

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PATRICK CROKO CAPUTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A TEMPERATURA NO TORNEAMENTO
CONVENCIONAL A SECO POR IMAGEM TERMOGRÁFICA E O MODELO
ANALÍTICO DE TRIGGER E CHAO**

JUIZ DE FORA

2016

PATRICK CROKO CAPUTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A TEMPERATURA NO TORNEAMENTO
CONVENCIONAL A SECO POR IMAGEM TERMOGRÁFICA E O MODELO
ANALÍTICO DE TRIGGER E CHAO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Professor Dr. Carlos Renato Pagotto

Co-Orientador: Professor Dr. Marcos Martins Borges

JUIZ DE FORA

2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Caputo, Patrick Croko .

Estudo comparativo entre a temperatura no torneamento convencional a seco por imagem termográfica e o modelo analítico de Trigger e Chao / Patrick Croko Caputo. -- 2016.
68 f.

Orientador: Carlos Renato Pagotto

Coorientador: Marcos Martins Borges

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Usinagem. 2. Temperatura. 3. Análise termográfica. I. Pagotto, Carlos Renato, orient. II. Borges, Marcos Martins, coorient. III. Título.

PATRICK CROKO CAPUTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A TEMPERATURA NO TORNEAMENTO
CONVENCIONAL A SECO POR IMAGEM TERMOGRÁFICA E O MODELO
ANALÍTICO DE TRIGGER E CHAO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 30 de junho de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Carlos Renato Pagotto
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Marcos Martins Borges
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto e ao Prof. Dr. Marcos Martins Borges por acreditarem na realização desse trabalho, pela confiança e orientação.

Aos amigos da UFJF que acompanharam minha caminhada durante o curso, na convivência do cotidiano acadêmico, meu muito obrigado. Fico com a certeza de que levarei a amizade de vocês no decorrer da vida.

Aos meus familiares que sempre deram todo o suporte necessário para essa conquista, que não é exclusivamente minha, mas sim de todos que contribuíram de alguma forma.

Em especial aos meus pais, e minha irmã. Que durante toda minha caminhada me deram total apoio, e estiveram comigo sempre que precisei.

Meu pai, que sempre foi um exemplo para mim, compartilhando não somente conhecimentos técnicos, mas também ensinamentos para a vida. Sempre fez mais do que o possível por mim. Muito obrigado!

Minha namorada, amiga e companheira, que fez parte dessa caminhada nesses últimos anos.

E a todos que de certa forma contribuíram para realização desse trabalho.

RESUMO

A análise da temperatura no processo de usinagem é de grande importância, pois ela influencia em diversos fatores, seja de forma direta ou indireta, como desgaste e vida da ferramenta, uso e escolha de lubrificantes, determinação dos parâmetros de corte, tolerância dimensional da peça, entre outros. O presente trabalho buscou viabilizar o uso da termografia na usinagem. Utilizando a análise termográfica para captar o calor na forma de imagem e mensurar a máxima temperatura obtida no processo, e posteriormente comparou-se com o modelo analítico de Trigger e Chao, que propõe calcular o aumento médio da temperatura de deformação do cavaco devido ao cisalhamento e o aumento de temperatura devido ao atrito ferramenta/cavaco na superfície de saída, sendo a temperatura final a soma dessas duas. As imagens termográficas foram coletadas durante o corte ortogonal a seco, utilizando pastilha de metal duro revestido, e o aço SAE 1045 como material usinado. Os parâmetros de corte foram variados, buscando a relação existente entre o comportamento da temperatura e a variação destes parâmetros na análise experimental e no modelo analítico escolhido. A partir da análise dos resultados obtidos foi possível estabelecer relações entre os métodos abordados e o comportamento da temperatura em função dos parâmetros utilizados. Os valores obtidos experimentalmente divergiram dos valores determinados analiticamente, entretanto o comportamento da temperatura em função dos parâmetros de corte foi coerente com o encontrado na literatura.

Palavras-chave: usinagem, temperatura, análise termográfica.

ABSTRACT

The temperature analysis is of great importance during the machining process since it influences on several factors, either directly or indirectly, such as wear and tool life, use and selection of lubricants, determination of cutting parameters, dimensional tolerance of the piece, among others. This study sought to enable the use of thermography in machining. Using the thermal analysis to capture heat in an image form and measuring the maximum temperature obtained during the process, and subsequently it was compared with the Trigger and Chao's analytical model, which proposes to calculate the average temperature increase of chip deformation due to shear and the temperature increase due to friction tool/chip on the rake face, and is the final temperature the sum of these two. The thermographic images were collected during the orthogonal cutting carried out dry, using carbide insert coated, and the SAE 1045 steel as machined material. The cutting parameters were varied, searching the relationship between the temperature behavior and the variation of these parameters in experimental analysis and the selected analytical model. From the analysis of the results, it was possible to determine the relationship between the used methods and the temperature behavior according to the used parameters. The values obtained experimentally diverged from those determined analytically though temperature behavior in terms of cutting parameters was consistent with was found in the literature.

Keywords: machining, temperature, thermographic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torneamento cilíndrico externo	18
Figura 2 – Ângulos de saída, de cunha e de folga da ferramenta, representados no plano admitido de trabalho	20
Figura 3 – Processo de formação do cavaco.....	21
Figura 4 – Exemplos de corte ortogonal em processos de torneamento e de fresamento	21
Figura 5 – Modelo de distribuição de tensão na superfície de saída da ferramenta	23
Figura 6 – Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos	25
Figura 7 – Distribuição típica de temperaturas na ponta de uma ferramenta de metal duro ...	26
Figura 8 – Relações entre a usinagem de determinados materiais e suas consequências	27
Figura 9 – Distribuição de temperaturas obtida através de fotografia infravermelha	30
Figura 10 – Resultado da temperatura em fresamento medida pela técnica de radiação infravermelha. (Fresamento de aço ABNT S12L14 com ferramenta de aço rápido usando $a_p = 1\text{mm}$ e $f_z = 0,05\text{ mm/dente}$)	30
Figura 11 – Influência do avanço nas temperaturas das ferramentas de corte, com os seguintes valores de avanço: (a) $0,125\text{mm/rev}$ (b) $0,25\text{mm/rev}$ (c) $0,5\text{ mm/rev}$	31
Figura 12 – Diferentes câmeras de imagem térmica	35
Figura 13 – Aplicações de imagens termográficas	35
Figura 14 – Esquema utilizado nos ensaios para coleta de imagens termográficas	36
Figura 15 – Distribuição da temperatura para o valor de $V_c = 120\text{m.min}^{-1}$ e $f = 0,1\text{ mm.rev}^{-1}$ no corte ortogonal do aço inoxidável 316L utilizando imagem termográfica.....	37
Figura 16 – Esquema de montagem do corpo de prova no torno	38
Figura 17 – Detalhes e características do revestimento da ferramenta utilizada (YBC251)....	40
Figura 18 – Detalhes do quebra cavaco da ferramenta.....	41
Figura 19–Detalhes do porta-ferramenta utilizado	42
Figura 20 – Torno utilizado nos ensaios.....	43
Figura 21 – Imagem da câmera utilizada, modelo E50 (Série EXX)	43
Figura 22 – Corpo de prova 1; $n=1600\text{ rpm}$; $V_c=123,9\text{ m/min}$; $f=0,042\text{ mm/rev}$; $a_p=0,125\text{ mm}$	47
Figura 23 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 20)	47
Figura 24 – Corpo de prova 2; $n=1600\text{ rpm}$; $V_c=127,67\text{ m/min}$; $f=0,042\text{ mm/rev}$; $a_p=0,375\text{ mm}$	48
Figura 25 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 22)	48

Figura 26 – Corpo de prova 3; $n=1600$ rpm; $V_c=115,11$ m/min; $f=0,100$ mm/rev; $a_p=0,25$ mm	49
Figura 27 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 24)	.49
Figura 28 – Corpo de prova 4; $n=1600$ rpm; $V_c=123,90$ m/min; $f=0,100$ mm/rev; $a_p=0,375$ mm	50
Figura 29 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 26)	50
Figura 30 – Corpo de prova 5; $n=1600$ rpm; $V_c=118,88$ m/min; $f=0,201$ mm/rev; $a_p=0,25$ mm	51
Figura 31 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 28)	51
Figura 32 – Corpo de prova 6; $n=1600$ rpm; $V_c=123,90$ m/min; $f=0,201$ mm/rev; $a_p=0,375$ mm	52
Figura 33 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 30)	52
Figura 34 – Efeito da velocidade de corte na temperatura, obtido através de imagem termográfica.....	57
Figura 35 – Efeito da profundidade de corte na temperatura para diferentes velocidades de corte, obtido através de imagem termográfica.....	57
Figura 36 – Efeito do avanço na temperatura para diferentes valores de velocidade de corte, obtido através de imagem termográfica.....	58
Figura 37 – Variação da temperatura em função da velocidade de corte, de acordo com o modelo de Trigger e Chao, dentro dos parâmetros e condições de corte utilizados nos ensaios	58
Figura 38 – Variação da temperatura em função da velocidade de corte, de acordo com o modelo de Trigger e Chao, dentro dos parâmetros e condições de corte utilizados nos ensaios	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 1045 (% em massa)	39
Tabela 2 – Dados da pastilha utilizada	41
Tabela 3 – Dados do porta-ferramenta utilizado	42
Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados	44
Tabela 5 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.....	45
Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos ensaios, e valores de temperaturas obtidos por imagem e analiticamente	55
Tabela 7 – Valores de velocidade de corte considerados na análise dos resultados obtidos....	56

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a_p = profundidade de corte

A = área da seção transversal de corte [mm^2]

A_1 = fração de energia de deformação transformada em calor

APC = aresta postiça de corte

B_1 = proporção de calor que flui para o cavaco

B_2 = proporção de calor do atrito que flui para o cavaco

b = largura de corte

b' = largura do cavaco

c = calor específico do material do cavaco [J/Kg.K]

CNC = comando numérico computadorizado

d = diâmetro da peça (mm)

f = avanço [mm/rev]

F_f = força de avanço [N]

F_c = força de corte [N]

F_p = força passiva ou de profundidade [N]

F_T = projeção da força principal de corte sobre a superfície de saída da ferramenta na sua direção tangencial [N]

h = espessura de corte

h' = espessura do cavaco

k = condutividade térmica do material

k_s = pressão específica de corte [N/mm^2]

k_{s1} = pressão específica de corte proporcional à espessura de corte [N/mm^2]

l_c = comprimento de contato ferramenta-cavaco sobre a superfície de saída [mm]

n = rotação (rpm)

Q = energia na forma de calor [W]

q_z = calor devido ao cisalhamento [W/m^2]

q_f = calor devido ao atrito na interface ferramenta/cavaco [W/m^2]

R_c = grau de recalque

S_z = área do plano de cisalhamento

T_o = temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]

T_f = aumento de temperatura devido ao atrito ferramenta cavaco [K]

T_z = temperatura devido ao cisalhamento [$^{\circ}\text{C}$]

v_c = velocidade de corte [m/min]

v_{cav} = velocidade do cavaco em relação à ferramenta [m/min]

v_f = velocidade de avanço [mm/min]

(1-z) = expoente da equação de Kienzle

α = ângulo de folga da ferramenta; difusividade térmica [m^2/s]

β = ângulo de cunha da ferramenta

γ = ângulo de saída da ferramenta

ϕ = ângulo de cisalhamento

ρ = densidade do material do cavaco [kg/m^3]

x_r = ângulo de posição da ferramenta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	15
1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS	15
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 USINAGEM DOS MATERIAIS	17
2.1.1 TORNEAMENTO	17
2.1.2 GRANDEZAS NO PROCESSO DE USINAGEM.....	18
2.2 FORMAÇÃO DO CAVACO	20
2.2.1 CORTE ORTOGONAL.....	21
2.2.2 INTERFACE FERRAMENTA CAVACO	22
2.3 TEMPERATURA DE CORTE.....	24
2.3.1 TEMPERATURA NA FORMAÇÃO DE CAVACOS: MODELO DE TRIGGER E CHAO	32
2.4 ANÁLISE TERMOGRÁFICA	34
2.4.1 CÂMERA DE IMAGEM TÉRMICA	34
2.4.2 IMAGEM TÉRMICA	35
2.4.3 APLICAÇÃO NA USINAGEM	36
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	38
3.1 MATERIAL UTILIZADO.....	38
3.2 FERRAMENTA UTILIZADA	39
3.2.1 PASTILHA	39
3.2.2 SUPORTE EXTERNO PARA FERRAMENTA.....	41
3.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO	42
3.3.1 TORNO.....	42
3.3.2 CÂMERA TERMOGRÁFICA	43

3.4	PARÂMETROS DE CORTE	44
4.	RESULTADOS	46
4.1	IMAGENS TERMOGRÁFICAS	46
4.2	ESTUDO ANALÍTICO	53
4.3	RESULTADOS ALCANÇADOS	54
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	60
5.	CONCLUSÕES	62
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXO 1 – APLICAÇÃO DO MODELO DE TRIGGER E CHAO	66
	ANEXO 2 – TERMO DE AUTENTICIDADE	68

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresentará a proposta do presente trabalho, citando os motivos que levaram ao seu desenvolvimento, quais foram os principais objetivos (gerais e específicos), fará algumas considerações sobre o tema, justificando as escolhas feitas para realização do estudo e um escopo para situar o trabalho dentro de suas delimitações.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A usinagem é um processo amplamente utilizado em todo o mundo, nas mais diversas aplicações, das mais simples até as mais complexas. Os estudos dos fatores que influenciam nos resultados da usinagem são de grande valia, principalmente para indústria que atua nesse campo. A temperatura no processo de usinagem possui influência em diversos outros fatores, seja de forma direta ou indireta. Dentre eles, podemos citar: seleção da ferramenta, vida da ferramenta, uso de lubrificantes, custos da usinagem, determinação dos parâmetros de usinagem como a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte, dentre outros que serão detalhados posteriormente.

O uso das câmeras termográficas permite captar o calor em forma de imagem, permitindo a análise das superfícies envolvidas no processo de usinagem sem que seja necessário o contato com a área analisada. Sendo assim, as temperaturas na superfície da peça, da ferramenta ou do cavaco, podem ser obtidas de forma acessível e rápida.

1.2 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho possui como principal objetivo a análise da viabilidade do uso das câmeras térmicas na determinação e investigação do comportamento da temperatura durante a usinagem, sendo alvo do estudo o torneamento sem lubrificação do aço ABNT 1045, utilizando pastilha de metal duro revestido.

A relevância do estudo realizado se encontra no grande número de estudos que se pode realizar partindo da análise de temperatura, seja limitando parâmetros de corte em uma condição econômica considerada ótima, seja analisando o custo benefício da alteração dos parâmetros de corte visando o menor tempo de usinagem. Observa-se que nos dois exemplos há vários pontos que, quando analisados, pode-se buscar correlacionar com os valores de

temperatura durante o processo de usinagem, por exemplo, se o valor dos parâmetros de corte utilizados influenciam de forma direta na temperatura de corte, que por sua vez diminuem a dureza da ferramenta e aumentam o seu desgaste, e conseqüentemente limitam sua vida útil, aumentando o número de ferramentas gastas e com isso os gastos envolvidos no processo de corte também aumentam.

A compreensão dos fatores que influenciam a geração de calor – praticamente toda energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica (calor), e do comportamento dos fluxos de calor e as temperaturas, principalmente próximos a aresta de corte, podem contribuir ainda mais no estudo dos fenômenos térmicos que ocorrem. Segundo Machado et al (2011), atualmente são conhecidos os princípios gerais dos fenômenos térmicos que ocorrem nessa região e alguns casos particulares foram pesquisados.

A viabilidade dos testes, foi fator relevante na escolha do estudo desenvolvido. Os testes foram realizados sem envolver mecanismos complexos, sendo o principal fator limitante o custo relativamente alto de uma câmera de imagem termográfica.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O desenvolvimento do trabalho consiste na comparação das temperaturas obtidas de forma experimental através das imagens termográficas, e o método analítico proposto por Trigger e Chao para determinar a temperatura na formação de cavacos.

Para tal análise, serão determinados os parâmetros e as condições de corte durante a coleta das imagens, e os mesmos parâmetros serão utilizados no modelo de Trigger e Chao. Serão repetidas as mesmas condições de corte em um determinado número de corpos de prova, para melhor confiabilidade dos valores obtidos experimentalmente.

