFRIGERAÇÃO INTERNOS NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

DISSERTAÇÃO apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins

Uberlândia – MG

2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F826	França, Pedro Henrique Pires, 1996-
2021	Estudo da Temperatura em Ferramentas de Usinagem com Canais de Refrigeração Internos no Torneamento do Ferro Fundido Cinzento [recurso eletrônico] / Pedro Henrique Pires França. - 2021. Orientador: Márcio Bacci da Silva. Coorientador: Paulo Sérgio Martins. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.283 Inclui bibliografia. 1. Engenharia mecânica. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964-, (Orient.). II. Martins, Paulo Sérgio, 1976-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.
	CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 588, COPEM				
Data:	30/06/2021	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:40
Matrícula do Discente:	11922EMC010				
Nome do Discente:	Pedro Henrique Pires França				
Título do Trabalho:	Estudo da Temperatura em Ferramentas de Usinagem com Canais de Refrigeração Internos no Torneamento do Ferro Fundido Cinzento				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Álisson Rocha Machado - FEMEC/UFU; Amauri Hassui - UNICAMP; Paulo Sérgio Martins (coorientador) - UNA/BH; e Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Márcio Bacci da Silva, Álisson Rocha Machado e o Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, o Prof. Amauri Hassui desde a cidade de Campinas/SP e o Prof. Paulo Sérgio Martins desde a cidade de Belo Horizonte/MG, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Márcio Bacci da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/06/2021, às 16:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALISSON ROCHA MACHADO, Usuário Externo**, em 30/06/2021, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Sérgio Martins, Usuário Externo**, em 30/06/2021, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Amauri Hassui, Usuário Externo**, em 30/06/2021, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2867992** e o código CRC **89192E9D**.

Quando um homem faz o que pode,
ele só precisa se manter altivo e convicto.

Tom, One Piece.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, sobretudo aos meus pais, Sebastião e Maria, por todo o apoio, ensinamentos e suporte oferecido durante toda a vida.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva e meu Coorientador Prof Dr. Paulo Sérgio Martins, pela Coorientação, ensinamentos, paciência e confiança durante este trabalho.

Ao Prof. Dr. Wisley Falco Sales (*in memoriam*) que foi meu primeiro orientador, por toda contribuição, confiança, ensinamentos e principalmente, por todas as alegrias que compartilhamos enquanto vivo.

Aos alunos de Mestrado Lucas Melo Queiroz Barbosa e Augusto César Santos Peixoto e ao aluno de doutorado Gustavo Henrique Nazareno Fernandes pela parceria no desenvolvimento deste projeto de pesquisa e pela amizade.

Aos meus amigos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), Leonardo, Felipe Chagas, Felipe dos Anjos, Renato e Giannini por toda ajuda e momentos compartilhados e ao José Ricardo do Laboratório de Transferência de Calor e Massa(LTCM) por todo auxílio na parte térmica do trabalho.

Aos professores e técnicos que me ajudaram em algum momento durante este trabalho.

À empresa Nipo-Tec Ferramentas Industriais a qual contribuiu pela produção dos insertos e adaptação do porta-ferramenta utilizados neste trabalho.

À empresa Walter Tools pelo fornecimento do porta-ferramentas.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), pela oportunidade concedida.

À CAPES, CNPq e FAPEMIG, por todo apoio financeiro.

FRANÇA, P. H. P. **ESTUDO DA TEMPERATURA EM FERRAMENTAS DE USINAGEM COM CANAIS INTERNOS DE REFRIGERAÇÃO NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO**. 2021. 112 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A Usinagem é um processo produtivo que envolve o atrito entre dois materiais, com alta taxa de deformação, em que a maior parte da energia mecânica é convertida em calor, principalmente concentrado em pequenas áreas na interface ferramenta/cavaco onde normalmente se encontram as maiores temperaturas. Na peça, a maior temperatura favorece a redução dos esforços de corte devido à redução da resistência do material. Sobre a ferramenta, tem um efeito adverso, pois acelera os mecanismos de desgaste comprometendo a sua vida útil. Além do mais, prejudica a integridade superficial da peça, as tolerâncias dimensionais, e conseqüentemente a produtividade do processo. A técnica padrão para o controle da temperatura na indústria metalmeccânica, é a aplicação de Fluidos de Corte em Abundância – FCA. As principais funções dos FCAs são a refrigeração, lubrificação, remoção de cavacos e proteção anticorrosiva. Esses insumos efetivamente melhoram a vida útil da ferramenta, além de produzir melhor controle dimensional e qualidade superficial. No entanto, os FCAs têm desvantagens em relação ao tripé de sustentabilidade: social, ambiental e econômico. Ambientalmente se não forem descartados corretamente podem impactar solos, esgotos, lençóis freáticos, rios, mananciais etc. Socialmente, são tóxicos e podem causar aos operadores problemas alérgicos de pele, respiratórios ou mesmo câncer. Por fim, economicamente eles representam uma parcela considerável no custo produtivo. Neste trabalho é apresentado um estudo térmico de uma técnica de refrigeração para usinagem a partir de ferramentas e porta-ferramenta projetados com canais internos de refrigeração, por onde circula água refrigerada em um ciclo fechado. Portanto, este trabalho buscou estudar o efeito que essa técnica de refrigeração em usinagem com ferramentas resfriadas internamente proporciona nas temperaturas de usinagem. Essa proposta pode ser considerada ecologicamente menos nociva por dispensar a utilização de fluidos de corte. Para analisar o comportamento do sistema, foi feito o torneamento do ferro fundido cinzento com ferramentas de metal duro. A variável resposta foi as temperaturas geradas durante o corte, mensuradas pelos métodos do termopar ferramenta-peça e termopar soldado. Os parâmetros de entrada foram a velocidade de corte (84, 132 e 212 m/min) e as condições ambientes(inserto comum, inserto modificado circulando água a temperatura ambiente e inserto modificado circulando água gelada), ambas controladas em três níveis. A principal conclusão encontrada foi que o

sistema de refrigeração se mostrou eficiente apresentando diferenças de temperaturas de até 21,52 % em comparação a um processo de usinagem a seco e também mostrou ter um impacto significativo no gradiente térmico formado durante o processo de corte.

Palavras chave: sistema de refrigeração em usinagem, sustentabilidade, termopar-ferramenta peça, fluidos de corte, ferramentas modificadas.

FRANÇA, P. H. P. **STUDY OF TEMPERATURE IN MACHINING TOOLS WITH INTERNAL COOLING CHANNELS IN TURNING OF GRAY CAST IRON.** 2021. 112 p. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Machining is a productive process that involves friction between two materials, with a high strain rate, in which most of the mechanical energy is converted into heat, mainly concentrated in small areas at the tool/chip interface where the highest temperatures are normally found. In the part, the higher temperature favors the reduction of cutting efforts due to the reduction of material resistance. It has an adverse effect on the tool, as it accelerates wear mechanisms, compromising its useful life. Furthermore, it harms the surface integrity of the part, the dimensional tolerances, and consequently the productivity of the process. The standard technique for temperature control in the metalworking industry is the application of Abundant Cutting Fluids – FCA. The main functions of FCAs are cooling, lubrication, chip removal and corrosion protection. These inputs effectively improve tool life, in addition to producing better dimensional control and surface quality. However, FCAs have disadvantages in relation to the sustainability tripod: social, environmental and economic. Environmentally, if not properly disposed of, they can impact soil, sewage, groundwater, rivers, springs, etc. Socially, they are toxic and can cause operators allergic skin problems, respiratory problems or even cancer. Finally, economically they represent a considerable portion of the production cost. This work presents a thermal study of a cooling technique for machining from tools and tool holders designed with internal cooling channels, through which chilled water circulates in a closed cycle. Therefore, this work aimed to study the effect that this cooling technique in machining with internally cooled tools has on machining temperatures. This proposal can be considered ecologically less harmful as it does not require the use of cutting fluids. To analyze the behavior of the system, gray cast iron was turned with carbide tools. The response variable was the temperatures generated during cutting, measured by the tool-work thermocouple and welded thermocouple methods. The input parameters were the cutting speed (84, 132 and 212 m/min) and the ambient conditions (common insert, modified insert circulating water at environment temperature and modified insert circulating chilled water), both controlled in three levels. The main conclusion found was that the cooling system proved to be efficient with temperature differences of up to 21.52% compared to a dry machining process and also showed to have a significant impact on the thermal gradient formed during the cutting process.

Keywords: cooled system in machining, sustainability, tool-work thermocouple, cutting fluids, modified tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Zonas de geração de calor durante a formação de cavacos. Adaptado de (MACHADO et al., 2011).....	6
Figura 2.2 - Representação do calor dissipado durante a formação de cavaco no processo de usinagem. Adaptado de (FERRARESI, 1977).....	8
Figura 2.3 - (a) Ferramenta com canais internos de CO ₂ . (b) Sistema de entrega de CO ₂ . Adaptado de : (STOLL, JAEGER, 2003).	13
Figura 2.4 - (a) Trocador de calor por micro canal. (b) Vista do porta-ferramenta após a brasagem do trocador de calor. Adaptado de: (ROZZI et al., 2011).	14
Figura 2.5 - Ensaio de vida da ferramenta utilizando fluido de corte e ICS. Adaptado de: (ROZZI et al., 2011).	15
Figura 2.6 - a) Inserto modificado com os canais de refrigeração. b) Calço modificado para a inserção do inserto (LI et al., 2018).	15
Figura 2.7 - (a) Malha da broca; (b) Malha da Peça. (HAN; WU, 2010).	18
Figura 2.8 - Distribuição de temperatura em uma broca de metal duro após 10,2 mm de profundidade de perfuração a uma velocidade de corte de 183 m/min sem a utilização de refrigeração interna (a seco) (LI; ALBERT, 2007).....	18
Figura 2.9 - Distribuição de temperatura (em °C) em uma broca de metal duro após 10,2 mm de profundidade de perfuração a uma velocidade de corte de 183 m/min com refrigeração interna (LI; ALBERT, 2007).	19
Figura 2.10 - Aparato experimental de uma medição de temperatura por infravermelho.	22
Figura 2.11 - Aparato experimental para medição de temperatura da ferramenta de corte com inserção de termopar (MELO, 1988).	23
Figura 2.12 - Esquematização do método de determinação da distribuição de temperatura através de pós químicos (SANTOS; SALES, 2007).	24
Figura 2.13 - Ilustração mostrando a equivalência entre dois circuitos termopares submetidos internamente a diferentes temperaturas (KAMINISE, 2012).	25
Figura 2.14 - Desenho esquemático mostrando a inclusão de um condutor C em torno do sistema (KAMINISE, 2012).	25
Figura 2.15 - Efeito da inserção de um material C em uma das junções, entre os ramos A e B de um termopar (KAMINISE, 2012).....	26
Figura 2.16 - Propriedade associativa da f.e.m entre materiais de um termopar (KAMINISE, 2012).....	26

Figura 2.17 - Propriedade associativa da f.e.m entre diferentes temperaturas das junções do termopar (KAMINISE, 2012).	26
Figura 2.18 - Circuito Básico do termopar (LIMA JUNIOR, 2020).	27
Figura 2.19 - Esquema representativo do termopar ferramenta-peça utilizando um contra ponta rotativo.	28
Figura 2.20 - Aplicações utilizando mercúrio no sistema do termopar ferramenta-peça. (a) Pelo eixo árvore do torno (GÖKKAYA et al., 2006); (b) Por um contra ponta rotativo (INGRACI et al., 2011).	29
Figura 2.21 - Sistema termoelétrico do termopar-ferramenta peça. Adaptado de: (KAMINISE, 2012).....	30
Figura 2.22 - Representação esquemática do sistema termopar ferramenta-peça com a adição de um elemento de compensação físico. Adaptado de: (KAMINISE ,2012).	31
Figura 2.23 - Procedimento de calibração por forno indutivo (VILARINHO; MACHADO, 2000).	34
Figura 2.24 - Curva de calibração feita em um forno indutivo e sua histerese (VILARINHO; MACHADO, 2000).....	35
Figura 2.25 - Aparato experimental da calibração através de uma resistência elétrica envolta em torno da peça Adaptado de : (REIS; ABRÃO, 2005).....	36
Figura 2.26 – Ilustração do esquema de calibração através de uma chama a gás oxiacetileno (KAMINISE, 2012).....	37
Figura 2.27 - Comparação da capacidade de amortecimento de vibração. Adaptado de: (De SOUSA et al., 2018).....	39
Figura 3.1 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	41
Figura 3.2 – Subsistemas TCP e TCS.	42
Figura 3.3 - Desenho esquemático do TCP (BAZON, 2020).	43
Figura 3.4 - Bomba de fluido refrigerante, termômetro e fonte de alimentação utilizados no sistema de refrigeração.....	44
Figura 3.5 - TCS (ferramenta e porta-ferramenta).....	45
Figura 3.6 - Geometria interna dos canais das ferramentas.....	45
Figura 3.7 - Insertos SNUN120412 após as modificações; a) Canal de entrada do fluido secundário; b) Canal de fluido da superfície lateral tampada por solda prata. c) Canais de saída de fluido.....	46
Figura 3.8 - Canais internos originais do porta-ferramenta (WALTER TOOLS, 2021).....	47
Figura 3.9 – Conjunto Porta-ferramenta e inserto após as modificações.	47
Figura 3.10 - Esquemática do aparato experimental utilizando durante a realização dos ensaios de usinagem.	51

Figura 3.11 - Contra ponta rotativo com mancal de mercúrio embutido internamente (KAMINISE,2012).....	52
Figura 3.12 - Elemento de compensação utilizado durante os ensaios de usinagem e calibração.....	53
Figura 3.13 - Aparato experimental utilizado para a realização dos ensaios de usinagem. (a) Bancada experimental mostrando as juntas $T2, T5, T6$; (b) Banca experimental mostrando as juntas $T1, T3, T4$; (c) Sistema termoelétrico do termopar ferramenta-peça com compensação física.....	54
Figura 3.14 - Posição dos termopares utilizados durante os ensaios de usinagem.....	55
Figura 3.15 - Esquematização do aparato experimental utilizado na calibração.	56
Figura 3.16 - Bancada de calibração utilizada.	57
Figura 3.17 - Elemento de aquecimento utilizado para a calibração.	58
Figura 3.18 - Termopar do tipo K utilizado para medir a temperatura da junta quente $T1$	59
Figura 3.19 - Influência da utilização da água mineral nos sinais das forças eletromotrizes.	61
Figura 3.20 - Ilustração do posicionamento dos termopares padrão utilizados na calibração do sistema.	62
Figura 3.21 - Temperaturas das juntas próximas ao elemento de aquecimento medidas na curva 2.....	63
Figura 3.22 - Curvas obtidas a partir dos ensaios de calibração.	64
Figura 3.23 - Curva resultante dos ensaios de calibração.....	65
Figura 4.1 – Temperaturas medidas no calço ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.	68
Figura 4.2 - Temperaturas medidas no calço ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 132$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.	69
Figura 4.3 - Temperaturas medidas no calço ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 212$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.	69
Figura 4.4 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a esquerda ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.....	70
Figura 4.5 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a esquerda ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 132$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.....	71
Figura 4.6 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a esquerda ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 212$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.....	71
Figura 4.7 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a direita ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.	72
Figura 4.8 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a direita ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 132$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.....	73

Figura 4.9 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a direita ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 212$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.....	73
Figura 4.10 - Temperaturas medidas na ferramenta ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.	74
Figura 4.11 - Temperaturas medidas na ferramenta ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 132$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.....	75
Figura 4.12 - Temperaturas medidas na ferramenta ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 212$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.....	75
Figura 4.13 - Intervalo de tempo considerado para o levantamento das temperaturas de usinagem em todas as condições de usinagem.	76
Figura 4.14 - Comparação das temperaturas de usinagem médias obtidas sob diferentes condições ambiente.	77
Figura 4.15 - Valores preditos versus valores observados dos resultados de temperatura. .	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Geometria do conjunto ferramenta e porta-ferramenta. Retirados de: (SECO TOOLS,2021); (WALTER TOOLS,2021).....	48
Tabela 3.2 - Composição química e propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento FUCO - 300® (TUPY,2011).	49
Tabela 3.3. Parâmetros de Corte utilizados na realização dos ensaios.	50
Tabela 3.4 - Linearização dos ensaios de calibração.....	65
Tabela 4.1 - Análise de variância para as condições de corte utilizadas.....	78
Tabela 4.2 - Diferença das temperaturas médias calculadas para todas as condições ambientes.	80
Tabela 4.3 - Análise de variância para as condições ambiente que utilizaram insertos refrigerados.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_1	Calor Gerado na zona de cisalhamento primária (W)
Q_2	Calor gerado na zona de cisalhamento secundária (W)
Q_3	Calor gerado na zona de cisalhamento terciária (W)
Q_C	Calor dissipado pelo cavaco (W)
Q_F	Calor dissipado pela ferramenta (W)
Q_{MA}	Calor dissipado para o meio ambiente (W)
Q_P	Calor dissipado pela peça (W)
Q_T	Quantidade de calor gerado total. (W)
r_ϵ	raio de ponta (mm)
α_o	ângulo de folga ($^\circ$)
γ_o	ângulo de saída ($^\circ$)
ϵ_r	raio de ponta ($^\circ$)
X_r	ângulo de posição primário ($^\circ$)
X_r'	ângulo de posição secundário ($^\circ$)
F_c	Componente principal da força de corte (N)
$T_{interface}$	Temperatura na interface cavaco-ferramenta
$T_{interface}, T_1$	Temperatura da junta quente ou temperatura de usinagem ($^\circ C$)
$T_{referência}, T_2$	Temperatura da junta de referência ou temperatura de compensação ($^\circ C$)
T_{amb}	Temperatura Ambiente ($^\circ C$)
V_c	Velocidade de corte (m/min)
W_{atrito}	trabalho das forças que produzem atrito (W)
$W_{cisal.}$	trabalho das forças que produzem o cisalhamento do material (W)
W_{corte}	trabalho total de corte (W)
$W_{disp.}$	trabalho das forças de dispersão (W)
$W_{elast.}$	trabalho das forças que produzem deformações elásticas (W)
$W_{plast.}$	trabalho das forças que produzem deformações plásticas (W)
a_p	profundidade de usinagem (mm)
B_0	ângulo de cunha ($^\circ$)
f	avanço (mm/rev)
f.e.m	força eletromotriz
FCA	Fluido de Corte em Abundância
FRI	Ferramenta Refrigerada Internamente
K	Constante de calibração

R^2	coeficiente de correlação
rev	revolução
TCP	Trocador de Calor Primário
TCS	Trocador de Calor Secundário
Q	Quantidade de calor gerada (W)
ΔE	diferença de potencial elétrico (V)

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I.....	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. CAPÍTULO II.....	4
2.1 TEMPERATURA NA USINAGEM.....	4
2.1.1 Transformação de Energia no Processo de Usinagem	4
2.1.2 Geração de Calor na Usinagem	6
2.1.3 Influência da geometria da ferramenta na geração de calor	9
2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS FLUÍDOS DE CORTE	9
2.3 TÉCNICAS “VERDES” DE REFRIGERAÇÃO NA USINAGEM	12
2.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	16
2.4.1 Técnicas numéricas.....	16
2.4.2 Técnicas Analíticas.....	20
2.5 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	21
2.5.1 Medição por Infra-Vermelho	21
2.5.2 Termopares Implantados.....	22
2.5.3 Vernizes Termosensíveis	23
2.5.4 Medição através de pós químicos	23
2.6 TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA: LEIS, SISTEMA E METODOLOGIAS	24
2.6.1 Lei dos Termopares.....	24
2.6.2 Sistema do Termopar Ferramenta-Peça.....	27
2.6.3 Investigação do circuito termoeletrico dos termopares	30
2.6.4 Sistema termoeletrico dos termopares com compensação física.....	31
2.6.5 Calibração do Termopar Ferramenta-peça	32
2.7 A USINAGEM DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS	38
3. CAPÍTULO III.....	41
3.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	42
3.1.1 Sistema do Trocador de Calor Primário - TCP.....	42
3.1.2 Sistema do Trocador de Calor Secundário - TCS	44
3.2 ENSAIOS DE USINAGEM.....	48
3.2.1 Material Utilizado	48

3.2.2	Planejamento Experimental: Parâmetros de Corte	49
3.2.3	Ensaio de usinagem – Aparato Experimental	50
3.2.4	Utilização do contra ponta modificado	51
3.2.5	Elemento de Compensação do Termopar ferramenta-peça	52
3.3	TERMOPARES SOLDADOS NO SISTEMA	54
3.4	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	56
3.4.1	Bancada Experimental de Calibração	56
3.4.2	Dispositivo de Aquecimento.....	58
3.4.3	Procedimentos realizados nos ensaios de calibração.....	60
3.4.4	Análise da influência do fluido refrigerante durante a aquisição de sinais.....	60
3.4.5	Levantamento das curvas de calibração.....	61
3.4.6	Levantamento e Análise da Curva de Calibração	63
4.	CAPÍTULO IV	67
4.1	TERMOPARES SOLDADOS	67
4.1.1	Termopar soldado no calço	67
4.1.2	Termopar soldado no porta-ferramenta a esquerda.....	70
4.1.3	Termopar soldado no porta-ferramenta a direita.....	72
4.1.4	Termopar soldado na ferramenta	74
4.2	TERMOFERRAMENTA-PEÇA	76
4.2.1	Análise dos resultados de temperatura obtidos na usinagem	76
5.	CAPÍTULO V	82
6.	CAPÍTULO VI	84

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Recentemente, nas indústrias de manufatura, a usinagem vem apresentando um papel bastante significativo. Pode ser que esse processo seja o mais versátil na obtenção de geometrias complexas e acabamentos com tolerâncias dimensionais precisas, tudo isso corre através da remoção de pequenas parcelas de materiais que são nomeadas de cavaco. Nos processos de usinagem convencionais o cavaco é formado pelo movimento relativo da ferramenta de corte com a peça de trabalho (TRENT; WRIGHT, 2000). Esse movimento relativo gera grande quantidade de atrito e de deformações plásticas na peça, sendo que quase 99 % dessas deformações são convertidas em calor (FERRARESI, 1977). Quando metais de alta resistência são usinados, grandes quantidades de calor são formadas, principalmente quando a velocidade de corte é aumentada, acarretando na diminuição da resistência da ferramenta e acelerando os mecanismos de desgaste, levando a sua falha (MACHADO et al., 2011). Além disso, o excesso de calor também pode causar problemas na peça como elevadas tensões residuais e alterações em sua microestrutura.

Para evitar esses problemas, na maioria das vezes é necessário utilizar técnicas de refrigeração para esfriar a peça e a zona de corte (TRENT; WRIGHT, 2000). Em grande parte, utiliza-se os fluidos de corte. Em termos de desempenho, a utilização desses fluidos aumenta efetivamente a vida útil da ferramenta, produzindo um melhor controle dimensional e boa qualidade superficial. Segundo (Debnath et al., 2014) em 2005 a quantidade dos fluidos de corte utilizados na usinagem foi estimada em 38 megatoneladas com um aumento estimado de 1,2% na próxima década. A partir desse dado é possível perceber o quanto a utilização desse insumo é abundante, no entanto, levando em conta a sustentabilidade, grande parte dos fluidos de corte não são favoráveis, há casos em que sua aplicação tem um impacto bastante significativo na saúde do operador e no meio ambiente por conta de suas composições tóxicas. Por esse motivo, várias propostas mais sustentáveis são desenvolvidas com o intuito de minimizar ou substituir a sua utilização, sendo em maior parte trabalhos que

apresentam métodos de refrigeração alternativos como, mínima quantidade de lubrificante, usinagem criogênica, ou sistemas de usinagem que refrigeram a zona de corte de uma maneira indireta.

A ideia de utilizar sistemas de usinagem com refrigeração indireta é bem antiga. Provavelmente o primeiro estudo relacionado a este tipo de sistema foi a patente de Meyers (1964), submetida em julho de 1964, que se baseava em um sistema termoelétrico para refrigerar a ferramenta de usinagem através da variação do diferencial de potência elétrica de determinados materiais. Anos depois surgiu a proposta de Jeffries e Zerkle (1970) que já mostraram uma ideia de refrigeração através de um fluido com mudança de fase, que trocava calor com a ferramenta através do calço. Assim em diante, vários trabalhos e patentes surgiram. Dentre esses trabalhos, são apresentadas ideias que buscam refrigerar as ferramentas de usinagem através da inserção de canais internos de refrigeração.

No trabalho de Rozzi et al. (2011) foi estudado um sistema de arrefecimento interno para o torneamento, que consistiu em refrigerar um inserto através da circulação de nitrogênio líquido em microcanais inseridos abaixo da ferramenta de corte que serviam como trocador de calor. Recentemente, Li et al. (2018) projetaram um sistema de resfriamento em sistema fechado para ferramentas de corte utilizando canais internos de refrigeração passando por dentro do calço, resfriando a ferramenta através da transferência de calor. Ambos os trabalhos mostraram resultados satisfatórios na melhoria da vida de ferramenta. No entanto, até os dias de hoje, há poucos estudos relacionados a sistemas de resfriamento interno que envolvam o conjunto ferramenta e suporte.

Neste trabalho é realizado um estudo das temperaturas de usinagem a partir da utilização de um sistema de refrigeração em usinagem que se trata de ferramentas e porta-ferramenta resfriados internamente na forma de um sistema fechado para o processo de torneamento. O intuito deste sistema é refrigerar todo o conjunto de usinagem (ferramenta e porta-ferramenta), e dessa forma, diminuir os valores de temperatura presentes em toda a ferramenta durante o processo do corte. Todos os ensaios foram realizados no torneamento cilíndrico externo do ferro fundido cinzento, onde foram realizadas medições de temperatura pelos métodos do termopar ferramenta-peça e termopar soldado.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi mensurar e comparar as temperaturas de usinagem geradas pela utilização de um sistema de refrigeração em usinagem, formado por ferramentas e porta-ferramenta modificados com canais internos de refrigeração com um sistema de usinagem convencional. Para isso, utilizou-se os métodos do termopar ferramenta-peça e termopar soldado durante o torneamento cilíndrico externo do ferro fundido cinzento. Como fluido refrigerante do sistema de refrigeração em usinagem, optou-se utilizar água por ela ser um fluido ecológico, assim, sua utilização não agride o meio ambiente e não causa problemas de saúde para os operadores.

1.2 Objetivos específicos

- Medir as temperaturas de corte no torneamento do ferro fundido cinzento utilizando os métodos do termopar ferramenta- peça e termopar-soldado.
- Comparar as temperaturas médias obtidas utilizando o sistema de refrigeração com o processo de usinagem a seco.
- Avaliar a eficiência do ciclo de refrigeração na redução das temperaturas durante o processo de corte.
- Comparar a eficiência do sistema de refrigeração em diferentes níveis de velocidade de corte.
- Comparar a utilização de um sistema de refrigeração utilizando água resfriada (próxima a temperatura de solidificação) e água a uma temperatura ambiente.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Temperatura na usinagem

2.1.1 *Transformação de Energia no Processo de Usinagem*

De acordo com Machado et al. (2011), a força de usinagem provoca deformações na peça, na ferramenta de corte e na própria máquina. O trabalho dessas forças (deformação e atrito) são convertidos em calor, e a partir desse calor e das massas, da geometria da ferramenta e das propriedades térmicas do material faz com que campos de temperatura propriamente arranjados sejam criados durante o processo.

Para Machado et al. (2011) as parcelas de trabalho total vindo da transformação de energia durante o processo de usinagem podem ser divididas em:

- Trabalho das deformações elásticas que são produzidas na ferramenta, peça, cavaco e máquina, que se transformam em vibrações elásticas que, rapidamente são amortecidas, sendo convertidas em calor.
- Trabalho vindo das forças de dispersão encarregadas pela superação das energias superficiais da peça, pelo deslocamento dos grãos cristalinos para o cavaco e pelo esmagamento de alguns grãos.
- Trabalho das forças que modificam a estrutura cristalina do metal sobre pressão e aquecimento.
- Trabalho das forças que causam deformação plástica no material que através de um processo dissipativo, faz com que a energia mecânica vinda deste fenômeno se transforme em calor.
- 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.

Com isso pela Equação (2.1), tem-se que o trabalho total gerado no processo de corte corresponde as parcelas:

$$W_{corte} = W_{elast.} + W_{disp.} + W_{estrut.} + W_{plast.} + W_{cisal.} + W_{atrito} \quad (2.1)$$

Segundo Ferraresi (1977) as três primeiras parcelas da Eq. (2.1), contribuem muito pouco no trabalho total gerado durante o processo, então pela Eq. (2.2) pode-se dizer que no processo de corte o trabalho total é aproximadamente dependente dos termos:

$$W_{corte} \cong W_{plast.} + W_{cisal.} + W_{atrito} \quad (2.2)$$

A partir de experimentos realizados, foi constatado que mais de 90 % de todo o trabalho mecânico gerado durante o processo de usinagem é transformado em calor (FERRARESI, 1977).

$$Q = \frac{F_c \cdot V_c}{60} \quad (2.3)$$

Sendo:

Q = Taxa de calor gerada (W)

F_c = Componente principal da força de corte (N)

V_c = Velocidade de corte ($\frac{m}{min}$)

Pela Equação (2.3), percebe-se que a taxa de calor gerada no processo de usinagem está diretamente ligada com a principal componente da força de corte e a velocidade de corte. Para maiores produções no processo de usinagem é interessante aumentar o avanço, a profundidade de usinagem e a velocidade de corte. Contudo, há um limite neste aumento, pois o desgaste da ferramenta está diretamente ligado com o aumento da temperatura (SANTOS; SALES, 2007). Por isso é necessário com que o usuário sempre faça um estudo prévio para determinar as melhores condições de corte a fim de se realizar uma operação de usinagem economicamente viável (MACHADO et al. ,2011).

2.1.2 Geração de Calor na Usinagem

Durante a usinagem uma grande quantidade de calor é formada na zona de corte, podendo ser dividida em três fontes, conforme a Figura 2.1. Esse aumento de temperatura acontece principalmente devido à deformação plástica do material da peça, do atrito gerado entre os contatos cavaco-ferramenta e ferramenta-peça que atuam durante a operação.

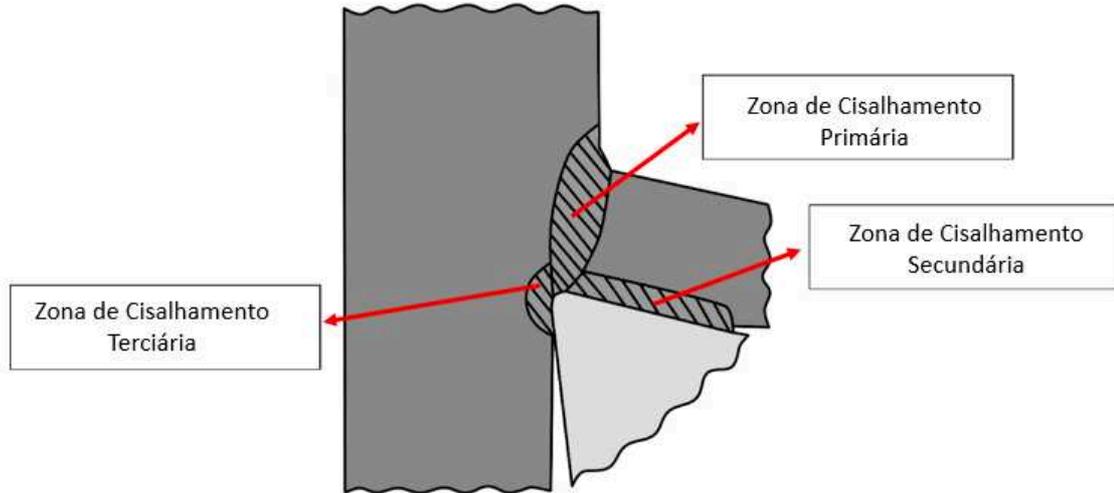


Figura 2.1 - Zonas de geração de calor durante a formação de cavacos. Adaptado de (MACHADO et al., 2011).

De acordo com Machado et al. (2011) e Santos; Sales (2007) essas três regiões distintas podem ser divididas como:

Zona de cisalhamento primária: a zona de cisalhamento primária é a região próxima à interface entre a ferramenta e o cavaco. Nela é onde se localiza um plano imaginário, chamado de plano de cisalhamento, que é o local onde ocorrem as máximas tensões e deformações plásticas na peça. Os distúrbios causados pela movimentação de átomos sobre outros átomos durante a deformação plástica resultam em um aquecimento na região (MACHADO et al., 2011).

Zona de cisalhamento secundária: situada na região onde ocorre o contato do fluxo de cavaco com a superfície da ferramenta, o calor gerado na zona de cisalhamento secundária tem a maior influência no desempenho do inserto. A temperatura de corte está ligada diretamente à velocidade de corte, ou seja, ao aumentar a velocidade de corte a tendência é que a temperatura aumente (MACHADO et al., 2011). Um crescimento da temperatura indica não só a aceleração dos mecanismos de desgaste como também propicia a diminuição do

limite de escoamento dos insertos (SANTOS; SALES, 2007). Por isso, para cada par ferramenta-peça haverá uma velocidade de corte limite (TRENT; WRIGHT, 2000).

Segundo Trent; Wright (2000) na interface cavaco-ferramenta a geração de calor e as tensões são tão altas e complexas que são quase impossíveis de serem medidas com os conhecimentos adquiridos até então. Há casos em que a temperatura pode ultrapassar valores de 1000 °C na zona de fluxo e a ferramenta deve estar preparada para suportar essas temperaturas. A temperatura na área de fluxo de cavaco, conseqüentemente, a temperatura do inserto depende da quantidade de trabalho necessária para cisalhar o material e a quantidade de material que passa pela zona de fluxo, que varia conforme o material a ser usinado (MACHADO et al., 2011) . Segundo Santos; Sales (2007) e Machado et al. (2011), para materiais macios e de baixo ponto de fusão, como magnésio e alumínio, a temperatura da ferramenta pode não apresentar problemas. Entretanto, quando se trata da usinagem de materiais mais duros, de alto ponto de fusão como ferros fundidos, aços, ligas de níquel e ligas de titânio ela se torna o fator controlador da taxa de remoção de material.

Zona de cisalhamento terciária: na zona de cisalhamento terciária a geração de calor se forma a partir do atrito entre a superfície de folga da ferramenta com a peça e do cisalhamento interno da peça causado pela aderência da superfície da ferramenta. O contato entre a superfície de folga da ferramenta com a peça pode acontecer mesmo que não haja desgaste de flanco na ferramenta, uma vez que é necessária uma deformação mínima para que ocorra a formação de cavacos (MACHADO et al., 2011).

Segundo Santos; Sales (2007) de toda energia que é transformada em calor durante a usinagem, a maior parte é dissipada pelo cavaco, uma pequena porcentagem é dissipada pela peça e outra para o meio ambiente, já o restante vai para o inserto de corte que geralmente varia em torno de 8 a 10 % do total. Pela Figura 2.2 é possível observar como ocorre essa dissipação de calor durante a formação de cavaco.

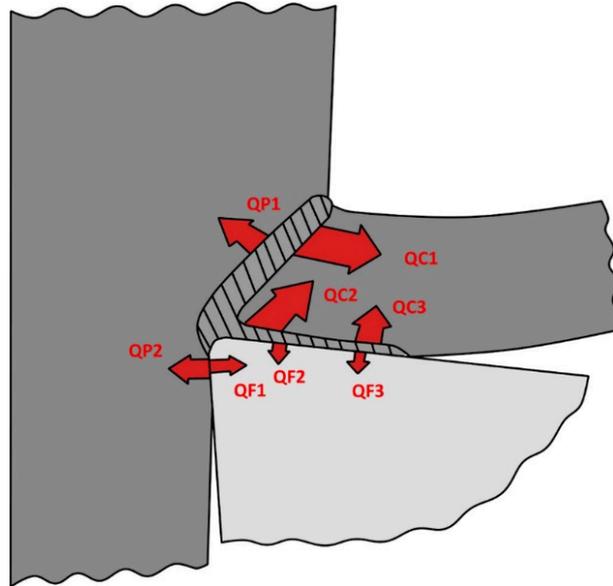


Figura 2.2 - Representação do calor dissipado durante a formação de cavaco no processo de usinagem. Adaptado de (FERRARESI, 1977).

Com isso, o balanço energético pode ser descrito como:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_P + Q_F + Q_C + Q_{MA} \quad (2.4)$$

Onde:

- Q_T : Quantidade de calor gerado total (W)
- Q_1 : Calor Gerado na zona de cisalhamento primária (W)
- Q_2 : Calor gerado na zona de cisalhamento secundária (W)
- Q_3 : Calor gerado na zona de 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_{MA} : Calor dissipado para o meio ambiente (W)

Pela Equação 2.4, a quantidade de calor total (Q_T) produzida durante a operação de usinagem é resultante da soma dos calores gerados nas zonas de cisalhamento primária (Q_1), secundária (Q_2) e terciária (Q_3). Pela lei da conservação de energia, sabe-se que esse calor também é igual ao somatório das dissipações de calor que ocorrem durante a operação através da peça (Q_P), ferramenta (Q_F) cavaco (Q_C) e meio ambiente (Q_{MA}). Sendo que, cada

parcela de calor de um elemento representa a soma dos calores em sua região. Como exemplo, o calor dissipado na ferramenta (Q_F), que é representado pelo somatório das parcelas de calor Q_{F1} , Q_{F2} e Q_{F3} .

2.1.3 Influência da geometria da ferramenta na geração de calor

A forma com que a ferramenta é projetada também influencia a geração de calor durante a operação de usinagem, portanto é importante levar em consideração os parâmetros geométricos da ferramenta. Dentre todos os ângulos da geometria de corte, o ângulo de saída tem um efeito misto. Aumentar o ângulo de saída (que varia de -8° a 20°) para valores positivos resultam em uma menor geração de calor na interface cavaco-ferramenta, entretanto, leva a um enfraquecimento da ferramenta (PRADEEPKUMAR et al., 2015). Além disso, o momento gerado pelo esforço de corte tende a quebrar a ferramenta. Decidir qual valor utilizar neste ângulo dependerá principalmente do tipo de material a ser usinado. Para materiais mais dúcteis, como alumínio e ligas de magnésio, utiliza-se ângulos positivos para evitar extensas áreas de adesão do cavaco à superfície de saída da ferramenta, que podem resultar na sua quebra. No contrário, utiliza-se ângulos negativos para materiais de difícil usinagem e em cortes interrompidos, por garantir uma resistência maior à cunha cortante (MACHADO et al., 2011).

Além do ângulo de saída, existe também o ângulo de ponta, que é definido pelo formato da ferramenta, que tem como função principal garantir sua resistência assim como uma boa capacidade de dissipar calor (SANTOS; SALES, 2007).

Um outro ângulo importante, é o ângulo de folga (geralmente varia de 5° a 20°) que tem o papel de minimizar o atrito entre a ferramenta e a peça, conseqüentemente diminuindo a quantidade de geração de calor. Para valores mais baixos do ângulo de folga a cunha da ferramenta não penetra corretamente na peça, assim a ferramenta perderá rapidamente sua afiação, uma vez que aumentará a quantidade de geração de calor. Pelo contrário, caso este ângulo seja muito elevado, resultará em uma fragilização da ferramenta podendo soltar pequenas lascas ou até quebrar (MACHADO et al., 2011).

2.2 Vantagens e desvantagens dos fluidos de corte

Com o passar dos anos, as empresas procuram cada vez mais fabricar produtos com baixo custo, em alta produtividade e bom acabamento. Para se atingir uma alta produtividade, é necessário trabalhar com altas velocidades de corte, penetração de trabalho e taxas de

avanço (MACHADO et al., 2011). Porém, elevar estes parâmetros de usinagem causa uma grande geração de calor na zona de corte e altas temperaturas, o qual influencia nas tolerâncias dimensionais da peça, acabamento da superfície, resistência mecânica e na vida da ferramenta. Desse modo, para tentar controlar esses fenômenos provenientes da geração de calor e aumento de temperatura, é comum utilizar fluidos de corte durante o processo, sendo que eles auxiliam no arrefecimento da zona de corte (Da SILVA et al., 2017).

Para arrefecer a zona de corte existem várias formas, que podem variar de técnicas mais simples como a aplicação de fluidos de corte convencionais ou mais requintadas, como fluidos criogênicos, que são amplamente usados na fabricação de componentes aeroespaciais compostos por ligas de titânio ou níquel (BORDIN et al., 2017); (DHANANCHEZIAN, 2019), ou utilizar fluidos de corte a uma alta pressão, que tem mostrado uma grande eficiência na redução do desgaste em ferramentas de corte (SHARMA et al., 2009); (NAVES et al., 2013).

Para Trent; Wright (2000) a aplicação dos fluidos de corte não tem influência significativa na temperatura máxima da interface ferramenta-cavaco, apenas em suas periferias, pois na zona de fluxo de cavaco há uma elevada quantidade de deformações plásticas e cisalhantes, ocasionando a junção do material da ferramenta e peça em nível de escala atômica, impedindo a penetração desses fluidos. Todavia, o uso dos fluidos de corte pode promover a mudança da forma ou o mecanismo de desgaste, o que contribui para uma maior vida de ferramenta (SANTOS; SALES, 2007). No entanto, mesmo que os fluidos de corte não penetrem na zona de fluxo de cavaco, eles auxiliam na diminuição da temperatura através da perda de calor por condução (FERRARESI, 1977). Segundo Debnath et al. (2014), para cada operação de usinagem haverá um fluido de corte específico a ser utilizado. Entretanto, há casos em que sua aplicação não é eficiente como por exemplo, a usinagem de aços endurecidos.

Mesmo que os fluidos de corte apresentem vantagens durante a usinagem, há alguns pontos negativos que justificam o motivo de que vários pesquisadores buscam novas formas de melhorar a eficiência da usinagem com pouca ou nenhuma utilização desses fluidos. A aplicação dos fluidos de corte em grande parte, podem criar severos impactos ambientais, como a poluição ou contaminação da água, do solo, e do ar, além de trazer sérios problemas para a saúde dos operadores (LISBOA et al., 2013). De acordo com Shashidhara; Jayaram (2010), cerca de 80 % das infecções que os operadores em usinagem adquirem são devido ao contato dos fluidos de corte com a pele. O motivo disso é a complexidade em sua composição, podendo ser alérgico ou irritante, mesmo que as matérias primas que fazem os fluidos sejam relativamente seguras.

É comum utilizar biocidas nos fluidos de corte, devido ao crescimento bacteriano que ocorre com o passar do tempo, levando à presença de massas microbianas significativas e

sobretudo de endotoxinas liberadas no chão da atmosfera. Para controlar esse crescimento bacteriano são aplicados biocidas aditivos nos fluidos de corte, contudo, sua aplicação pode afetar na decomposição natural da substância. Vários biocidas também dispõem de formaldeído, que é um agente cancerígeno (SHOKRANI et al., 2012).

Em uma pesquisa feita por Zhao et al. (2012), no ano de 2005 foi exibido que mais de 20 % do consumo de água potável era utilizado por indústrias. O autor também alegou que na usinagem a maioria dessa água potável consumida era devido a utilização dos fluidos de corte. Segundo Bartz (2001), para preparar óleo solúvel de corte é necessário utilizar cerca de 95 % em volume de água. Os outros 5 % restantes do fluido de corte contém óleo solúvel (naftênico ou parafínicos), emulsificantes (sódio, sulfonato, etoxilatos de nonilfenol, ésteres de PEG e alcanolamidas) e aditivos para controlar efeitos de corrosão, acidez e crescimento microbiano (BARTZ, 2001).

Através dessas pesquisas realizadas e outras análises presentes na literatura, é possível notar os vários problemas que os fluidos de corte causam. Para contornar a situação alguns autores defendem a utilização da usinagem a seco. Segundo Ingraci Neto (2014), o trabalho *Dry Cutting* de Klocke e Eisenblätter apresentado em 1997 na seção de abertura do CIRP (*College International pour la Recherche en Productique*) é um dos mais citados e também um dos pioneiros que influenciaram a busca de novas alternativas de refrigeração e lubrificação nos processos de corte e perspectivas do corte a seco. Os autores mostraram dados relacionados ao uso de fluidos de corte nas indústrias automobilísticas alegando que este produto tem uma influência significativa no custo da produção das peças com cerca de 7 % a 17 % no valor do item. Também foi destacado que às empresas não possuíam as informações necessárias para saber o custo mais preciso relacionado ao uso dos fluidos de corte, que dependem de vários elementos como seu monitoramento e manutenção, mão de obra especializada, precauções de segurança. Como alternativa foi sugerido que a opção mais viável para eliminar os problemas dos fluidos de corte seria a sua não utilização, e passar a aplicar o corte a seco desde que atinja a qualidade das peças desejadas, vida das ferramentas cabível e um tempo de produção admissível.

Entretanto, vários autores não concordam que é possível aplicar a usinagem a seco apenas com a não utilização dos fluidos de corte. Durante o corte a seco a elevação do atrito entre a ferramenta e a peça e a geração de calor devido à deformação do material aumentam significativamente a temperatura, resultando em maiores níveis de abrasão, oxidação e difusão na ferramenta e conseqüentemente, uma menor vida (MACHADO et al., 2011). A peça a ser usinada também pode sofrer problemas devido à grande geração de calor durante o corte, dificultando a obtenção de tolerâncias estreitas e danos metalúrgicos que podem ocorrer em sua superfície (DEBNATH et al., 2014). Para que se obtenha uma operação de corte mais eficaz, os efeitos de lubrificação, refrigeração, remoção de cavaco e a redução da

ocorrência de quebra da ferramenta devem ser atingidos através de soluções complementares que podem ser revestimentos na ferramenta, novos materiais para ferramentas de corte ou técnicas alternativas de refrigeração sem a necessidade/minimização da utilização de fluidos de corte.

2.3 Técnicas “verdes” de refrigeração na usinagem

Devido aos problemas ambientais que a aplicação dos fluidos de corte causa e do aumento de temperatura gerado durante a usinagem a seco, é de se esperar que propostas mais sustentáveis surjam a fim de refrigerar a zona de corte de uma forma mais eficiente e limpa. Das técnicas de refrigeração aplicadas a usinagem, é possível encontrar na literatura diferentes patentes, pesquisas e metodologias que já são aplicadas em indústrias ou que mostram tendências de utilização.

Dentre as patentes, como exemplo, pode-se citar a patente de Zerkle (1971) que retrata a utilização da refrigeração interna da ferramenta num ciclo fechado. O sistema de refrigeração para ferramentas de corte inclui uma cavidade interna com uma superfície que troca o calor utilizando um fluido numa câmara que se comunica somente com um reservatório de fluido externo. A patente de Stoll; Jaeger (2003) propõe um método que utiliza canais de refrigeração interno na ferramenta como mostra a Figura 2.3(a), para entregar na zona de corte dióxido de carbono (CO₂) em forma de um sistema aberto, onde este fluido é transmitido através de um tanque, conforme ilustrado na Figura 2.3 (b).

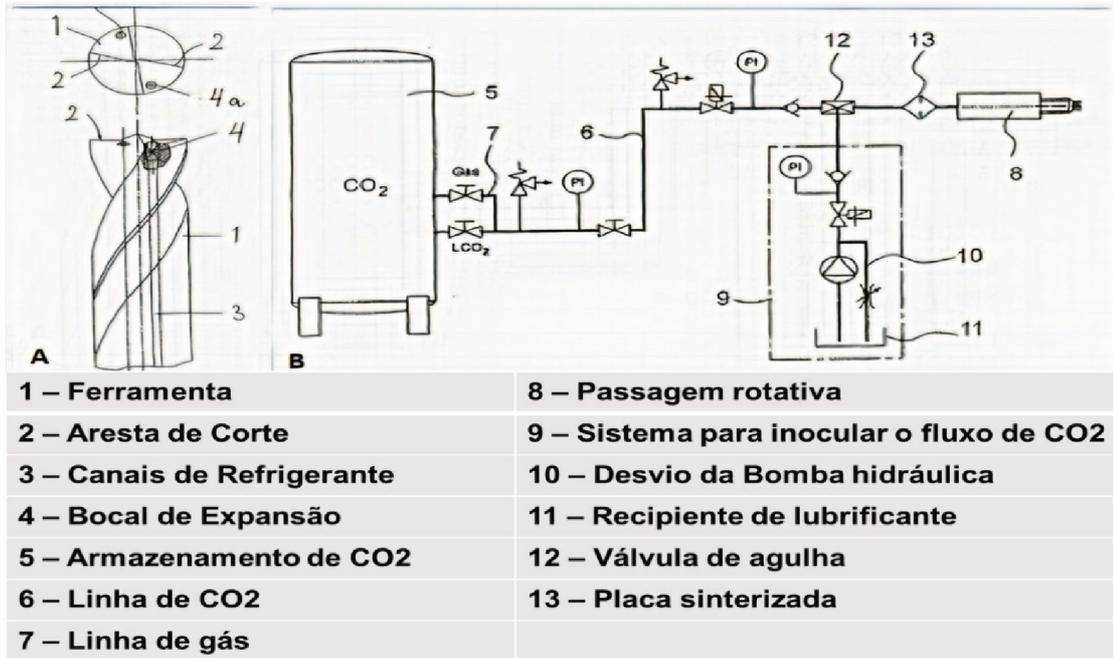


Figura 2.3 - (a) Ferramenta com canais internos de CO₂. (b) Sistema de entrega de CO₂. Adaptado de : (STOLL, JAEGER, 2003).

Outros exemplos são as patentes de (PAVLOVICH et al., 2017) e (FIOCCHI et al., 2016).

Pavlovich et al. (2017) apresentaram um sistema de refrigeração para o torneamento que se baseia em um dispositivo de refrigeração para ferramentas de corte através de dois trocadores de calor, onde uma célula de Peltier é inserida dentro de um tanque com fluido refrigerante. Nenhuma pesquisa experimental foi realizada, porém foi afirmado que esse dispositivo tem capacidade de aumentar a vida da ferramenta em torno de 1,5 vezes.

Fiocchi et al. (2016) utilizaram o porta-ferramenta como dispositivo de expansão em um sistema de refrigeração. Um ponto importante dessa patente é que, por utilizar fluidos de refrigeração, caso ocorra algum vazamento, há perigo de comprometer a saúde do operador devido a sua toxicidade, e também de poluir o meio ambiente. Esta patente também foi estudada no trabalho de Ingraci Neto et al. (2016) onde foi avaliado o valor médio de temperatura e vida da ferramenta na usinagem do aço ABNT 1045. Como resultado, foi observado uma diminuição de 10% na temperatura média na zona de contato cavaco/ferramenta. Comparando ao torneamento interrompido, o resfriamento interno foi capaz de estender a vida das ferramentas de corte em 58 % e 13 % em relação à aplicação de fluido de corte e corte a seco, respectivamente, e em torneamento contínuo a vida da ferramenta foi aumentada de 7 % e 45% em relação à aplicação de fluido de corte e corte a seco, respectivamente.

Além das patentes, há outros trabalhos que também tem o intuito de refrigerar a ferramenta de corte através de modificações. No trabalho de Rozzi et al. (2011) foi apresentado um sistema de arrefecimento interno para o torneamento, que consistiu em resfriar a ferramenta de corte através da circulação de nitrogênio líquido em microcanais inseridos abaixo da ferramenta de corte que servem como trocador de calor, nomeado de sistema de resfriamento interno (do inglês *Internal Cooled System*), conforme a Figura 2.4. Após experimentos de usinagem no aço inoxidável 416 o autor obteve resultados satisfatórios na vida da ferramenta em comparação a utilização do fluido de corte convencional, conforme mostra o gráfico da Figura 2.5.

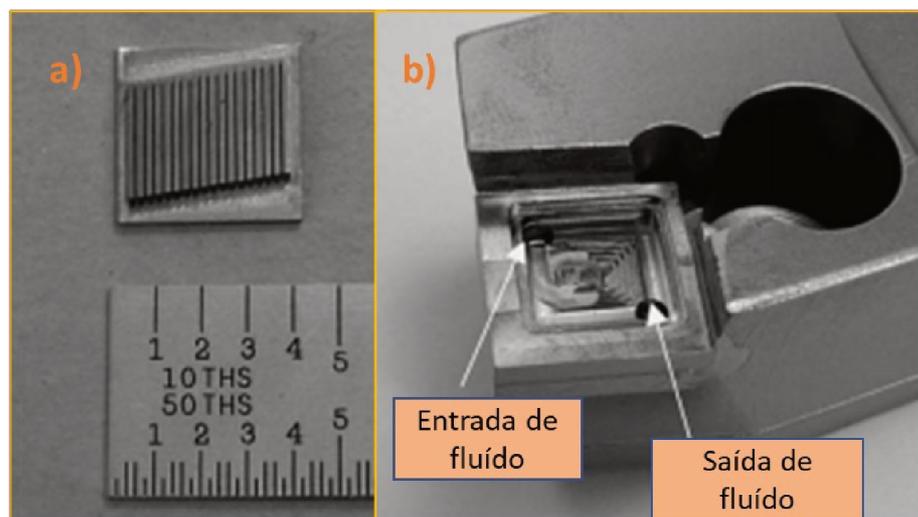


Figura 2.4 - (a) Trocador de calor por micro canal. (b) Vista do porta-ferramenta após a brasagem do trocador de calor. Adaptado de: (ROZZI et al., 2011).

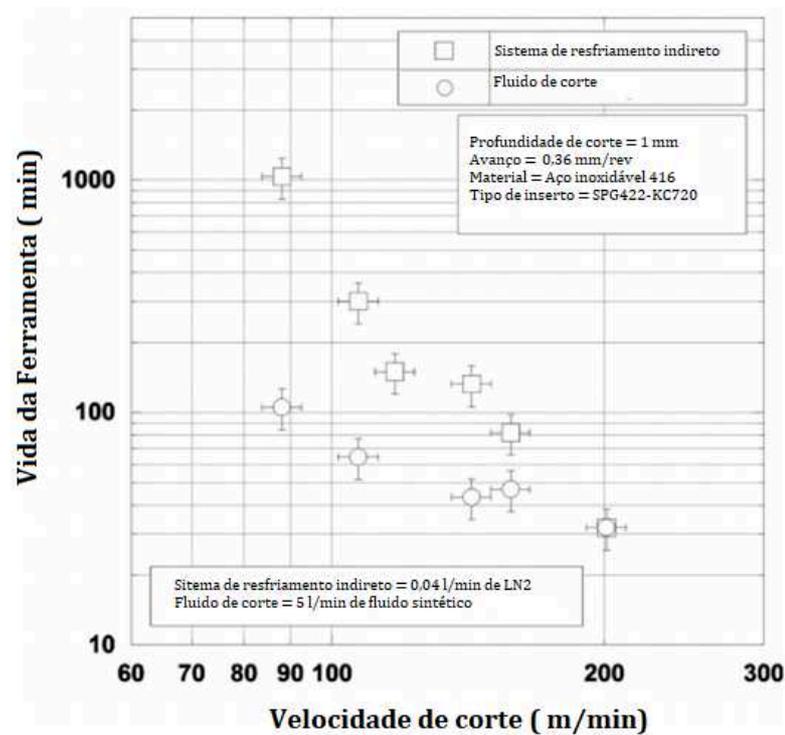


Figura 2.5 - Ensaio de vida da ferramenta utilizando fluido de corte e ICS. Adaptado de: (ROZZI et al., 2011).

Li et al. (2018) desenvolveram um sistema de arrefecimento em ciclo fechado para ferramentas de corte utilizando canais internos de refrigeração passando dentro do calço da ferramenta, como mostra a Figura 2.6a. Além destes canais internos, os autores fizeram um relevo no calço e o negativo deste relevo (reentrâncias) na ferramenta para aumentar a área de troca térmica e a eficiência deste sistema (Figura 2.6b).

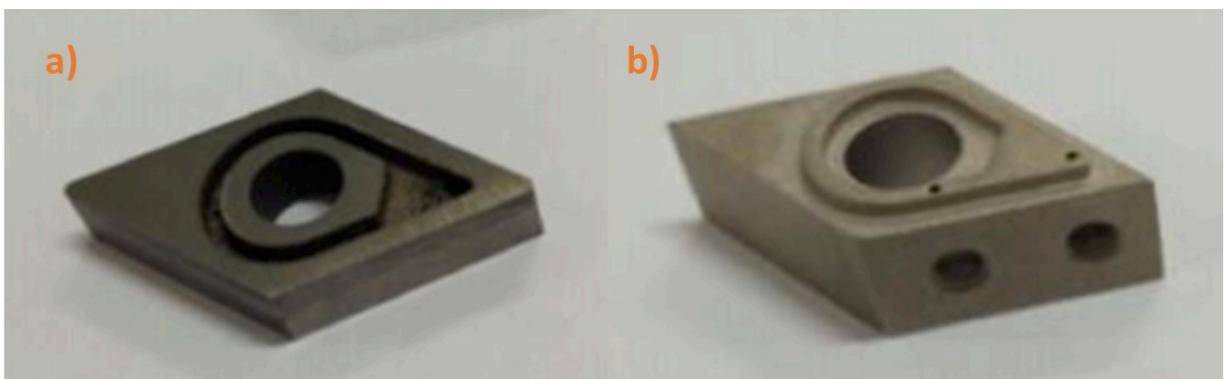


Figura 2.6 - a) Inserto modificado com os canais de refrigeração. b) Calço modificado para a inserção do inserto (LI et al., 2018).

Estudos de temperatura, deformação e desgaste da ferramenta foram realizados, comparando a eficiência de um inserto comum e dois com canais de refrigeração diferentes utilizando água a 11 °C como fluido refrigerante, um otimizado através de análises mecânicas e térmicas e um convencional, na usinagem a seco do aço AISI 1045 sob mesmas condições de corte. Nos ensaios de temperatura os autores obtiveram temperaturas de 22,56 °C, 38,88 °C e 110,31 °C para os insertos otimizado, convencional e sem modificação, respectivamente. Deformações na direção principal de corte encontradas foram de 0 a 0,0505 mm para o inserto otimizado e 0,03 a 0,0712 mm para um inserto convencional. Em relação ao desgaste das ferramentas, o sistema com inserto otimizado apresentou melhores resultados apresentando um desgaste de cratera de 19 µm comparado a 47 µm para o inserto convencional e um desgaste severo em um inserto comum.

2.4 Técnicas de medição de temperatura

O aumento de temperatura é bastante significativo na vida da ferramenta, dependendo dos valores de temperatura presentes na interface de corte, um mecanismo de desgaste pode prevalecer em relação a outro (SANTOS; SALES, 2007). Com isso e várias outras razões, vários pesquisadores buscam métodos que possam controlar ou inspecionar as temperaturas na usinagem a fim de uma melhoria no processo de corte. Na parte de determinação de temperatura encontra-se presente na literatura diversas técnicas que podem ser realizadas para colher esses valores que normalmente apresentam-se nas formas analíticas, numéricas e experimentais. Porém, mesmo existindo vários métodos, até hoje não há um que demonstre ao certo as temperaturas exatas que estão presentes nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, apenas uma estimação, pelo motivo de serem zonas de difícil acesso.

2.4.1 Técnicas numéricas

2.4.1.1 Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) tem sido uma ferramenta muito popular em análises de operações de usinagem, em particular para problemas que se deseja estudar a distribuição de temperatura em insertos de usinagem.

Para Nascimento (2011) o MEF consiste na discretização de um meio contínuo em vários elementos pequenos. A formulação do método dos elementos finitos requer a existência de uma equação integral, de forma que seja possível substituir a integral sobre um

domínio complexo (com um volume V) para um somatório de várias integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (com volume V_i). Dessa forma, pela Equação (2.5) tem-se que:

$$\int_V f \, dv = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dv \quad (2.5)$$

Com isso, pressupõe:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.6)$$

Os subdomínios V_i são elementos finitos de várias geometrias (triangular, quadrangular, paralelepipedal e tetrahedral). Isto é, em elementos finitos, o domínio que a função é definida é dividida em vários subdomínios de geometrias mais simples, para que seja possível realizar os cálculos.

Para Maranhão et al. (2016), uma das principais vantagens deste método é que ele permite efetuar análises detalhadas que dificilmente seriam obtidas através dos métodos de medição experimental, além da sua flexibilidade, que pode ser utilizado de forma mais abrangente.

Han; Wu (2010) estudaram um modelo termomecânico acoplado em 3D no processo de furação desenvolvido no *software AdvantEdge™ da Third Wave Systems*, onde foram analisadas as forças de corte e temperatura na usinagem do aço AISI 1045 e da liga de titânio Ti-6Al-4V. A Figura 2.7 mostra as malhas que foram realizadas na peça e na ferramenta. No modelo, a peça usinada foi considerada como sendo elásto-plástica, dessa forma, conforme o cavaco se forma, a malha da região de corte é automaticamente redefinida. Como resultado, os autores indicaram que os dados obtidos nas simulações foram condizentes com os experimentais, apresentando maiores valores de força na usinagem do aço AISI 1045 em relação a liga de titânio Ti-6Al-4V e maiores temperaturas na usinagem da liga de titânio Ti-6Al-4V.



Figura 2.7 - (a) Malha da broca; (b) Malha da Peça. (HAN; WU, 2010).

Li; Albert (2007) estudaram as distribuições de temperatura em uma broca de 9,92 mm de diâmetro com canais de refrigeração interno na furação da liga de titânio Ti-6Al-4V, através de um modelo finito térmico utilizando o método de transferência de calor inverso. Foi comparado resultados experimentais e numéricos. Pelos resultados de modelagem, confirmou-se que a aplicação de um fluido circulando internamente às brocas tem influência bastante significância. A uma velocidade de corte de 183 m/min (periférica) os autores encontraram uma redução de temperatura de 1210 °C para 651 °C comparando brocas refrigeradas internamente e sem refrigeração (a seco). Além disso, observou-se maiores temperaturas localizadas próximas da aresta de corte do inserto, onde a velocidade de corte (periférica) é maior. A Figura 2.8 e a Figura 2.9 mostram os resultados encontrados utilizando brocas refrigeradas e sem refrigeração.

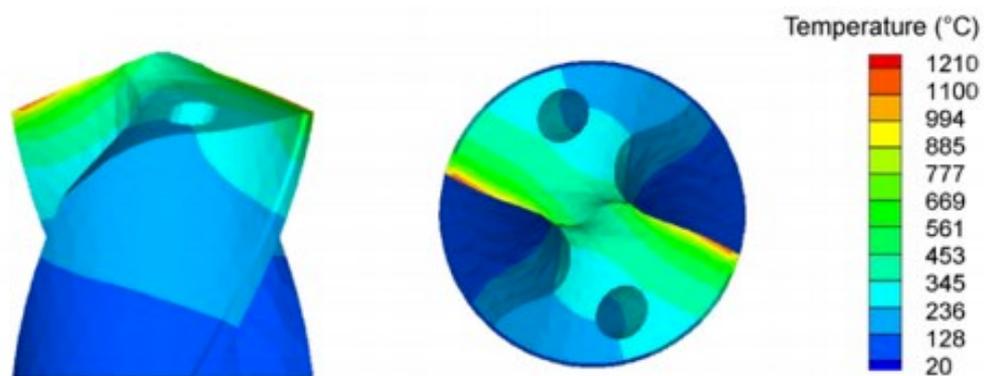


Figura 2.8 - Distribuição de temperatura em uma broca de metal duro após 10,2 mm de profundidade de perfuração a uma velocidade de corte de 183 m/min sem a utilização de refrigeração interna (a seco) (LI; ALBERT, 2007).

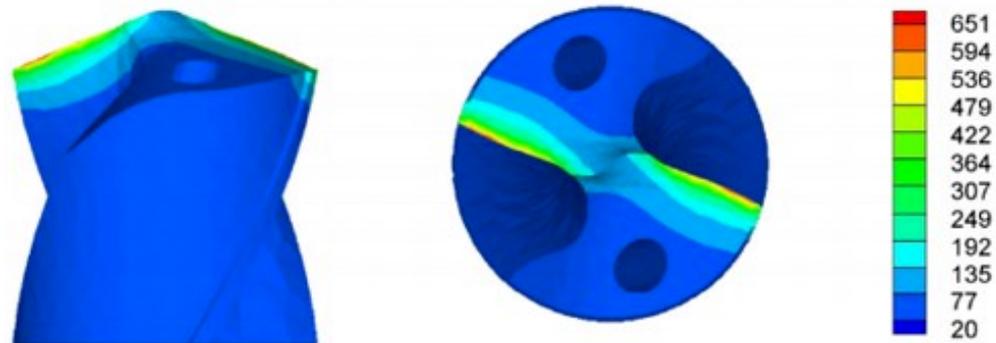


Figura 2.9 - Distribuição de temperatura (em °C) em uma broca de metal duro após 10,2 mm de profundidade de perfuração a uma velocidade de corte de 183 m/min com refrigeração interna (LI; ALBERT, 2007).