Após a coleta e análise dos dados experimentais e teóricos será feita a conclusão sobre as condições do ensaio adotadas, os valores obtidos, e o método escolhido.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O presente trabalho possui como objetivo geral analisar o comportamento da temperatura de usinagem através do método experimental e do método analítico. E apresenta como objetivos específicos:

- ⇒ Correlacionar os métodos utilizados, de modo a verificar se os valores obtidos convergem;
- ⇒ Análise dos valores obtidos de modo a verificar se ambos tratam da mesma superfície em questão, por exemplo a superfície do cavaco no momento em que sai do contato com a ferramenta, a interface ferramenta cavaco;
- ⇒ Viabilizar o uso da câmera termográfica para a análise de temperatura adotada nos ensaios;
- ⇒ Observar e traçar a tendência do comportamento da temperatura em função dos parâmetros de corte utilizados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo faz uma abordagem dos conceitos, dentro da literatura, de modo a fornecer a base teórica necessária para o estudo desenvolvido no decorrer do trabalho, facilitando a compreensão do objeto de estudo e a interpretação dos resultados obtidos. Serão abordados alguns conceitos em usinagem, temperatura no processo de usinagem, o modelo analítico de Trigger e Chao, e imagens térmicas.

2.1 USINAGEM DOS MATERIAIS

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT, 1985).

Como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, produzem cavaco. Definimos cavaco, a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1977).

2.1.1 Torneamento

Segundo Ferraresi (1977), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

O torneamento utilizado no presente trabalho será o torneamento retilíneo – a ferramenta se deslocando segundo uma trajetória retilínea. Mais especificamente, o torneamento cilíndrico externo, conforme a figura 1, sendo este um tipo de torneamento retilíneo.

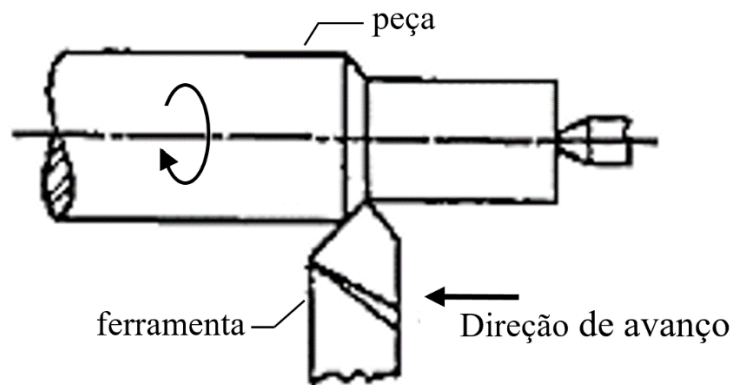


Figura 1 – Torneamento cilíndrico externo
Fonte: Ferraresi, 1977 (adaptado).

2.1.2 Grandezas no processo de usinagem

As grandezas envolvidas são padronizadas (ABNT), de modo que os princípios usados nas máquinas e ferramentas permitem obter as superfícies desejadas. A seguir serão apresentadas algumas das grandezas envolvidas no processo de usinagem, de modo a facilitar a compreensão dos conceitos relacionados às diferentes operações de usinagem.

Movimento de corte – ocorre entre a peça e a aresta de corte, e quando ocorre sem o movimento de avanço só retira material da peça em uma única rotação.

Movimento de avanço – ocorre também entre a peça e a aresta de corte, e juntamente com o movimento de corte, possibilita a retirada contínua de material.

Movimento efetivo de corte – é o resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço.

v_c – segundo Diniz et al (2008) é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para as operações do tipo torneamento, fresamento ou furção, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [m/min]$$

Onde:

d = diâmetro da peça (mm)

n = rotação (rpm)

v_f – de acordo com Ferraresi (1977), a velocidade de avanço é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço.

$$v_f = f \cdot n \text{ [mm/min]}$$

Onde:

f = avanço (mm)

n = rotação (rpm)

f – avanço é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta, conforme Ferraresi (1977).

a_p – profundidade de usinagem ou largura de corte [mm] é a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho, de acordo com Ferraresi (1977).

b – largura de corte define-se como a largura calculada da seção transversal que será retirada, sendo medida na superfície de corte, numa direção normal à direção do corte.

h - espessura de corte, segundo Machado et al (2011), é a espessura calculada da seção transversal de corte a ser retirada e medida, normalmente, à superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular à direção de corte [...].

χ_r – ângulo de posição da ferramenta é o ângulo entre o plano de corte da ferramenta e o plano admitido de trabalho, medido sobre o plano de referência da ferramenta, segundo Diniz et al (2008).

α – ângulo de folga é o ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte da ferramenta, segundo Diniz et al (2008).

γ – ângulo de saída se localiza entre a superfície de saída e o plano de referência da ferramenta, conforme Machado et al (2011).

β – ângulo de cunha da ferramenta é formado pelas superfícies de saída e de folga, de acordo com Machado et al (2011).

A figura 2 mostra a representação dos diferentes ângulos pertencentes ao plano admitido de trabalho.

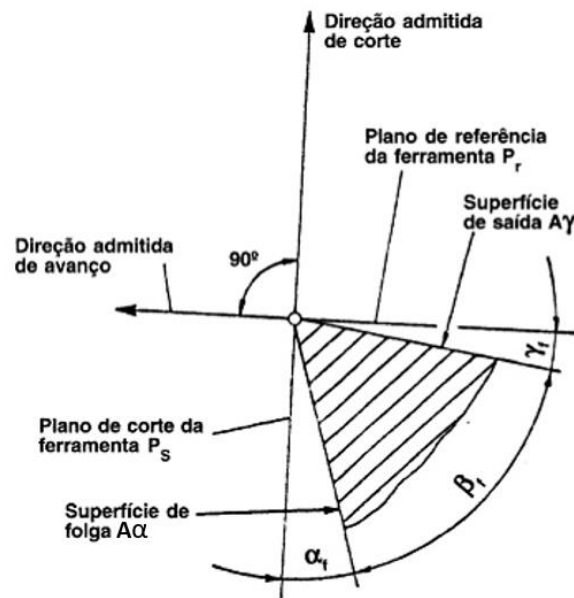


Figura 2 – Ângulos de saída, de cunha e de folga da ferramenta, representados no plano admitido de trabalho
Fonte: Diniz et al (2008).

2.2 FORMAÇÃO DO CAVACO

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem (DINIZ et al, 2008).

A base para um melhor entendimento de todos os processos de usinagem está no estudo científico de formação de cavacos. Esse estudo tem proporcionado [...] o aperfeiçoamento das arestas de corte, com quebra-cavacos cada vez mais eficientes, além de novos e mais eficazes materiais para ferramentas e a possibilidade de usinar os mais variados tipos de materiais (MACHADO et al, 2011).

Em geral, conforme afirmou Diniz et al (2008), a formação do cavaco nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço-rápido se processa da seguinte forma:

- ⇒ Uma pequena porção do material (ainda solidária à peça) é recalçada (deformações elástica e plástica) contra a superfície de saída da ferramenta;
- ⇒ Esta deformação plástica aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja perda de coesão) entre a porção de material recalçada e a peça;

- ⇒ Com a penetração da ferramenta, haverá uma ruptura (cisalhamento) parcial ou completa do cavaco, acompanhando o plano de cisalhamento já citado anteriormente e dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem;
- ⇒ Devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo o fenômeno.

A figura 3, ilustra esquematicamente o processo de formação do cavaco.

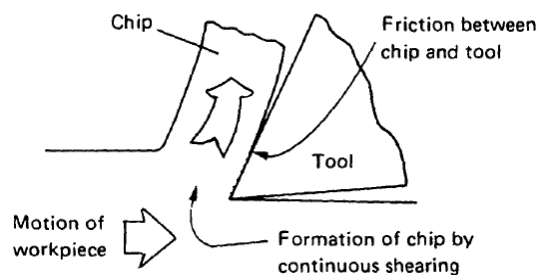


Figura 3 – Processo de formação do cavaco
Fonte: Boothroyd, 1989 (adaptado).

2.2.1 Corte ortogonal

No corte ortogonal (figura 4), a aresta de corte é uma reta normal à direção de corte e à direção de avanço, de maneira que a formação de cavaco pode ser considerada um fenômeno bidimensional e que ocorre em um plano normal à aresta cortante, ou seja, no plano de trabalho (MACHADO et al, 2011).

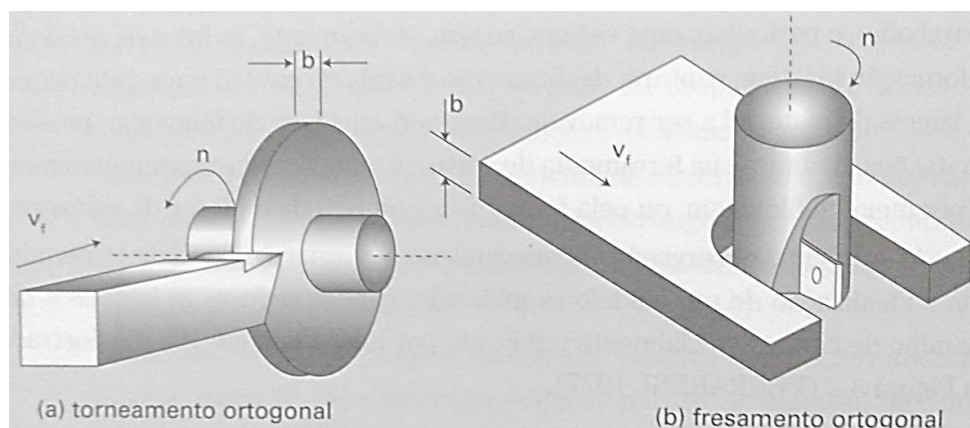


Figura 4 – Exemplos de corte ortogonal em processos de torneamento e de fresamento
Fonte: Machado et al (2011).

São admitidas, conforme apontado por Machado et al (2011), algumas simplificações, que permitem um tratamento matemático do corte ortogonal e podem ser estendidas a outras operações de usinagem.

- ⇒ Os cavacos formados são contínuos, sem formação de aresta postiça de corte (APC), segundo Diniz et al (2008), ela é definida como uma porção de cavaco que se prende à superfície da ferramenta e mantém esse contato enquanto há fluxo de cavaco sobre essa camada depositada, encruando e aumentando a resistência mecânica da camada que passa a agir como aresta de corte. A APC tende a crescer gradualmente, até que em certo momento se rompe, e arranca partículas da superfície de folga da ferramenta.
- ⇒ Não há contato entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície usinada.
- ⇒ A espessura de corte (h), equivalente ao avanço (f), é suficientemente pequena em relação à largura de corte (b).
- ⇒ A largura da aresta de corte é maior que a largura de corte (b).
- ⇒ A largura de corte (b) e a largura do cavaco (b') são idênticas. Onde b' é a largura calculada da seção transversal de corte a ser retirada, sendo definida por:

$$\frac{a_p}{\text{sen}\chi}$$
- ⇒ A aresta de corte é idealmente afiada e perpendicular ao plano de trabalho.

2.2.2 Interface ferramenta cavaco

A formação do cavaco é um processo periódico, com cada ciclo dividido em quatro eventos distintos, sendo o último movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. As condições nas quais esse escorregamento acontece têm influências marcantes em todo o processo, particularmente no mecanismo de formação do cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o corte e, conseqüentemente, na temperatura de corte e nos mecanismos e taxa de desgaste das ferramentas, afetando assim seu tempo de vida [...] (MACHADO et al, 2011).

O conceito básico de atrito, baseado nas leis de Amonton e Coulomb, não é apropriado para aplicação em usinagem dos metais, pois, nesse caso, a força de atrito é proporcional à força normal, sendo a constante de proporcionalidade chamada “coeficiente de atrito”. Em condições usuais de corte, a pressão normal à superfície de saída da ferramenta é, geralmente, bastante elevada, chegando à 3,5 GN/m² na usinagem de certos aços (TRENT, 1963).

Duas superfícies em movimento relativo, onde uma carga normal é aplicada, possuem uma área de contato real (A_r) e uma área de contato aparente (A). Sendo que A_r é muito menor que a área A , devido à rugosidade presente em qualquer superfície, então os contatos são estabelecidos nos picos das irregularidades. A força tangencial (F), ou força de atrito, aumenta conforme a força N aumenta, obedecendo um limite de proporcionalidade, que é o coeficiente de atrito μ , valendo, portanto, a Lei de Atrito de Coulomb.

No caso em que a força normal aplicada aumenta demasiadamente, pode-se chegar a situação em que é igualada a área real e a área aparente, onde todos os picos das irregularidades da superfície se deformaram o suficiente para que esta situação ocorra. A força normal necessária para que isso ocorra é chamada de “força normal limite” e, a partir desse valor, o aumento da força normal não altera mais a força tangencial de atrito. Ou seja, a força tangencial e a força normal não são mais proporcionais, pois passa a ser constante e admite um valor suficiente para vencer a resistência ao cisalhamento do material menos resistente. Sendo assim, a Lei de atrito de Coulomb não tem mais validade.

Durante o corte dos metais, os dois regimes citados anteriormente ocorrem simultaneamente em pontos distintos ao longo do comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta. O modelo de distribuição de tensão na superfície, ilustrado na figura 5, mostra que o contato pode ser dividido em duas regiões distintas: “a região de aderência” e “a região de escorregamento”, conforme Zorev (1963).

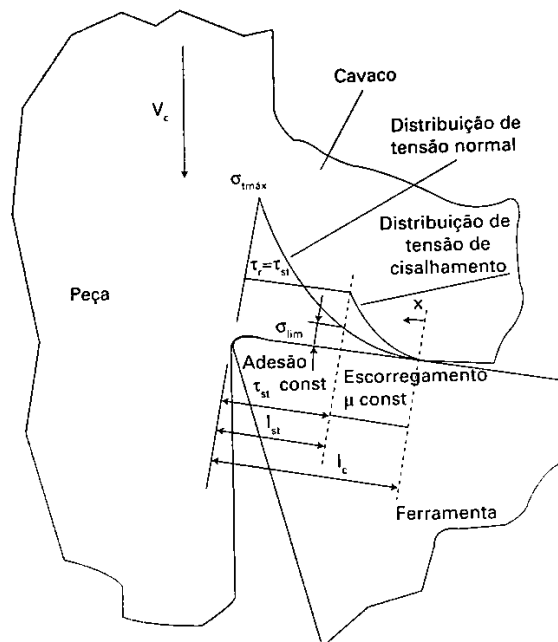


Figura 5 – Modelo de distribuição de tensão na superfície de saída da ferramenta
Fonte: Zorev (1963).

2.3 TEMPERATURA DE CORTE

As fontes geradoras de calor no processo de usinagem são as deformações e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça. [...] As porcentagens do calor total devido a cada uma das fontes acima variam com o tipo de usinagem, o material da peça e da ferramenta, as condições de usinagem e a forma da ferramenta. Porém, numa primeira aproximação, pode-se dizer que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são as principais fontes geradoras de calor, seguidas pelo atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e depois pelo atrito peça-superfície de folga da ferramenta (DINIZ et al, 2008).

Pode-se constatar, experimentalmente, que mais de 90% de todo o trabalho mecânico na usinagem se converte em calor (PANKINE, 1965; FERRARESI, 1977 apud MACHADO et al, 2011). Assim, temos:

$$Q = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [W]$$

Onde:

Q = quantidade de calor gerada [W]

F_c = componente principal da força de corte [N]

v_c = velocidade de corte [m/min]

A maior parte da potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo à aresta cortante da ferramenta e muitos problemas técnicos e econômicos são causados direta ou indiretamente por conta desse aquecimento (TRENT, 1988).

A energia gasta no processo de formação de cavacos é percebida na forma de calor em três regiões distintas na área de formação de cavacos: na zona do plano de cisalhamento ou zona de cisalhamento primário (região A, na figura a seguir), na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou zona secundária de cisalhamento (regiões B e C, na figura a seguir), e na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta ou zona terciária de cisalhamento (região D, na figura a seguir) (MACHADO et al, 2011).

Os ensaios realizados buscaram determinar experimentalmente as maiores temperaturas atingidas durante o processo de usinagem, nas imediações da região B da figura 6, na região de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta.