2.4.1.2 Métodos Inversos

As técnicas inversas são aplicadas para determinar causas desconhecidas baseando-se na observação de seus efeitos. Problemas inversos em condução podem ser considerados como uma classe especial dentro das técnicas de problemas inversos. Os principais atributos destes problemas são: usar temperaturas medidas experimentalmente, modelar o problema térmico baseando-se na equação da difusão de calor para determinar outros parâmetros térmicos, tais como, o fluxo de calor superficial ou a obtenção da temperatura em uma face da ferramenta sem acesso direto Carvalho (2005).

Na usinagem, o método inverso é utilizado para estipular propriedades que não são possíveis de serem definidas experimentalmente, como a temperatura na interface cavaco-ferramenta. Como alternativa, determina-se a temperatura em regiões de fácil acesso da ferramenta para estimar a taxa de transferência de calor, e com isso encontrar a temperatura na interface cavaco-ferramenta.

No trabalho de Liang et al. (2013) foi apresentado uma abordagem tridimensional em regime permanente, através da técnica de métodos inversos em condução, onde foi estimado a temperatura na interface cavaco-ferramenta no torneamento a seco do aço AISI-1045, utilizando ferramentas de metal duro da classe P10. Para medir a temperatura na ferramenta foi utilizado a medição por infravermelho em sua superfície de saída para registrar a temperatura após a interrupção do movimento de avanço.

Kryzhanivskyy et al. (2017) determinaram a distribuição de temperatura em uma ferramenta de corte durante o torneamento de um aço endurecido e encruado com dureza de HRc 58, se baseando em dados experimentais. Tais dados foram obtidos pela medição de termopares, que foram inseridos no porta-ferramenta, calço e no inserto de PCBN. Foi

resolvido um problema inverso, onde os fluxos de calor foram calculados. A distribuição de temperatura foi modelada para as ferramentas. Baseado nos dados experimentais os autores conseguiram resultados próximos para a distribuição de temperatura reconstruída. Como conclusão obteve-se que o fluxo de calor na superfície de saída reduziu com o aumento da condutividade térmica do material da ferramenta.

Liang et al. (2011) utilizaram um sistema de refrigeração partindo da utilização de tubos de calor para diminuir a temperatura de corte no torneamento a seco do aço AISI 1045. Para determinar a temperatura de corte na interface cavaco-ferramenta, o autor utilizou as técnicas de problemas inversos e diferenças finitas. Como resultado, foi encontrado que com o aumento da velocidade de corte, a temperatura e o fluxo efetivo de calor aumentaram. Além disso, com a utilização do sistema de refrigeração de tubos de calor concluiu-se que a temperatura pode abaixar, onde essa redução é mais evidente para casos em que a velocidade de corte é maior.

2.4.2 *Técnicas Analíticas*

É possível modelar os problemas de usinagem analiticamente. Para isso é necessário definir um domínio no qual o problema seja representado por meio da equação da difusão de calor, que pode ser tratado de forma unidimensional, bidimensional e tridimensional. Segundo Carvalho (2005) em problemas de usinagem, devido à sua complexidade, não é possível estabelecer as condições de contorno diretamente, sendo então necessário fazer algumas considerações, que podem ser nas trocas convectivas do meio ambiente, nas propriedades dos materiais ou até na geometria da ferramenta, o que causa limitações.

No trabalho de Ulutan et al. (2009) foi desenvolvido um modelo analítico termomecânico que prevê as tensões residuais durante um processo de usinagem. Neste modelo é realizado uma acoplagem entre o campo térmico da peça e as forças mecânicas de corte. Para sua resolução, alguns parâmetros são considerados com base na primeira lei da termodinâmica que são: energia criada na zona de cisalhamento primária, energia de atrito produzida na superfície de saída, balanço térmico entre cavaco, ferramenta e peça. Já as distribuições de temperatura na peça, ferramenta e cavaco são resolvidas usando o método de diferença finita. O campo de temperatura calculado na peça é usado nos cálculos da carga térmica, e as tensões resultantes da carga térmica e mecânica são calculadas usando um modelo elasto-plástico analítico. O modelo foi verificado com medições experimentais das tensões residuais em um mancal de aço 100Cr6, mostrando uma precisão aceitável e um rápido tempo de processamento em comparação a outros modelos existentes.

Radulescu; Kapoor (1994) propuseram um modelo tridimensional analítico que determina os campos de temperatura durante usinagem com corte interrompido e corte contínuo. O problema térmico foi dividido em três subgrupos: obtenção do calor gerado no contato da ferramenta com a peça, comportamento de temperatura no inserto e comportamento na peça. O calor gerado na zona de corte foi calculado de acordo com a força de corte. O campo de temperatura nos dois meios foi obtido a partir do conhecimento do fluxo de calor total e do modelo analítico da ferramenta e do cavaco. No modelo analítico tridimensional transiente do inserto, as condições de contorno foram simplificadas desprezando-se efeitos convectivos e de resistência de contato. No modelo analítico tridimensional do cavaco a formulação foi válida para o regime quase permanente.

2.5 Técnicas Experimentais

Das técnicas experimentais existentes há várias formas de se determinar as temperaturas de usinagem, porém cabe ao autor escolher qual delas será a mais apropriada para tal situação, pois qualquer técnica de medição em usinagem utilizada apresentará vantagens e desvantagens. Dentre os métodos experimentais pode-se citar: infravermelho, termopares implantados, tintas termo sensíveis, medição utilizando pós químicos e o termopar ferramenta-peça. Todas essas técnicas serão discutidas nos tópicos a seguir, onde será dado uma ênfase maior ao método do termopar ferramenta-peça, que foi a técnica utilizada neste trabalho.

2.5.1 Medição por Infra-Vermelho

Descoberto em 1800 por Willian Herschel, o método infravermelho (Figura 2.10) é comumente utilizado em medições de temperatura na usinagem. Essa medição é realizada através da radiação que é emitida pela zona de corte, que é relacionada a uma certa escala de temperatura (SULLIVAN; COTTERELL , 2001). O processo de medição consiste na exposição do corpo aquecido a um sensor óptico conhecido como pirômetro ou infravermelho. Este sensor recebe a radiação térmica e gera um sinal elétrico com uma força eletromotriz (f.e.m) que pode ser detectada a partir de um voltímetro. Com isso, este sinal pode ser relacionado a uma escala de temperatura, fornecendo os valores da temperatura na região (CARVALHO, 2005).

Uma de suas desvantagens é que a temperatura captada é a média das temperaturas da região da área de foco do instrumento. Além do mais, é necessário conhecer a

emissividade da superfície que será feita a medição. Para casos em que a ferramenta varie sua emissividade durante a operação de usinagem, esta técnica se torna inadequada (CARVALHO, 2005). Porém, a utilização deste método não envolve a necessidade de contato com a superfície analisada, resultando em uma medição sem intervenção do campo de temperatura original, o que não ocorre em algumas técnicas experimentais (NASCIMENTO, 2011).

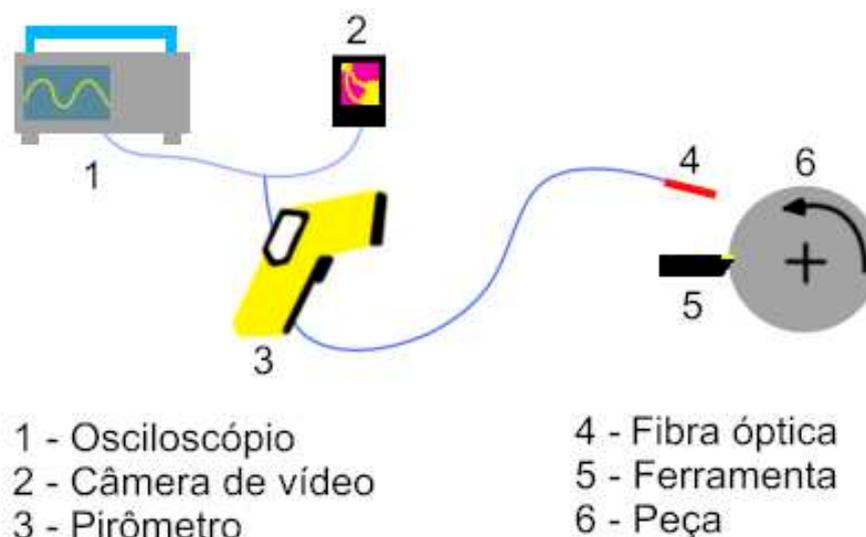


Figura 2.10 - Aparato experimental de uma medição de temperatura por infravermelho.

2.5.2 Termopares Implantados

Este método consiste na inserção de termopares de pequenos diâmetros internamente a ferramenta de corte em diversas posições através de micro furos. Geralmente, estes micros furos são feitos por um processo de eletroerosão, onde por intermédio de um termopar próximo a zona de geração de calor é feita uma estimativa da temperatura na superfície da ferramenta. Como desvantagens este método apresenta uma certa dificuldade em instalar os termopares, devido ao pequeno tamanho da ferramenta, além da alteração dos efeitos da difusão que o micro furo provoca por conta da inserção do termopar, por isso recomenda-se realizar apenas um micro furo, uma vez que este tem influência significativa na qualidade dos resultados obtidos (CARVALHO, 2005). A Figura 2.11 ilustra o esquema de medição de temperatura utilizando esta técnica.

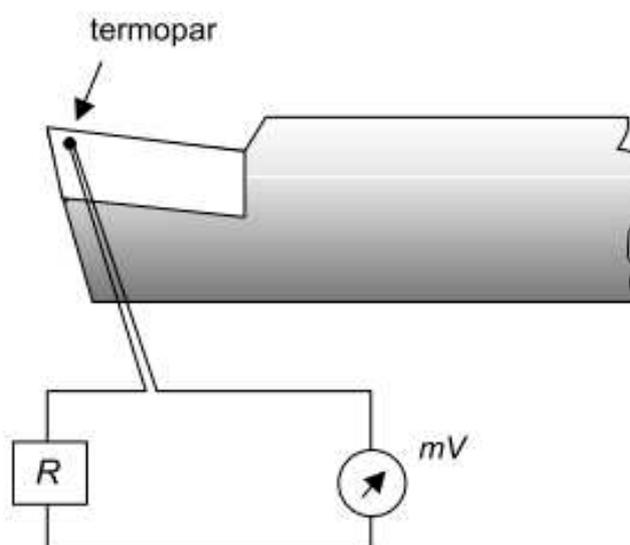


Figura 2.11 - Aparato experimental para medição de temperatura da ferramenta de corte com inserção de termopar (MELO, 1988).

2.5.3 Vernizes Termosensíveis

De acordo com Machado et al. (2011), esta técnica se dá pela prática de vernizes (ou tintas termosensíveis) que são capazes de mudar de cor conforme exposto a uma determinada temperatura, devido às propriedades físicas da substância, ou devido à reações químicas devido a essa temperatura. A aplicação de vernizes pode ser feita apenas em superfícies expostas, limitando sua aplicação em superfícies de contato. Além disso, em alguns casos, de acordo com o produto utilizado pode ser que haja problemas, visto que o tempo de início da reação é de milissegundos, enquanto o da reação total pode chegar a cerca de 10 minutos.

2.5.4 Medição através de pós químicos

Esta técnica proporciona a visualização da distribuição de temperatura em uma seção da ferramenta de corte. Para isso a ferramenta é dividida por meio de duas ferramentas semelhantes, que são usinadas por abrasão até atingirem metade de sua largura original. Ambas as superfícies são umedecidas com uma solução de silicato de sódio, de forma a facilitar a adesão do sal, que é distribuído sobre a superfície. Então, as duas partes da ferramenta são unidas e tem início a etapa de usinagem, que tem duração o suficiente para que todo o sistema entre no estado de regime permanente. Quando as partes da ferramenta são separadas, será possível observar regiões em que o sal se encontra no estado sólido e

outras fundidas, assim é possível traçar uma linha isotérmica em que sua temperatura corresponderá a temperatura de fusão do sal. Dessa forma, ao variar o tipo de sal utilizado durante o processo será possível traçar novas isotermas que correspondem à distribuição de temperatura da superfície (SANTOS; SALES, 2007). A Figura 2.12 ilustra a esquemática deste processo.

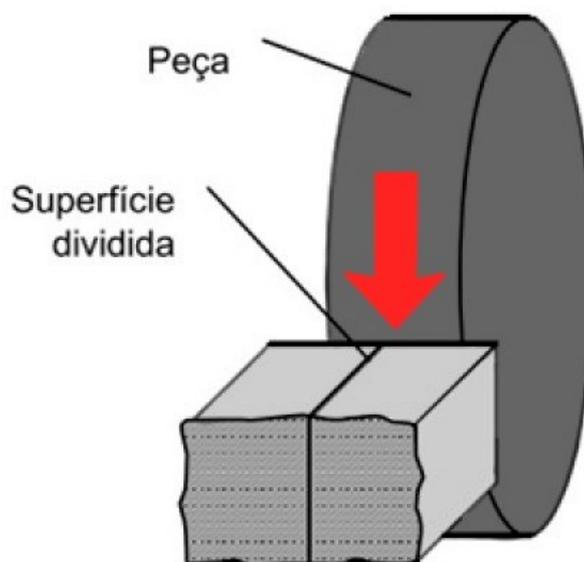


Figura 2.12 - Esquematização do método de determinação da distribuição de temperatura através de pós químicos. Adaptado de: (SANTOS; SALES, 2007).

2.6 Termopar ferramenta-peça: leis, sistema e metodologias

2.6.1 Lei dos Termopares

Segundo (DOEBELIN, 1990) e (TAYLOR, 1988), os termopares apresentam 5 leis fundamentais.

1º Lei: a f.e.m de um circuito termopar que tem suas junções sujeitas a temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente, não dependem de demais temperaturas durante o circuito, contando que dois materiais condutores A e B sejam homogêneos, conforme a Figura 2.13.

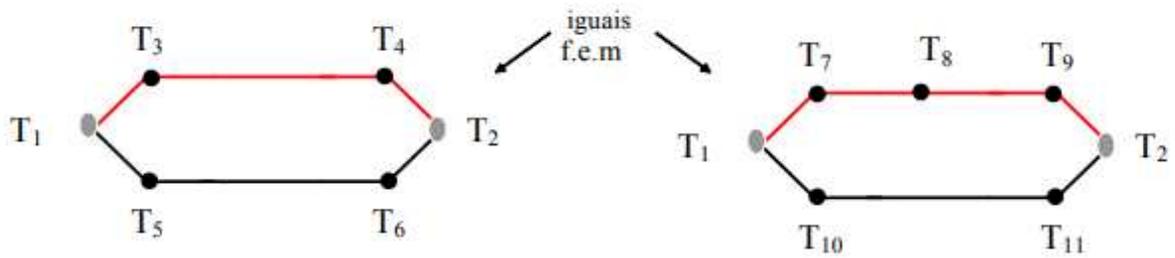


Figura 2.13 - Ilustração mostrando a equivalência entre dois circuitos termopares submetidos internamente a diferentes temperaturas (KAMINISE, 2012).

2ª Lei: se um terceiro condutor C for adicionado no sistema entre A e B, e se suas junções estiverem submetidas a uma mesma temperatura T_3 , a f.e.m permanece invariável, independente da variação de temperatura por toda extensão C.

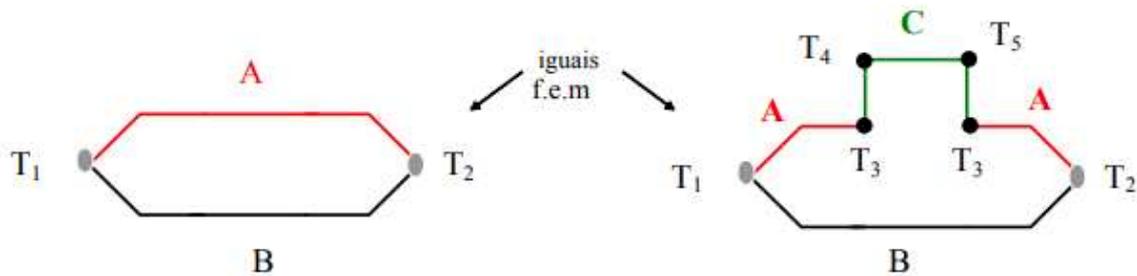


Figura 2.14 - Desenho esquemático mostrando a inclusão de um condutor C em torno do sistema (KAMINISE, 2012).

3ª Lei: caso um material C seja acrescentado nas junções entre A e B, e se houve diferenças de temperatura ao longo do sistema, a f.e.m permanece inalterável, desde que essa diferença não ocorra nas juntas AC e BC submetidas a mesma temperatura T_1 , conforme ilustrado na Figura 2.15 (KAMINISE, 2012).

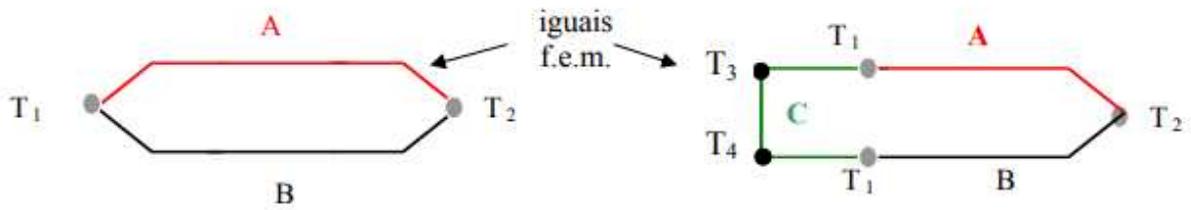


Figura 2.15 - Efeito da inserção de um material C em uma das junções, entre os ramos A e B de um termopar (KAMINISE, 2012).

4ª Lei: seja a f.e.m dos metais A e C E_{ac} e dos metais B e C E_{bc} , então a f.e.m de A e B é igual a $E_{ac}+E_{bc}$, conforme a Figura 2.16.

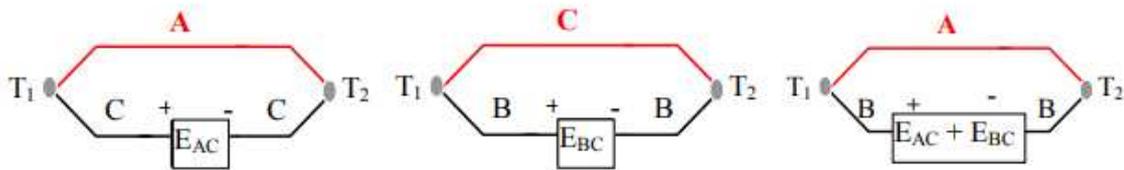


Figura 2.16 - Propriedade associativa da f.e.m entre materiais de um termopar (KAMINISE, 2012).

5ª Lei: se no sistema do termopar uma f.e.m E_1 é produzida quando suas junções estão submetidas as temperaturas T_1 e T_2 e uma f.e.m E_2 caso seja submetido a temperaturas T_2 e T_3 , então o sistema produzirá E_1 e E_2 quando for submetido as temperaturas T_1 e T_3 , respectivamente.

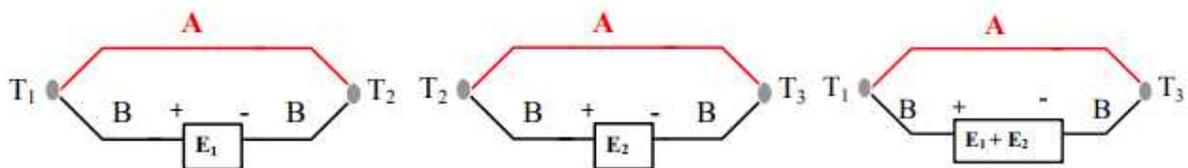


Figura 2.17 - Propriedade associativa da f.e.m entre diferentes temperaturas das junções do termopar (KAMINISE, 2012).

2.6.2 Sistema do Termopar Ferramenta-Peça

Sendo uma técnica bem antiga, segundo Leshock; Shin (1997) a técnica de medição do termopar ferramenta-peça ou termopar dinâmico foi desenvolvido no começo do século XX concomitantemente por três pesquisadores distintos: (GOTTWEIN, 1925), (SHORE, 1925) e (HERBERT, 1926). Das técnicas experimentais de medição de temperatura em usinagem este método é um dos mais utilizados pois não depende da modificação da ferramenta de corte, podendo então ser aplicado em diversas ocasiões, além de possuir um baixo custo. Na literatura é possível encontrar esta técnica de medição aplicada a várias operações de usinagem como furação (AGAPIOU;STEPHENSON, 1994) fresamento (LEZANSKI;SHAW, 1990),(GONÇALVES, 2017) e torneamento (LESHOCK; SHIN, 1997), (KAMINISE, 2012), (LIMA JUNIOR, 2020).

A configuração deste sistema é considerada simples e baseia-se no princípio de funcionamento de um termopar, que consiste em dois materiais condutores diferentes que possuem ao menos uma conexão elétrica denominada de junta ou junção. Quando essa junta é submetida a uma diferença de temperatura, pela lei de *Seebeck*, uma f.e.m será formada. Essa f.e.m é proporcional a essa diferença de temperatura. A Figura 2.18 demonstra um circuito básico sobre o termopar.

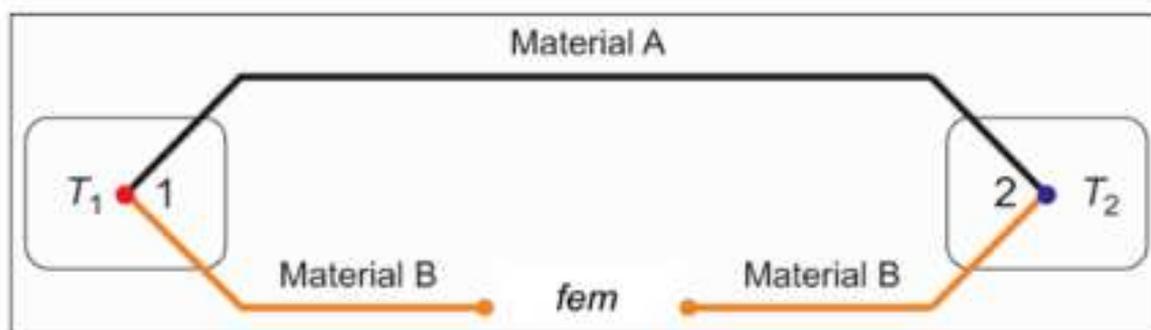


Figura 2.18 - Circuito Básico do termopar (LIMA JUNIOR, 2020).

Dessa forma, seguindo o princípio dos termopares, é possível montar uma bancada de medição de temperatura em usinagem. Durante a usinagem, no contato da ferramenta com a peça haverá um aumento de temperatura, esse aumento irá gerar uma f.e.m que pode ser amplificada e medida através de um voltímetro, originando o termopar ferramenta-peça. Pela Figura 2.19 é possível observar uma configuração deste sistema.

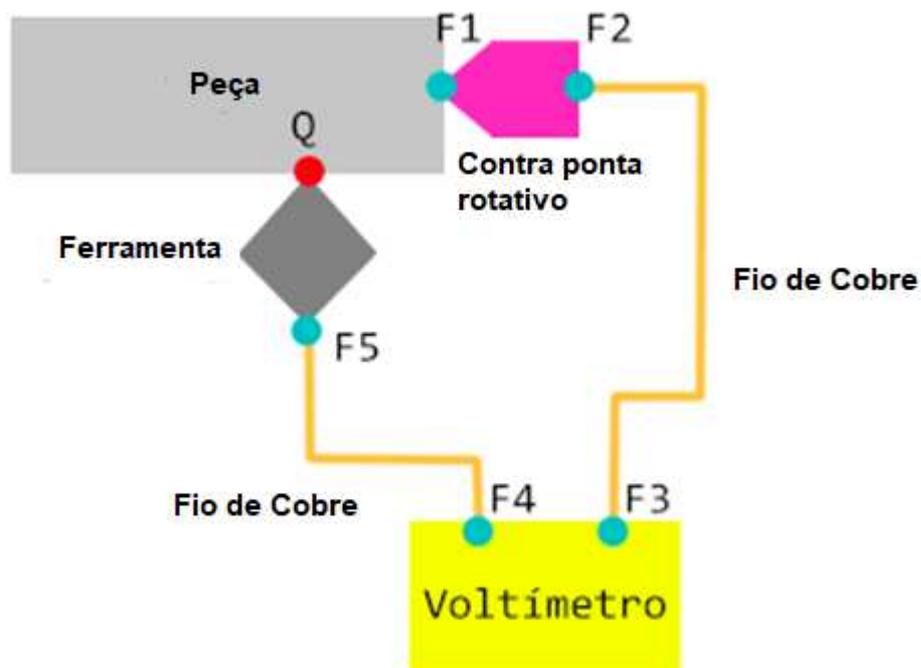


Figura 2.19 - Esquema representativo do termopar ferramenta-peça utilizando um contra ponta rotativo.

O ponto de encosto entre a ferramenta e a peça Q é denominado de junta quente (em vermelho), que reproduz a temperatura gerada durante a operação de usinagem. Já F₁, F₂, F₃, F₄ e F₅ representam as juntas frias (em azul). Nesta configuração utiliza-se um contra pontas rotativo onde o sinal elétrico é transferido através de uma cuba de mercúrio localizado internamente a esse componente. Com a conexão dos fios elétricos que saem das juntas F₅ (conexão da ferramenta a um fio elétrico) e F₂ (conexão do fio elétrico ao mercúrio do contra pontas) em F₃ e F₄ é possível obter o sinal elétrico do sistema e assim determinar as temperaturas de usinagem (MACHADO et al., 2011).

Na literatura, além da configuração mostrada antes, é possível encontrar outros sistemas de termopares, e o que difere cada um geralmente está na forma de como é feito o componente que transfere o sinal elétrico da peça para o voltímetro, não sendo uma tarefa simples, pois durante o processo de corte a peça estará em movimento rotatório (KAMINISE, 2012). Algumas técnicas foram desenvolvidas para conduzir o sinal do corpo de prova para o instrumento de medição. Entre elas pode-se citar as configurações em que é utilizado um componente de mercúrio como condutor.

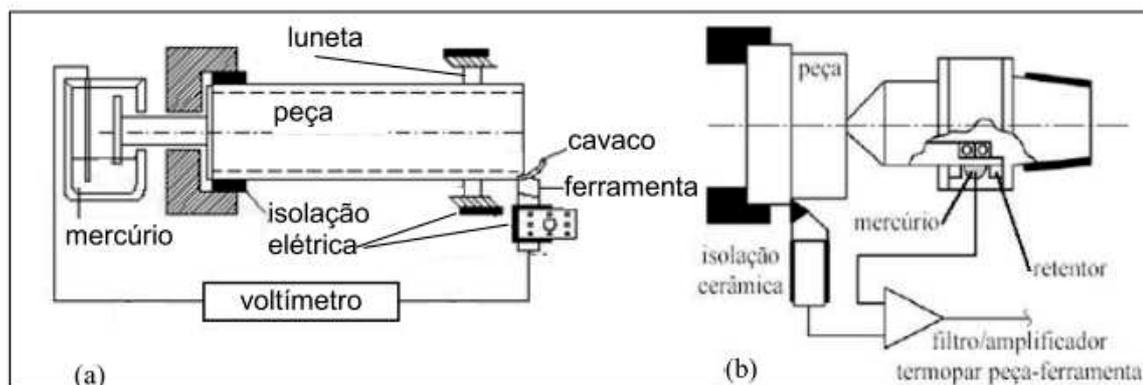


Figura 2.20 - Aplicações utilizando mercúrio no sistema do termopar ferramenta-peça. (a) Pelo eixo árvore do torno (GÖKKAYA et al., 2006); (b) Por um contra ponta rotativo (INGRACI et al., 2011).

Na Figura 2.20a é apresentado uma banca experimental a partir de um disco rotativo, onde um eixo com um disco fixo em uma de suas extremidades é acoplado concentricamente à face do corpo de prova que fica presa na placa do torno. O isolamento elétrico é realizado internamente ao eixo árvore para que o disco fique na parte externa da máquina. Em volta do disco coloca-se uma cuba preenchida com mercúrio junto a um fio para que o sinal elétrico seja transmitido até o voltímetro. Aplicações deste método podem ser encontrados nos estudos realizados por (STEPHENSON, 1993) e (GRZESIK, 2003).

Na Figura 2.20b é ilustrado a bancada experimental utilizando um contra ponta com um mancal modificado com mercúrio interligado à sua estrutura. Pelo contato da ponta rotativa com o mercúrio que fica em contato com o fio elétrico, é possível transmitir o sinal até o voltímetro. O mercúrio junto ao fio elétrico se localiza em uma estrutura interna a este contra pontas. Estudos desenvolvidos que utilizam essa aplicação são (KAMINISE, 2012) e (LIMA JUNIOR, 2020).

Há também outras configurações do termopar ferramenta-peça que não se utiliza o mercúrio como condutor elétrico. Como exemplo, no trabalho de Santos et al. (2017) foi desenvolvido um sistema em que foi utilizado três escovas feitas de liga de alumínio como elemento de contato na seção transversal polida da barra a ser usinada. A eficácia desse sistema foi avaliada através da usinagem de diferentes ligas de alumínio, onde os autores perceberam valores consistentes de temperatura com os presentes na literatura durante a usinagem de ligas de alumínio. Além disso, como vantagem desse sistema, é dito que essa configuração permite usinar em condições mais severas, sem a necessidade de alterar os recursos geométricos do torno.

Segundo Leshock; Shin (1997) para que se tenha bons resultados nas medições de temperatura é importante levar em consideração alguns aspectos. Dentre eles estão: o

conjunto ferramenta-peça obrigatoriamente devem ser condutores elétricos, todo o sistema deve ser isolado eletricamente, a questão de como a força eletromotriz está sendo medida pelo termopar, as dificuldades presentes durante a calibração e as forças eletromotrizes parasitas criadas pelas juntas secundárias no sistema.

Para minimizar os efeitos dessas forças eletromotrizes parasitas é necessário que a temperatura das junções frias permaneça na mesma temperatura. Segundo Kaminise (2012) em sistemas em que as juntas frias são compostas por diferentes materiais pode haver uma devida dificuldade nesse controle de temperatura.

2.6.3 Investigação do circuito termoelétrico dos termopares

Basicamente, a bancada do termopar ferramenta-peça é formada por um sistema termoelétrico que envolve uma cadeia de elementos, e conseqüentemente várias junções além da formada pelo inserto e corpo de prova. A Figura 2.21 retrata o sistema termoelétrico do termopar ferramenta-peça.

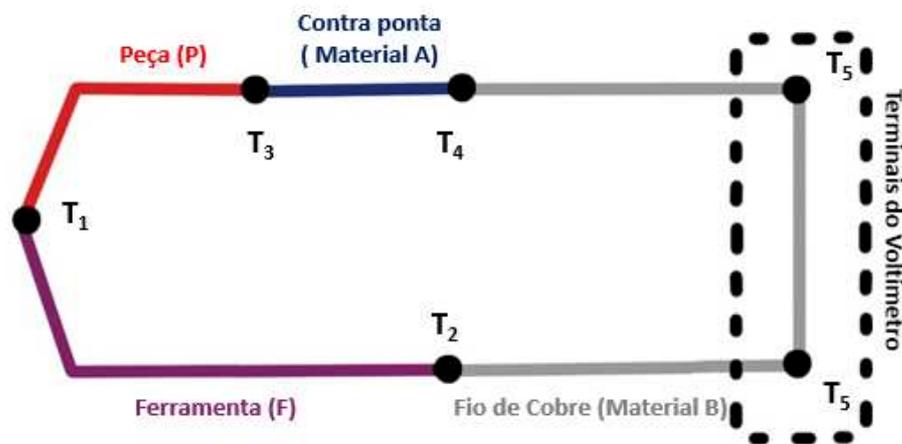


Figura 2.21 - Sistema termoelétrico do termopar-ferramenta peça. Adaptado de: (KAMINISE, 2012).

Considerando o sentido horário durante o levantamento da equação, é possível obter a equação que descreve seu circuito elétrico:

$$\Delta E = E_{FP} \cdot T_1 + E_{PA} \cdot T_3 + E_{AB} \cdot T_4 + E_{BF} \cdot T_2 \quad (2.7)$$

Cada parcela do somatório desta equação representa a f.e.m formada em cada junção de seus respectivos pares, onde essa f.e.m está em função da temperatura submetida. O

termo E_{FP} indica a f.e.m que é gerada entre o inserto e a peça sujeita à temperatura T_1 . E_{PA} representa a f.e.m gerada entre o corpo de prova e o material A sobre à temperatura T_3 . E_{AB} a f.e.m que relaciona a junta entre o metal A e o fio de cobre B em vista da temperatura T_4 e por fim, o último termo da equação E_{BF} indica a f.e.m formada pela conexão do fio de cobre e a ferramenta à temperatura T_2 .