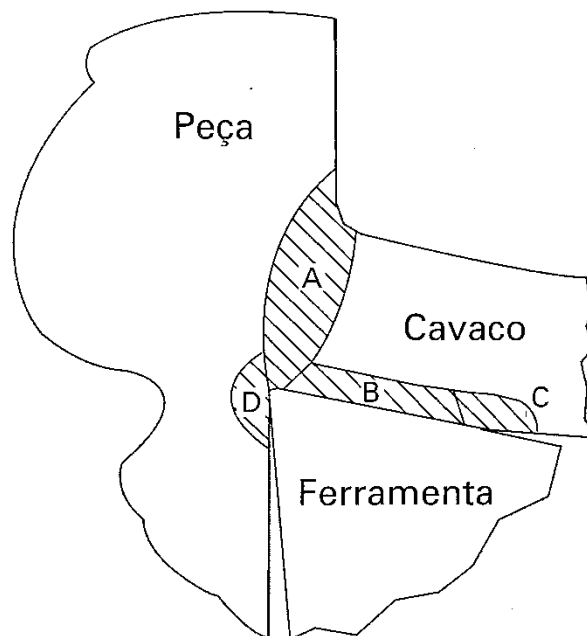


Figura 6 – Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos
 Fonte: Machado et al (2011).

O calor na zona primária de cisalhamento provém do trabalho de cisalhamento interno do material, enquanto nas outras duas zonas o calor vem do atrito e do cisalhamento interno provocados pela aderência entre as superfícies (MACHADO et al, 2011).

Segundo Machado et al (2011), o calor no plano de cisalhamento pode até ser benéfico para a usinagem, pois aumenta a temperatura nas zonas primária e secundária e diminui a resistência mecânica do material da peça para dar continuidade à deformação plástica (efeito de amolecimento). O calor gerado na zona secundária de cisalhamento tem maior influência sobre o desempenho da ferramenta e é praticamente fator limitante para a taxa de remoção de material, em especial por meio do aumento da velocidade de corte. O contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça (zona terciária) pode ocorrer mesmo no caso de ferramentas sem desgaste de flanco, uma vez que é necessária uma deformação mínima para a formação de cavacos – além disso, também pode contribuir para o aumento da temperatura da peça e da ferramenta.

O calor gerado dissipa-se através do cavaco, da peça, da ferramenta e do fluído de corte (quando utilizado). A quantidade de calor dissipado por cada um desses meios explicitados também sofre variação de acordo com os diversos parâmetros de usinagem.

A figura 7 ilustra a distribuição de temperatura na ponta de uma ferramenta de metal duro, ferramenta essa que será utilizada nos ensaios do presente trabalho.

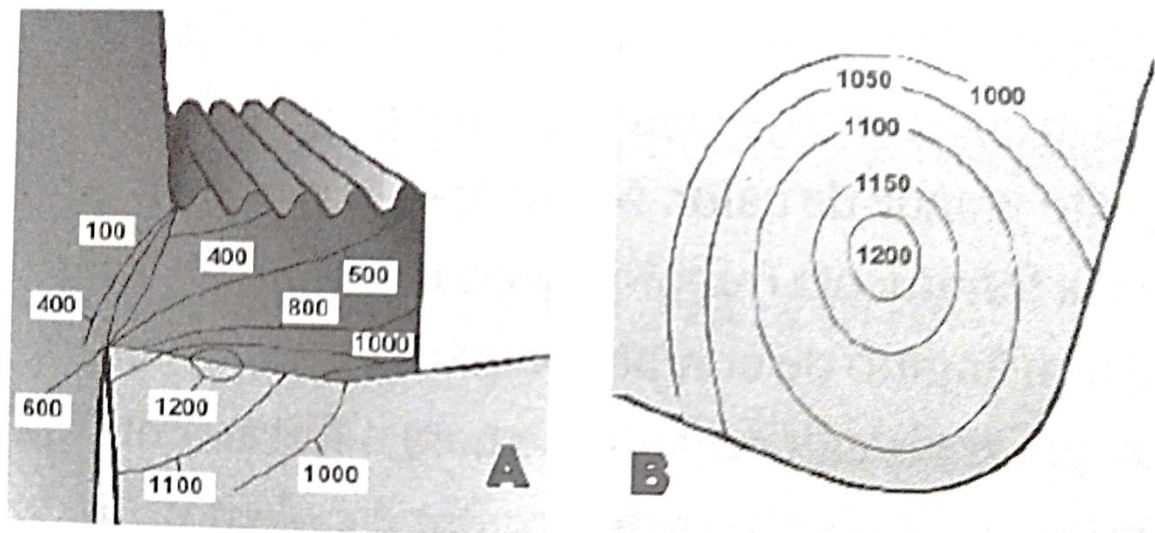


Figura 7 – Distribuição típica de temperaturas na ponta de uma ferramenta de metal duro
Fonte: Diniz et al (2008).

De acordo com Diniz et al (2008), a quantidade de calor que é dissipado pela ferramenta é pequena. Porém como a região da ferramenta que recebe este calor (região de contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta) é reduzida e não muda com o tempo, como acontece com a peça, desenvolvendo-se altas temperaturas (até 1200°C), que contribui expressivamente para o desgaste da ferramenta.

A porcentagem do calor total que é dissipado pelo cavaco aumenta com o aumento da velocidade. Em velocidades de corte muito altas, a maior parte do calor é carregado pelo cavaco, uma pequena quantidade pela peça e uma quantidade menor ainda pela ferramenta (DINIZ et al, 2008).

Os efeitos de formação e transmissão do calor no corte de metais são muito complexos, pois com o aumento da temperatura mudam as características físicas e mecânicas do metal de trabalho. A temperatura, influenciando no desgaste das ferramentas, limita a aplicação de regimes de corte mais altos, fixando, portanto, as condições máximas de produtividade e duração das ferramentas (FERRARESI, 1977).

Estendendo o citado por Ferraresi (1977), no parágrafo anterior, pode-se citar que, intimamente ligada ao custo de usinagem está a taxa de remoção de material, que pode ser alterada variando a velocidade de corte (V_c) ou o avanço (f). Aumentando a velocidade de corte e/ou o avanço aumenta-se esta taxa, diminuindo o custo de usinagem. Porém esse aumento é limitado, pois se atingido um certo limite a vida da ferramenta cai drasticamente. O

corte da maioria dos materiais gera um grande aquecimento da ferramenta, que pode colapsarem um curto intervalo de tempo, conforme ilustrado na figura 8.

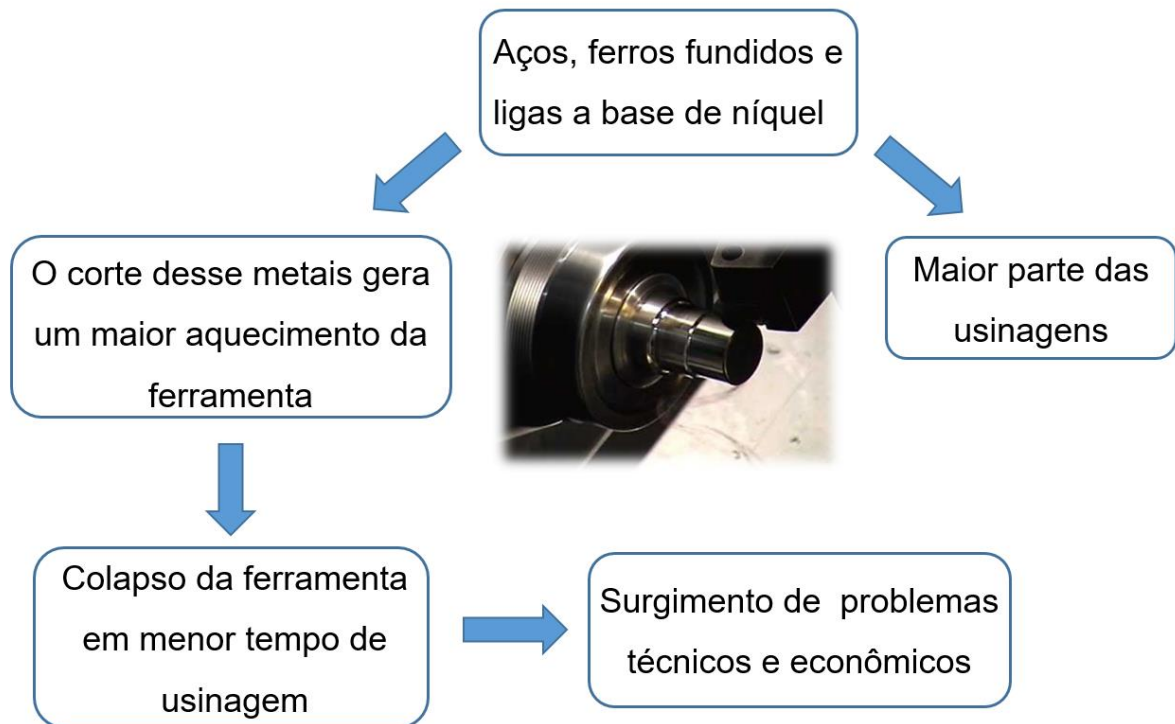


Figura 8 – Relações entre a usinagem de determinados materiais e suas consequências
Fonte: Arquivo do aluno

Segundo Ferraresi (1977), as primeiras experiências registradas em usinagem, realçando seu aspecto térmico, ocorreram no século XVIII. Utilizando o método do calorímetro, medindo a temperatura da água que envolve a peça em usinagem, bem como a ferramenta e o cavaco. Os resultados revelaram que, de fato, praticamente toda a energia mecânica do processo de usinagem é convertida em energia térmica.

Em 1907, F. W. Taylor publicou um extenso trabalho sobre usinagem dos metais, no qual observou e mediu o efeito da temperatura de corte sobre o desgaste da ferramenta. Resulta desse fato o desenvolvimento dos novos aços rápidos (MICHELETTI, 1977).

Segundo Micheletti (1977) e Weil (1971), até 1925 pouco desenvolvimento ocorreu no sentido de fazer uma análise teórica do processo de usinagem dos metais. Nesse mesmo ano, nos Estados Unidos e na Alemanha, foram estudados problemas térmicos na usinagem dos metais usando o método do par termoelétrico ferramenta/peça para chegar a algumas conclusões.

Ainda em 1925, K. Gottwein, na Alemanha, analisou o problema de medição das temperaturas de corte também pelo par termoeletrico ferramenta/peça, tirando conclusões muito interessantes para usinagem dos metais: por exemplo, a seguinte equação relacionando a temperatura à velocidade de corte:

$$\theta = C \cdot v_c^n$$

Onde:

θ = temperatura de corte

v_c = velocidade de corte

C e n = valores característicos do par ferramenta/peça e das condições operacionais

Em 1926, E. G. Herbert, na Inglaterra (ISNARD, 1955), analogamente usou o par termoeletrico ferramenta/peça para medir as temperaturas de corte e, com base em seus experimentos, enunciou a primeira Lei do Desgaste da Ferramenta, lei que leva o nome do pesquisador e diz: “o desgaste da ferramenta é função da temperatura de corte”.

Segundo Machado et al (2011), em 1930 foi utilizado, na Alemanha, por F. Schwerd, duas lentes convergentes de cloreto de sódio que concentravam os raios térmicos, oriundos do ponto onde se deseja medir a temperatura, sobre um par termoeletrico. Esse par termoeletrico transmitia o sinal a um oscilógrafo a raios catódicos. Esse sistema permitia a medição de temperatura em pequenas regiões (0,1 a 0,25 mm de raio). Com esse sistema, foi possível detectar grandes variações de temperatura (centenas de graus Celsius) em 1 mm² do cavaco ou da peça.

Em 1936, W. Reichel aplicou o princípio do par termoeletrico para analisar as variações de temperatura na usinagem. Ele utilizou um estilete metálico em contato com o ponto onde se deseja medir a temperatura, mensurando e analisando a temperatura nas superfícies da peça e da ferramenta, bem como nas camadas subjacentes à superfície. Entretanto, devido às limitações técnicas da instrumentação utilizada, não foi possível medir em pontos próximos da aresta de corte nem em altas velocidades de corte (MACHADO et al, 2011).

Como conclusões do estudo de Reichel, conforme Machado et al (2011), temos:

- ⇒ A máxima temperatura atingida na superfície da peça no instante da usinagem cai imediatamente após alguns centésimos de segundo da passagem da ferramenta de corte.
- ⇒ Em profundidade de 0,24 a 0,96 mm, o fenômeno de queda de temperatura também ocorre, entretanto, parte de temperaturas menores (quanto mais afastado da superfície, menor a temperatura).

Em 1937, uma expressão relacionando temperatura e a vida da ferramenta de aço rápido foi proposta por H. Schallbroch e H. Schaumann. Posteriormente, foi comprovado por outros pesquisadores que a expressão também pode ser aplicada para ferramentas de metal duro (MACHADO et al, 2011).

$$T \cdot \theta^n = K$$

Onde:

T = vida da ferramenta (min)

θ = temperatura da ferramenta (°C)

n, K = constantes que dependem do material e das condições de corte

Outro método utilizado para analisar a temperatura na usinagem, é o método dos vernizes térmicos, onde é aplicada uma camada de verniz sobre a superfície em que se deseja obter as temperaturas. Os vernizes mudam de cor conforme a temperatura atingida, permitindo identificar regiões com mesma temperatura. A faixa de trabalho, vai de 40°C a 650°C. Possui a limitação de não ser possível sua utilização em superfícies em que ocorre atrito.

O uso da radiação térmica possui ampla aplicação na obtenção de temperaturas nas superfícies da peça, do cavaco ou da ferramenta. Os raios infravermelhos estão associados ao calor dos corpos. No entanto esse método depende da exposição da superfície durante a medição da temperatura, assim como a ausência de fluido de corte, sendo aplicado somente na usinagem a seco. A maior vantagem consiste em não necessitar do contato com a superfície em que se está medindo a temperatura, diminuindo as interferências e perturbações nas temperaturas coletadas.

A figura 9 mostra a distribuição de temperaturas na peça e no cavaco obtida através de fotografia infravermelha durante o corte ortogonal de um aço com baixo carbono e velocidade de corte de 22,8 m/min.

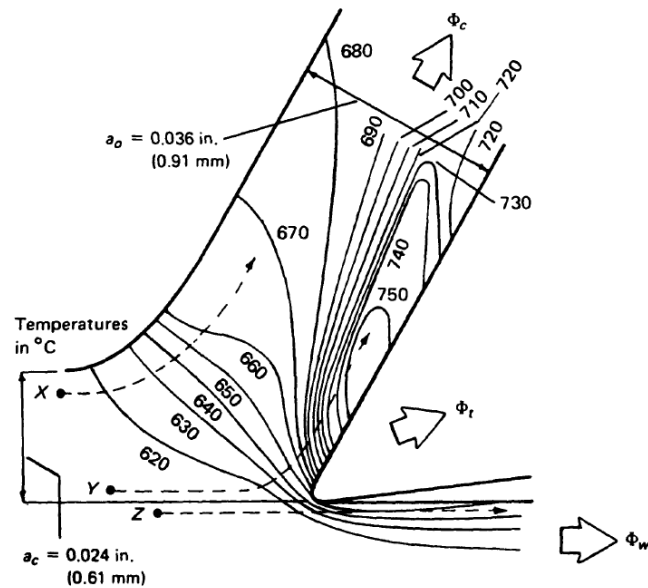


Figura 9 – Distribuição de temperaturas obtida através de fotografia infravermelha
Fonte: Boothroyd (1989).

Na figura 10 observa-se o comportamento da temperatura na operação de fresamento, sendo resultado da utilização da técnica do infravermelho. Sendo recomendada para tal operação pela vantagem da ausência de contato com a superfície que se deseja determinar a temperatura, uma vez que a fresa trabalha em rotação.

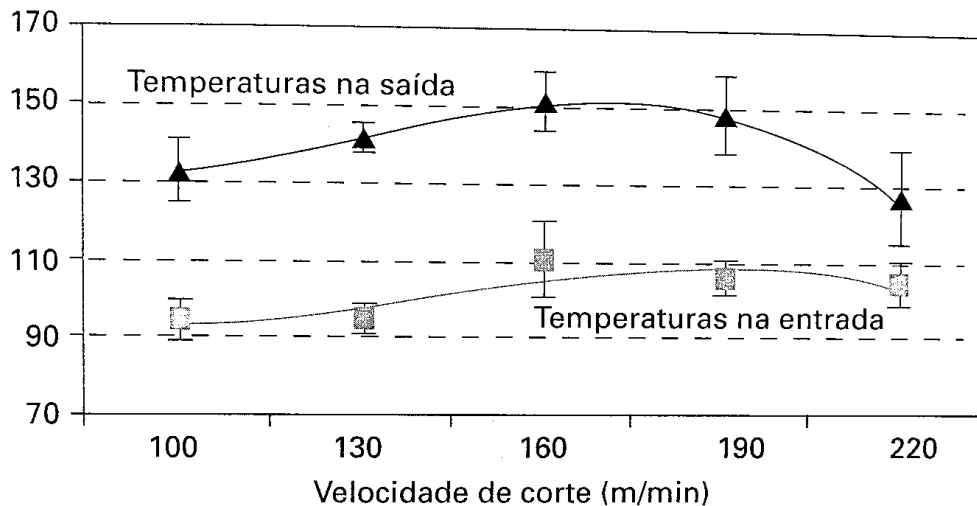


Figura 10 – Resultado da temperatura em fresamento medida pela técnica de radiação infravermelha.
(Fresamento de aço ABNT S12L14 com ferramenta de aço rápido usando $a_p = 1\text{ mm}$ e $f_z = 0,05\text{ mm/dente}$)
Fonte: Machado et al (2011).