Analisando a Equação (2.7), percebe-se que para descobrir a temperatura de interesse, da junta quente (T_1), é necessário ter o conhecimento das forças eletromotrices atuantes nas outras juntas do sistema (STEPHENSON, 1993). Por serem formadas por diferentes tipos de materiais e por normalmente apresentarem temperaturas relativas, as junções secundárias geram f.e.m.s que influenciam significativamente na f.e.m do sistema.

2.6.4 Sistema termoeletrico dos termopares com compensação física

Análogo ao sistema do termopar ferramenta-peça, o termopar ferramenta-peça com a adição de uma compensação física é uma proposta que, segundo Kaminise (2012) tem como objetivo minimizar o efeito das f.e.ms geradas pelas diversas juntas frias através da adição de um componente formado pelos dois materiais na cadeia que compõe o sistema padrão de medição, que são o material da peça A e material da peça P. E também para permitir a calibração na própria bancada de teste, que por outro lado, na maioria das vezes é realizado de forma externa, podendo não representar adequadamente o sistema de forma mais realista. A Figura 2.22 ilustra este circuito com o acréscimo da compensação física.

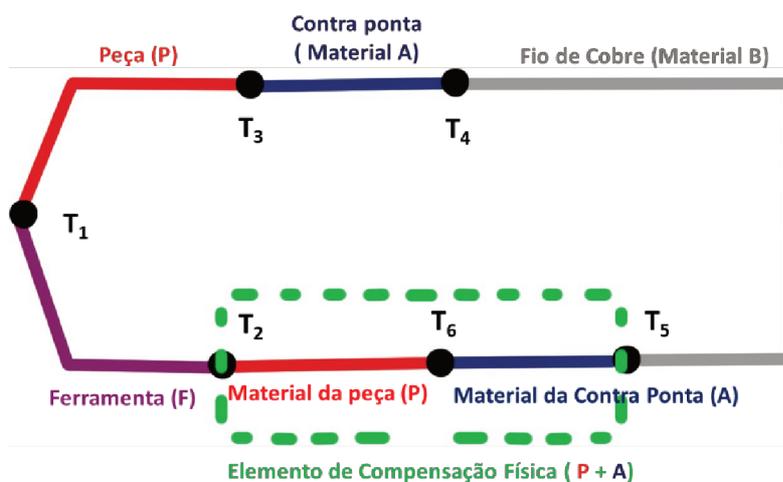


Figura 2.22 - Representação esquemática do sistema termopar ferramenta-peça com a adição de um elemento de compensação físico. Adaptado de: (KAMINISE, 2012).

Analisando o circuito padrão com o acréscimo da compensação física, obtém-se a Equação (2.8) (KAMINISE, 2012):

$$\Delta E = E_{FP} \cdot T_1 + E_{PA} \cdot T_3 + E_{AB} \cdot T_4 - E_{AB} \cdot T_5 - E_{PA} \cdot T_6 - E_{FP} \cdot T_2 \quad (2.8)$$

Ao considerar que as juntas frias distantes da zona de corte não sofrem variações de temperatura ao longo dos ensaios, tem-se as relações $T_3 = T_4 = T_5 = T_6$ e as seguintes igualdades (KAMINISE, 2012):

$$E_{PA} \cdot T_3 = E_{PA} \cdot T_6 \text{ e } E_{AB} \cdot T_4 = E_{AB} \cdot T_5$$

Dessa forma, com essas considerações adotadas, pela Equação (2.8) é possível chegar à Equação (2.9)

$$\Delta E = E_{FP} \cdot T_1 - E_{FP} \cdot T_2 = K (T_1 - T_2) \quad (2.9)$$

Isolando T_1 , chega-se na Equação (2.10)

$$T_1 = T_2 + \frac{\Delta E}{K} \quad (2.10)$$

Nota-se que, pela Equação (2.10) é possível obter as temperaturas de corte pela tensão ΔE medida por um voltímetro, sendo T_1 a temperatura média obtida na interface cavaco-ferramenta, T_2 a temperatura da junta que é formada pelo contato do elemento de compensação na ferramenta, e K a constante de *Seebeck*, que é obtida na calibração do sistema.

É necessário ter em mente, que as temperaturas obtidas em T_2 podem variar ao longo do processo de corte, principalmente em processos que são utilizados insertos (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006). Por isso, é necessário medir T_2 tanto na calibração quanto na realização dos ensaios e também levada em consideração durante a realização dos cálculos.

2.6.5 Calibração do Termopar Ferramenta-peça

Apesar de este método demonstre um funcionamento simples, há diversos problemas associados que segundo Leshock; Shin (1997) é necessário levar em consideração, que são:

- Forças eletromotrizes parasitas criadas pelas junções secundárias.
- A bancada de experimento requer um isolamento do termopar com o meio ambiente.
- A própria calibração do sistema.

Dentre os três problemas citados, pode-se dizer que a calibração é o mais importante, pois se ela não for feita de forma adequada, a temperatura medida não será condizente com a resposta real.

O principal propósito de calibrar o sistema termopar ferramenta-peça é determinar uma relação termoelétrica entre a ferramenta de corte e a peça. Dessa forma, durante a calibração é aplicado uma temperatura T_1 conhecida, de uma maneira que simule a junta quente, onde a partir de uma curva de calibração, com os resultados experimentais da f.e.m gerada durante os ensaios, determina-se a temperatura de usinagem T_1 (LIMA JUNIOR , 2020).

Na literatura encontra-se diversas formas de se calibrar o sistema do termopar ferramenta-peça. Dentre esses métodos os mais empregados são: utilização de um forno, aquecimento externo por uma chama e o aquecimento elétrico por resistência em volta da peça.

Segundo Tabak (2015), durante a realização da calibração, manter todas as juntas que não são pontos de interesse a uma temperatura constante é um ponto difícil de se evitar. Ao aquecer o ponto de interesse todo o corpo da ferramenta de corte será aquecido, ou seja, por condução, o calor gerado no contato da ferramenta com o material de usinagem fluirá pela ferramenta de corte, aquecendo pontos não desejados, como o contato da ferramenta de corte com o fio de cobre, gerando assim uma segunda junta com variação de temperatura distintas das demais. Algumas formas de se deter esse aumento de temperatura na maioria das vezes é prolongar o comprimento ou diâmetro do material submetido a variações de temperatura, pois assim, consegue-se diminuir/evitar o aumento de temperatura.

2.6.5.1 Calibração por forno indutivo

Na calibração por forno um de indução é simulado o aumento de temperatura no contato ferramenta-peça durante a usinagem através do material da ferramenta e o material da peça. Este processo é ilustrado na Figura 2.23.

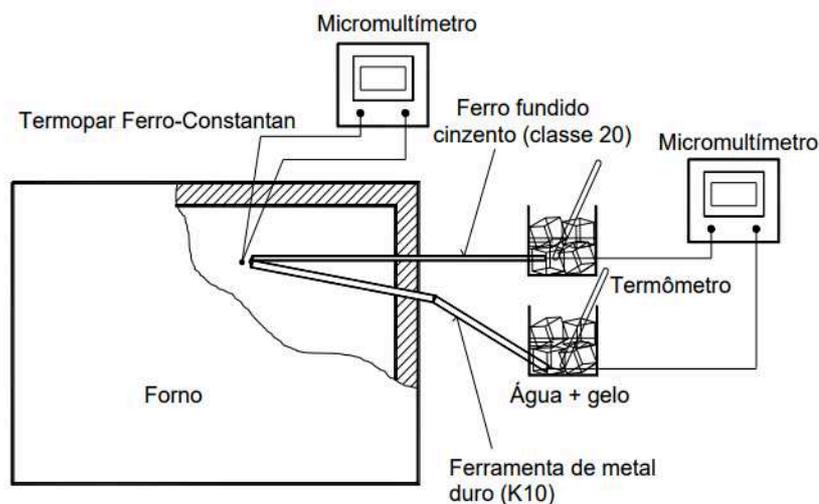


Figura 2.23 - Procedimento de calibração por forno indutivo (VILARINHO; MACHADO, 2000).

A conexão das hastes que são feitas a partir do material da peça e da ferramenta são levadas para dentro do forno que contém uma resistência elétrica, que quando aquecida, permite alcançar as temperaturas do processo de usinagem. No ambiente externo ao forno, nas outras extremidades das hastes, se faz a junta fria que geralmente é feita de uma mistura de água destilada com gelo, proveniente também de água destilada (VILARINHO; MACHADO, 2000). Alguns autores utilizam a temperatura ambiente como junta fria, porém não é recomendável devido à sua variação, o que dificulta a repetibilidade dos ensaios.

A temperatura da junta quente geralmente é fornecida através de um termopar previamente calibrado em suas proximidades. Todas as medições de temperatura são feitas na medida que a temperatura da junta quente entra em regime permanente, através de um voltímetro (NAVES et al, 2006). Tradicionalmente, o método mais comum de se realizar a calibração a forno indutivo é através da utilização de cavacos do material da peça. Porém, esta técnica se torna fácil de calibrar apenas em materiais que produzem cavacos longos durante sua usinagem, como por exemplo aços e alumínio (VILARINHO; MACHADO, 2000).

Uma característica intrínseca, da calibração a partir do forno indutivo é a sua histerese, conforme ilustrado na Figura 2.24, sendo possível realizar a calibração tanto no seu aquecimento quanto no seu resfriamento (FERNANDES; MACHADO, 1992).

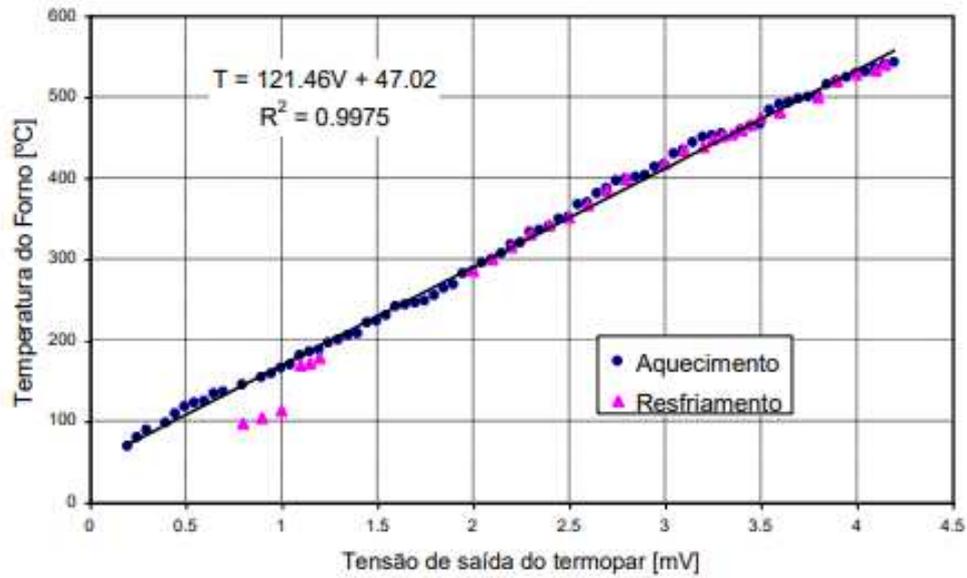


Figura 2.24 - Curva de calibração feita em um forno indutivo e sua histerese (VILARINHO; MACHADO, 2000).

2.6.5.2 Resistência Elétrica

Este método consiste em colocar em contato, sob pressão, a aresta de corte da ferramenta junto ao metal a ser usinado, onde este metal é sujeito a uma resistência elétrica que o aquecerá (Figura 2.25). Um termopar previamente calibrado é imposto na peça próximo a região de contato ferramenta/peça, que servirá como padrão de temperatura. Para evitar diferenças de temperatura entre o ponto de medição e a região de contato do termopar deve-se isolar o sistema termicamente (MACHADO et al., 2011).

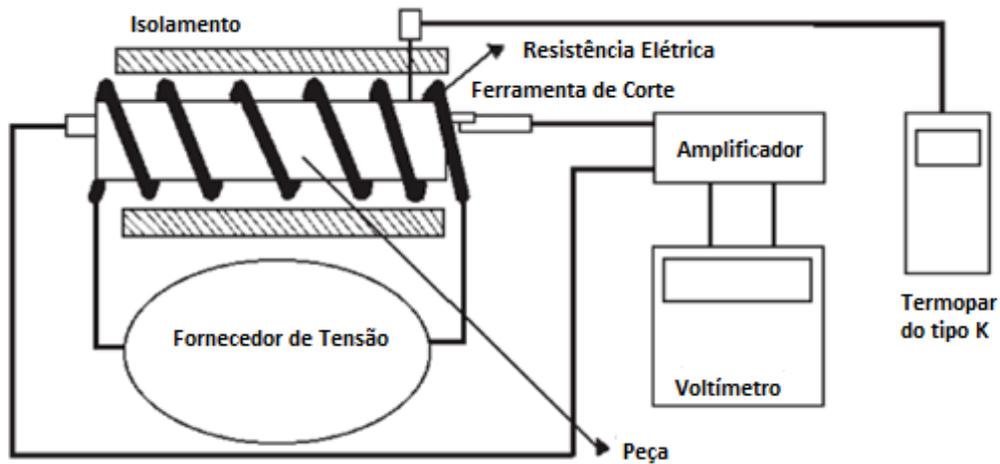


Figura 2.25 - Aparato experimental da calibração através de uma resistência elétrica enrolada em torno da peça Adaptado de : (REIS; ABRÃO, 2005).

2.6.5.3 Chama oxi-acetileno

A calibração do sistema através de uma chama a uma alta temperatura consiste em aquecer o material da peça até que se atinja as temperaturas de usinagem, e assim levantar a curva de tensão x temperatura. Diferente de alguns métodos de calibração, esta técnica apresenta a vantagem de poder ser realizada na própria bancada experimental, levando em conta toda a bancada experimental do termopar ferramenta-peça: Pela Figura 2.26 é possível observar uma configuração deste sistema.

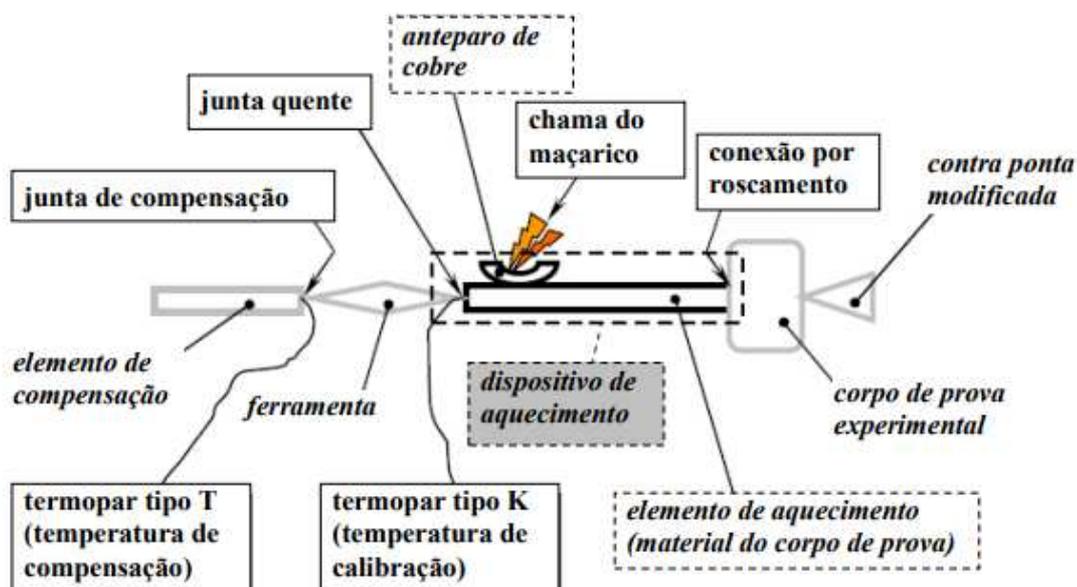


Figura 2.26 – Ilustração do esquema de calibração através de uma chama a gás oxiacetileno (KAMINISE, 2012).

Neste sistema, na própria bancada do termopar ferramenta-peça com elemento de compensação (inserto, peça, porta-ferramenta, elemento de compensação, contra ponta rotativo, fio de cobre, voltímetro), utiliza-se um dispositivo de aquecimento do mesmo material que a peça, que normalmente fica inserido dentro de um recipiente para evitar perdas térmicas para o meio ambiente. Este dispositivo fica em contato com a barra, onde é aquecido através de uma chama a gás de oxiacetileno. Com um termopar acoplado a uma das extremidades desse dispositivo, é possível monitorar a sua temperatura e assim quando aquecido, pelo movimento transversal do carro do torno, encosta-se a ferramenta sob pressão, que também será aquecida por transferência de calor, realizando a calibração do sistema (LIMA JUNIOR, 2020). Alguns autores fizeram estudos de temperatura na usinagem através da utilização deste método de calibração

Kaminise (2012) estudou o efeito que material do porta-ferramenta exerce nas temperaturas na interface cavaco/ferramenta. Foram estudados cinco tipos de porta-ferramenta de mesma geometria produzidos por diferentes materiais de condutividade térmica distinta. Como resultado concluiu-se que as temperaturas na interface ferramenta-cavaco não alteram significativamente ao alterar o material do porta-ferramenta.

Lima Junior (2020) fez um estudo das temperaturas de corte geradas no torneamento do aço-ferramenta AISI D6 temperado e revenido com o auxílio de nitrogênio líquido utilizando insertos inteiriços de nitreto cúbico de boro policristalino sem revestimento. Como resultado, percebeu-se que a redução da temperatura de corte pela aplicação do nitrogênio líquido se

tornou menos efetiva à medida que a velocidade de corte aumenta. Porém, no geral, essa redução de temperatura se comportou de uma maneira pouco significativa.

2.7 A usinagem dos ferros fundidos cinzentos

Dentre os metais, os ferros fundidos são um dos mais utilizados em diversos setores, não apenas pelas suas propriedades, mas principalmente pela sua versatilidade e o seu baixo custo. Os ferros fundidos são definidos como uma liga ternária Fe-C-Si, cujo o teor de carbono se situa acima de 2,0 % aproximadamente, porém, na prática, na maioria das vezes esse valor está entre 3 a 4,5 %. Há vários tipos de ferro fundido e o que os caracterizam é o estado em que o carbono se encontra em sua estrutura, fazendo com que cada tipo apresente comportamentos físico-químicos diferentes, tornando-os específicos para cada tipo de aplicação: (DE SOUSA et al., 2018).

Os ferros fundidos do tipo cinzento são aqueles que durante a solidificação, a formação de fase é austenita e grafita seguindo o diagrama de equilíbrio (DA SILVA et al., 2019). Em comparação aos outros ferros fundidos, pode-se dizer que sua diferença está principalmente relacionada ao formato de sua grafita, que se apresenta em lamelas ou flocos. Por esse motivo, considera-se o ferro fundido cinzento como um dos mais frágeis, devido a esse formato “afinado” da sua grafita que pode servir como pontos de concentração de tensão caso o material sofra algum esforço de tração. Porém, sua resistência a esforços compressivos é bem maior, assim como a sua resistência ao desgaste (TRENT, ;WRIGHT, 2000). Por apresentar uma baixa resistência a tração, este tipo de ferro fundido é o que apresenta uma melhor usinabilidade, pois essa concentração de tensão no plano de cisalhamento facilita o corte do material.

Em termos de aplicação o ferro fundido cinzento é bastante utilizado em casos que se deseja minimizar esforços oscilatórios como peças automotivas e máquinas industriais (KISHAWY et al., 2005). Conforme a Figura 2.27 é possível observar uma comparação da capacidade de absorção de energia vibracional ao longo do tempo dos ferros fundidos cinzentos, nodulares e dos aços.

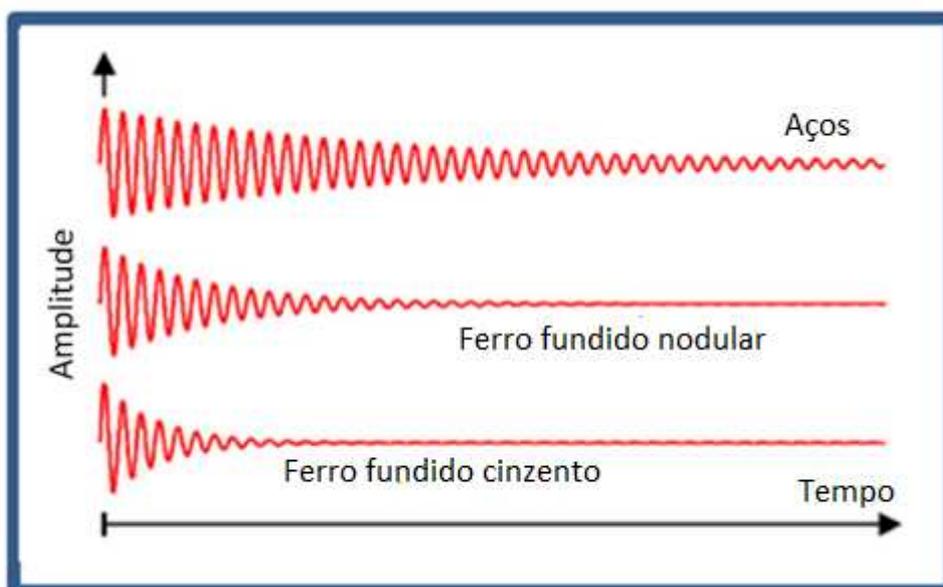


Figura 2.27 - Comparação da capacidade de amortecimento de vibração. Adaptado de: (De SOUSA et al., 2018).

Um outro ponto importante para levar em consideração na usinagem dos ferros fundidos é sua variação microestrutural, que pode ocorrer devido às características do processo de fundição contínua (De SOUSA et al., 2018). De acordo com a localização que se usina a peça, diferentes valores de força ou diferentes vidas da ferramenta podem ocorrer. No trabalho de (SOUSA, 2014) que estudou a influência da microestrutura na usinagem do ferro fundido nodular FE405012 em diferentes bitolas obtidas por fundição contínua foi encontrado diferentes magnitudes de desgaste da ferramenta e esforços mecânicos para os processos de furação, torneamento e fresamento.

Na usinagem dos ferros fundidos normalmente o tipo de desgaste predominante é o desgaste de flanco, devido a mecanismos de abrasão e adesão que ocorrem em grande parte nessa superfície (TRENT; WRIGHT, 2000). A abrasão está ligada a partículas duras presentes tanto no material da peça quanto da ferramenta, que podem ser SiC, Fe₃C, TiC, WC entre outras. Para garantir uma vida maior da ferramenta, é necessária que elas sejam resistentes a esses mecanismos de abrasão e que apresentem uma alta tenacidade, além de ser quimicamente inerte para evitar interações com o material da peça. De acordo com (MACHAO et al., 2011) citado por (De SOUSA et al., 2018) normalmente, na usinagem dos ferros fundidos utilizam-se ferramentas de metal duro classe K (revestidas por TiAlN, TiN, TiAl ou sem revestimento), ultraduros (Pcbn-L ou PCBN-H), cerâmicas (Si₃N₄, Si₃N₄+ Al₂O₃-sialon, Al₂O₃+SiC-Whisker, Al₂O₃+TiC-Misturada) ou ferramentas de aço rápido.

Durante a sua usinagem, as maiores temperaturas se concentram próximas à aresta de corte, devido a descontinuidade do cavaco, fazendo com que o limitante da velocidade de

corte seja as forças de natureza compressiva (DE SOUSA et al., 2018). As altas temperaturas próximas na aresta de corte podem comprometer tanto a ferramenta devido à aceleração dos mecanismos de desgaste quanto a peça em erros de tolerância, altas tensões superficiais assim como diferenças de microestrutura da superfície em relação a camadas mais internas (KISHAWY et al., 2005).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo será descrita a metodologia, as dimensões dos materiais usinados, os tipos de materiais, ferramentas, porta-ferramenta, equipamentos e métodos utilizados durante a realização dos experimentos. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

As tarefas foram divididas em quatro etapas, conforme o fluxograma da Figura 3.1. Cada uma delas será discutida adiante, com exceção da análise de resultados.

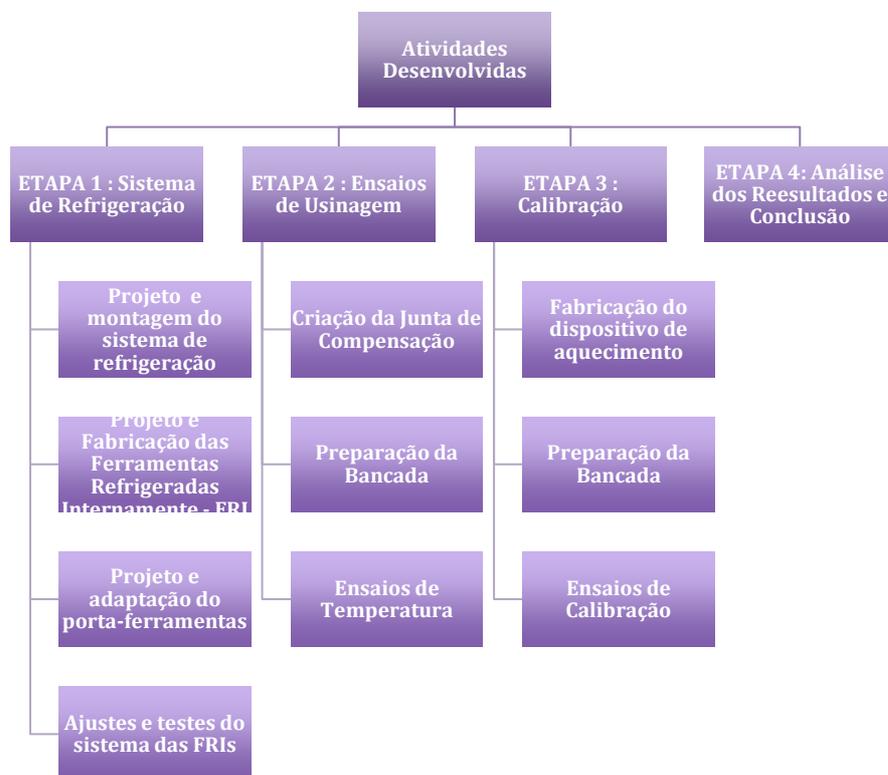


Figura 3.1 - Fluxograma das etapas do trabalho.

3.1 Sistema de refrigeração

A primeira etapa deste trabalho foi o projeto e desenvolvimento do sistema de Ferramentas Refrigeradas Internamente - FRI. Este mesmo sistema foi utilizado no trabalho de (Bazon, 2020). A princípio, o objetivo é resfriar as ferramentas de corte por meio da circulação de um fluido refrigerante secundário que circula internamente. Este fluido circula pelo inserto e porta-ferramenta através de canais internos em um sistema fechado, isto é, sem nenhuma dispersão de fluidos para a atmosfera. Por isto, as FRIs podem ser consideradas como uma técnica ecologicamente amigável, que busca evitar a utilização dos Fluidos de Corte – FCs.

Os sistemas das FRIs são divididos em dois subsistemas (Figura 3.2), Trocador de Calor Primário - TCP e Trocador de Calor Secundário - TCS. O TCS é o de usinagem, à esquerda da linha tracejada, cor verde, enquanto o TCP, que se trata de uma adaptação de um refrigerador convencional, está à direita (Fig. 3.2). A interface entre os dois sistemas é feita no reservatório de fluido, onde ocorre a troca térmica do secundário para o primário.

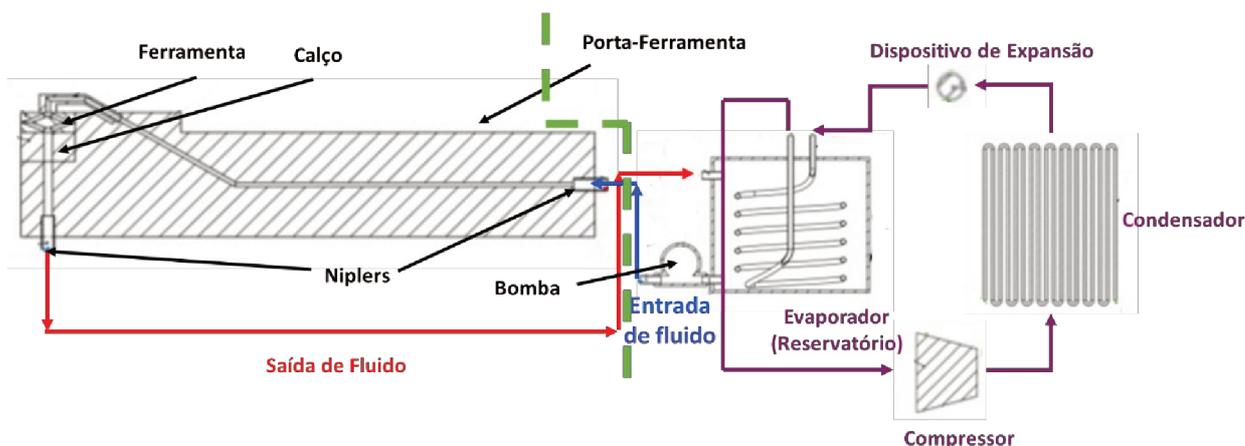


Figura 3.2 – Subsistemas TCP e TCS.

3.1.1 Sistema do Trocador de Calor Primário - TCP

O intuito principal do TCP é refrigerar um fluido do TCS. Esse fluido atuará como refrigerante durante o processo de corte. A Figura 3.3 mostra o projeto em Projeto Assistido por Computador (CAD) do TCP.

O TCP é composto por um *freezer* vertical, modelo 04180CBC201 da marca Prosdócimo®, adaptado para as condições propostas neste trabalho. Essa modificação foi realizada na parte da unidade evaporadora, onde foi inserida uma serpentina na forma de

espira, inserida dentro de um reservatório de fluido, com capacidade de aproximadamente 20 litros.

A troca térmica ocorre com a transferência de calor do fluido secundário para o fluido primário dentro do reservatório de fluido onde estão as serpentinas da unidade evaporadora. Neste estudo, o fluido escolhido para o TCS foi a água mineralizada (torneira), devido a sua boa capacidade de troca térmica e por ser um fluido sustentável.

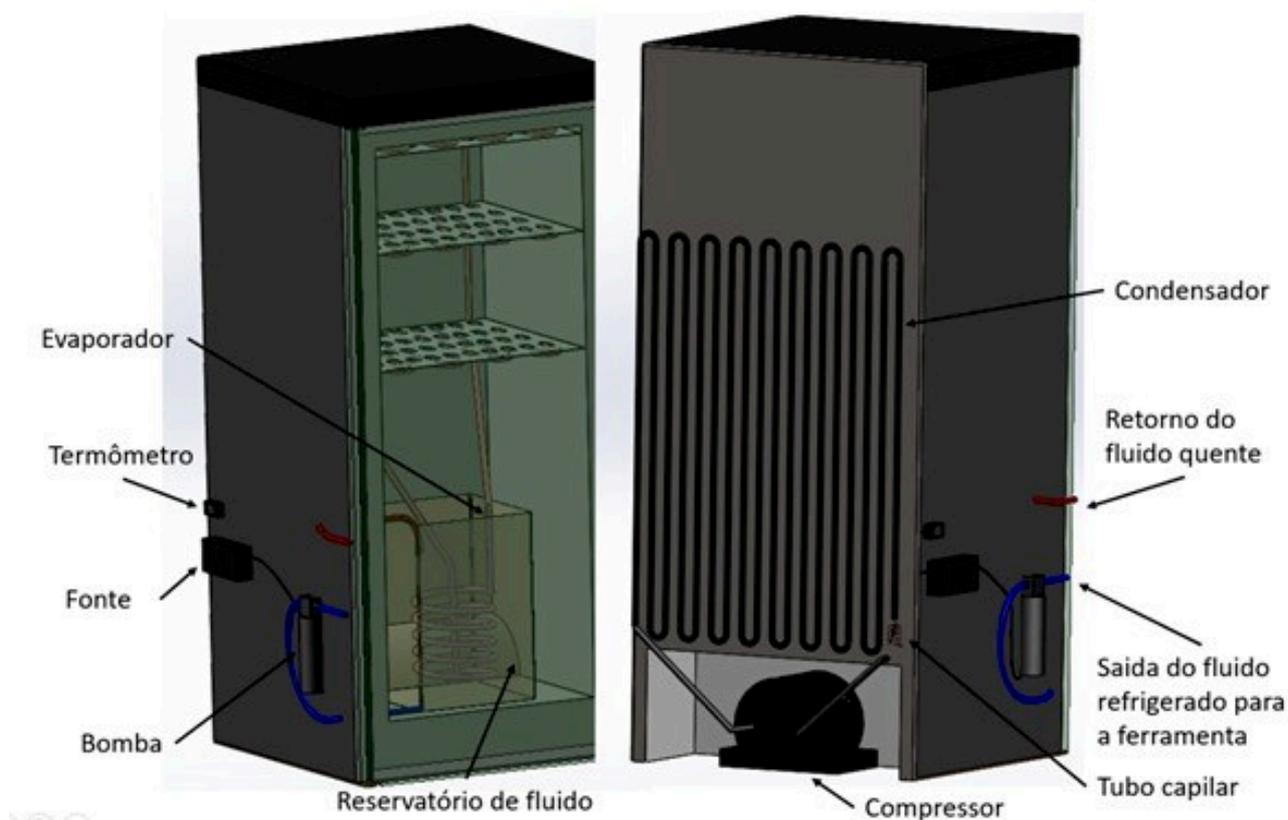


Figura 3.3 - Desenho esquemático do TCP (BAZON, 2020).