A distribuição da temperatura na ferramenta de corte durante o trabalho pode ser estimada pela inspeção metalográfica da ferramenta após a operação. A dureza, à temperatura ambiente, do aço-carbono endurecido, bem como a do aço rápido, decresce após seu reaquecimento, e a redução na dureza depende da temperatura e do tempo de reaquecimento. As ferramentas de aço-carbono endurecidas começam a perder sua dureza a partir de 250°C, e essa propriedade é rapidamente reduzida após um aquecimento a 600°C. Já as ferramentas de aço rápido não sofrem amolecimento apreciável até 600°C (WRIGHT, 1973).

Entre 600°C e 850°C, a dureza cai rapidamente, mas pode voltar a subir e chegar a temperaturas de reaquecimento maiores, se forem rapidamente resfriadas. Calibrando-se a dureza *versus* a temperatura e o tempo de aquecimento, uma família de curvas pode ser obtida para cada material de ferramenta. (DEARNLEY, 1983).

Analisando a figura 11, podemos notar regiões da ferramenta onde há alteração na dureza, conforme o que foi citado anteriormente. Esta imagem ilustra a distribuição de temperaturas na ferramenta buscando relacionar os resultados obtidos com os diferentes valores de avanço, para ferramentas usadas para usinar o mesmo aço de baixo carbono.

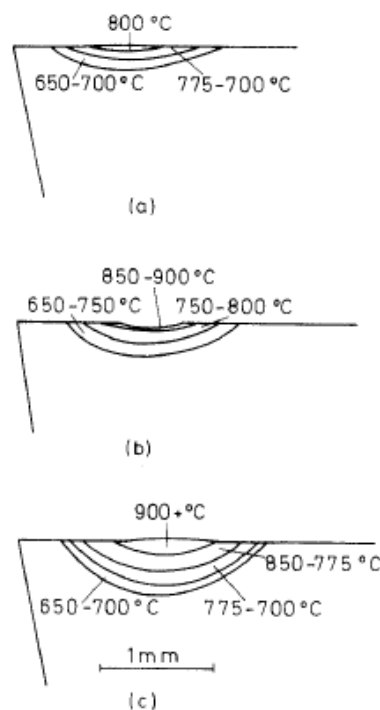


Figura 11 – Influência do avanço nas temperaturas das ferramentas de corte, com os seguintes valores de avanço: (a) 0,125mm/rev (b) 0,25mm/rev (c) 0,5 mm/rev

Fonte: Trent (2004)

2.3.1 Temperatura na formação de cavacos: modelo de Trigger e Chao

Sendo a análise da temperatura na usinagem um problema complexo, algumas considerações são feitas para chegar a uma aproximação através dos modelos analíticos. Logo, os resultados obtidos são considerados aproximações e se faz necessário o uso de técnicas experimentais para validação do modelo.

A escolha do referido modelo está relacionada aos estudos desenvolvidos nessa área terem como ponto de partida os modelos desenvolvidos na metade do século XX, por Trigger e Chao, assim como Loewen e Shaw. Todos utilizando o corte ortogonal.

Tal técnica analítica volta-se para o estudo do calor gerado durante a formação de cavaco no corte ortogonal. Foi um dos pontos de partida para os estudos na área. Parte do princípio de que o fluxo de calor se dá em regime permanente, e a temperatura gerada na interface ferramenta/cavaco está associada à temperatura oriunda do cisalhamento na zona primária ou do atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Sendo assim, é desprezado o calor devido ao atrito entre a superfície usinada e a superfície de folga da ferramenta.

Segundo o modelo desenvolvido por Trigger e Chao para um estado estacionário, o calor total produzido na formação de cavacos pode ser calculado por duas parcelas como segue (TRIGGER & CHAO, 1951):

$$q = q_z + q_f \quad [W/m^2]$$

Onde:

q = calor total $[W/m^2]$

q_z = calor devido ao cisalhamento $[W/m^2]$

q_f = calor devido ao atrito na interface ferramenta/cavaco $[W/m^2]$

O modelo de Trigger e Chao assume, arbitrariamente, que 90% do total de calor é passado ao cavaco. O aumento médio da temperatura de deformação do cavaco devido ao cisalhamento pode ser calculado pela equação a seguir (MACHADO et al, 2011):

$$T_z - T_o = \frac{A_1 [F_c \cdot v_c \cdot (B_1) - F_f \cdot v_{cav}]}{c \cdot \rho \cdot v_{cav} \cdot S_z} \cdot 10^6 \quad [K]$$

Onde:

T_z = aumento de temperatura do cavaco assim que deixa a zona primária de cisalhamento [K]

T_o = temperatura ambiente [K]

A_1 = fração de energia de deformação transformada em calor (0,875 para aços recozidos)

B_1 = proporção de calor que flui para o cavaco (0,1)

F_f = força de avanço [N]

F_c = força de corte [N]

v_c = velocidade de corte [m/min]

v_{cav} = velocidade do cavaco em relação à ferramenta [m/min]

c = calor específico do material do cavaco [J/kg.K]

ρ = densidade do material do cavaco [kg/m³]

S_z = área do plano de cisalhamento

O aumento de temperatura devido ao atrito ferramenta/cavaco na superfície de saída, assumindo uma fonte móvel de calor sobre a superfície do cavaco sob condições de regime permanente é obtido através da seguinte equação:

$$T_f - T_o = \frac{B_2 \cdot F_T}{9 \cdot (5\pi)^{1/2} \cdot k \cdot b} \left[\frac{\alpha \cdot v_{cav}}{60 \cdot l_c} \right] \cdot 10^6 \quad [K]$$

Onde:

T_f = aumento de temperatura devido ao atrito ferramenta/cavaco [K]

B_2 = proporção de calor do atrito que flui para o cavaco (0,9)

α = difusividade térmica do material do cavaco = $\frac{k}{c \cdot \rho}$ [m²/s]

k = condutividade térmica

l_c = comprimento de contato ferramenta/cavaco [mm]

A temperatura final é a soma de T_z e T_f . Maiores refinamentos foram introduzidos pelos pesquisadores para melhor aproximar o modelo de resultados experimentais, considerando não uniforme a partição de energia entre o cavaco e a peça, bem como

o fluxo de calor na interface ferramenta/cavaco. O calor gerado pelo atrito da superfície usinada com a superfície de folga da ferramenta não foi considerado.

2.4 ANÁLISE TERMOGRÁFICA

2.4.1 Câmera de imagem térmica

A câmera de imagem térmica (figura 12) faz a leitura da intensidade de radiação na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético (invisível para o olho humano) e converte para uma imagem visível.

As primeiras câmeras de imagem térmica foram vendidas para inspeções em linhas de alta tensão. O uso das câmeras de imagens térmicas para aplicações industriais se tornou um mercado cada vez maior.

A tecnologia das imagens térmicas tem evoluído, e as câmeras de imagem térmica tornaram-se mais compactas e parecidas com as câmeras digitais de foto ou vídeo. Elas são consideradas de fácil manuseio, e são capazes de gerar uma imagem nítida e em alta resolução em tempo real. O uso das imagens térmicas se tornou uma importante ferramenta no uso industrial, por exemplo, detectando anomalias que geralmente não são visíveis a olho nu, prevenindo possíveis falhas e paradas, e permitindo que sejam tomadas medidas corretivas antes de uma falha no equipamento.

A câmera de imagem térmica é um instrumento confiável que trabalha sem contato direto com o local onde está mensurando a temperatura. Sendo capaz de examinar e mostrar a distribuição de temperatura de superfícies. O uso das imagens, aliado a softwares tem contribuído para uma economia substancial de custos para diversos setores onde é aplicada.

A radiação infravermelha vinda dos objetos em foco passam pela lente e são direcionadas ao detector de infravermelho, o detector envia as informações ao sensor eletrônico para processar a imagem, os dados recebidos são traduzidos em imagem e poderão ser vistos pelo usuário.



Figura 12 – Diferentes câmeras de imagem térmica
Fonte: FLIR Industrial Guidebook

Comparando as câmeras de imagem térmica com os termômetros de infravermelho, observa-se facilmente que a temperatura mensurada pelo termômetro é pontual, medida em um único ponto alvo. Já as câmeras medem a temperatura em toda a área da imagem, sendo equivalente à um termômetro infravermelho em cada pixel da imagem. Por exemplo, uma câmera que tenha a resolução da imagem igual a 60 x 60 pixels seria equivalente ao uso de 3600 termômetros de infravermelho ao mesmo tempo.

2.4.2 Imagem térmica

A radiação infravermelha situa-se entre a faixa do visível e a faixa das micro-ondas do espectro eletromagnético. A fonte primária de radiação infravermelha é o calor ou radiação térmica. Qualquer objeto que possui temperatura acima do zero absoluto (0K ou -273,15 °C) emite radiação na região do infravermelho. Até mesmo objetos que aparentam ser muito frios (cubos de gelo, por exemplo) emitem radiação infravermelha.

A imagem termográfica é a transformação do infravermelho em imagem, permitindo que valores de temperatura sejam lidos da imagem. Então cada pixel da imagem termográfica é uma leitura de temperatura, onde um algoritmo converteu os dados recebidos em forma de radiação em imagem.



Figura 13 – Aplicações de imagens termográficas
Fonte: FLIR Industrial Storybook

Cada vez mais aumenta a gama de uso das imagens térmicas, as pessoas estão descobrindo os benefícios de seu uso. De acordo com informações de uma fabricante, o volume de câmeras térmicas tem aumentado e seu preço vem diminuindo. Indicando que as câmeras térmicas estão ocupando cada vez mais o mercado (figura 13). Dentro do campo das ciências/P&D as imagens térmicas também estão expandindo seus campos de uso, e também será alvo de estudo no presente trabalho.

2.4.3 Aplicação na usinagem

O uso das câmeras de imagem térmicas no contexto da usinagem é ainda recente e com poucas informações disponíveis sobre esse método. Portanto, é um campo onde podem ser descobertos os mais variados métodos e abordagens, de modo a contribuir para o desenvolvimento na área.

Durante os estudos realizados por Valiorgue et al (2013), na área de engenharia térmica aplicada, o uso da emissividade usando termografia no contexto da usinagem, proporcionou resultados interessantes. Nos ensaios realizados durante o corte ortogonal do aço inoxidável 316L as condições atmosféricas e de temperatura foram controladas, e a câmera termográfica foi integrada a um microscópio para obter as temperaturas na usinagem em um torno CNC – controle numérico computadorizado. Para isso, um aparato foi construído para realização dos ensaios, conforme a figura 14.

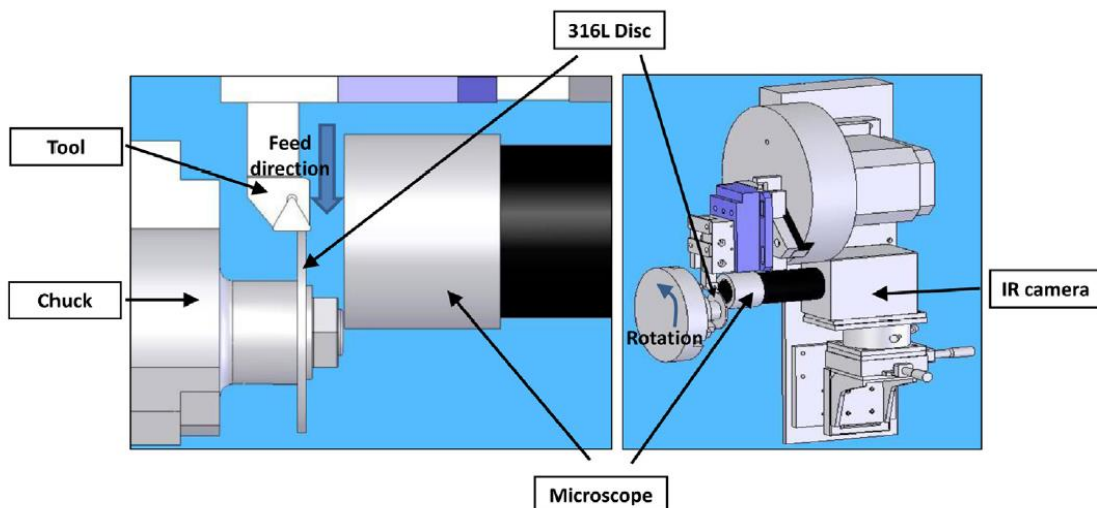


Figura 14 – Esquema utilizado nos ensaios para coleta de imagens termográficas
Fonte: Valiorgue et al (2013)

Como resultado do estudo realizado, observa-se elevados valores de temperatura no cavaco, próximo a região da superfície de saída da ferramenta, conforme a figura 15. O uso do microscópio juntamente com a câmera termográfica propiciou determinar um campo de temperaturas em uma área muito pequena.

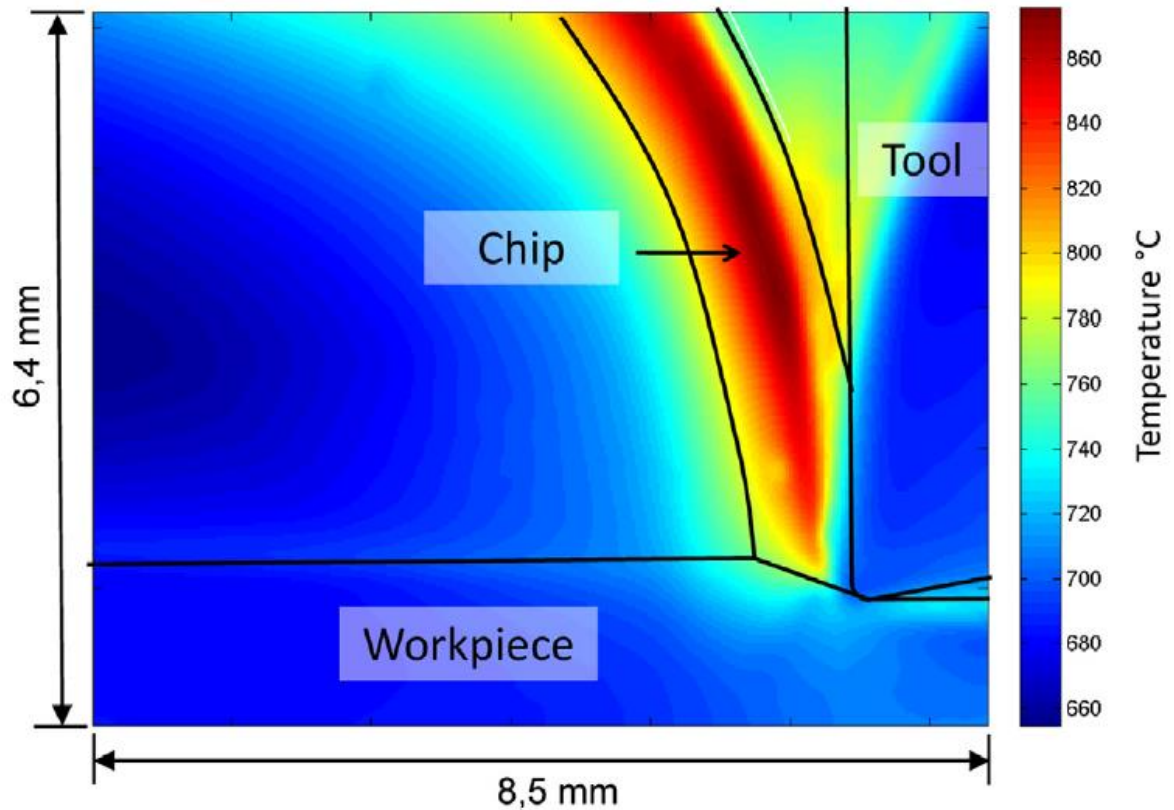


Figura 15 – Distribuição da temperatura para o valor de $V_c = 120\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ e $f = 0,1\text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ no corte ortogonal do aço inoxidável 316L utilizando imagem termográfica
Fonte: Valiorgue et al (2013)

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O presente capítulo fará a abordagem do desenvolvimento de trabalho, exibindo considerações necessárias para as condições de realização da análise experimental, e as escolhas feitas no decorrer do desenvolvimento do estudo. Incluindo o material a ser usinado, a ferramenta selecionada, bem como os parâmetros a serem utilizados processo de usinagem. Tudo visando a melhor condição possível para realização do estudo proposto.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

As condições que permitem a realização da medição utilizando a câmera termográfica incluem a exposição da superfície durante a operação, e que o material possa ser usinado sem a presença de fluido de corte.

A figura 14 ilustra esquematicamente como foi montado o corpo de prova no torno utilizado. Sendo a linha preta, uma indicação de onde foram tomadas as temperaturas durante a usinagem – aproximadamente 50mm após o início da usinagem. Foram utilizados 6 corpos de prova, com 125mm de comprimento e 25,4mm de diâmetro cada um deles.

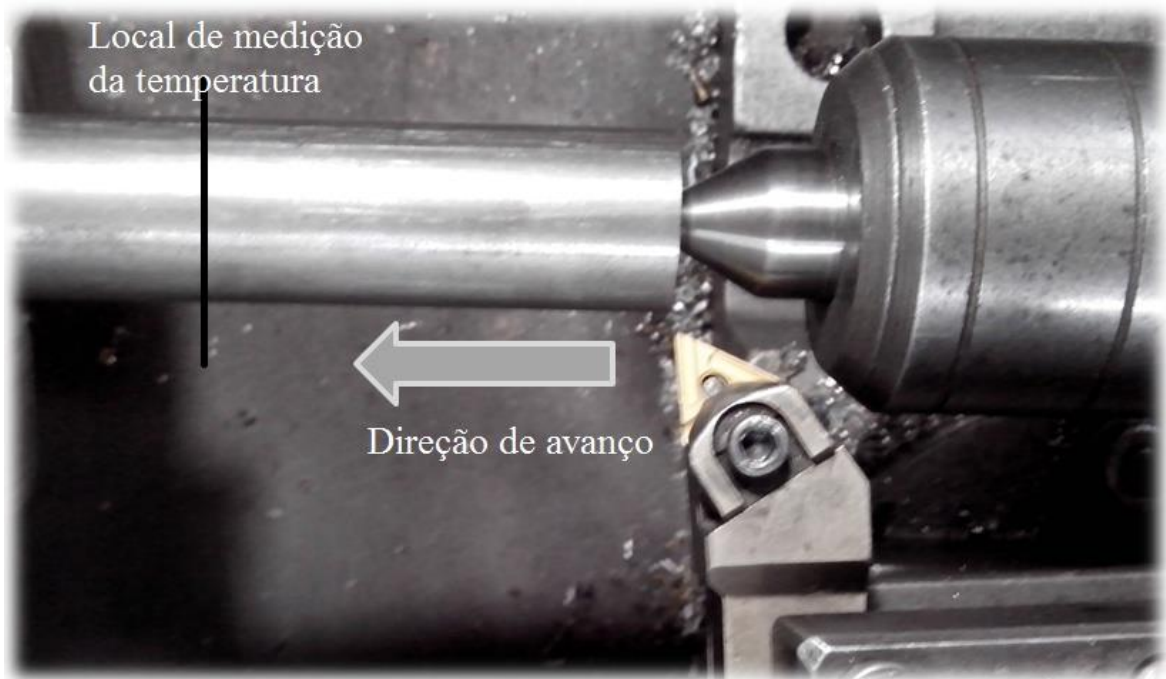


Figura 16 – Esquema de montagem do corpo de prova no torno
Fonte: Arquivo do aluno

A presença do fluido de corte, segundo Machado et al (2011), altera a emissão dos raios infravermelhos e a temperatura nas interfaces não pode ser avaliada pelo método da radiação infravermelha – câmera termográfica.

O material escolhido, já foi e é usado em diversos experimentos quando o assunto é usinagem, o aço ABNT 1045. Sendo um aço que apresenta boa resistência mecânica, boa usinabilidade e portabilidade. Apresenta médio teor de carbono, podendo ser endurecido ou beneficiado através de tratamento térmico. É disponível em diversos perfis e acabamentos. Sua utilização abrange diversas áreas na indústria mecânica geral, sendo usado na fabricação de diversos componentes da indústria petrolífera, na fabricação de eixos, cilindros, na indústria agrícola e de máquinas e equipamentos.

De acordo com a norma que estabelece as composições químicas dos aços para construção mecânica, NBR NM 87/2000, o aço ABNT 1045 deve apresentar a composição química conforme a tabela a seguir:

Tabela 1 – Composição química do aço ABNT 1045 (% em massa)

C	Mn	P_{máx}	S_{máx}	Si
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

3.2 FERRAMENTA UTILIZADA

3.2.1 Pastilha

Denominado “metal duro”, o carboneto de tungstênio, fabricado pelo processo de metalurgia do pó, possui uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade (MACHADO et al, 2011).

A norma ISO padronizou a classificação dos metais duros e designou como classe K os que contêm carboneto de tungstênio (WC) + Co. Essa classe também é conhecida como “classe dos ferros fundidos” ou “classe aplicada a materiais que produzem cavacos curtos”. Em um sistema de cores de especificação internacional coube a esse grupo a cor vermelha. Quando se adiciona carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) e/ou carboneto de nióbio (NbC), a ISO os designa de classe P. Essa classe também ficou conhecida como “classe dos aços ou dos materiais que produzem cavacos longos”, e tem o azul como cor de referência nos catálogos. A classe M é uma classe intermediária quando o WC + Co possui

adições de TiC, TaC e/ou NbC, mas em menores quantidades que as apresentadas pela classe P. A classe M também é conhecida como a “classe dos aços inoxidáveis”, tendo em vista a sua maior aplicação na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos. A coloração padrão dessa classe é o amarelo (MACHADO et al, 2011).

Segundo Diniz et al (2008), ferramentas de metal duro são usadas com sucesso em operações de usinagem tais como torneamento, fresamento, mandrilamento e em alguns casos de furação, aplainamento e serramento. Elas podem usinar qualquer tipo de material, desde que sua dureza não ultrapasse 45 HRc. Porém, os metais duros com microgrãos que têm características superiores aos metais duros convencionais têm sido utilizados na usinagem de aço mais duros que esse valor.

Ultimamente pastilhas de metal duro com cobertura de TiC, e/ou Al_2O_3 , TiN e TiCN têm sido utilizadas com frequência. A finalidade principal dessas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade característica do metal duro mais simples, possibilitando aumentar consideravelmente a vida da ferramenta, conforme Diniz et al (2008).

A ferramenta utilizada nos ensaios foi a TNMG160404R-ZC YBC251, P10-P30, abrangendo todos os tipos de aço e aço fundido, com exceção de aço inoxidável com uma estrutura austenítica, seguindo a classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513 (2004). O fabricante da ferramenta é a empresa ZCC-CT.

Conforme informações oriundas do catalogo fornecido pelo fabricante, a pastilha escolhida é um metal duro revestido através do processo CVD (deposição química de vapor), e as diferentes camadas seguem o modelo da figura 15, a seguir.

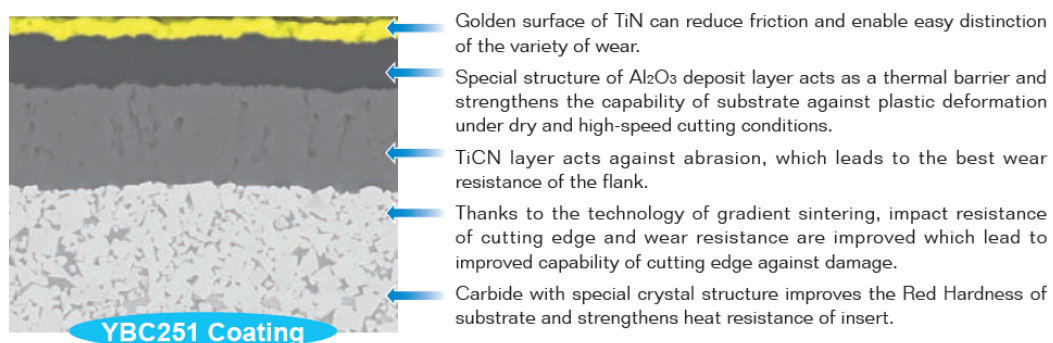


Figura 17 – Detalhes e características do revestimento da ferramenta utilizada (YBC251)

Fonte: Catálogo do fabricante – ZCC-CT 2014.

Para definir os parâmetros de corte a serem utilizados no ensaio, serão tomadas como base as recomendações do fabricante da ferramenta, que traz as seguintes informações, conforme a tabela 2, para esse modelo de pastilha:

Tabela 2 – Dados da pastilha utilizada

Aresta da pastilha [mm]	Espessura da pastilha [mm]	Diâmetro do furo de fixação [mm]	Forma	Ângulo de folga	Quebra cavaco	Diâmetro do círculo inscrito na ferramenta [mm]	Raio de ponta da ferramenta [mm]	Ângulo de saída
16	4,76	3,81	Triangular	0°	Ambos os lados, e travamento com furo	9,525	0,4	14°

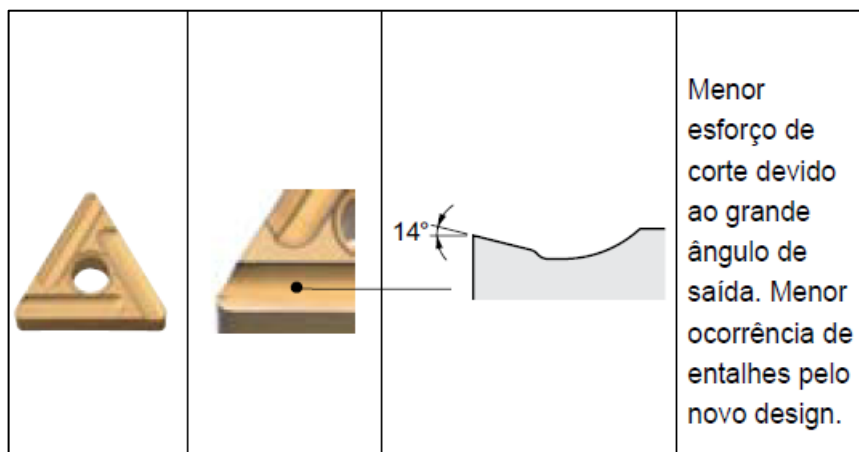


Figura 18 – Detalhes do quebra cavaco da ferramenta
Fonte: Catálogo do fabricante - Kyocera

3.2.2 Suporte externo para ferramenta

A ampla gama de porta-ferramentas e formatos existentes é capaz de cobrir a grande maioria das operações de torneamento, seja externo ou interno. O porta-ferramenta utilizado segue a padronização internacional das dimensões de ferramentas para torneiar, sendo compatível com a pastilha intercambiável. O modelo do suporte é: MTJNR 2525 M16. Resultando nas seguintes características, conforme representado na figura 19:

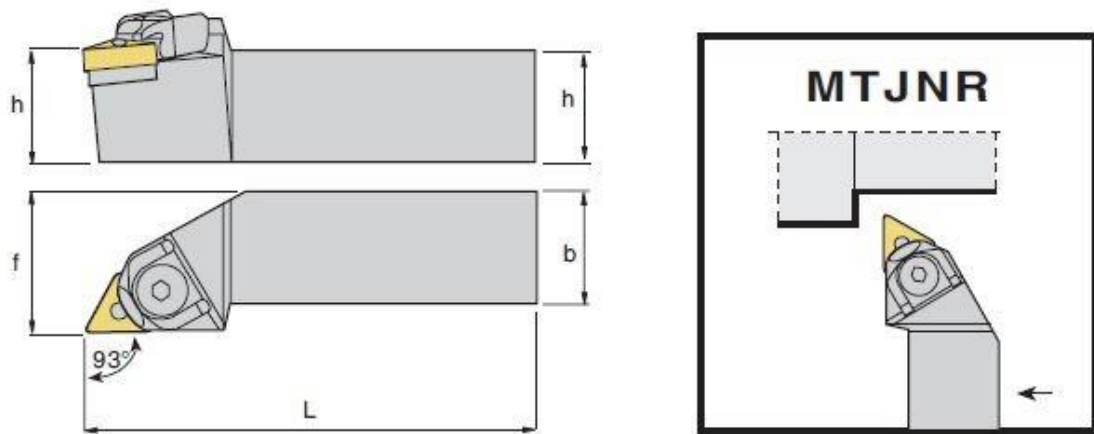


Figura 19–Detalhes do porta-ferramenta utilizado
 Fonte: <http://katalog.mav.cz/> <acesso em 10/06/16, 00:49>.

Tabela 3 – Dados do porta-ferramenta utilizado

b [mm]	h [mm]	L [mm]	f [mm]	M	T	J	N	R	M16
25	25	150	32	Fixação	Formato da pastilha	Tipo de suporte	Ângulo de folga	Versão da ferramenta	Comprimento da ferramenta
				Pino e grampo	Triangular	Ângulo de posição: 93°	0°	Direita	M = 150mm
			Ângulo de ataque: -3°			Comprimento da aresta de corte = 16mm			

- ⇒ A sigla MTJNR refere-se, respectivamente, a: fixação (M=pino e grampo), formato da pastilha (T = triangular), tipo de suporte (J: ângulo de posição = 93° e ângulo de ataque = -3°), ângulo de folga (N = 0°) e versão da ferramenta (R = direita).
- ⇒ M16 refere-se ao comprimento da ferramenta, sendo M = 150mm e '16' o comprimento da aresta de corte da ferramenta.

3.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO

3.3.1 Torno

O torno utilizado nos ensaios foi o NARDINI-MS 205AS, cedido gentilmente para tomada das imagens termográficas. Os parâmetros utilizados no torno foram: rotação (n) = 1600 rpm, avanço (f) = 0,042; 0,100; 0,201 mm.rev⁻¹, profundidade de corte (a_p) = 0,125; 0,250 e 0,375 mm.



Figura 20 – Torno utilizado nos ensaios
Fonte: Arquivo do aluno

3.3.2 Câmera termográfica

A câmera termográfica utilizada foi da marca FLIR, modelo E50, possuindo as seguintes características, fornecidas pelo fabricante (para maiores informações, consultar as demais informações disponíveis no catálogo de produtos do fabricante):

- ⇒ Resolução IR: 160 x 120 pixels
- ⇒ Faixa de temperatura: -20°C a 120°C / 0°C a 650°C
- ⇒ Precisão: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$ da leitura, para temperatura ambiente de 10°C a 35°C



Figura 21 – Imagem da câmera utilizada, modelo E50 (Série EXX)
Fonte: FLIR product catalog

3.4 PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte, conforme citado anteriormente, exercem influência na temperatura alcançada durante a operação de usinagem. Por isso, foram usados parâmetros redefinidos, de modo a facilitar a análise dos dados experimentais e teóricos.

A escolha dos parâmetros utilizados foi em função da compatibilidade com os ensaios e com as características da ferramenta, do torno e do material empregados no trabalho. A velocidade de corte variou entre 105,10 e 127,67 m/min em função do diâmetro dos corpos de prova utilizados. Os valores de avanço selecionados, de acordo com os disponíveis no equipamento, foram 0,042; 0,100 e 0,201 mm.rev⁻¹. A profundidade de corte utilizada foi 0,125; 0,250 e 0,375 mm. A rotação foi mantida constante em 1600 rpm, e o diâmetro inicial dos corpos de prova foi de 25,4 mm.

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados

Rotação (n) [rpm]	Avanço (f) [mm.rev ⁻¹]	Profundidade de corte (a _p) [mm]
1600	0,042	0,125
	0,100	0,250
	0,201	0,375

A interação desses parâmetros, juntamente com os valores obtidos da temperatura, será o principal suporte para análise dos resultados obtidos. A tabela a seguir ilustra os parâmetros utilizados em cada teste, sendo que cada corpo de prova passou por 8 ou 4 coletas de temperatura.