Para bombear a água do reservatório de fluido para dentro do TCS foi utilizada uma bomba de funcionamento por diafragma, modelo P142-30, marca Propumps®, pressão máxima de 0,7 MPa e uma vazão máxima de 3 l/min, com potência de 30 W. Para alimentação da bomba foi utilizada uma fonte universal, marca Nativa®, tensão regulável de 12 V a 24 V. A tensão utilizada foi de 12 V.

Para medir a temperatura da água do reservatório, foi instalado próximo ao recalque da bomba um termômetro digital, modelo TA21, marca TSSHOP, com faixa nominal de - 50 °C a 110 °C, resolução de 0,1 °C e exatidão de ± 1 °C. A Figura 3.4. contém a montagem da

fonte de alimentação, do termômetro e da bomba dá água afixados lateralmente junto à geladeira.

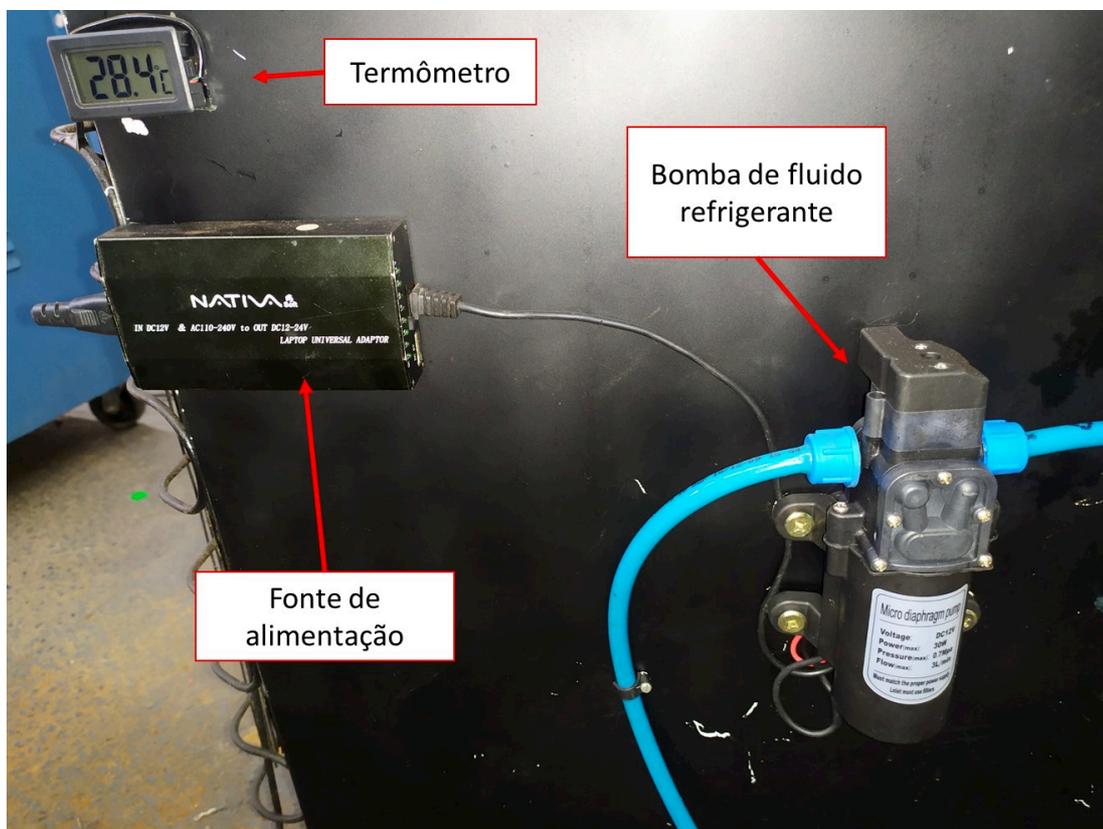


Figura 3.4 - Bomba de fluido refrigerante, termômetro e fonte de alimentação utilizados no sistema de refrigeração.

3.1.2 Sistema do Trocador de Calor Secundário - TCS

O TCS é uma outra parte do sistema de refrigeração, composto pelo conjunto da ferramenta e do porta-ferramenta projetados com refrigeração interna, como mostra o desenho em CAD da Figura 3.5. O fluido refrigerante (água) pressurizado é levado para dentro dos canais internos do porta-ferramenta através de um tubo condutor de Policloreto de Vinnila - PVC de 1 mm de diâmetro.

Ao entrar pelos canais internos do porta-ferramenta, o fluido refrigerante circula dentro do grampo de fixação, depois dentro da ferramenta, refrigerando-a e, por fim, para o reservatório de fluido completando o ciclo.

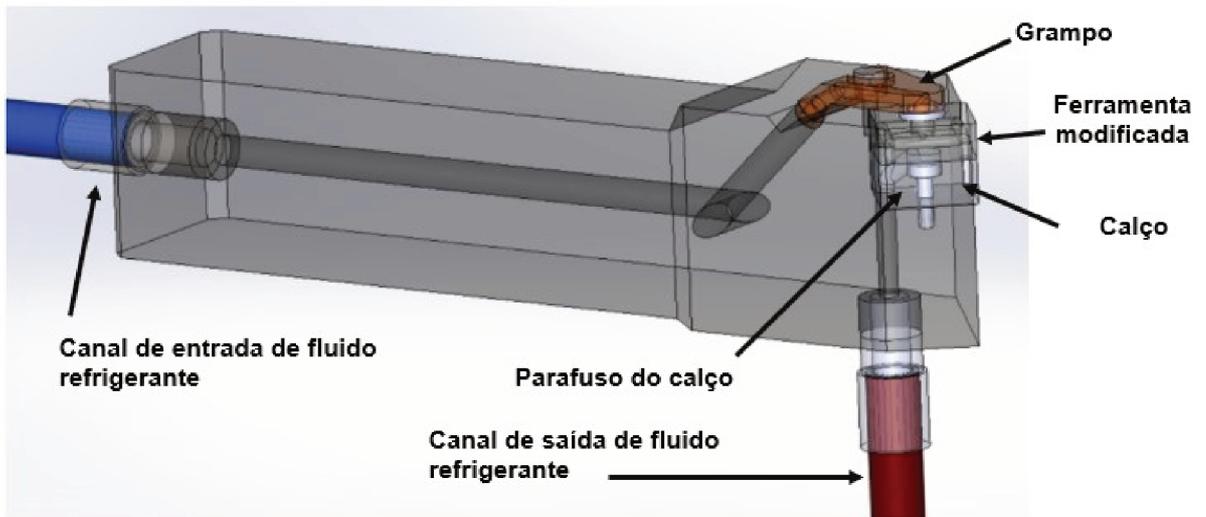


Figura 3.5 - TCS (ferramenta e porta-ferramenta).

3.1.2.1 Porta-ferramenta e inserto modificados

Todas as ferramentas de corte utilizadas são de metal duro sem revestimento de código ISO SNUN120412 classe K10 da marca Seco Tools®. A Figura 3.6 mostra detalhes de uma ferramenta modificada com canais internos de refrigeração. Toda a geometria do inserto está descrita no apêndice A.

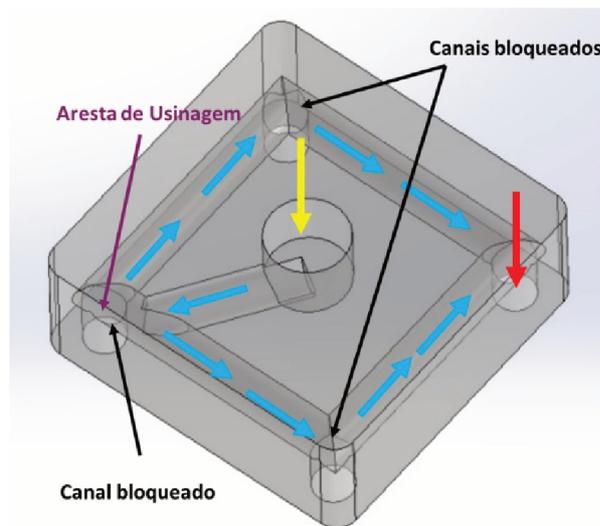


Figura 3.6 - Geometria interna dos canais das ferramentas.

As setas indicam o caminho que o fluido secundário percorre ao entrar na ferramenta. A entrada de fluido acontece na face superior, através do furo maior que fica conectado ao

grampo, indicado pela seta amarela. Internamente a ferramenta, o fluxo de fluido nos canais segue no sentido indicado pelas setas azuis e sai pela aresta oposta à de usinagem (em roxa), indicado pela seta vermelha. Nota-se que existem 4 saídas de fluido na ferramenta, no entanto, o suporte foi modificado para que o fluido saia somente na aresta oposta à de usinagem, obrigando-o a percorrer e resfriar todo o inserto. Através dessa configuração projetada, cada ferramenta de usinagem tem apenas 4 arestas de corte disponíveis.

A fabricação das galerias internas nos insertos (Figura 3.7) foram produzidas pela empresa NipoTec®, através do processo de eletroerosão por eletrodo rotativo. Os prolongamentos gerados nos canais são correspondentes do processo de eletroerosão, dessa forma, para evitar vazamentos de fluido, os canais foram tampados através de solda prata (Figura 3.7b). Para a fabricação dos canais das ferramentas, foram utilizados eletrodos de 1,5 mm resultando em galerias internas com diâmetros de $1,5 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ e um eletrodo de 3 mm para a fabricação do canal de entrada da ferramenta com um diâmetro em torno de $3 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$.

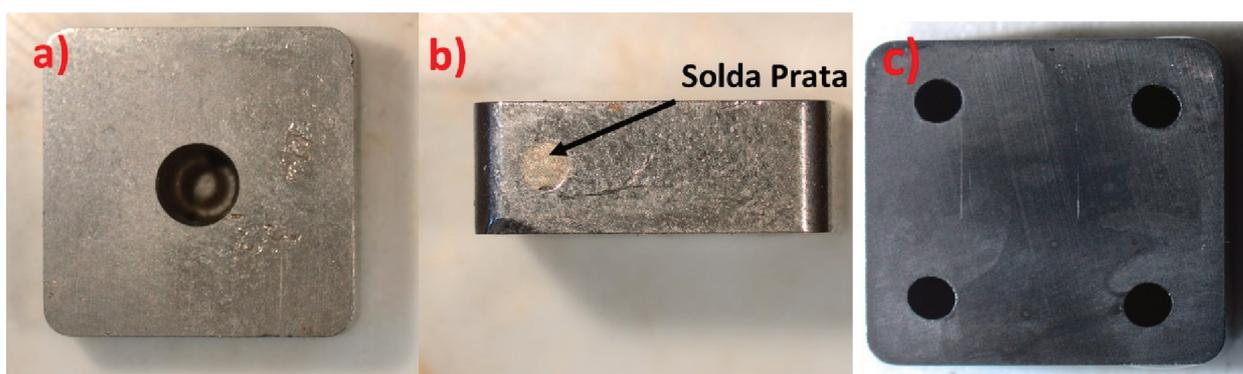


Figura 3.7 - Insertos SNUN120412 após as modificações; a) Canal de entrada do fluido secundário; b) Canal de fluido da superfície lateral tampada por solda prata. c) Canais de saída de fluido.

O porta-ferramenta utilizado para a realização dos ensaios foi fabricado pela Empresa Walter Tools®, de código DSSNL2525X12-P. Esse porta-ferramenta já possuía canais internos de resfriamento. Para a realização do projeto o suporte sofreu algumas alterações em sua estrutura, originalmente o mesmo possuía um canal de fluido direcionado para a superfície de saída da ferramenta e um outro canal direcionado para a superfície de folga, como ilustra a Figura 3.8, onde as partes azuis representam os canais internos no porta-ferramenta.

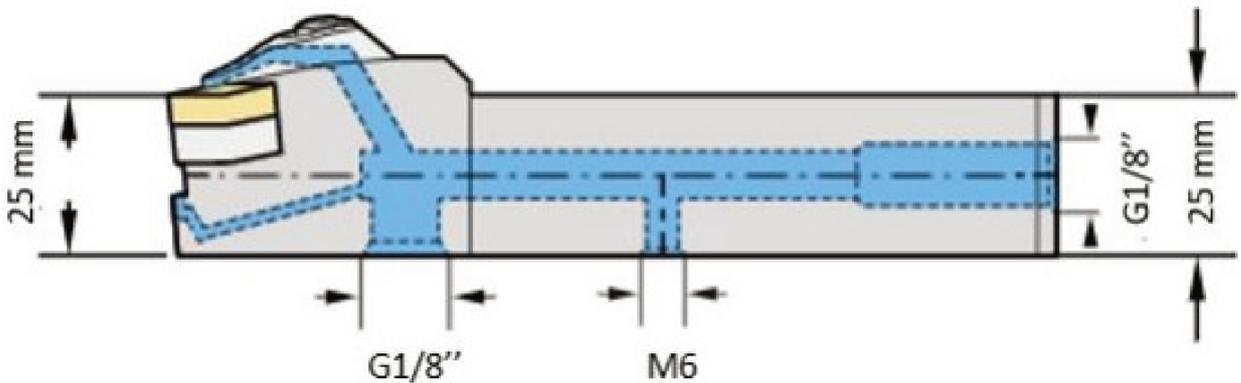


Figura 3.8 - Canais internos originais do porta-ferramenta (WALTER TOOLS, 2021).

Das modificações realizadas, o canal esquerdo da parte de baixo foi tampado, e o grampo sofreu alterações para que o fluido entrasse pela parte superior da ferramenta. A Figura 3.5 mostra o trajeto do fluido, que entra no porta-ferramenta (mangueira azul) percorrendo os canais dentro de sua estrutura, passando pelo grampo de fixação, depois pela parte superior da ferramenta e saindo pela parte de baixo (mangueira vermelha). A Figura 3.9 ilustra o conjunto porta-ferramenta modificado acoplado a um inserto.

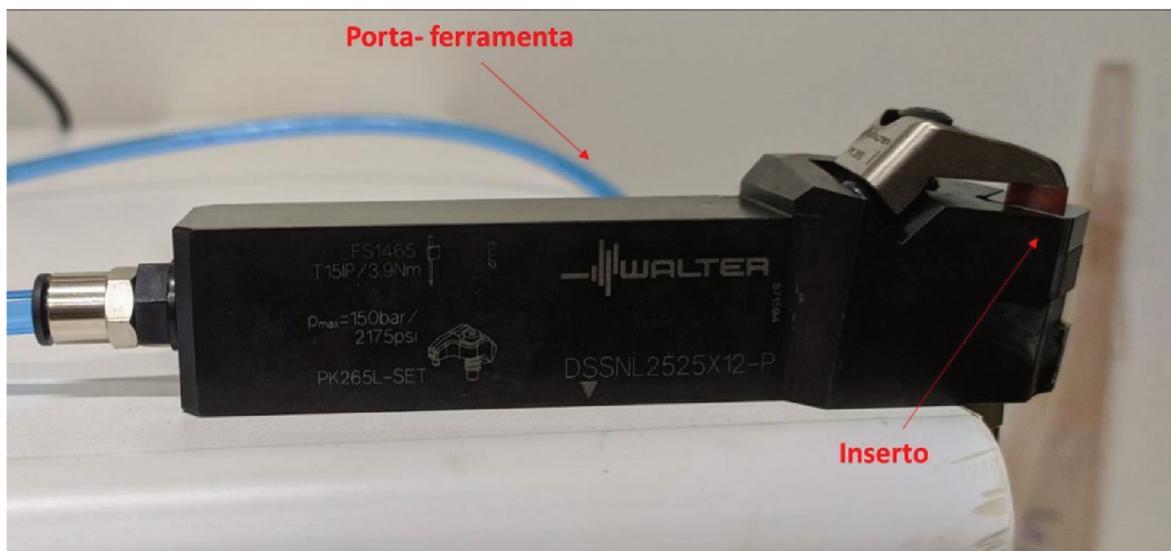


Figura 3.9 – Conjunto Porta-ferramenta e inserto após as modificações.

Os detalhes da geometria do conjunto inserto-suporte, considerando o processo de torneamento são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Geometria do conjunto ferramenta e porta-ferramenta. Retirados de: (SECO TOOLS,2021); (WALTER TOOLS,2021).

Classe ISO	K-10
Ângulo de saída (γ_o)	-8°
Ângulo de posição primário (χ_r)	45°
Ângulo de posição secundário (χ_r')	45°
Ângulo de ponta (ϵ_r)	90°
Ângulo de folga (α_o)	8 °
Ângulo de cunha (B_0)	90 °
Raio de ponta (r_ϵ)	1,2 mm

3.2 Ensaios de usinagem

Nesta etapa é mostrado os materiais e equipamentos utilizados, e toda a forma de preparação dos ensaios.

3.2.1 Material Utilizado

As barras utilizadas foram de ferro fundido cinzento FUCO-300® de acordo com a norma ABNT NBR 6589, com um diâmetro de 75 mm e comprimento de 305 mm. Essas barras foram fabricadas pelo processo de fundição contínua, que se trata de um vazamento de um metal líquido num forno alimentador, onde sua parte frontal inferior é montado uma coquilha de grafite refrigerada a água que confere a forma e o perfil desejado a ser produzido. A Tabela 3.2 mostra os dados de composição química e propriedades mecânicas das barras retiradas do catálogo técnico (TUPY, 2011).

Tabela 3.2 - Composição química e propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento FUCO - 300® (TUPY,2011).

Composição Química	
C	2,80 % – 3,70 %
Si	2,20 % – 2,70 %
Mn	0,20 % – 0,70 %
P	0,20 % máx
S	0,15 % máx
Cr	0,10 % máx
Propriedades Mecânicas para um diâmetro de 75 mm	
Resistência à Tração [MPa]	240
Dureza [HB]	179-285

3.2.2 *Planejamento Experimental: Parâmetros de Corte*

Para estudar a influência das FRIs nas temperaturas de usinagem no torneamento cilíndrico externo do ferro fundido cinzento, decidiu-se utilizar como parâmetros de corte três níveis de velocidade de corte, mantendo o avanço e profundidade constantes de 0,095 mm/rev e 1,25 mm. Foi preferido variar apenas a velocidade devido a sua maior influência nas temperaturas de usinagem em comparação aos outros parâmetros e também devido a quantidade limitada de FRIs. Os níveis de velocidades foram escolhidos para que seja possível estudar o efeito de resfriar a ferramenta em uma longa faixa de valores. Como condição ambiente foi utilizado três níveis, correspondentes ao processo de resfriamento exercidos na ferramenta, sendo: seco (inserto comum), resfriado com a utilização de água a uma temperatura ambiente (em torno de 27 °C) e resfriado com água a uma temperatura próxima a temperatura de solidificação (em torno de 2 °C). Para cada condição ambiente utilizou-se um inserto diferente, e para os refrigerados utilizou-se a mesma aresta de usinagem que é a mesma indicada pela seta de cor roxa na Figura 3.6, para evitar possíveis diferenças de capacidade de refrigeração de circulação da água. Todos os parâmetros estão representados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros de Corte utilizados na realização dos ensaios.

Parâmetros de Corte	
Velocidade de Corte (m/min)	84 – 132 – 212
Avanço (mm/rev)	0,095
Profundidade de Corte (mm)	1,25
Ambiente (-)	Seco - Água (27 °C) - Água (2 °C)

Para validar os ensaios de forma estatística, utilizou-se um planejamento fatorial completo, composto por três níveis e dois fatores, com uma réplica por experimento, resultando em um total de 18 ensaios. Utilizou-se nas análises um nível de confiança de 95 %. Como a temperatura de usinagem tende a estabilizar rapidamente, foi estipulado um tempo de usinagem de 40 segundos para cada ensaio. Durante a realização de todos os ensaios FRI foi utilizado uma vazão média de água de 350 ml/min, que foi medida através de um copo graduado com faixa nominal de 0 a 500 ml.

Para minimizar os erros de medição devido às variações das propriedades físicas das barras de ferro fundido cinzento ao longo de seus diâmetros, preferiu-se utilizar três corpos de prova com dimensões iguais.

3.2.3 Ensaios de usinagem – Aparato Experimental

Para a realização dos ensaios de medição de temperatura pelo método do termopar ferramenta-peça com compensação física, foi utilizado um torno mecânico universal IMOR MAX II. Para a aquisição dos sinais das f.e.ms geradas durante a usinagem foi utilizado uma placa de aquisição de sinais Agilent® 34901A, do fabricante KEYSIGHT®, com resolução de 1 μ V e incerteza de medição de 0,3 °C, através de um microcomputador com um *software* compatível a placa de aquisição (*Software Agilent® BenchLink Data Logger*). Foi estipulado uma frequência de aquisição de 2 Hz. Os sinais são adquiridos através dos dois fios de cobre pertencentes ao circuito termoelétrico do termopar ferramenta-peça ligados na contra ponta modificada e no elemento de compensação. A Figura 3.10 mostra a esquematização do aparato experimental do termopar ferramenta-peça utilizado.

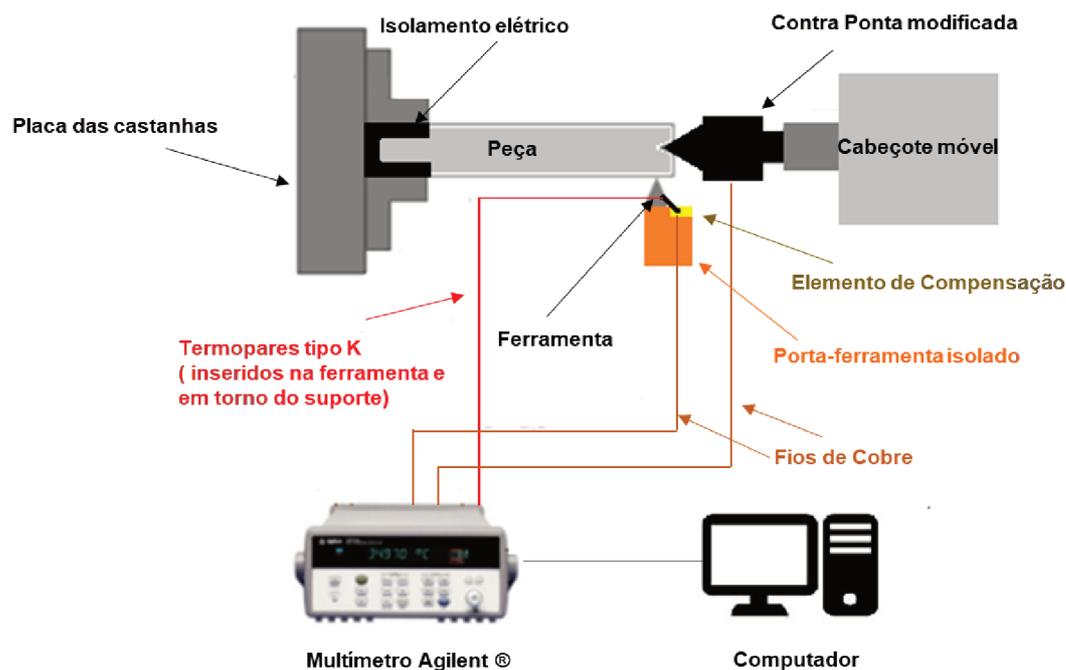


Figura 3.10 - Esquemática do aparato experimental utilizado durante a realização dos ensaios de usinagem.

Para evitar f.e.ms parasitas durante as medições, tanto a barra quanto o porta-ferramenta foram isolados eletricamente. Na extremidade esquerda da barra que fica fixada pelas castanhas do torno, foi colocado folhas de lixa presas por fita isolante. Para evitar interferências com o castelo da máquina, foi colado em volta do porta-ferramenta fita isolante e um pedaço de lixa em sua superfície inferior servindo como um calço, e superior para evitar o cisalhamento da fita isolante, devido ao torque gerado pelos parafusos durante a sua fixação.

3.2.4 Utilização do contra ponta modificado

Para transferir o sinal elétrico da peça até o fio de cobre foi utilizado um contra ponta modificado internamente. Esse mesmo contra ponta foi utilizado nos trabalhos de (KAMINISE, 2012) e (NUNES, 2020). Dentro desse contra pontas há uma capsula de Teflon® onde se armazena mercúrio, que fica encaixada no interior do cone Morse, com a finalidade de permitir uma continuidade do sinal elétrico no decorrer dos testes tanto para a calibração quanto para o torneamento.

Segundo (Kaminise, 2012) “o circuito elétrico é mantido entre a ponta rotativa e uma haste instalada na carcaça da contra ponta com isolamento elétrica da mesma. Ambas, a ponta rotativa e a haste foram feitas de um mesmo material (SAE 1050) e, assim, formou-se a junção

pelos mesmos materiais e o mercúrio sem gerar f.e.m. prejudicial (2ª lei dos termopares). Soldou-se um fio de cobre a essa haste, externamente à contra ponta, para fechar o circuito com o sistema de medição. Obteve-se a isolamento elétrica no cone Morse da contra ponta através da aplicação de pintura eletrostática à base de resina epóxi”. Neste trabalho, além da pintura já existente no contra ponta modificado, também foi aplicado fita isolante para reforçar seu isolamento elétrico. Na Figura 3.11 é mostrado os componentes internos e externos do contra ponta utilizado.

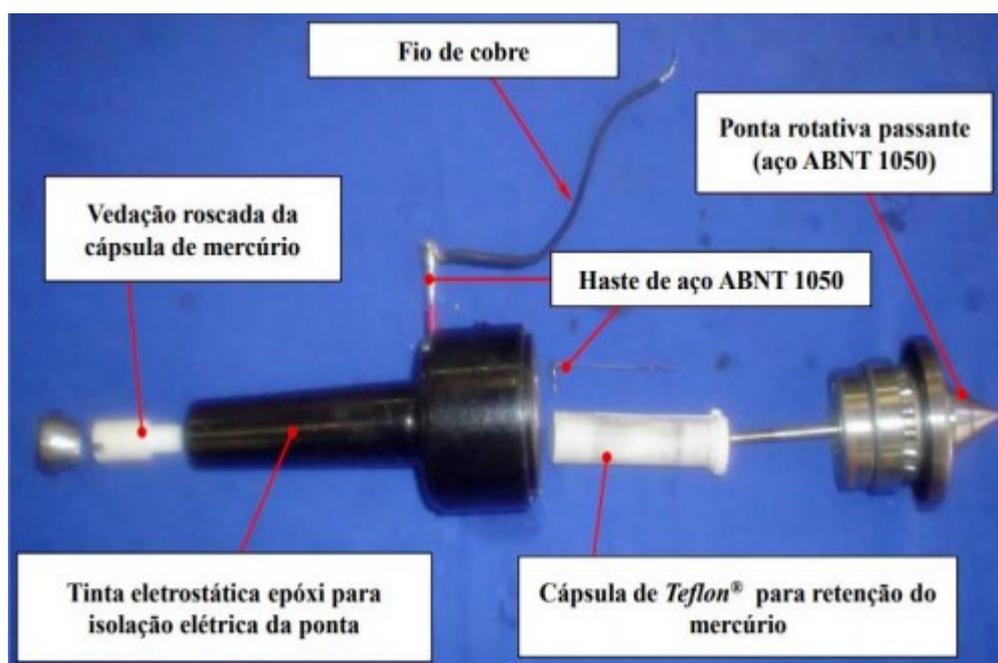


Figura 3.11 - Contra ponta rotativo com mancal de mercúrio embutido internamente (KAMINISE,2012).

3.2.5 Elemento de Compensação do Termopar ferramenta-peça

Como já discutido no tópico 2.6.4, o principal objetivo do elemento de compensação é minimizar/eliminar o efeito das possíveis f.e.ms geradas pelas juntas secundárias do termopar ferramenta-peça. Na bancada experimental do termopar ferramenta-peça deste trabalho, foi utilizado um elemento de compensação, que é formado por uma base de madeira isolante, que fica fixo no castelo do torno, um pino do mesmo material da peça (ferro fundido cinzento) e uma haste do mesmo material do contra ponta (aço ABNT 1050), formando as juntas com temperaturas T_6 , T_2 quando conectado a peça e T_5 quando conectado ao fio de cobre.

Com esse elemento acrescentado ao aparato experimental do termopar ferramenta-peça, durante a realização de todos os ensaios, a ponta do pino de ferro fundido cinzento

ficou em contato com a ferramenta próximo ao termopar do tipo K, localizado a 1 mm x 1 mm da ponta da ferramenta, em sua face da superfície de saída, que é referente a junta de referência, de temperatura T_2 . A Figura 3.12 mostra o elemento de compensação utilizado como parte do sistema do termopar ferramenta-peça e a Figura 3.13 demonstra todo o aparato experimental de usinagem levando em conta as demais junções.



Figura 3.12 - Elemento de compensação utilizado durante os ensaios de usinagem e calibração.

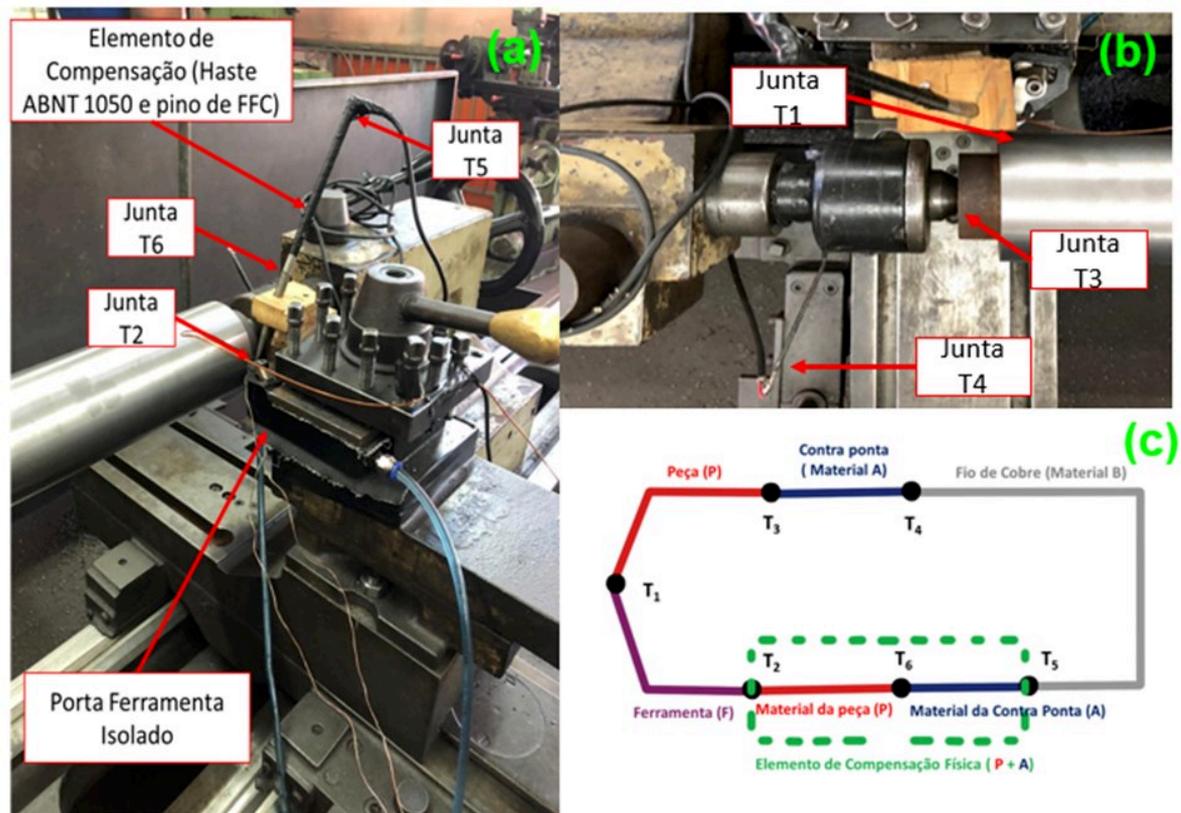


Figura 3.13 - Aparato experimental utilizado para a realização dos ensaios de usinagem. (a) Bancada experimental mostrando as juntas T_2, T_5, T_6 ; (b) Banca experimental mostrando as juntas T_1, T_3, T_4 ; (c) Sistema termoeletrico do termopar ferramenta-peça com compensação física.

3.3 Termopares soldados no sistema

Além da utilização do termopar ferramenta-peça para medir as temperaturas, previamente a realização dos ensaios, implantou-se em torno do conjunto inserto e porta-ferramenta, termopares do tipo K, com o objetivo de estudar o comportamento térmico do sistema em outras regiões além da interface cavaco/ferramenta. Foram soldados 4 termopares em diferentes regiões conforme ilustrado na Figura 3.14.

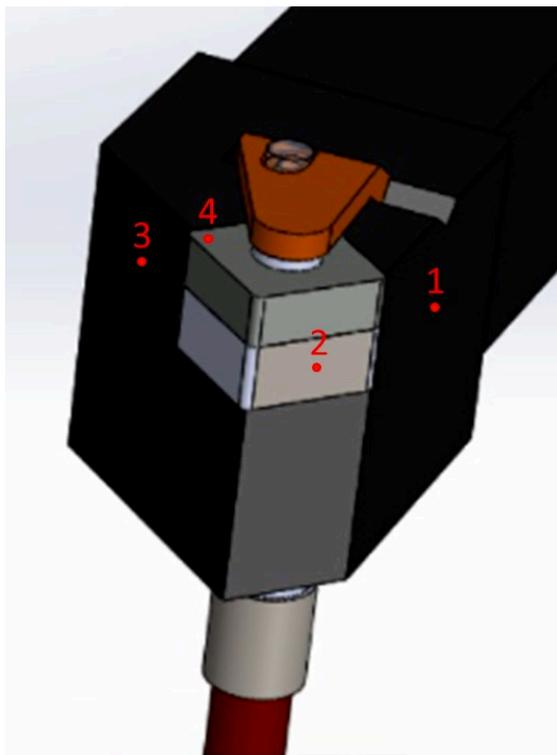


Figura 3.14 - Posição dos termopares utilizados durante os ensaios de usinagem.

A posição do termopar 1 se localiza na superfície esquerda do porta-ferramenta, com uma distância horizontal média de 7 mm da ferramenta e 7mm vertical à aresta superior do porta-ferramenta, o termopar 3 foi soldado na superfície direita do porta-ferramenta, com a mesma relação de posição referente ao termopar 1. O termopar 2 foi soldado no ponto médio a esquerda do calço do suporte. O termopar 4, que representa o termopar próximo a junta de compensação, referente a temperatura de compensação T_2 da Equação (2.10), foi soldado a uma distância média de 1 mm x 1 mm da ponta da ferramenta, em sua face da superfície de saída. Toda a aquisição dos sinais produzidos pelos termopares foi coletada da mesma forma que as f.e.ms, utilizando-se a placa de aquisição de sinais Agilent® 34901A com uma aquisição similar de 2 Hz por aquisição. Para melhorar a fixação dos termopares e também para protegê-los de possíveis interferências devido ao cavaco formado durante o processo de corte, aplicou-se um pingão de cola adesivo epóxi em suas regiões de contato.

3.4 Calibração do sistema

3.4.1 Bancada Experimental de Calibração

Nesta etapa foi realizada a calibração do sistema. Para representar as temperaturas de usinagem foi utilizado um sistema de aquecimento através de uma chama de maçarico a gás oxiacetileno. Este método já foi conduzido em vários trabalhos (STEPHENSON, 1991); (KAMINISE, 2012); (LIMA JUNIOR, 2020) e apresentou como principal vantagem a execução da calibração usando o aparato experimental parecido com o de usinagem. Dessa forma, as junções secundárias presentes no sistema do termopar ferramenta-peça são levadas em consideração. A esquematização do aparato experimental utilizado para a calibração está ilustrada na Figura 3.15.

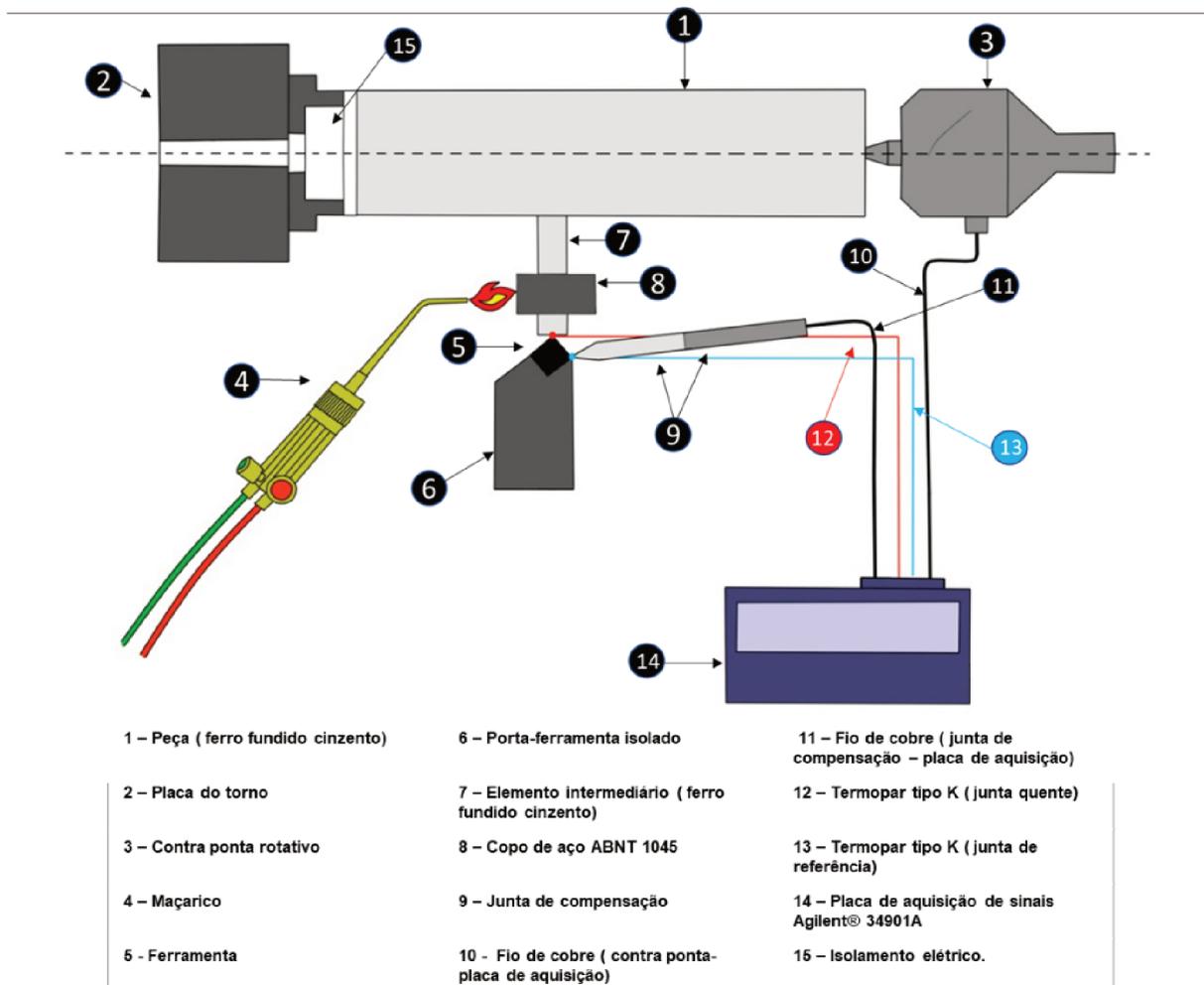


Figura 3.15 - Esquematização do aparato experimental utilizado na calibração.

O circuito de calibração funciona da seguinte maneira: o corpo de prova (1) é fixado entre as castanhas da placa do torno (2) e o contra ponta modificado com uma cuba interna de mercúrio (3), garantindo a transferência do sinal elétrico mesmo que a peça esteja em movimento rotatório para o fio de cobre (10), que é ligado a placa de aquisição de sinais (14). Entre o corpo de prova e a ferramenta (5), se localiza o dispositivo de aquecimento, composto por um copo de aço ABNT 1045 (8) e um elemento intermediário do mesmo material da peça (7). O dispositivo de aquecimento é utilizado para simular as temperaturas de usinagem, que quando aquecido pelo maçarico (4), é possível atingir temperaturas médias de até 780 °C. A junta quente do sistema é feita através do contato da ferramenta (5) com a face do elemento intermediário, onde mede-se a temperatura T_1 referente da Equação (2.10), através de um termopar padrão do tipo K (12), soldado nessa mesma face. Na lateral direita da ferramenta, mede-se a temperatura T_2 , que é referente ao contato ferramenta e elemento de compensação (9) através de um outro termopar padrão do tipo K (13), soldado na ferramenta nas proximidades deste contato. Para fechar o circuito, o sinal elétrico é transferido do elemento de compensação para um fio de cobre (11) que é ligado a placa de aquisição de sinais. A Figura 3.16 retrata a bancada experimental utilizada.

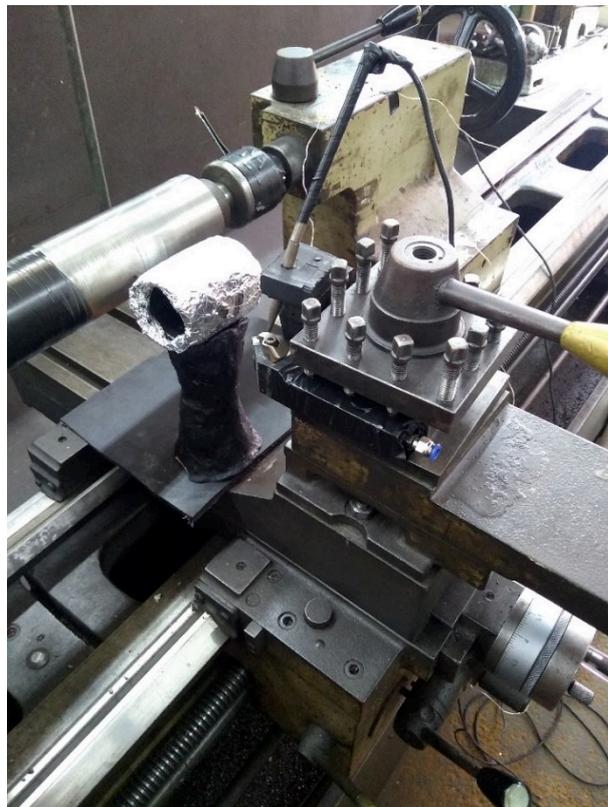


Figura 3.16 - Bancada de calibração utilizada.

3.4.2 Dispositivo de Aquecimento

Ao comparar o aparato experimental de calibração com o de usinagem mostrado na Figura 3.10, é possível observar que a única diferença entre ambos é que na calibração há a inclusão do dispositivo de aquecimento entre a peça e a ferramenta, e que não há remoção de material durante as medições.

O dispositivo de aquecimento utilizado neste trabalho foi criado para servir como uma espécie de isolante térmico, para que a chama do maçarico se concentre no elemento intermediário (pino de ferro fundido), assim transferindo a maior quantidade de calor possível para a face do pino que fica em contato com a ferramenta durante a calibração. A Figura 3.17 mostra este dispositivo utilizado.



Figura 3.17 - Elemento de aquecimento utilizado para a calibração.

Ele é constituído dos seguintes componentes: copo de aço ABNT 1045, lã de vidro, folhas de alumínio e um pino de ferro fundido cinzento. Utilizou-se o copo de aço ABNT 1045 para servir como isolante térmico do fluxo de ar do ambiente e também para segurar o pino em um posicionamento fixo durante a calibração. Para reforçar seu isolamento térmico foi envolto em torno de toda sua superfície externa lã de vidro, no qual foi coberto por folhas de alumínio para evitar perdas térmicas por radiação. Em seu corpo foi realizado dois furos transversais concêntricos de mesmo diâmetro para permitir o encaixe do pino. Decidiu-se utilizar o elemento intermediário com a geometria de um pino para que em uma de suas

extremidades transfira a menor quantidade de calor possível (ponta), gerando uma menor quantidade de calor transferida para a peça, e assim evitando possíveis alterações de temperatura na junta formada entre o contra ponta e o corpo de prova. Na outra extremidade (face do pino), é o local onde é realizado o contato com a ferramenta, através do movimento retilíneo do castelo do torno, e também onde é formado a junta quente com temperatura T_1 . Dessa forma, para atingir maiores temperaturas através da chama do maçarico, é necessário que essa chama se aproxime o mais próximo possível do corpo do pino localizado na parte interna do copo de aço ABNT 1045.

Para medir as temperaturas da junta quente posicionou-se na face do pino, milímetros acima do contato da ferramenta um termopar padrão do tipo K, conforme ilustrado na Figura 3.18. Assim, considerou-se que as temperaturas medidas pelo termopar são as mesmas temperaturas presentes nessa junta. Observa-se na Figura 3.17 que esse dispositivo de aquecimento fica posicionado em cima de um componente pintado de cor preta. Este componente é feito de argila e serve como um suporte de altura para o dispositivo de aquecimento e também como isolante elétrico. Posicionou-se o dispositivo de aquecimento no sentido horizontal para evitar possíveis acidentes com a chama do maçarico na base do elemento de compensação, que foi feito de madeira.



Figura 3.18 - Termopar do tipo K utilizado para medir a temperatura da junta quente T_1 .

3.4.3 *Procedimentos realizados nos ensaios de calibração*

Ressalta-se da revisão que, o objetivo principal da calibração é determinar a relação existente entre a diferença de temperatura na interface ferramenta-peça e na junta de compensação e seu respectivo valor da f.e.m.

Para a realização dos ensaios de calibração, iniciou-se o sistema com o carro transversal do torno recuado no máximo possível, dessa forma garantiu-se que todas as temperaturas nas junções estavam na temperatura ambiente. Após isso, através da chama do maçarico, aqueceu-se o elemento intermediário conforme mostrado na Figura 3.17 até sua face atingir a maior temperatura possível, que foi da ordem de 770 ° C, monitorada pelo termopar padrão do tipo K. Com a temperatura máxima estabilizada, iniciou-se a aquisição de dados momentos antes de encostar a ferramenta no elemento intermediário. Alguns segundos após o encosto da ferramenta na face do pino, desligou-se a chama do maçarico para o resfriamento do sistema. Todos os ensaios de calibração foram interrompidos quando as temperaturas indicaram valores próximos de 350 °C na face do pino, que são equivalentes aos valores de tensão da ordem de 2,5 mV. O que já não correspondiam as f.e.m adquiridas nos ensaios de usinagem, que foram na faixa de 3 mV a 7,5 mV.

3.4.4 *Análise da influência do fluido refrigerante durante a aquisição de sinais*

Por conter íons, a água mineral pode vir a ser um condutor elétrico. Por esse motivo, antes de realizar os testes de medição de temperatura utilizando o termopar ferramenta-peça, foi realizado ensaios preliminares para verificar se a utilização da água mineral como fluido refrigerante pode gerar f.e.ms parasitas e significativas a ponto de interferir nos resultados das aquisições.

Para a realização dos ensaios foi utilizado uma FRI. Todos os testes foram feitos com a FRI em contato com a peça, com o torno desligado. Cada ensaio teve uma duração de 50 segundos, divididas em 2 etapas. Na primeira etapa, durante os primeiros 25 segundos, foi realizado a aquisição das f.e.ms sem a circulação do fluido refrigerante na ferramenta, e após isso, nos últimos 25 segundos de ensaio, ligou-se o sistema de resfriamento, permitindo a circulação da água gelada. O gráfico da Figura 3.19 mostra o comportamento das f.e.m adquiridas durante um teste, mostrando nenhuma diferença significativa. Dessa maneira, foi possível constatar que o termopar ferramenta-peça pode ser utilizado para FRIs utilizando água como fluido refrigerante.

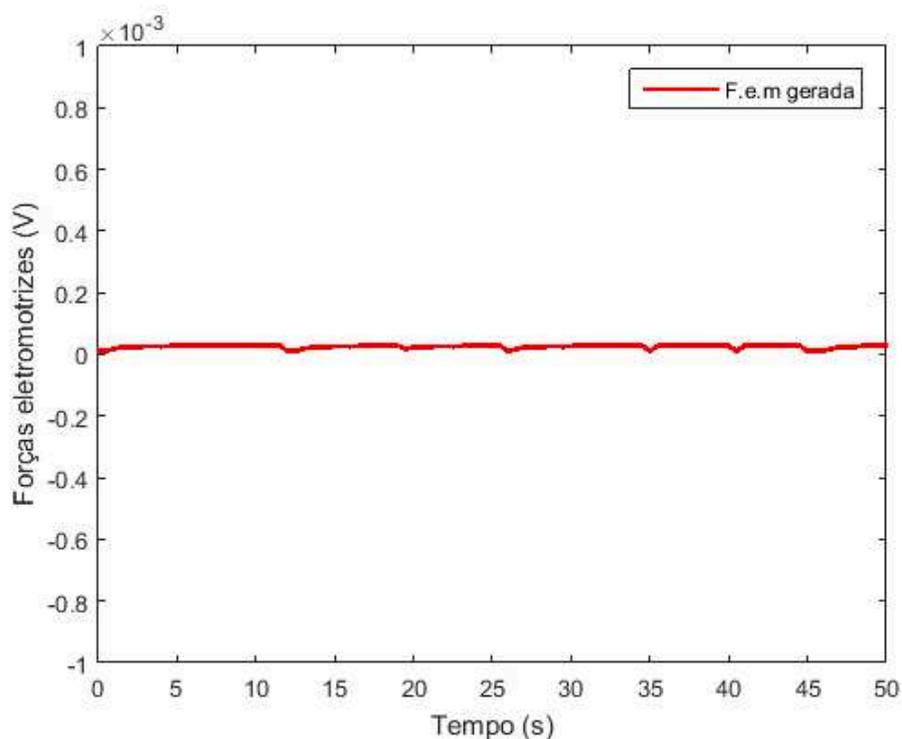


Figura 3.19 - Influência da utilização da água mineral nos sinais das forças eletromotrizes.

3.4.5 Levantamento das curvas de calibração

Durante a realização da calibração, foi realizado o monitoramento das temperaturas das junções frias do termopar ferramenta-peça, correspondentes do contato contra ponta com o corpo de prova e a conexão dos componentes que compõem o elemento de compensação (pino de ferro fundido cinzento e haste de aço ABNT 1050), localizadas próximas ao elemento de aquecimento. Para isso inseriu-se termopares do tipo K em regiões próximas dessas juntas, conforme ilustrado na Figura 3.20.

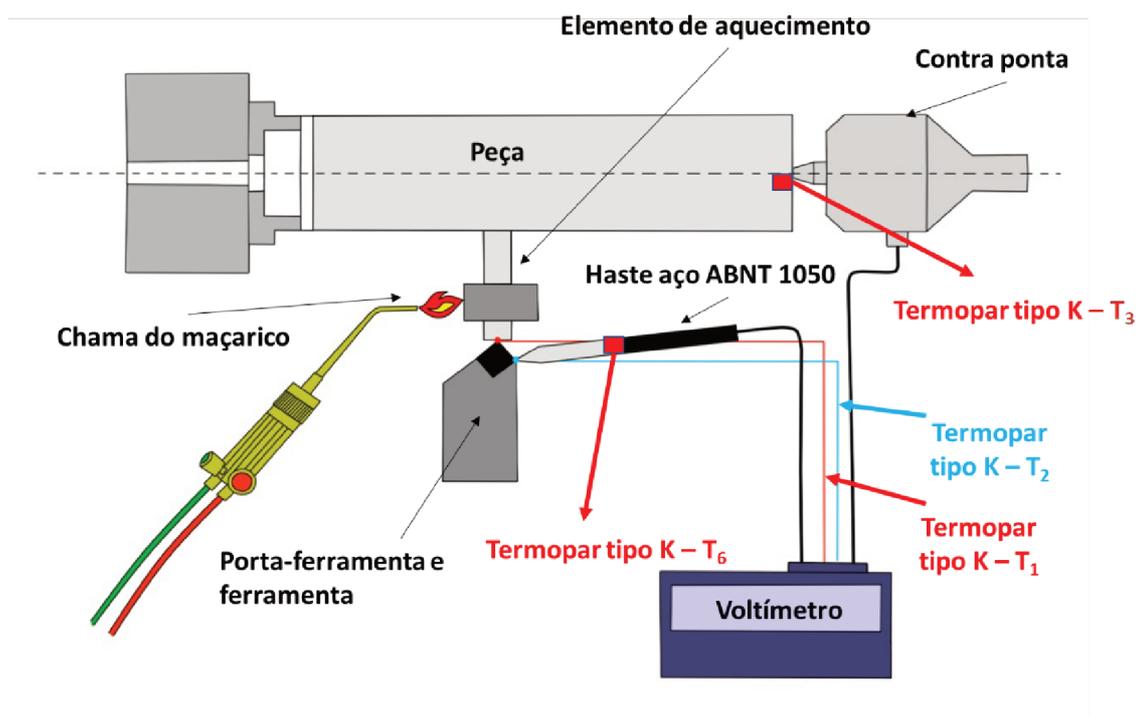


Figura 3.20 - Ilustração do posicionamento dos termopares padrão utilizados na calibração do sistema.

A Figura 3.21 descreve o comportamento térmico dessas junções próximas ao elemento de aquecimento medidas durante um ensaio de calibração. Nota-se que as temperaturas das juntas dos contatos da peça com contra ponta, e pino de ferro fundido com a haste de aço ABNT 1050 se mantiveram próximas a temperatura ambiente. Essa temperatura foi medida através de um termômetro do mesmo modelo que foi utilizado para as medições das temperaturas do fluido no reservatório de água, onde foi indicado 33 °C no momento da realização deste ensaio, indicando pouca ou nenhuma interferência na aquisição dos sinais das f.e.ms.

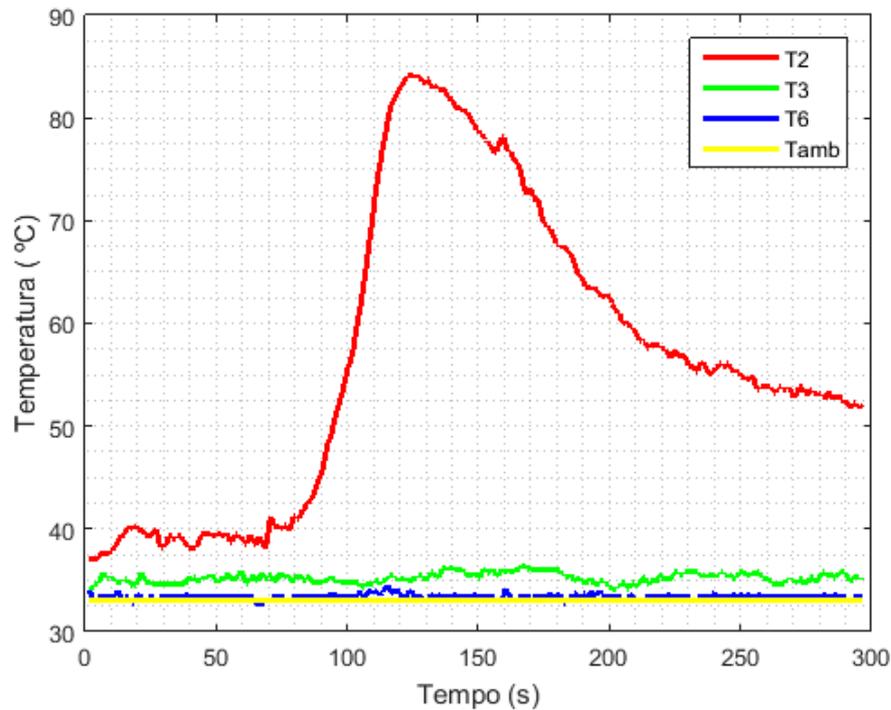


Figura 3.21 - Temperaturas das juntas próximas ao elemento de aquecimento medidas na curva 2.

3.4.6 Levantamento e Análise da Curva de Calibração

O gráfico da Figura 3.22 mostra as curvas obtidas durante os ensaios de calibração. Devido a variação da temperatura de referência T_2 , foram levantadas as curvas através das diferenças das temperaturas $T_1 - T_2$ e suas f.e.ms correspondentes a cada ensaio. O intuito da calibração foi encontrar as faixas das f.e.ms correspondentes aos ensaios de usinagem, e dessa forma, determinar as temperaturas da junta quente T_1 . A partir de pré-testes realizados, foi visto que as temperaturas T_1 estavam em torno de 370 °C – 760 °C para a faixa das f.e.ms adquiridas na usinagem, enquanto as temperaturas da junta de referência T_2 se mantiveram em torno de 30 - 135 °C. Com isso, iniciou-se todos os ensaios quando a temperatura T_1 ultrapassou valores em torno de 770 °C e interrompidos quando T_1 atingiu cerca de 350 °C.

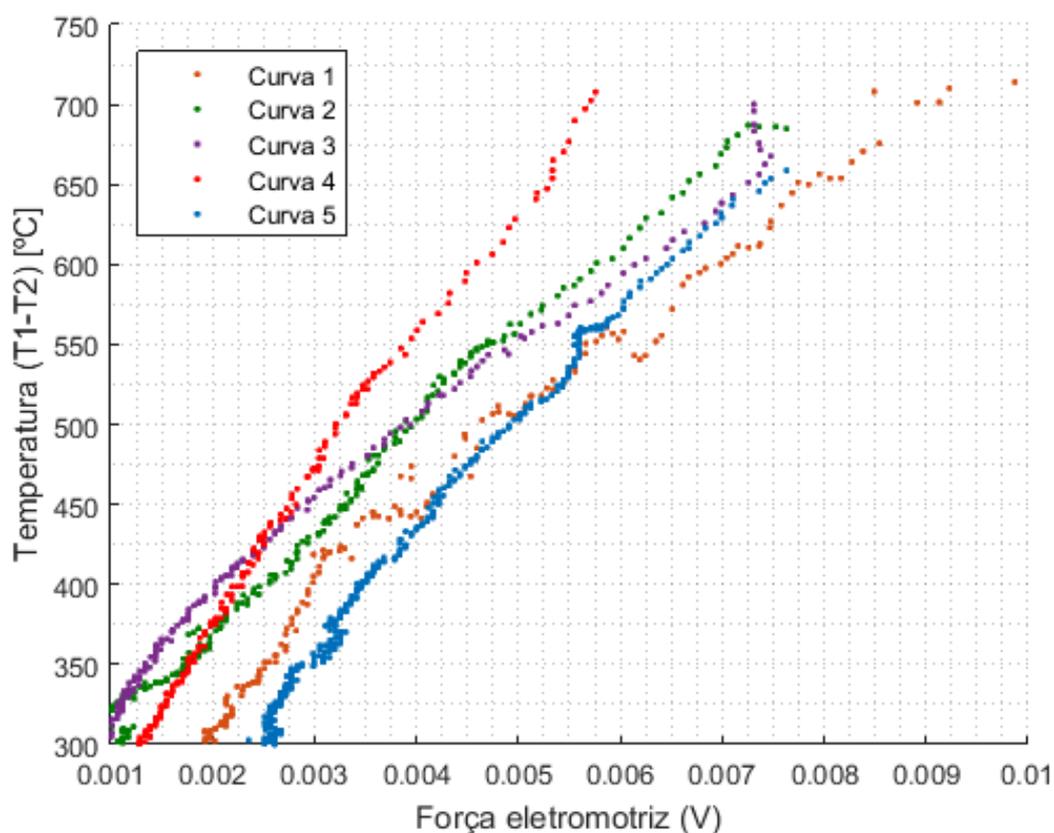


Figura 3.22 - Curvas obtidas a partir dos ensaios de calibração.

Dos ensaios realizados, foram levantadas cinco curvas. Nota-se que dentre as curvas obtidas, é visto uma diferença significativa entre seus coeficientes lineares. Uma hipótese para essa diferença pode ser possíveis oxidações que ocorrem no material devido ao aumento das temperaturas geradas, causando diferenciações nas f.e.ms. Nos trabalhos de (KAMINISE, 2012) e (LIMA JUNIOR, 2020) foram encontrados o mesmo tipo de comportamento durante o levantamento das curvas de calibração. Ao analisar cada curva separadamente, é possível perceber que elas apresentaram praticamente um comportamento linear, indicando coeficientes de correlação (R^2) maiores que 0,97, conforme mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Linearização dos ensaios de calibração.

Curva	Equação da reta	R ²
1	$(T1-T2) = 57537,342 * E(V) + 207,216$	0,979
2	$(T1-T2) = 62309,371 * E(V) + 245,823$	0,992
3	$(T1-T2) = 58835,535 * E(V) + 257,536$	0,973
4	$(T1-T2) = 92522,115 * E(V) + 185,927$	0,994
5	$(T1-T2) = 75283,073 * E(V) + 125,230$	0,989

Dentre todas as curvas, a de número 4 apresentou um comportamento diferente das demais, onde foi apresentado resultados de f.e.m fora da faixa dos resultados de usinagem. Por esse motivo, preferiu-se descartar esse ensaio, pois caso fosse considerado, seria necessário realizar uma extrapolação dos seus valores de temperatura, o que poderia gerar resultados equivocados. Após o descarte da curva de número 4, com os valores dos pontos das outras curvas, foi possível calcular a curva resultante de calibração. Conforme indicado no gráfico da Figura 3.23.

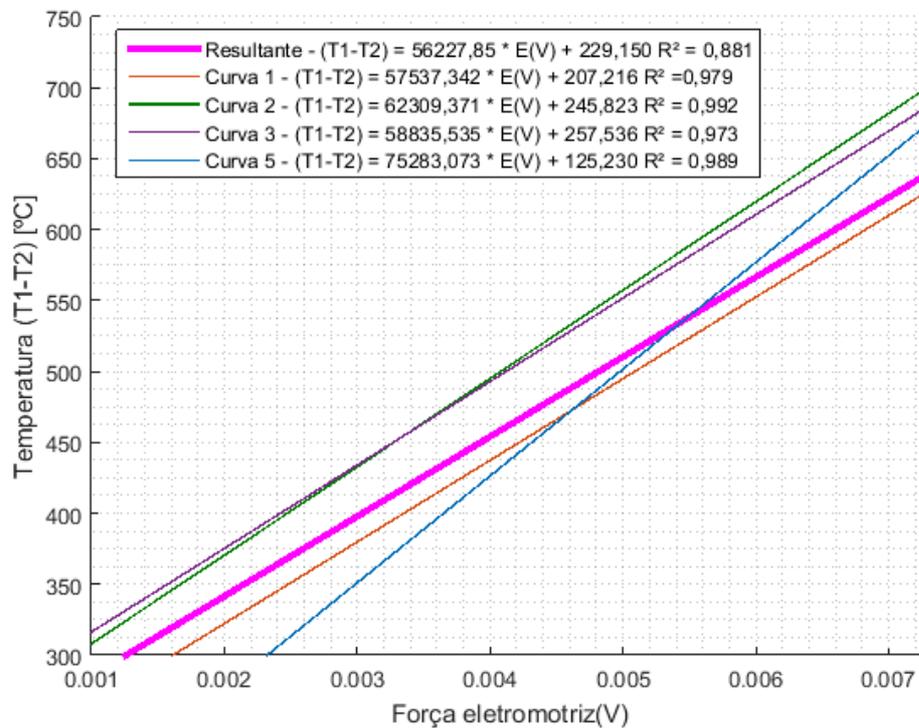


Figura 3.23 - Curva resultante dos ensaios de calibração.