Tabela 5 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Corpo de prova	n [rpm]	Diâmetro da peça [mm]	a_p [mm]	f [mm/rev.]
1	1600	25,40	0,125	0,042
1	1600	25,15	0,250	0,042
1	1600	24,65	0,125	0,042
1	1600	24,40	0,250	0,042
1	1600	23,90	0,125	0,042
1	1600	23,65	0,250	0,042
1	1600	23,15	0,125	0,042
1	1600	22,90	0,250	0,042
2	1600	25,40	0,375	0,042
2	1600	24,65	0,375	0,042
2	1600	23,90	0,375	0,042
2	1600	23,15	0,375	0,042
3	1600	25,40	0,125	0,100
3	1600	25,15	0,250	0,100
3	1600	24,65	0,125	0,100
3	1600	24,40	0,250	0,100
3	1600	23,90	0,125	0,100
3	1600	23,65	0,250	0,100
3	1600	23,15	0,125	0,100
3	1600	22,90	0,250	0,100
4	1600	25,40	0,375	0,100
4	1600	24,65	0,375	0,100
4	1600	23,90	0,375	0,100
4	1600	23,15	0,375	0,100
5	1600	25,40	0,125	0,201
5	1600	25,15	0,250	0,201
5	1600	24,65	0,125	0,201
5	1600	24,40	0,250	0,201
5	1600	23,90	0,125	0,201
5	1600	23,65	0,250	0,201
5	1600	23,15	0,125	0,201
5	1600	22,90	0,250	0,201
6	1600	25,40	0,375	0,201
6	1600	24,65	0,375	0,201
6	1600	23,90	0,375	0,201
6	1600	23,15	0,375	0,201

4. RESULTADOS

O presente capítulo fará abordagem dos dados coletados experimentalmente através da câmera termográfica e dos dados obtidos através do uso de equações retiradas nas literaturas utilizadas. De modo a se estimar os aumentos de temperatura por meio do modelo de Trigger e Chao, com a finalidade de relacionar os dados experimentais e os teóricos, de modo a permitir as conclusões do presente trabalho. E, após a apresentação dos dados obtidos, será feita uma discussão dos mesmos.

4.1 IMAGENS TERMOGRÁFICAS

Através dos ensaios realizados, foram coletadas 8 ou 4 imagens termográficas em cada corpo de prova utilizado. A tabela exibida após as imagens traz todos os dados coletados durante os ensaios. Não serão exibidas todas as imagens geradas, a seguir estão algumas das imagens e seus respectivos parâmetros em cada legenda. Vale salientar que não foi possível a utilização de todas, por motivos diversos, que serão explicitados nas conclusões do trabalho. A temperatura máxima obtida na imagem é indicada pelo vértice superior do triângulo vermelho, dentro da área demarcada que aparece nas imagens termográficas, sendo indicada pelo valor registrado na parte superior esquerda da imagem.

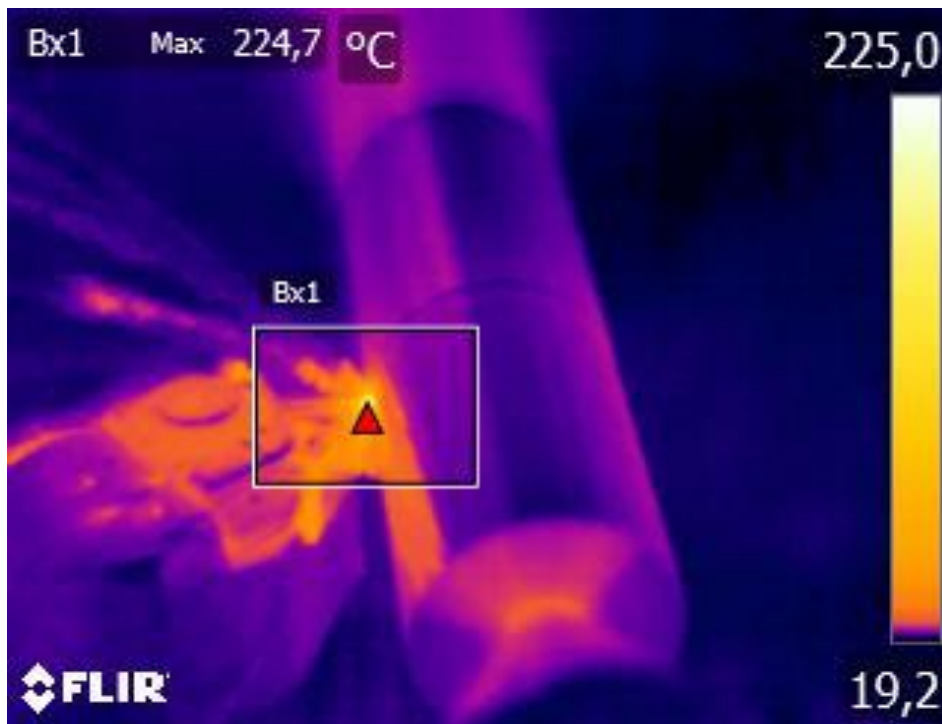


Figura 22 – Corpo de prova 1; $n=1600$ rpm; $V_c=123,9$ m/min; $f=0,042$ mm/rev; $a_p=0,125$ mm
Fonte: Arquivo do aluno



Figura 23 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 20)
Fonte: Arquivo do aluno

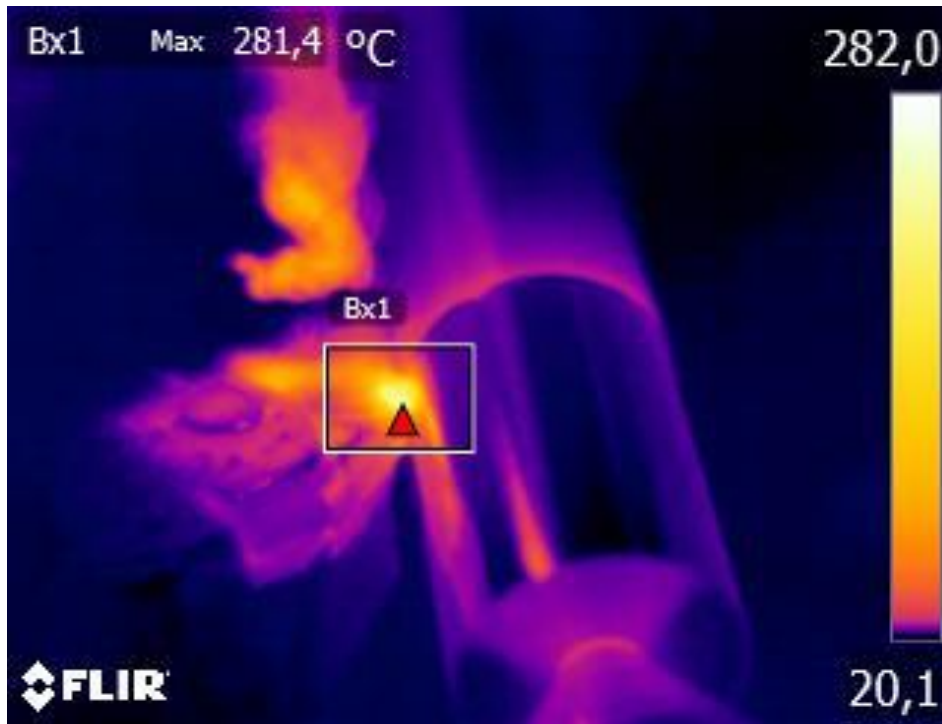


Figura 24 – Corpo de prova 2; $n=1600$ rpm; $V_c=127,67$ m/min; $f=0,042$ mm/rev; $a_p=0,375$ mm
Fonte: Arquivo do aluno



Figura 25 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 22)
Fonte: Arquivo do aluno



Figura 26 – Corpo de prova 3; $n=1600$ rpm; $V_c=115,11$ m/min; $f=0,100$ mm/rev; $a_p=0,25$ mm
Fonte: Arquivo do aluno



Figura 27–Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 24)
Fonte: Arquivo do aluno

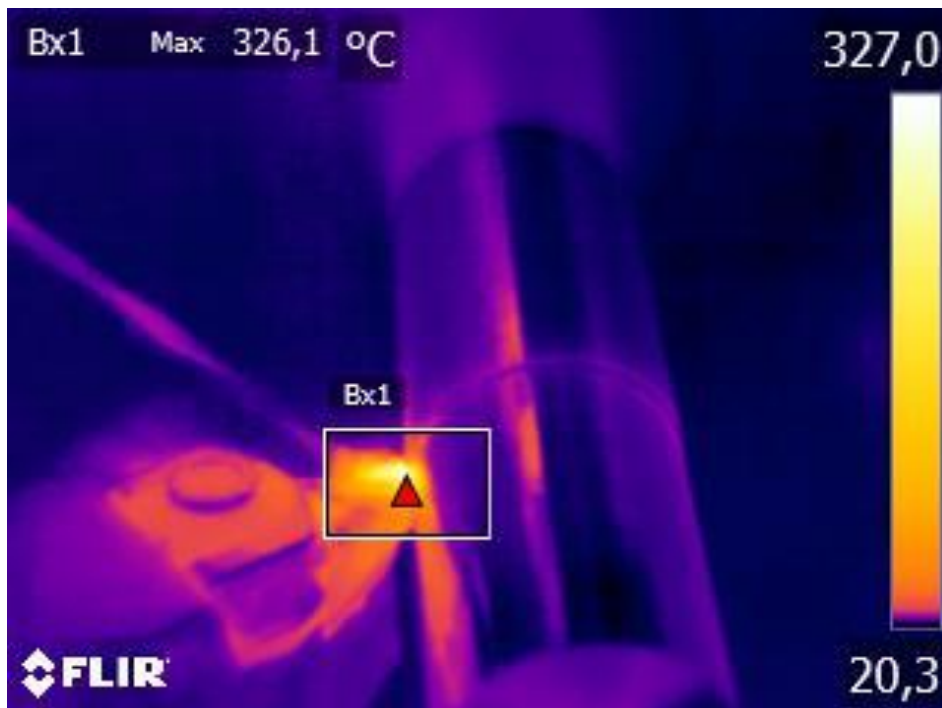


Figura 28 – Corpo de prova 4; $n=1600$ rpm; $V_c=123,90$ m/min; $f=0,100$ mm/rev; $a_p=0,375$ mm
Fonte: Arquivo do aluno

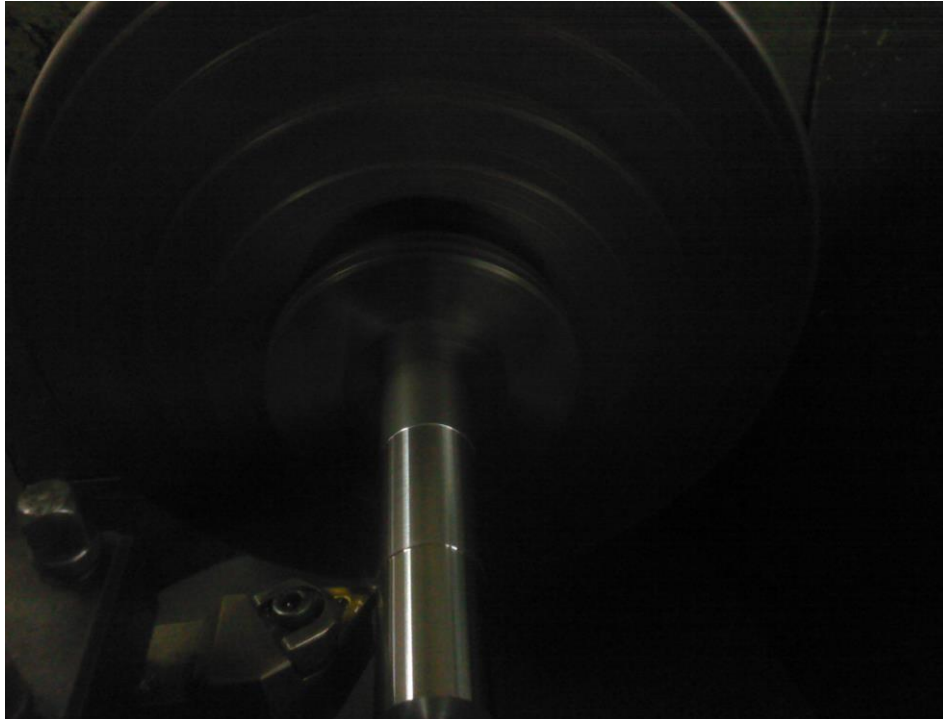


Figura 29 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 26)
Fonte: Arquivo do aluno

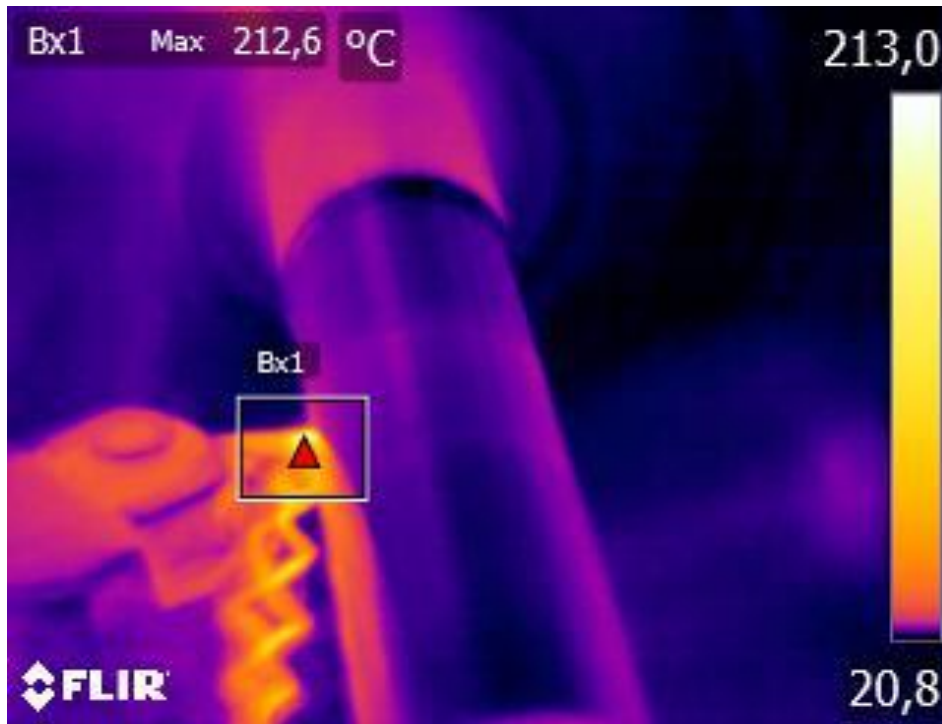


Figura 30– Corpo de prova 5; $n=1600$ rpm; $V_c=118,88$ m/min; $f=0,201$ mm/rev; $a_p=0,25$ mm
Fonte: Arquivo do aluno

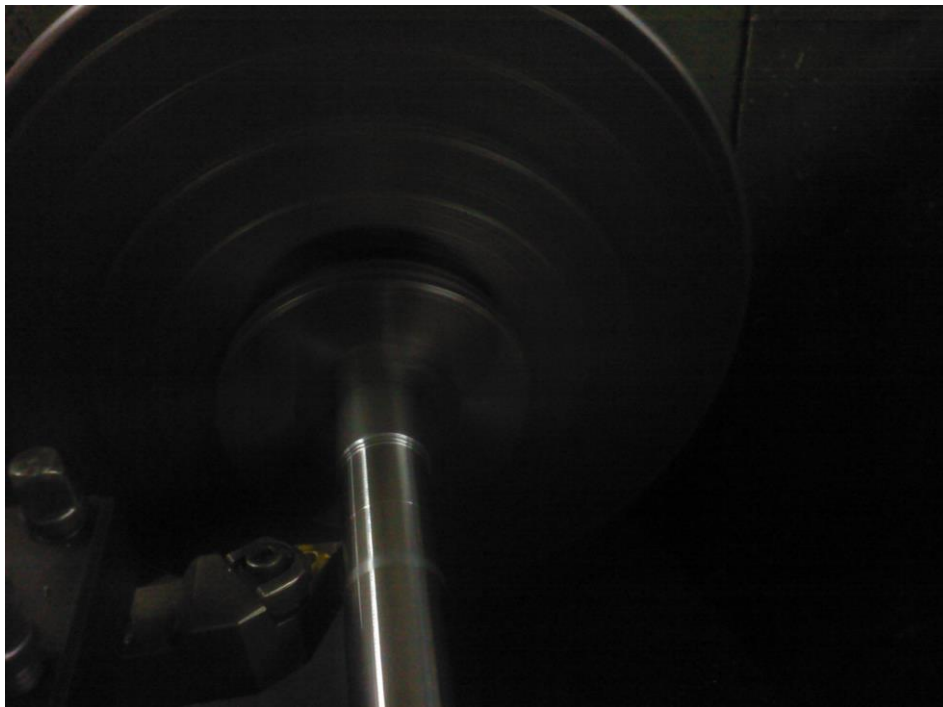


Figura 31 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 28)
Fonte: Arquivo do aluno