Assim, a curva resultante que é utilizada para converter as temperaturas geradas no processo de usinagem do ferro fundido cinzento a partir dos valores das f.e.m, é representada pela Equação (3.1). Onde $T_{interface}$ representa as temperaturas T_1 medidas na interface de contato da ferramenta com a peça, $T_{referência}$ representa as temperaturas medidas na junta de referência T_2 e E os valores das f.e.m em V, obtidas durante a aquisição dos ensaios de usinagem.

$$(T_{interface} - T_{referência}) = 56227,85 \cdot (E) + 229,15 \quad (3.1)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados do presente trabalho. Dividiu-se os resultados em dois tópicos, um relacionado às temperaturas medidas através dos termopares soldados, e o outro a respeito das medições de temperatura realizadas através do método do termopar ferramenta-peça.

4.1 Termopares soldados

Neste tópico será discutido e mostrado as distribuições de temperatura ao longo do porta-ferramenta e ferramenta durante a usinagem, medidas através da inserção de termopares. Antes de iniciar a discussão a respeito desses resultados, vale dizer que, para minimizar o efeito das prováveis interferências nos sinais provenientes da medição dos termopares, aplicou-se um filtro de média móvel em todo o conjunto dos dados de temperatura.

4.1.1 *Termopar soldado no calço*

Pelos gráficos das Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 é possível observar o comportamento térmico no ponto (2) ao decorrer do tempo, para os diferentes níveis de velocidades de corte sob diferentes condições ambientes. As linhas vermelhas dos gráficos indicam as temperaturas médias entre os ensaios e as réplicas para a condição a seco, verde para as condições com FRI com água a uma temperatura ambiente, e azuis para as FRIs com circulação de água gelada.

Ao comparar os três gráficos, percebe-se uma semelhança em relação aos menores crescimentos de temperatura gerados pela utilização do sistema de resfriamento. Sua

utilização proporcionou menores temperaturas geradas nesse ponto, indicando uma redução no gradiente térmico gerado durante o corte. Na usinagem com o maior nível de velocidade de corte para um tempo médio de 35 a 40 segundos, foi apresentado temperaturas maiores que 100 °C para as condições a seco, já nas condições no qual utilizou-se FRI com água gelada, observou-se temperaturas na ordem de 50 °C. Indicando uma diferença média entre ambas em torno de 50 °C. No entanto, ao comparar ambas as condições que utilizam FRIs, percebe-se pouca diferença de temperatura a partir de 15 segundos de usinagem.

Também pode perceber que, ao aumentar a velocidade de corte, as temperaturas medidas em ambas as condições tendem a aumentar, isso pode ser explicado devido a relação da temperatura com a velocidade de corte, em que, ao aumentar a rotação do torno, o número de interações da ferramenta com a peça é maior, resultando em um maior atrito e deformações na peça em um tempo mais curto, e conseqüentemente aumentando a geração de calor (SANTOS; SALES,2007).

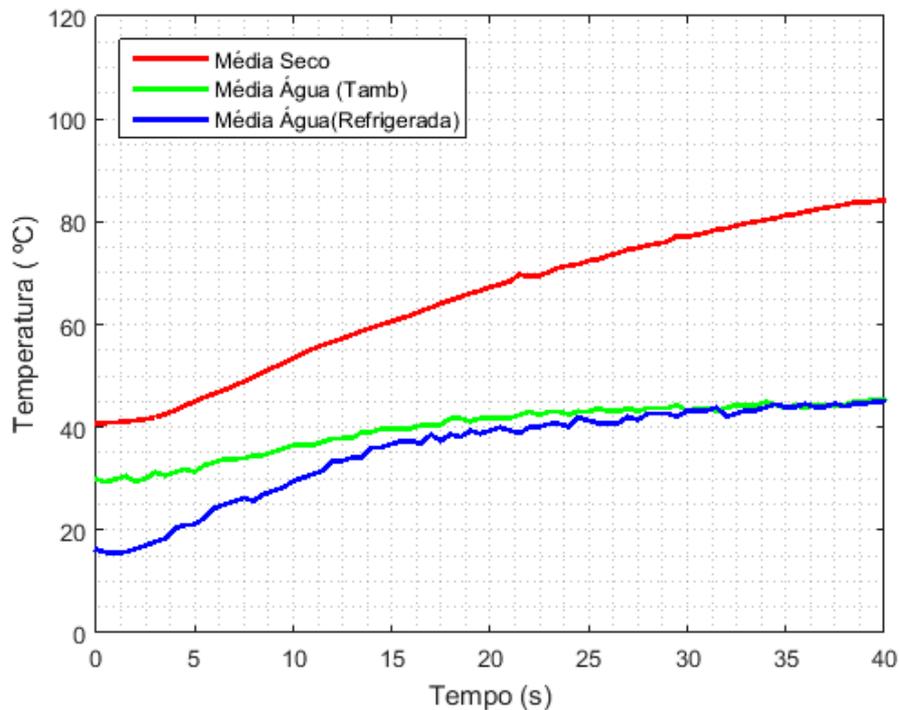


Figura 4.1 – Temperaturas medidas no calço ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

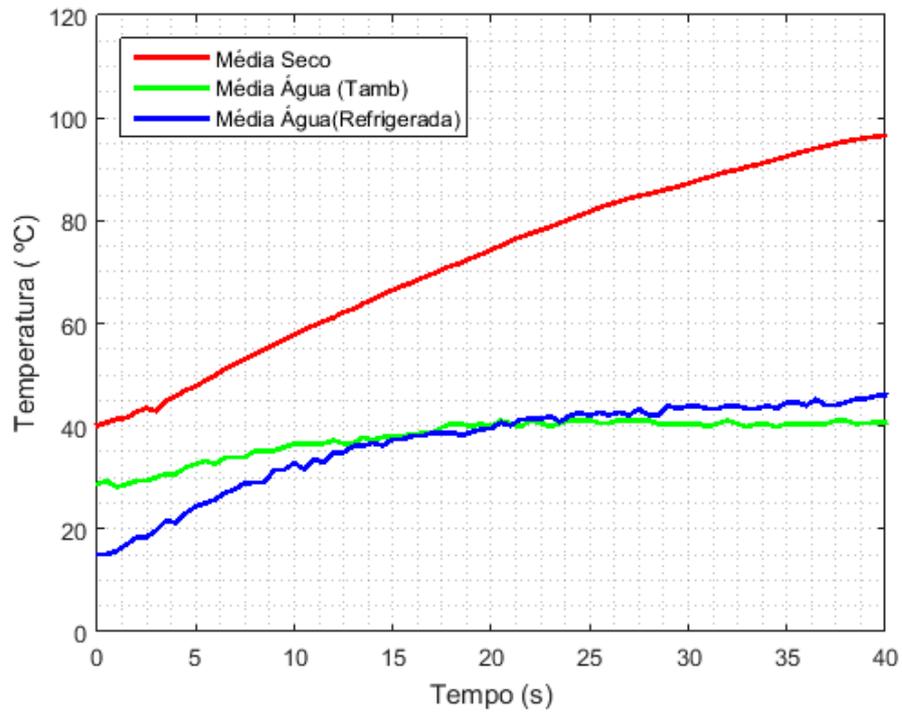


Figura 4.2 - Temperaturas medidas no calço ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 132$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.

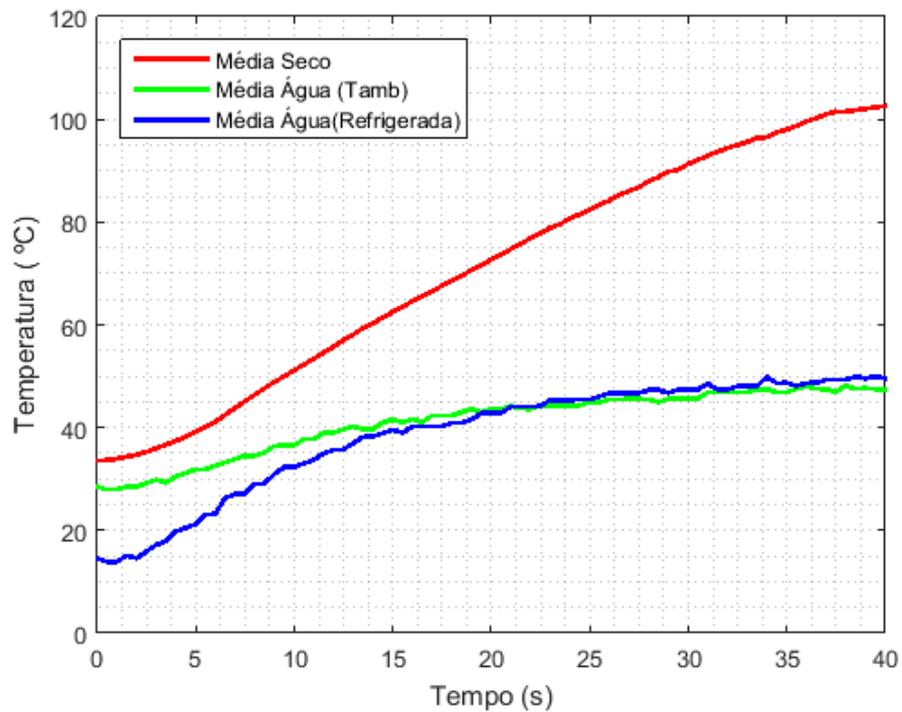


Figura 4.3 - Temperaturas medidas no calço ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c= 212$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p= 1,25$ mm.

4.1.2 Termopar soldado no porta-ferramenta a esquerda

Os gráficos das Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6 mostram os comportamentos térmicos do termopar soldado no ponto (1) em um intervalo de 40 segundos de usinagem, para os diferentes níveis de velocidades de corte sob diferentes condições ambientes. É possível observar que, conforme a velocidade de corte aumentou, as temperaturas de usinagem aumentaram, sendo mais relevante nas condições realizadas a seco. Comparando as temperaturas médias obtidas para as condições de FRI, observa-se maiores temperaturas para a água a uma temperatura ambiente.

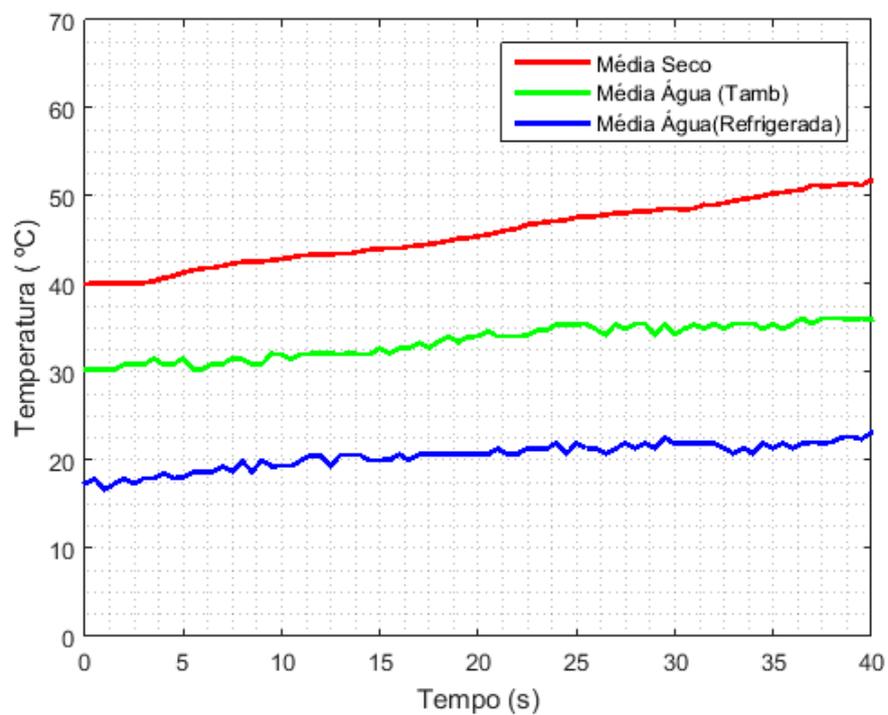


Figura 4.4 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a esquerda ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

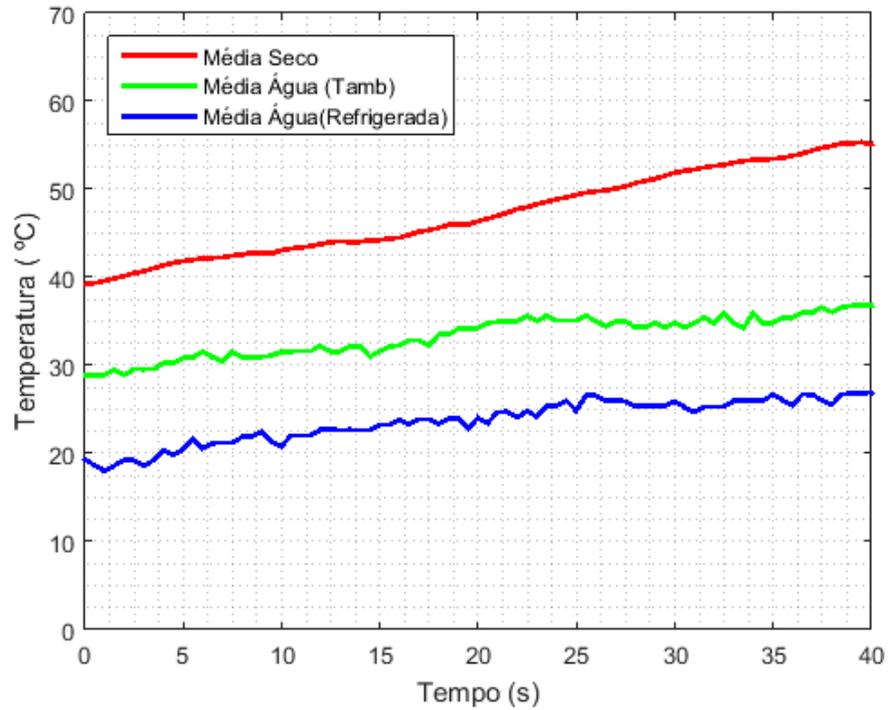


Figura 4.5 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a esquerda ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 132$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

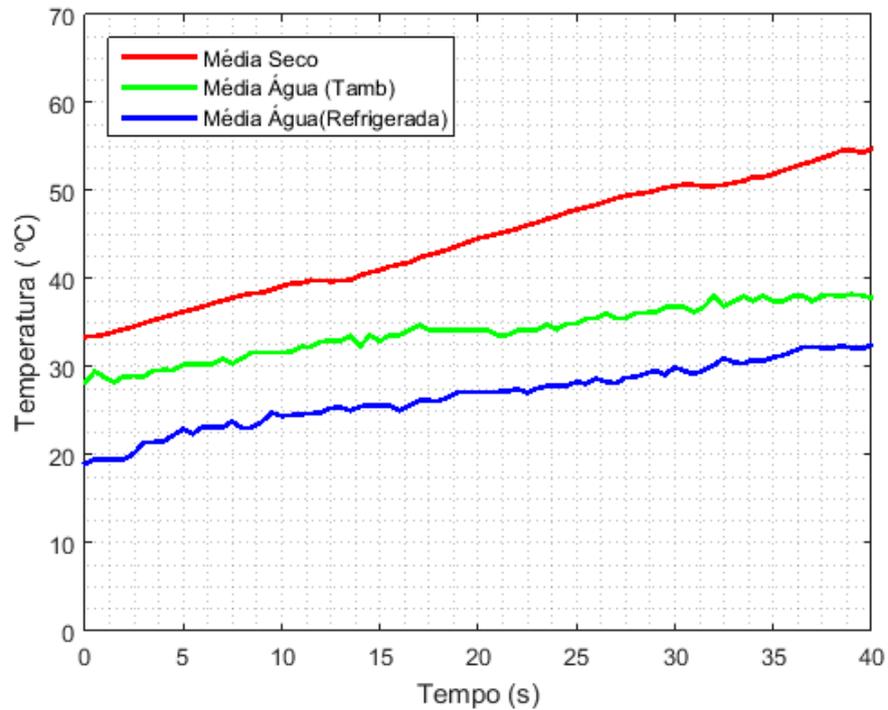


Figura 4.6 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a esquerda ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 212$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

4.1.3 Termopar soldado no porta-ferramenta a direita

As Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 mostram os comportamentos térmicos do termopar soldado no ponto (3) com um intervalo de 40 segundos de usinagem, para os diferentes níveis de velocidades de corte sob diferentes condições ambientes. Para todas as condições de corte, é possível observar que as temperaturas aumentaram conforme o tempo de usinagem, devido ao calor transferido do contato com a ferramenta e o calço. Conforme aumentou-se o parâmetro da velocidade de corte, foi possível observar uma elevação das temperaturas de usinagem para as condições realizadas a seco.

Ao comparar as temperaturas médias dos ensaios que foi utilizado FRI circulando água a uma temperatura ambiente e gelada, foram notadas maiores temperaturas para as condições em que foi utilizada água a uma temperatura ambiente. Tal diferença de temperatura pode ser explicado devido a circulação da própria água que circula também dentro do porta-ferramenta.

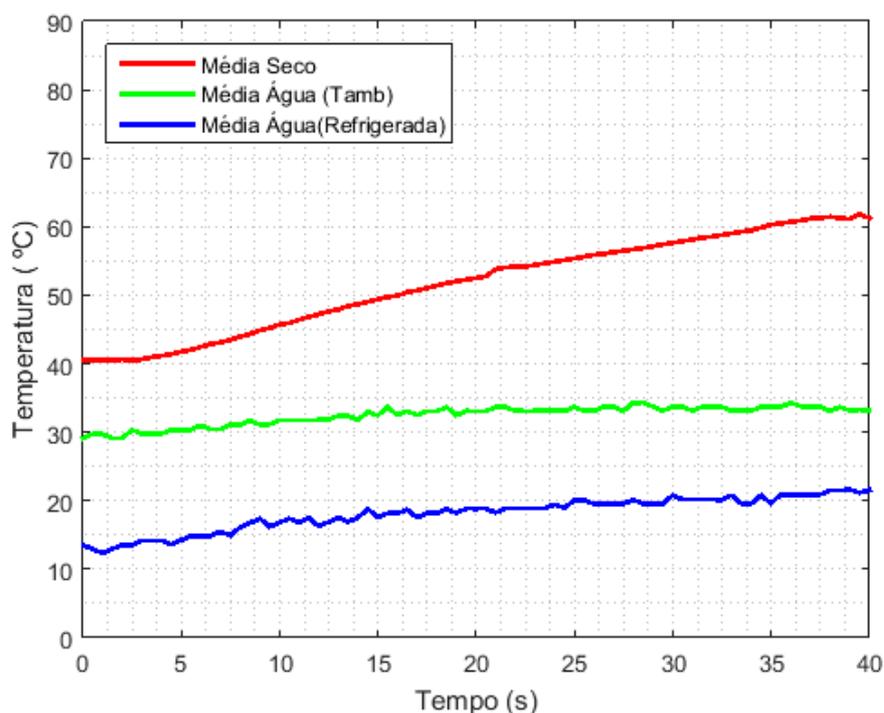


Figura 4.7 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a direita ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

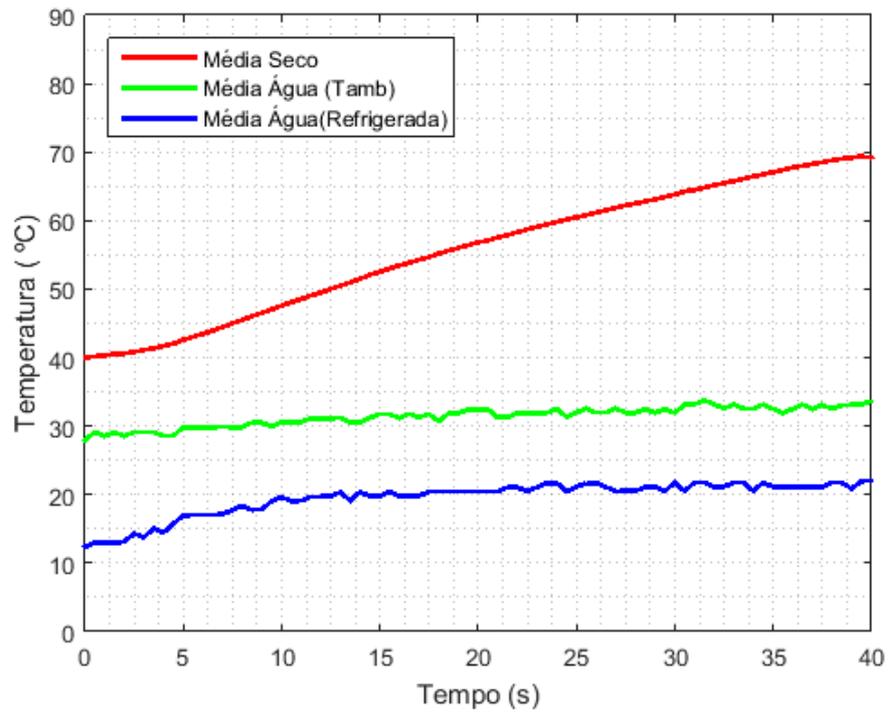


Figura 4.8 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a direita ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 132$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

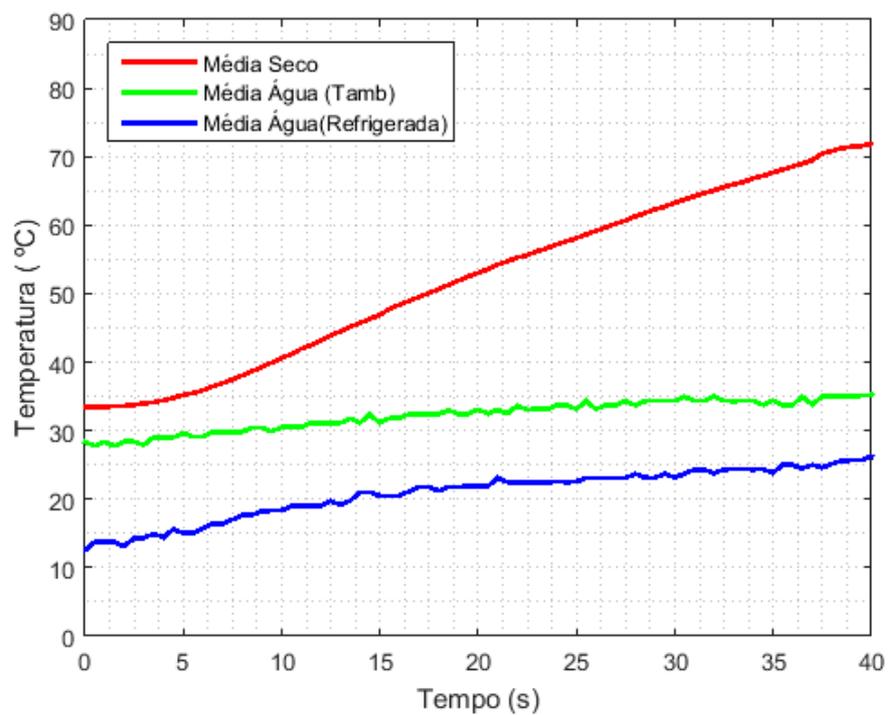


Figura 4.9 - Temperaturas medidas no porta-ferramenta a direita ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 212$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

4.1.4 Termopar soldado na ferramenta

Os gráficos das Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12 mostram os comportamentos térmicos do termopar soldado no ponto (4), que representa a temperatura de referência T_2 , em um intervalo de 40 segundos de usinagem, para os diferentes níveis de velocidades de corte sob diferentes condições ambientes. Ao analisar os gráficos, observa-se que conforme aumentou-se a velocidade de corte, a temperatura aumentou. Analisando as temperaturas de todos os gráficos, nota-se que os ensaios realizados a seco apresentaram temperaturas relativamente maiores do que as condições que utilizaram FRIs. Para as condições com velocidades de corte de 84 m/min percebeu-se diferenças em torno de 120 °C em comparação a utilização das FRIs por água gelada. Já na condição com uma velocidade de corte de 212 m/min foi apresentado diferenças em torno de 170 °C. Para os ensaios em que foi utilizado FRIs, não foi observado uma diferença relevante em comparação as condições de água a uma temperatura ambiente e resfriada.

Em relação as temperaturas medidas pelos outros termopares (1, 2 e 3), é possível observar que quanto mais próximo da zona de corte é a região estudada, maior será os valores das temperaturas, isso pode ser explicado pelo efeito da geração de calor que é formado na zona de usinagem, onde o calor gerado tenderá a ser dissipado na forma de fluxo. Dentre os pontos mais próximos da interface, encontram-se os termopares soldados na ferramenta e no calço, o que justifica suas maiores temperaturas em relação aos outros.

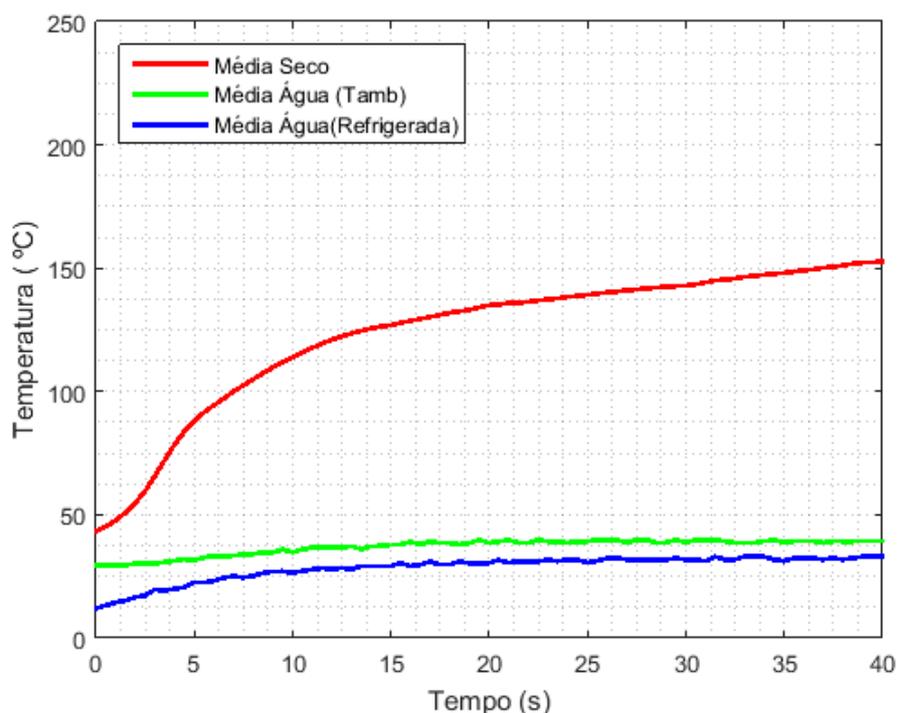


Figura 4.10 - Temperaturas medidas na ferramenta ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c = 84$ m/min, $f = 0,095$ mm/rev e $a_p = 1,25$ mm.

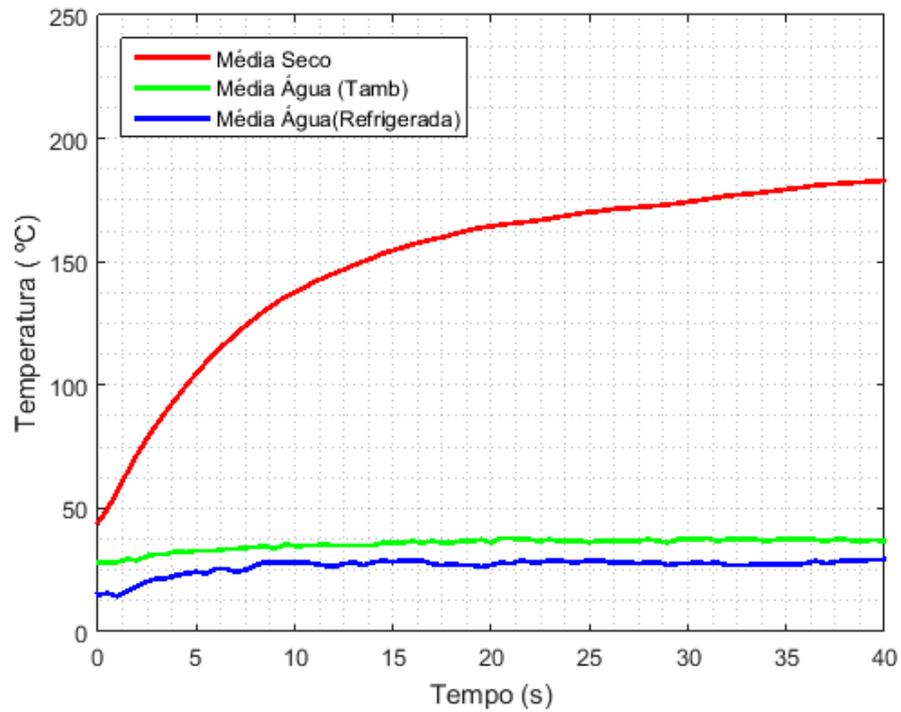


Figura 4.11 - Temperaturas medidas na ferramenta ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c=132$ m/min, $f=0,095$ mm/rev e $a_p=1,25$ mm.

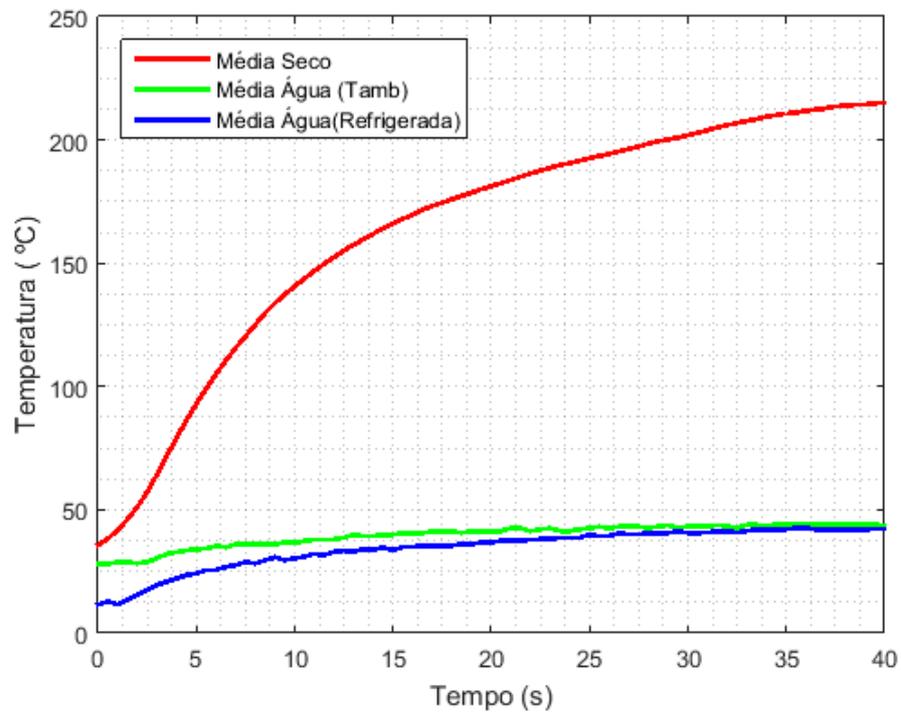


Figura 4.12 - Temperaturas medidas na ferramenta ao longo do tempo para uma condição de corte de: $V_c=212$ m/min, $f=0,095$ mm/rev e $a_p=1,25$ mm.

4.2 Termopar ferramenta-peça

Nesta seção será discutido os resultados de temperatura determinados através da técnica do termopar ferramenta-peça.

4.2.1 Análise dos resultados de temperatura obtidos na usinagem

O resultado principal das temperaturas de corte não está em função somente das f.e.ms produzidas durante os ensaios de usinagem, mas também na forma de como é considerado a temperatura de referência T_2 durante a análise dos resultados. Pela Figura 4.13 é possível ver o comportamento térmico da temperatura média de referência T_2 para os ensaios realizados a seco a uma velocidade de corte de 212 m/min.

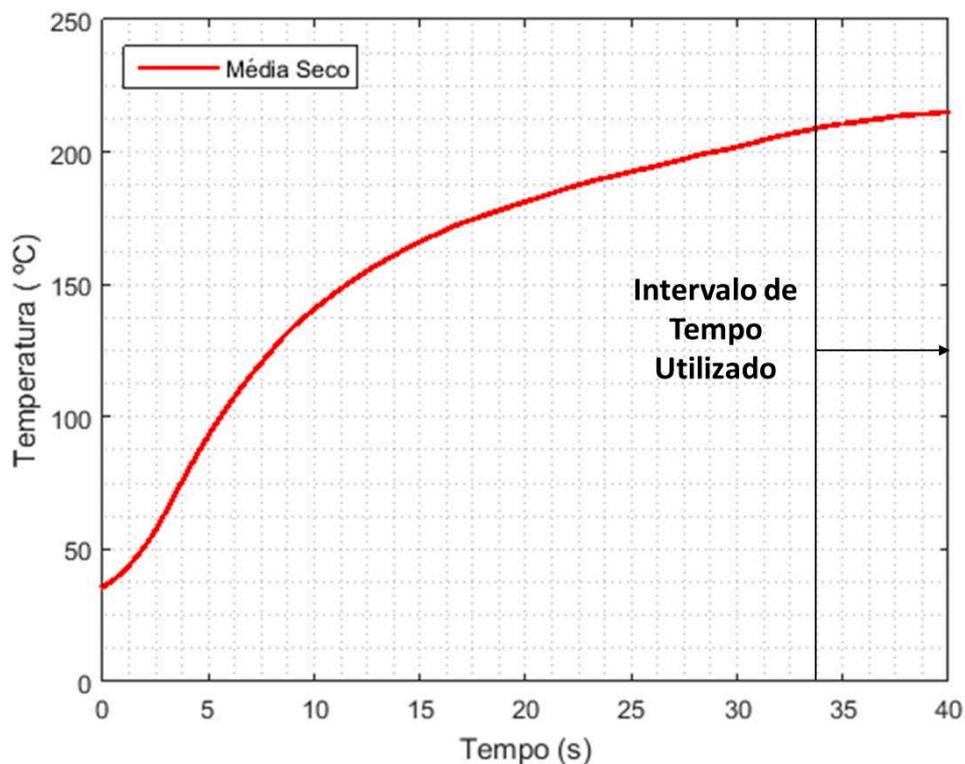


Figura 4.13 - Intervalo de tempo considerado para o levantamento das temperaturas de usinagem em todas as condições de usinagem.

Observa-se que nos primeiros instantes de usinagem a temperatura na junta de referência tende a crescer rapidamente, e após um determinado tempo, a taxa de aumento de temperatura reduz, tendendo a uma estabilização desses valores. Por isso, para evitar erros devido a essas variações de temperatura, deve-se considerar T_2 em tempos maiores,

nos quais essas variações são menores. Para determinar as temperaturas de usinagem perante o termopar ferramenta-peça, considerou-se os valores de temperatura dos últimos 7,5 segundos de usinagem antes de desligar o torno, o mesmo vale para as f.e.ms adquiridas durante a realização dos ensaios.

O gráfico da Figura 4.14 mostra as temperaturas médias obtidas pelo método do termopar ferramenta-peça para as diferentes velocidades de corte e condições ambiente.

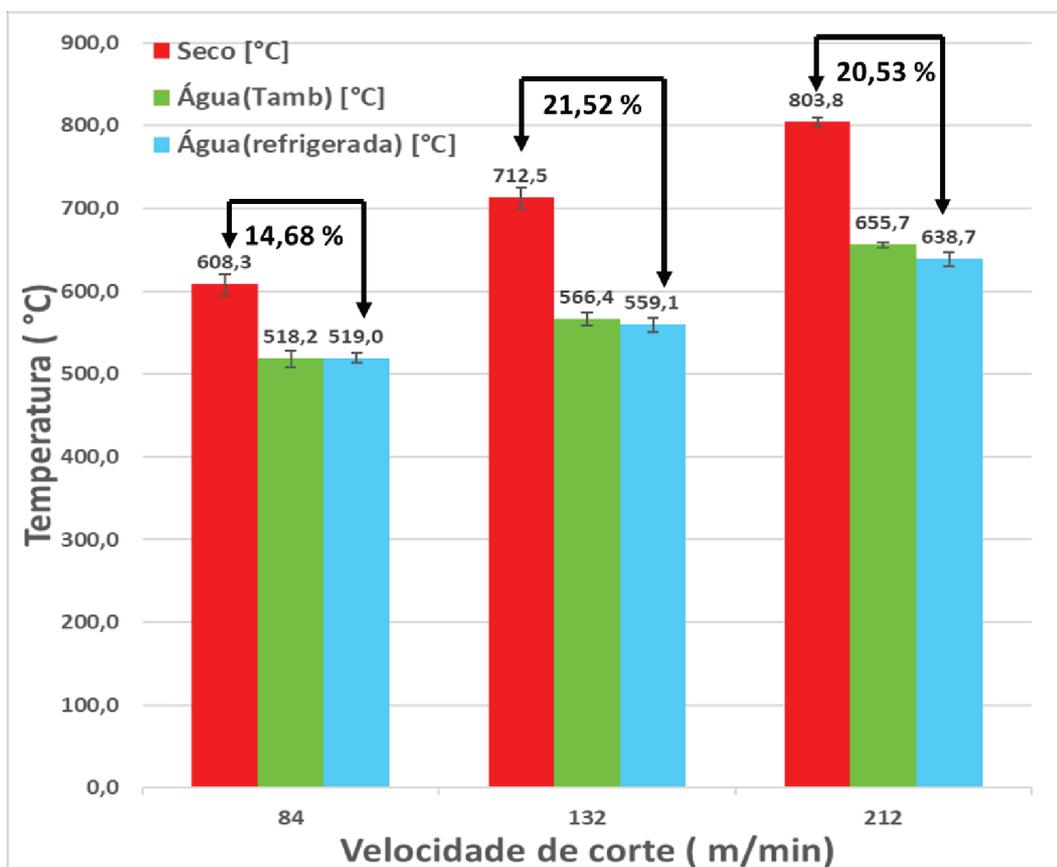


Figura 4.14 - Comparação das temperaturas de usinagem médias obtidas sob diferentes condições ambiente.

Os resultados mostraram que ao aumentar a velocidade de corte, a temperatura de usinagem também aumenta. Aumentar a velocidade de corte significa aumentar o número de iterações da ferramenta com a peça em um intervalo de tempo, resultando em um maior atrito e também maiores taxas de deformação na peça, acarretando em um aumento de temperatura.

A usinagem a seco foi o parâmetro que apresentou as maiores temperaturas médias em todas as condições de corte. Nos ensaios realizados a uma velocidade de corte de 212 m/min foi atingido temperaturas na ordem de 800 °C, já em menores velocidades de corte de 84 m/min obteve-se temperaturas médias em torno de 608,3 °C. Em comparação as

condições que foi utilizado FRI, observa-se que os ensaios a seco apresentaram diferenças significativas.

Considerando o efeito da variação das velocidades de corte e das condições ambientes, foi realizado uma análise estatística para verificar quais foram os parâmetros influentes e também para verificar se há uma interação significativa entre esses parâmetros. Dessa forma, utilizando o *software Statistica® versão 10.0* foi realizado o levantamento do quadro da análise de variância ANOVA indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Análise de variância para as condições de corte utilizadas.

Fator	SQ	Grau de Liberdade	Q.M	F	p
Média	6961203	1	6961203	40493,53	0,00000
Ambiente	67875	2	33937	197,41	0,00000
Velocidade de Corte	66486	2	33243	193,37	0,00000
Ambiente e Velocidade de corte	4124	4	1031	6,00	0,012361
Erro	1547	9	172		

A coluna escrita em vermelho indica os valores de “p”. Para $p > 0,05$ significa que o parâmetro não é estatisticamente significativo em uma confiabilidade de 95 %. Ao analisar a Tabela 4.1 percebe-se que tanto o parâmetro da velocidade de corte quanto a condição ambiente se mostraram significativas, assim como sua interação. Com isso é possível

confirmar que o aumento da velocidade de corte acarreta em maiores temperaturas. No caso das variações das condições ambientes, percebe-se que foi apresentado um valor de “p” bastante pequeno. Dessa forma, comprova-se que a utilização de um sistema de resfriamento pode ter um impacto significativo nas temperaturas de usinagem.

Na Figura 4.15 é apresentado o gráfico dos valores observados versus valores preditos, onde é possível visualizar que o modelo estatístico utilizado apresentou uma boa representatividade para os resultados obtidos, onde os pontos dos dados observados estão bem próximos a linha de regressão ajustada.

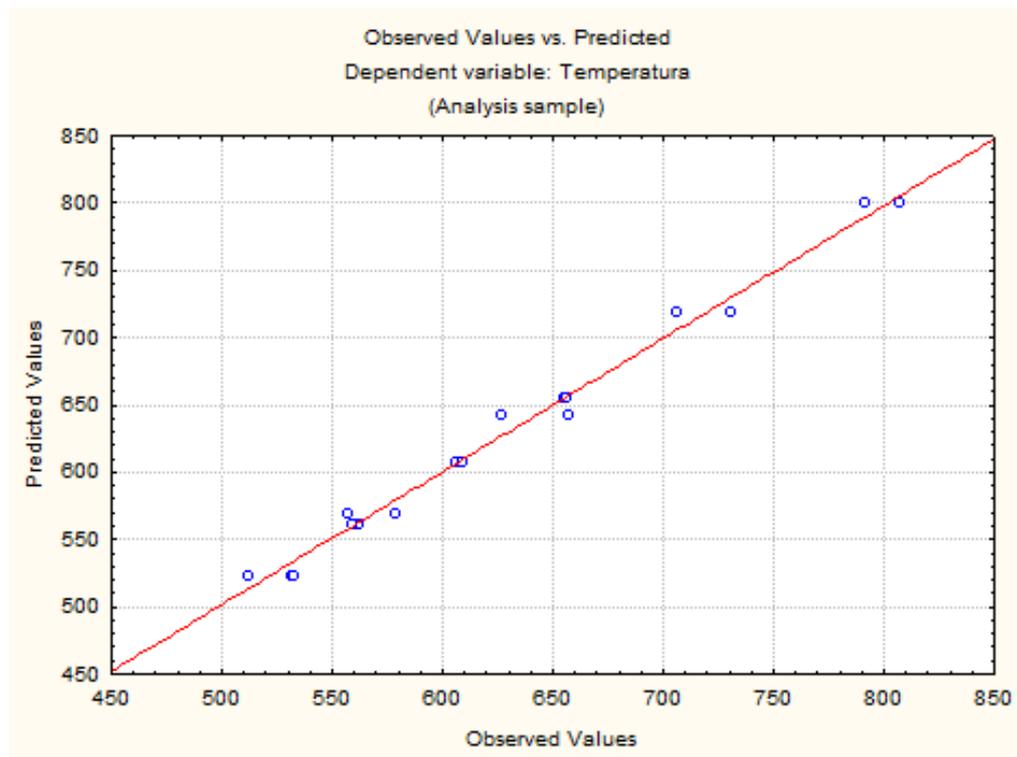


Figura 4.15 - Valores preditos versus valores observados dos resultados de temperatura.

Para determinar o efeito da utilização das FRIs nas temperaturas médias de usinagem, foi calculado a diferença de seus valores (referentes ao gráfico da Figura 4.14) para todas as condições, indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Diferença das temperaturas médias calculadas para todas as condições ambientes.

Velocidade de corte	Seco - Água(refrigerada)	Seco - Água (T_{amb})	Água (T_{amb})-Água (Refrigerada)
84 m/min	89,3 °C (14,68 %)	90,1 °C (14,81 %)	-0,8 °C (< 1 %)
132 m/min	153,4 °C (21,52 %)	146,1 °C (20,50 %)	7,3 °C (1,3 %)
212 m/min	165,1 °C (20,53 %)	148,2 °C (18,44 %)	17,0 °C (2,6 %)

Em relação as diferenças de temperatura dos ensaios a seco e resfriado por água gelada, nota-se que no menor nível de velocidade de corte, foi obtido uma diferença de temperatura média de 89,3 °C, já na condição intermediária de velocidade de corte obteve-se uma diferença de temperatura média de 153,4 °C e no maior nível foi registrado uma diferença de 165,1 °C. No entanto em porcentagem, o efeito da refrigeração foi maior na condição intermediária. Ao comparar a condição de usinagem a seco com a condição que foi utilizado ferramentas modificadas circulando água a uma temperatura ambiente, observou-se diferenças de 90,1 °C (14,81 %), 146,1 °C (20,50 %) e 148,2 °C (18,44 %) para os níveis baixo, médio e alto de velocidade de corte.

Comparando as condições de FRI por água gelada e água a uma temperatura ambiente percebeu-se diferenças de -0,8 °C (< 1 %), 7,3 °C (1,3 %) e 17,0 °C (2,6 %) para os níveis baixo, médio e altos de velocidade de corte.

Ao analisar todos esses resultados nota-se um comportamento similar de forma crescente nas diferenças de temperaturas das condições seco/FRI conforme é aumentado a velocidade de corte. Com isso, percebeu-se que a utilização do sistema de refrigeração foi mais efetiva em maiores velocidades de corte, pois gera maiores diferenças de temperaturas. No entanto, ao analisar as diferenças entre as FRIs por água a uma temperatura ambiente e resfriada percebeu-se nenhuma relevância. Para confirmar esta afirmação de maneira estatística, foi realizado uma análise de variância dessas condições, mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Análise de variância para as condições ambiente que utilizaram insertos refrigerados.

Fator	SQ	Grau de Liberdade	Q.M	F	p
Média	4016000	1	4016000	21563,70	0,00000
Ambiente	144	1	144	0,77	0,413265
Velocidade de Corte	33255	2	16627	89,28	0,000034
Ambiente e Velocidade de corte	98	2	49	0,26	0,776143
Erro	1117	6	172		

Observa-se que a condição ambiente apresentou um valor de $p > 0,05$, o que indica que não há uma significância estatística. Nesse caso, conclui-se que para refrigerar as ferramentas internamente, basta apenas utilizar água a uma temperatura ambiente, sem a necessidade de refrigerá-la.

Levando em conta o aspecto da sustentabilidade, pode-se dizer que o resultado é satisfatório, pois dessa maneira, não há a necessidade de se utilizar um sistema de refrigeração, evitando o gasto com energia elétrica. No entanto, caso esse sistema fosse aplicado em uma grande escala, talvez seria necessário um sistema de arrefecimento para a água. Mas não necessariamente um sistema de refrigeração necessite do uso de energia elétrica, as vezes um sistema de resfriamento na forma de radiadores seria o suficiente, trocando calor com a água apenas através da convecção do ar ambiente.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Ao finalizar este trabalho observou-se as seguintes conclusões:

- Através dos gráficos gerados para os termopares soldados em torno da ferramenta e porta-ferramenta, percebeu-se nos pontos mais próximos da interface cavaco/ferramenta maiores diferenças de temperaturas comparando as condições a seco e FRIs.
- A utilização do sistema de refrigeração impactou significativamente nas temperaturas de todo o conjunto ferramenta e inserto, sendo mais significativos nas regiões próximas a interface cavaco/ferramenta.
- Ao comparar o sistema de resfriamento utilizando água gelada e água a uma temperatura ambiente, pelo método do termopar ferramenta-peça, não foi encontrado uma redução significativa nas temperaturas da interface cavaco/ferramenta.
- Conforme aumentou-se a velocidade de corte foi obtido maiores temperaturas, sendo a maior de 803,8 °C, obtida no ensaio a seco com uma $V_c = 212$ m/min. No entanto, esse aumento foi menor para as condições que foi utilizado um sistema de resfriamento.
- Pelo método do termopar ferramenta-peça, percebeu-se que a utilização de FRIs é mais eficiente em maiores velocidades de corte. A maior diferença de temperatura notada entre os insertos comuns e FRIs foi no maior nível de velocidade de corte sendo 165,1 °C (20,53 %). No entanto, em % o nível intermediário de V_c foi o que apresentou um maior valor de 21,52 %.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos, são apresentadas as seguintes propostas para futuras pesquisas:

- Estudar a eficiência do sistema de refrigeração na usinagem de diferentes tipos de materiais como ligas de aços, titânio e níquel.
- Realizar estudos desta tecnologia para diferentes processos de usinagem como: fresamento, furação e sangramento.
- Comparar o uso desta técnica com diferentes condições de refrigeração como nitrogênio líquido, ar comprimido, fluidos de corte.
- Estudar o efeito térmico em resfriar a ferramenta e o porta-ferramenta separadamente.
- Realização de estudos que buscam otimizar a geometria da ferramenta, de forma a melhorar a qualidade de sua refrigeração e também a disponibilidade no número de arestas disponíveis para o corte.
- Utilizar outros sistemas de medição de temperatura como a câmera térmica para comparar os resultados obtidos nesse trabalho.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAPIOU, J. S.; STEPHENSON, D. A. Analytical and experimental studies of drill temperatures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 116, n. 1, p. 54–60, 1994. <https://doi.org/10.1115/1.2901809>

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.

BORDIN, A.; SARTORI, S.; BRUSCHI, S.; GHIOTTI, A. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, n. 2017, p. 4142–4151, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.209>

CARVALHO, S. R. Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento. 2005.123 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CUNHA, R.N. Medição Experimental de Temperatura no Torneamento da Liga Ti-6Al-4V utilizando o método do termopar ferramenta-peça. 2020. 132f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DA SILVA, L.R.R.; COSTA, E.S; FRANÇA, P.H.P; RAMOS, C.H.; SALES, W.F.; MACHADO, A.R. Performance Of Coated Cemented Carbide Drills In Drilling Of Gray Cast Iron Under

Different Lubri-Cooling Conditions. In : 24° ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 03 a 08 de Dezembro de 2017, Curitiba, Paraná, Brasil..

DA SILVA, L.R.R; RUZZI R.S.; TELES V.C.; SALES W.F.; GUESSER W.L.; MACHADO A.R. Analysis of the coefficient of friction at the workpiece-tool interface in milling of high strength compacted graphite cast irons. *Wear*. 426-427, Part B, 1646-1957,2019.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.111>

DE SOUSA, J. A. G. Influência da Microestrutura na Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular. 203 f. 2014. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DE SOUSA, J. A. G.; SALES, W. F.; MACHADO, A. R. A review on the machining of cast irons. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94, n. 9–12, p. 4073–4092, 2018.

<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1140-1>

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 83, p. 33–47, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071>

DHANANCHEZIAN, M. Study the machinability characteristics of Nicked based Hastelloy C-276 under cryogenic cooling. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 136, p. 694–702, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.072>

DOEBELIN, E. O. *Measurement Systems, Application and Design*, NY, USA, McGraw Hill,1990, 896 p.

Fernandes, J. R. S; Machado, A. R.; 1992. Determinação da Influência do Comprimento de Contato Cavaco/Ferramenta na Temperatura de Corte. Relatório de Iniciação Científica DIRPE nº 052/92. Universidade Federal de Uberlândia.

FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda, 1977.

FIOCCHI, A. A.; SANCHEZ, L. E. A.; INGRACI NETO, R. R.; SCALON, V. L. Porta-Ferramentas 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.

GÖKKAYA, H.; NALBANT, M.; OZÇATALBAS, Y. The applicability of the system developed to measure the tool-chip interface heat by means of tool-work piece thermocouple method. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol. 21, issue 3, pp. 409-413, 2006. (Em Turco)

GONÇALVES, M. A. Estudo Sobre a Temperatura no Fresamento do Aço Ferramenta ABNT D2 Empregando os Métodos do Termopar Ferramenta-Peça, Termopar Inserido e Simulação Numérica. 2017. 152 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Gottwein, K., 1925, Die Messung der Schneidentemperatur beim Abdrehen von Flusseise Maschinenbau, Vol. 4, pp. 1129-1135. (em Alemão)

GRZESIK, W. Friction behaviour of heat isolating coatings in machining: Mechanical, thermal and energy-based considerations. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 43, n. 2, p. 145–150, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00169-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00169-4)

HAN, R.; WU, J. Finite Element Simulation of Drilling Based on Third Wave Systems AdvantEdge .Key Engineering Materials, v. 432, p. 229–232, 2010.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.431-432.229>

HERBERT, E. G. The Measurement of Cutting Temperatures. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, Vol. 1, pp. 289-329, 1926.

https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1926_110_018_02

INGRACI NETO, R. R. Avanços no Torneamento Utilizando um Porta-ferramentas Refrigerado Internamente com Fluido em Mudança de Fase. 2014. 186 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru.

INGRACI NETO, R. R.; FIOCHI, A. A.; SANCHEZ, L. E. A.; AGUIAR, P. R. A. Predição Do Desgaste De Flanco No Torneamento Por Meio Da Análise Do Sinal Elétrico De Um Termopar Peça- Ferramenta Utilizando Wavelet E Redes Neurais. In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO

DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 11 a 15 de Abril de 2011. Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

INGRACI NETO, R. R.; SCALON, V. L.; FIOCCHI, A. A.; SANCHEZ, L. E. A. Indirect cooling of the cutting tool with a pumped two-phase system in turning of AISI 1045 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, n. 9–12, p. 2485–2495, 2016.

<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8620-6>

JEFFRIES, N. P.; ZERKLE, R. D. Thermal analysis of an internally-cooled metal-cutting tool. *International Journal of Machine Tool Design and Research*. v. 10, n. 3, p. 381–399, 1970.

[https://doi.org/10.1016/0020-7357\(70\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0020-7357(70)90019-3)

J. BARTZ, W. Ecological and Environmental Aspects of Cutting Fluids. *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, v.57, 13-16, 2001.

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.

KISHAWY, H.A; DUMITRESCU, M.; ELBESTAWI, M.A. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal Machining Tools Manufacturing*, 45(2):219–227, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.07.003>

KRYZHANIVSKYY, V.; BUSHLYA, V.; GUTNICHENKO, O.; SAOUBI, R. M.; STÅHL, J. E. Influence of Tool Material and Tool Wear on Tool Temperature in Hard Turning Reconstructed via Inverse Problem Solution. *Journal of Superhard Materials*, v. 39, n. 3, p. 192–202, 2017.

<https://doi.org/10.3103/S1063457617030078>

LESHOCK, C.E.; SHIN, Y.C. Investigation on cutting temperature in turning by a tool-work thermocouple technique. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 119, n. 4, p. 502–508, 1997.

<https://doi.org/10.1115/1.2831180>

LEZANSKI, P.; SHAW, M. C. Tool face temperatures in high speed milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 112, n. 2, p. 132–135, 1990.

<https://doi.org/10.1115/1.2899555>

LIMA JUNIOR, E. D. Medição da Temperatura de Corte no Torneamento do Aço-Ferramenta AISI D6 Temperado e Revenido Auxiliado por LN2, 2020.136 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte- Natal.

LI, R.; ALBERT, J.S. Spiral point drill temperature and stress in high-throughput drilling of titanium. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, n. 2007, p. 2005–2017, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.014>

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>

LIANG, L.; QUAN, Y.; KE, Z. Investigation of tool-chip interface temperature in dry turning assisted by heat pipe cooling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.54, p. 35–43, 2011.

<https://doi.org/10.1007/s00170-010-2926-6>

LIANG, L.; XU, H.; KE, Z. An improved three-dimensional inverse heat conduction procedure to determine the tool-chip interface temperature in dry turning. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 64, p. 152–161, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.012>

LISBOA, F.C.; MORAES J.J.B.; HIRASHITA, M.A. Fluidos De Corte: Uma Abordagem Geral E Novas Tendências. In: XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO. 08 a 11 de outubro de 2013, Salvador, Bahia, Brasil.

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.

MARANHÃO, C.; SILVA, L.; DAVIM, J. Simulação por elementos finitos com validação experimental no micro-torneamento ortogonal do aço AISI D2. *Revista iberoamericana de ingeniería mecánica*, v. 20, n. 1, p. 87–97, 2016.

MELO, A. C. A. Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor, 1998. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MEYERS, P.G.; Tool Cooling Apparatus. US3137184A. Estados Unidos, 1964.

NASCIMENTO, C. H. Estudo Da Distribuição De Temperatura Na Região De Formação De Cavacos Usando Método Dos Elementos Finitos. 2011. 123 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

NAVES, V. T. G.; DA SILVA, M. B.; DA SILVA, F. J. Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. *Wear*, v. 302, n. 1–2, p. 1201–1208, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.016>

NAVES, V.T.G.; LUIZ, N.E.; MACHADO, A.R.; DANTAS, N. O. Calibração De Um Sistema Termopar Ferramenta-Peça Para Medição De Temperatura De Usinagem. In: 16º SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, POSMEC. 2006. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

PRADEEPKUMAR, M.; AMARNATH, K.; SUNILKUMAR, M. A Review on Heat Generation in Metal Cutting. *International Journal of Engineering and Management Research*, v. 4, n. 4, p. 193–197, 2015.

RADULESCU, R.; KAPOOR, S. G. An Analytical Model for Prediction of Tool Temperature Fields during Continuous and Interrupted. *Journal of Engineering for Industry*, v. 116, p. 135-143, 1994.

<https://doi.org/10.1115/1.2901923>

REIS, D. D.; ABRÃO, A. M. The machining of aluminium alloy 6351. *Journal Engineering Manufacture*, p. 27–33, 2005.

<https://doi.org/10.1243/095440505X7966>

ROZZI, J. C.; SANDERS, J. K.; CHEN, W. The Experimental and Theoretical Evaluation of an Indirect Cooling System for Machining. *Journal of Heat Transfer*, v. 133, p. 1–10, 2011.

<https://doi.org/10.1115/1.4002446>

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 tool-workpiece 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-a0ba-3d6be9737f3a?SearchMode=toolsUnited&classificationType=GTC>. Acesso em: 05/07/2021 às 14:32.

SHARMA, V. S.; DOGRA, M.; SURI, N. M. Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 49, n. 6, p. 435–453, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.12.010>

SHASHIDHARA, Y. M. Ã.; JAYARAM, S. R. Tribology International Vegetable oils as a potential cutting fluid — An evolution. *Tribology International*, v. 43, n. 5–6, p. 1073–1081, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.065>

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 57, p. 83–101, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002>

SHORE, H. Thermoelectric Measurement of Cutting Tool Temperature. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, Vol. 15, pp. 85-88, 1925.

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>

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.; AGAPIOU, J.S. *Metal Cutting Theory and Practice*, 2 nd Edition, Taylor & Francis, 2006.

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

SULLIVAN, D. O.; COTTERELL, M. Temperature measurement in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology* , v. 118, p. 301–308, 2001.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00853-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00853-6)

TABAK, D.; DA SILVA, M.B.; MOURA, R.R. In: XVIII COLÓQUIO DE USINAGEM, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. 2015. Desempenho dos lubrificantes sólidos na usinagem da liga Ti-6Al-4V.

TAYLOR, J. L., *Fundamental of Measurement Error*, USA, Neff Instrument Corporation, 1988.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. *Metal Cutting*. 4. Ed. Boston, USA, Butterworth-Heinemann, 2000, 446p.

TUPY. 2011. Catálogo Técnico FUCO® Perfis Fundidos - TUPY. Disponível em: https://www.tupy.com.br/imagens/promocional/catalogo_tecnico_fuco.pdf. Acessado em: 04/07/2021.

ULUTAN, D.; LAZOGLU, I.; DINC, C. Three-dimensional temperature predictions in machining processes using finite difference method. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 2, p. 1111–1121, 2009.

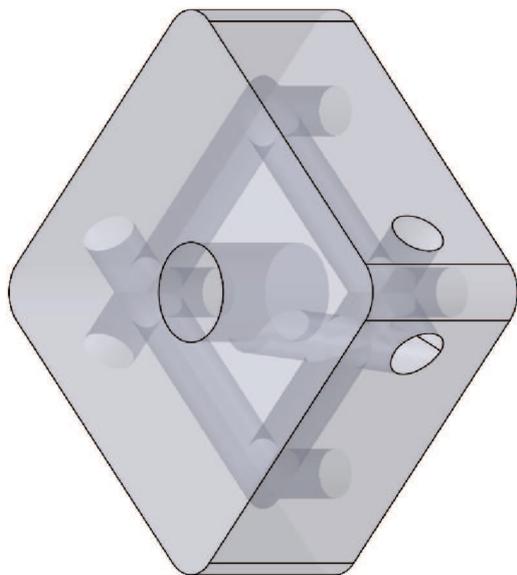
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.020>

Vilarinho, L.O.; Machado, A.R; Comportamento Da Temperatura De Corte Durante A Usinagem De Ferro Fundido Cinzento Determinada Pelo Método Termopar Ferramenta-Peça. *Science and Engineering Journal*, v. 9, n. 2, p. 65-69, 2000.

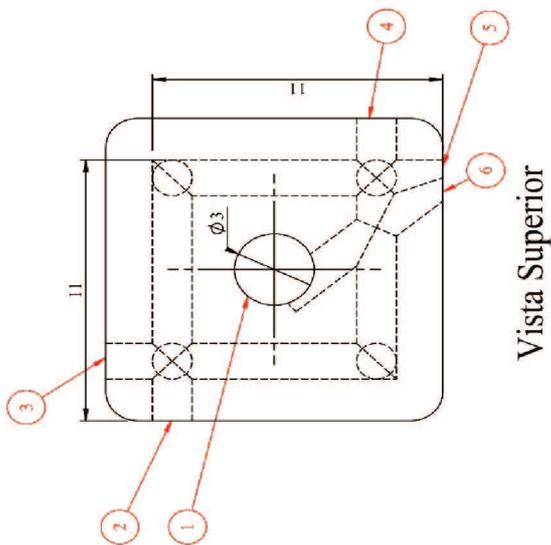
Walter Tools. 2021. Catálogo de produtos Walter Tools® - Porta-ferramentas DSSNL2525X12-P. Disponível em: <https://www.waltertools.com/pt-pt/search/pages/default.aspx#/product/DSSNL2525X12-P?query=%7B%22t%22:%22productdetails%22%7D>. Acessado em: 04/07/2021.

ZERKLE, R. D. Cooling system for cutting tool and the like.US3571877A. Depósito: 04/04/1968. Publicação: 23/03/1971.1971. United States.

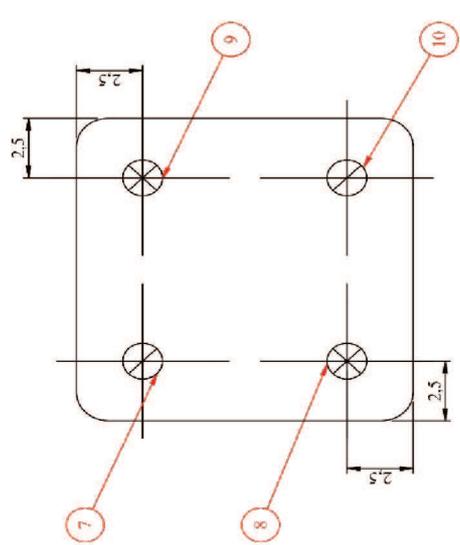
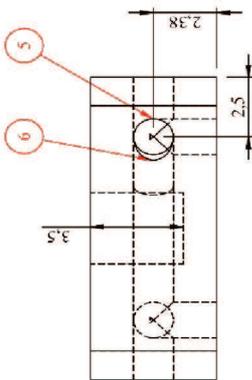
ZHAO, F.; OGALDEZ, J.; SUTHERLAND, J.W. In:CIRP Annals - Manufacturing Technology Quantifying the water inventory of machining processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 61, n. 1, p. 67–70, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.027>



Pastilha de Metal Duro: SNUN120412



Vista Frontal



Vista Inferior

Furo EDM	Face	Diâmetro	Profundidade	Ângulo
1	Superior	3 mm	3,5 mm	Reto
2	Lateral	1,5 mm	11 mm	Reto
3	Lateral	1,5 mm	11 mm	Reto
4	Lateral	1,5 mm	11 mm	Reto
5	Lateral	1,5 mm	11 mm	Reto
6	Lateral	1,5 mm	9 mm	50°
7	Inferior	1,5 mm	2,5 mm	Reto
8	Inferior	1,5 mm	2,5 mm	Reto
9	Inferior	1,5 mm	2,5 mm	Reto
10	Inferior	1,5 mm	2,5 mm	Reto

DESCRIÇÃO Canais Internos de Refrigeração em Pastilhas de Metal Duro				
POUR	DATA	APROVADO	DATA	DATA
DESENHO	Augusto César S.P.	07/2020		
PROJETO	Augusto César S.P.	07/2020		
VERIFICADO	Augusto César S.P.	07/2020		
FIRMA	ESCALA DIM.	FOLHA	DESENHO	REV.
Universidade Federal de Uberlândia	A3	1/1	01	0
PREFÍXO/CEAN°	PLANTA	ÁREA	TIPO	NÚMERO
				01