Figura 32 – Corpo de prova 6; $n=1600$ rpm; $V_c=123,90$ m/min; $f=0,201$ mm/rev; $a_p=0,375$ mm
Fonte: Arquivo do aluno

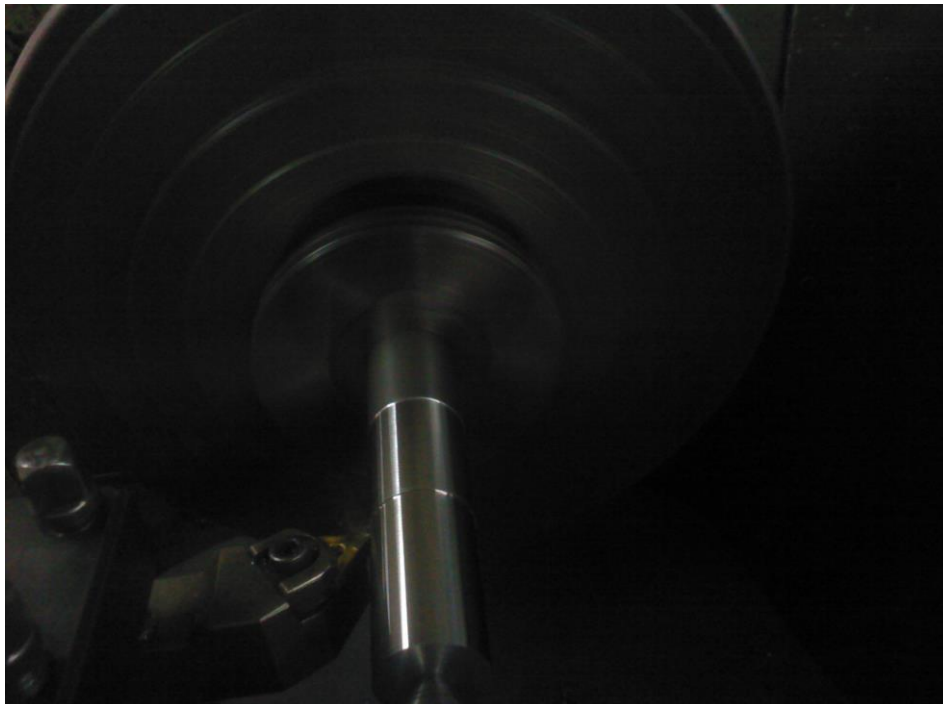


Figura 33 – Imagem no momento em que foi capturada a imagem térmica acima (figura 30)
Fonte: Arquivo do aluno

4.2 ESTUDO ANALÍTICO

Os valores das forças de usinagem necessários para a estimativa das temperaturas através do modelo de Trigger e Chao foram calculados de acordo com as relações a seguir, encontradas na literatura.

De acordo com Diniz et al (2008), a força de corte pode ser determinada, utilizando os cálculos de Kienzle (K_s), através da seguinte expressão:

$$F_c = K_{s1} \cdot b \cdot h^{1-z}$$

Onde $b = a_p / \text{sen} \alpha_r$, $h = f \cdot \text{sen} \alpha_r$, e os valores de K_{s1} e $1-z$ para o material da peça são os seguintes: $K_{s1} = 2100 \text{ N/mm}^2$ e $(1-z) = 0,83$.

Conforme Machado et al (2011), para usinagem de aços comuns com ferramenta de metal duro, tem-se a seguinte proporção média:

$$F_c : F_p : F_f = 4,5 : 2,5 : 1$$

Com essas proporções em mente, em geral, somente o cálculo da força de corte é suficiente para que se obtenha os demais valores das forças de avanço e passiva/profundidade. O valor da força de corte foi cálculo, e os valores das outras forças serão obtidos através da proporção citada.

O valor de F_T é determinado através da seguinte expressão, relacionando as forças calculadas anteriormente e o ângulo de saída da ferramenta segundo Machado et al (2011):

$$F_T = F_c \cdot \text{sen} \gamma + F_f \cdot \text{cos} \gamma$$

Os valores do ângulo de cisalhamento (ϕ) e do ângulo de saída (γ) foram 12° e 14° , respectivamente, sendo o ângulo de cisalhamento usado um valor aceitável para as condições dos ensaios, conforme a literatura. E o valor do ângulo de saída é característico da geometria da ferramenta de corte.

A velocidade do cavaco é definida pela expressão:

$$v_{cav} = v_c \cdot \frac{\text{sen} \phi}{\text{cos}(\phi - \gamma)}$$

Com isso, seguindo as expressões encontradas, no capítulo em que Machado et al (2011) aborda a formação de cavacos, determinar o valor da espessura do cavaco (h'), temos que:

$$R_c = \frac{h'}{h} = \frac{v_c}{v_{cav}}$$

De modo a determinar o valor da espessura da área do plano de cisalhamento S_z , para o corte ortogonal, temos:

$$S_z = \frac{b \cdot h}{\text{sen}\phi}$$

Segundo Callister (1999), conforme o ‘Apêndice B – Propriedades de Materiais de Engenharia Seleccionados’, para o material da peça selecionado para os ensaios, temos que o calor específico (c) do material = 486 J/Kg.K, densidade (ρ) do material do cavaco = 7850 Kg/m³, condutividade térmica (k) do material = 51,9 W/m.K.

4.3 RESULTADOS ALCANÇADOS

Com base nas expressões e dados apresentados no item anterior, e também através dos valores de temperaturas mensurados a partir das imagens termográficas, chegamos aos resultados que constam na tabela 6.

Considerando os valores de velocidade de corte aproximadamente iguais para os valores de profundidade de corte de 0,125 e 0,25 dentro um mesmo avanço, sendo este um valor intermediário. Por exemplo: $f = 0,042$ então, para os dois maiores valores de V_c , será considerado $V_c = 127$ m/min. Então, os valores de velocidade de corte considerados na análise dos resultados serão conforme a tabela 7.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos ensaios, e valores de temperaturas obtidos por imagem e analiticamente

Corpo de prova	n [rpm]	D [mm]	a _p [mm]	f [mm/rev]	Vc [m/min]	T _{experimental} [°C]	T _{calculada} [°C]
1	1600	25,40	0,125	0,042	127,6743	139,0	1018,2574
1	1600	25,15	0,250	0,042	126,4177	263,3	1018,2525
1	1600	24,65	0,125	0,042	123,9044	224,7	1018,2426
1	1600	24,40	0,250	0,042	122,6478	236,6	1018,2377
1	1600	23,90	0,125	0,042	120,1345	199,2	1018,2278
1	1600	23,65	0,250	0,042	118,8779	283,9	1018,2228
1	1600	23,15	0,125	0,042	116,3646	147,5	1018,2130
1	1600	22,90	0,250	0,042	115,1080	263,6	1018,2080
2	1600	25,40	0,375	0,042	127,6743	281,4	1018,2574
2	1600	24,65	0,375	0,042	123,9044	292,4	1018,2426
2	1600	23,90	0,375	0,042	120,1345	260,2	1018,2278
2	1600	23,15	0,375	0,042	116,3646	272,2	1018,2130
3	1600	25,40	0,125	0,100	127,6743	199,9	921,5758
3	1600	25,15	0,250	0,100	126,4177	238,3	921,5716
3	1600	24,65	0,125	0,100	123,9044	195,1	921,5631
3	1600	24,40	0,250	0,100	122,6478	240,3	921,5588
3	1600	23,90	0,125	0,100	120,1345	230,6	921,5503
3	1600	23,65	0,250	0,100	118,8779	242,3	921,5460
3	1600	23,15	0,125	0,100	116,3646	246,7	921,5375
3	1600	22,90	0,250	0,100	115,108	244,3	921,5332
4	1600	25,40	0,375	0,100	127,6743	235,2	921,5758
4	1600	24,65	0,375	0,100	123,9044	326,1	921,5631
4	1600	23,90	0,375	0,100	120,1345	330,4	921,5503
4	1600	23,15	0,375	0,100	116,3646	308,4	921,5375
5	1600	25,40	0,125	0,201	127,6743	154,1	853,4865
5	1600	25,15	0,250	0,201	126,4177	214,2	853,4827
5	1600	24,65	0,125	0,201	123,9044	182,4	853,4752
5	1600	24,40	0,250	0,201	122,6478	220,4	853,4714
5	1600	23,90	0,125	0,201	120,1345	217,6	853,4638
5	1600	23,65	0,250	0,201	118,8779	212,6	853,4600
5	1600	23,15	0,125	0,201	116,3646	225,8	853,4525
5	1600	22,90	0,250	0,201	115,108	219,3	853,4487
6	1600	25,40	0,375	0,201	127,6743	237,8	853,4865
6	1600	24,65	0,375	0,201	123,9044	299,7	853,4752
6	1600	23,90	0,375	0,201	120,1345	284,9	853,4638
6	1600	23,15	0,375	0,201	116,3646	285,6	853,4525

Tabela 7 – Valores de velocidade de corte considerados na análise dos resultados obtidos

a_p [mm]	f [mm/rev]	V_c [m/min]
0,125	0,042	127,0
0,250	0,042	127,0
0,125	0,042	123,4
0,250	0,042	123,4
0,125	0,042	119,5
0,250	0,042	119,5
0,125	0,042	115,5
0,250	0,042	115,5
0,375	0,042	127,0
0,375	0,042	123,4
0,375	0,042	119,5
0,375	0,042	115,5
0,125	0,100	127,0
0,250	0,100	127,0
0,125	0,100	123,4
0,250	0,100	123,4
0,125	0,100	119,5
0,250	0,100	119,5
0,125	0,100	115,5
0,250	0,100	115,5
0,375	0,100	127,0
0,375	0,100	123,4
0,375	0,100	119,5
0,375	0,100	115,5
0,125	0,201	127,0
0,250	0,201	127,0
0,125	0,201	123,4
0,250	0,201	123,4
0,125	0,201	119,5
0,250	0,201	119,5
0,125	0,201	115,5
0,250	0,201	115,5
0,375	0,201	127,0
0,375	0,201	123,4
0,375	0,201	119,5
0,375	0,201	115,5

Sendo assim, chega-se aos seguintes gráficos e curvas de temperatura em função dos parâmetros de corte utilizados:

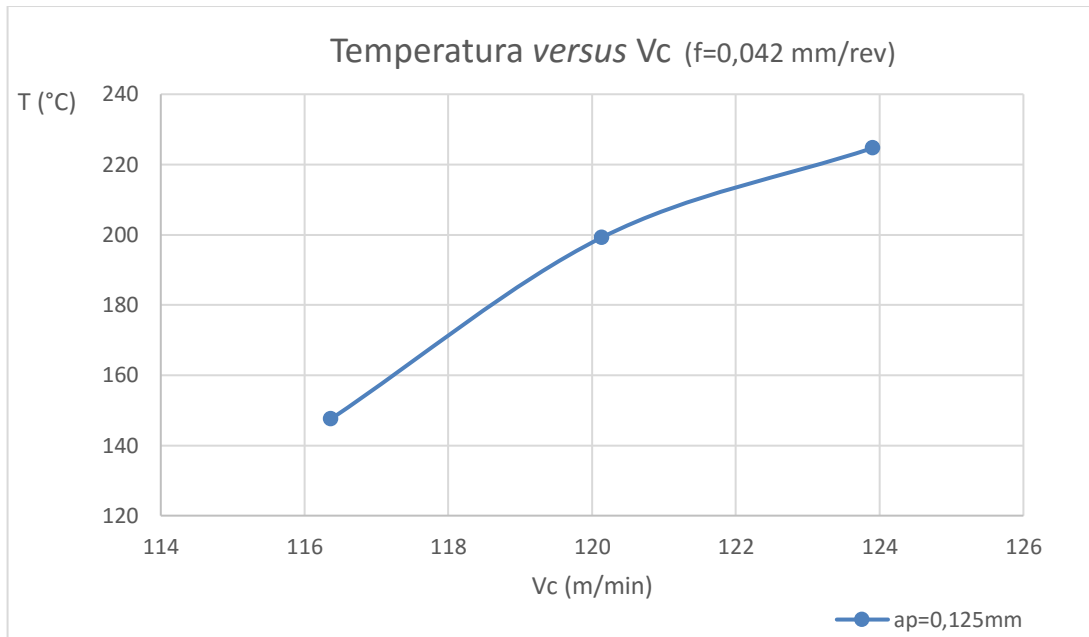


Figura 34 – Efeito da velocidade de corte na temperatura, obtido através de imagem termográfica
Fonte: Arquivo do aluno

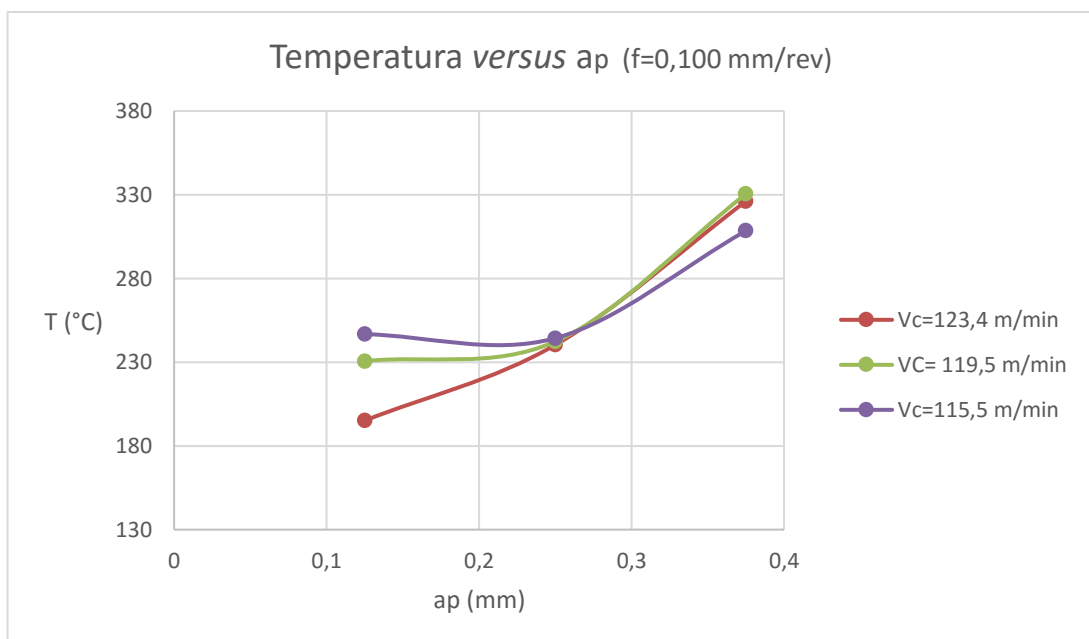


Figura 35 – Efeito da profundidade de corte na temperatura para diferentes velocidades de corte, obtido através de imagem termográfica
Fonte: Arquivo do aluno

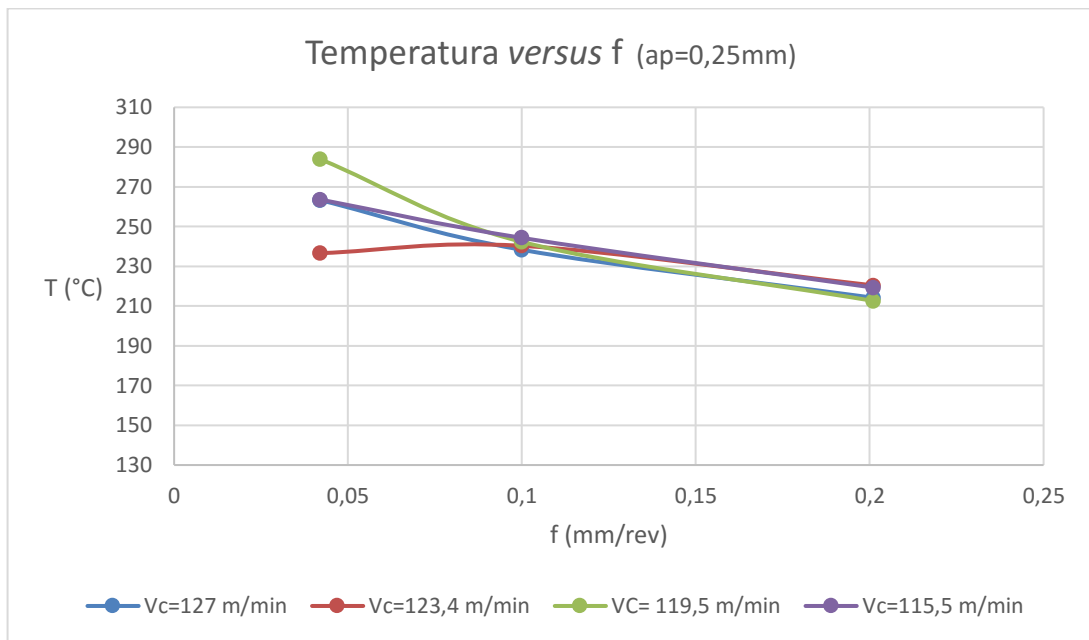


Figura 36 – Efeito do avanço na temperatura para diferentes valores de velocidade de corte, obtido através de imagem termográfica
Fonte: Arquivo do aluno

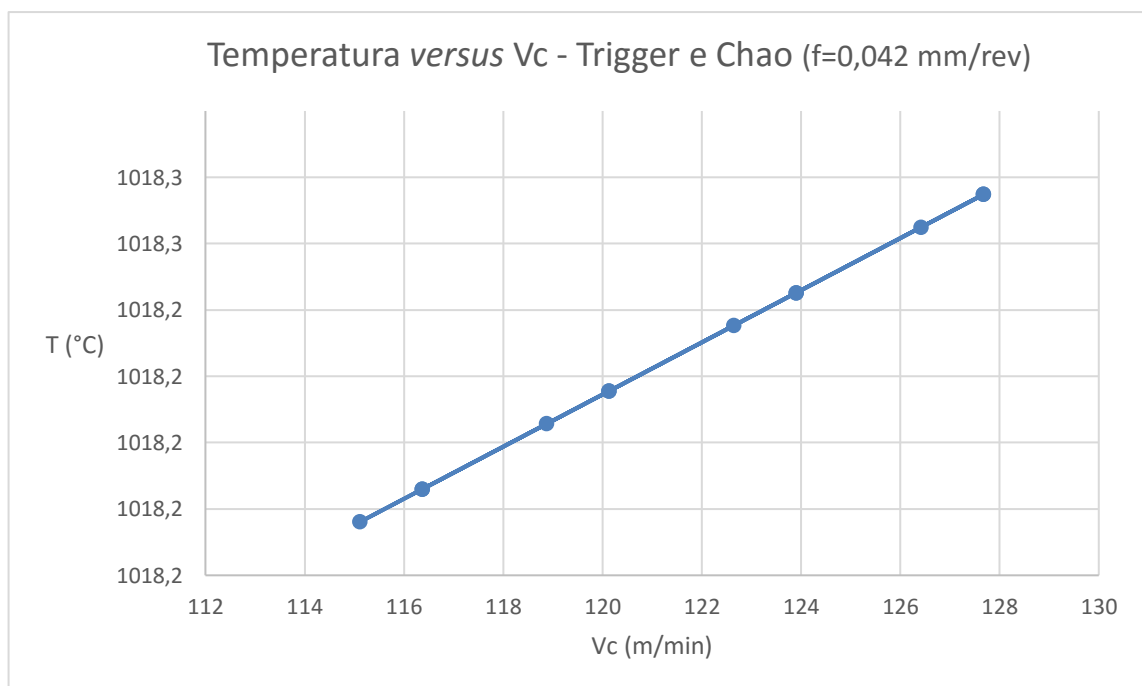


Figura 37 – Variação da temperatura em função da velocidade de corte, de acordo com o modelo de Trigger e Chao, dentro dos parâmetros e condições de corte utilizados nos ensaios
Fonte: Arquivo do aluno

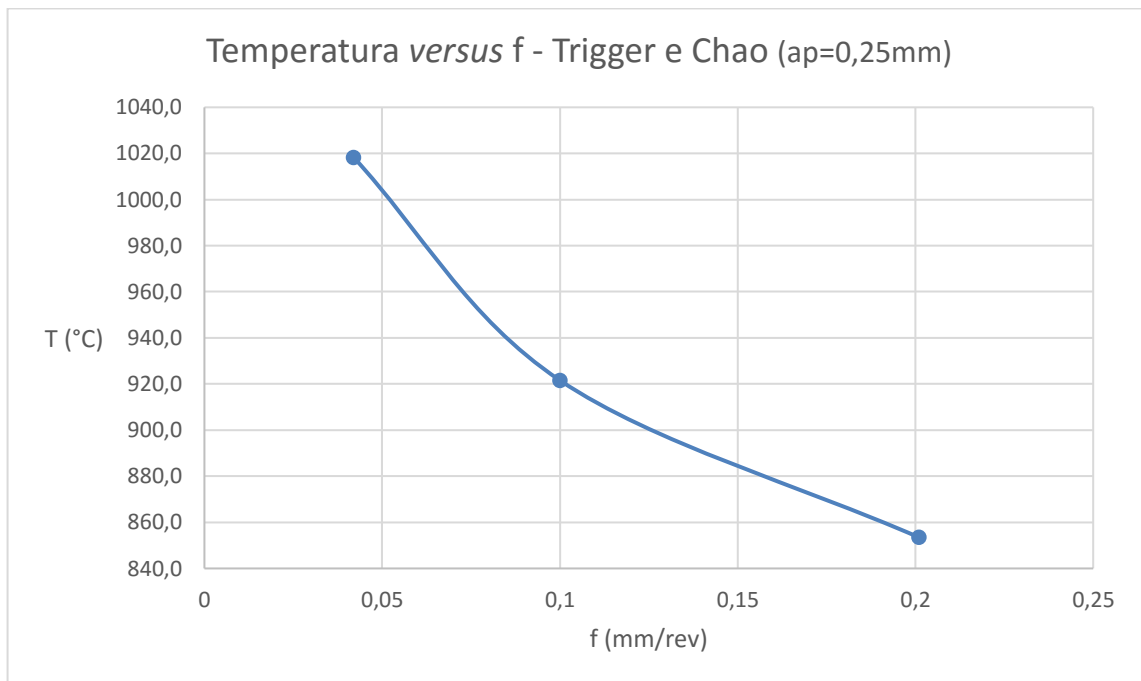


Figura 38 – Variação da temperatura em função da velocidade de corte, de acordo com o modelo de Trigger e Chao, dentro dos parâmetros e condições de corte utilizados nos ensaios
Fonte: Arquivo do aluno

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos dados obtidos nos ensaios e através do modelo analítico serão feitas algumas considerações acerca dos resultados.

O comportamento da temperatura em função da profundidade de corte apresentou valores considerados constantes no intervalo de variação dos valores de a_p , com base no modelo analítico adotado. O que não ocorre no gráfico que apresenta a curva gerada a partir dos valores obtidos experimentalmente. O parâmetro a_p , mesmo que não apareça explicitamente nas equações do modelo analítico, possui variáveis que se relacionam com seu valor, sendo simplificado nas equações. Com isso, a relação do valor de temperatura com a profundidade de corte não é observada através do modelo adotado.

Com base nos dados apresentados na tabela 6, pode-se notar que há, nos valores medidos, a tendência de crescimento ou decréscimo observada nas curvas experimentais, com exceção dos valores relacionados ao parâmetro a_p dentro do modelo analítico. As tendências constatadas vão de encontro ao que observamos na literatura.

Através dos resultados obtidos, também nota-se a divergência nos valores absolutos de temperatura entre a imagem termográfica e o modelo analítico adotado. Talvez haja relação entre essa diferença de valores e o fato das imagens termográficas não mensurarem a mesma temperatura que é apontada pelo modelo analítico – cisalhamento mais atrito ferramenta/cavaco. Durante os ensaios, devido as dificuldades encontradas na tentativa de capturar com a câmera as zonas de geração de calor analisadas analiticamente, a superfície de onde foram tomados os valores de temperatura não apresentou os valores esperados. Então a região de temperaturas mais elevadas, próxima a superfície de saída da ferramenta, não foi captada. Lembrando que, antes da realização dos ensaios, não se tinha a certeza de que tal região seria captada pela câmera, principalmente pelo método utilizado nos ensaios não ter disponível muitas informações acerca do uso da imagem termográfica nesse contexto.

Limitações do ensaio são capazes de comprometer os resultados obtidos, de modo que, devido as condições para a realização do presente trabalho, não foi possível obter condições similares de controle de fatores externos (temperatura e atmosfera) nem a análise de uma região tão específica quanto a região abordada no estudo de Valiorgue (2013).

Os valores de temperatura encontrados pelo método analítico, com base nos parâmetros utilizados, foram superiores ao máximo valor de temperatura que pode ser capturado com a câmera utilizada. Portanto, não é viável o uso desse modelo de câmera para

essa análise. Porém, foi utilizado o modelo disponível na instituição de ensino – UFJF. Há vários outros modelos disponíveis, e compatíveis com essa análise. Visto que, antes da medição desses valores, não era esperado que fossem tão elevados, conforme um teste realizado durante o estudo realizado por um aluno da mesma instituição, no torneamento de ferro fundido e alumínio em condições de corte próximas as utilizadas nesse estudo.

Os valores obtidos analiticamente estão mais próximos do estudo já realizado no contexto da usinagem com o uso de câmera termográfica conforme citado na revisão bibliográfica, o que indica a convergência dos valores obtidos para a região analisada analiticamente.

Com base nas imagens obtidas, e também no comportamento observado durante os ensaios, a temperatura do cavaco, quando deixa a superfície de saída da ferramenta, se mostra superior aos valores de temperaturas das superfícies próximas – peça e ferramenta. Comprovando o que é observado na literatura quando diz que a maior parte do calor é removido pelo cavaco, uma pequena quantia pela peça e uma quantidade ainda menor pela ferramenta.

5. CONCLUSÕES

Após a análise dos dados obtidos no decorrer do estudo, através da investigação experimental e da verificação feita analiticamente – com base no modelo de Trigger e Chao. É possível destacar, principalmente, que o comportamento da temperatura em função dos parâmetros de corte utilizados está de acordo com o observado na literatura. Com isso, há a possibilidade de se estabelecer relações e tendências do comportamento da temperatura durante o processo de usinagem e os parâmetros de corte, com base nos resultados obtidos.

Através dos gráficos obtidos e das curvas geradas, verificou-se a tendência do aumento da temperatura com o aumento da velocidade de corte em ambos os métodos. Há também a tendência de diminuição da temperatura com o aumento do avanço, conforme os dois métodos. Já a profundidade de corte, quando observada experimentalmente, expõe a tendência de aumento da temperatura com o aumento de seu valor. O que não ocorre quando analisamos o modelo de Trigger e Chao, que não apresenta variação significativa quando a profundidade de corte varia nos limites dos valores utilizados neste trabalho.

Os dados obtidos experimentalmente divergem, em valores absolutos, dos dados obtidos através do modelo analítico de Trigger e Chao, sendo os valores experimentais bem menores do que os teóricos, conforme a tabela de resultados. Portanto, as imagens não registraram a mesma região que é alvo no modelo analítico adotado. Então, não foi mensurado nos ensaios o aumento médio da temperatura de deformação do cavaco devido ao cisalhamento e o aumento da temperatura devido ao atrito ferramenta/cavaco na superfície de saída, sendo a temperatura final a soma dos dois aumentos de temperatura citados.

A partir dos dados obtidos nos ensaios, as temperaturas próximas dos valores encontrados são as obtidas experimentalmente utilizando termopar inserido em um inserto de metal duro, conforme a literatura. Valores próximos também foram encontrados, em ensaios para determinação da temperatura na interface ferramenta cavaco usando a técnica do termopar ferramenta/peça – usinando liga de alumínio com a ferramenta de PCD.

Ao observar o estudo já realizado no mesmo contexto, envolvendo a câmera termográfica, observa-se melhores condições de coleta e análise dos resultados, apontando para o interesse na área e a viabilidade do uso da termografia no contexto da usinagem.

O presente trabalho permite comprovar que os parâmetros de corte influenciam na temperatura de corte, durante o torneamento sem lubrificação do aço ABNT 1045 utilizando ferramenta de metal duro revestido. Entretanto, os valores obtidos de forma experimental não

estão de acordo com os obtidos analiticamente. Lembrando que, antes da realização dos ensaios, não se tinha a certeza de que a região captada pela câmera seria a região de temperaturas mais elevadas, próximo a superfície de saída da ferramenta.

A divergência dos valores obtidos não inviabiliza o uso da câmera termográfica para análise da temperatura na usinagem, porém indica que não necessariamente condições diferentes no ensaio e/ou outra abordagem analítica para comprovar o método.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ⇒ Análise dos valores de temperatura quando o cavaco acaba de deixar a superfície de saída da ferramenta.
- ⇒ Buscar outros métodos analíticos alternativos para obter valores esperados de temperatura conforme os dados obtidos pelo uso da imagem termográfica, e poder confirmar qual temperatura está realmente sendo mensurada pela câmera termográfica. Estabelecendo os critérios para a seleção do método com base nos resultados já obtidos.
- ⇒ Coletar um maior número de amostras dentro dos mesmos parâmetros, de modo a se obter valores mais assegurados.
- ⇒ O uso de simulações computacionais para obter os valores de temperatura, de modo a obter mais um método para comparação, contribuindo para elucidar a divergência dos valores.

REFERÊNCIAS

- ARCELORMITTAL. **Guia do Aço**. [S.I.], 2013. Disponível em: <
<http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 27 maio 2016,
 17:32.
- BOOTHROOYD, G. **Fundamentals of metal machining and machine tools**. 5 ed.
 Internacional student edition. Nova York: McGraw-Hill, 1981.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução** 5 ed. Rio de
 Janeiro: LTC, 2008.
- CARVALHO, Davidsom S.; ABRAAO, Alexandre M.; RUBIO, Juan C. C. **Monitoramento
 da temperatura de usinagem**. In: XI CREEM - Instituto politécnico, Nova Friburgo. Set.
 2004. Paper.
- COPPINI, N. L. **Usinagem Enxuta: Gestão do Processo**. São Paulo: Artliber, 2015.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- CUNHA, L. S.; CRAVENCO M. P. **Manual Prático do Mecânico**. 2 ed. [S.I.]: Hemus, 2006.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia Da Usinagem Dos
 Materiais** 2.ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2000.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1977.
- HUANG, H. H. **Simulação da formação de cavacos usando FEM (Finite Element Method)**
 – Temperatura e força. 2007. 101f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade
 de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.
- HUANG, H. H. **Estudo teórico-experimental da distribuição de temperatura na região de
 formação de cavacos usando FEM (Finite Element Method)**. 2007. Dissertação. Escola de
 Engenharia de São Carlos (USP), São Carlos, 2007.
- MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- MATOSINHOS, F. C.; DA SILVA, R. B.; ABRÃO, A. M.; **Torneamento do aço abnt 1045
 com ferramenta de metal duro e cermet**. In: II CONEM – João Pessoa, PB. Ago.2002.
- NASCIMENTO, Cláudia Hespanholo. **Estudo da distribuição de temperatura na região de
 formação de cavacos usando método dos elementos finitos**. 2011. 98f. Dissertação
 (Mestrado em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Manufatura Avançada) –
 Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.
- NASCIMENTO, Cláudia Hespanholo; LUCHESI, Vanda Maria; TEIXEIRA, Reginaldo
 Coelho. **Estudo teórico-experimental da condução de calor na região de formação de
 cavacos usando métodos analíticos e numéricos**. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE
 ENGENHARIA MECÂNICA, 2010. Campina Grande, Paraíba.

RODRIGUES FILHO, J. B. et al. **Aplicação da equação de Kienzle na determinação da força e potência de corte na usinagem em torno convencional.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, Fortaleza.

S.R. Carvalho; S.M.M. Lima e Silva; A.R. Machado; G. Guimarães. **Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder.** Journal of Materials Processing Technology 179 (2006) 97–104.

SILVA, M. A. **Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SOUSA, J. A.; SOUSA M. N. **Análise da temperatura de usinagem no corte ortogonal de alumínio.** In: 20º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

TRENT, E. M. **Metal cutting.** 2 ed. Londres: Butterworths & Co., 1984.

VALIORGUE, Frederic. et al. **Emissivity calibration for temperatures measurement using thermography in the context of machining.** Applied Thermal Engineering 58, p.321-326, 2013.

ANEXO 1 – APLICAÇÃO DO MODELO DE TRIGGER E CHAO

Muitos modelos desenvolvidos na metade do século XX tem sido o ponto de partida nos estudos da geração de calor durante a formação de cavacos. Partindo do princípio de que o fluxo de calor se dá em regime permanente e que a temperatura gerada na interface ferramenta/cavaco está associada à temperatura produzida pelo cisalhamento na zona primária ou ao aumento de temperatura causado pelo atrito entre o cavaco e a superfície de saída. Sendo desconsiderados o calor provocado pelo atrito entre a superfície usinada e a superfície de folga da ferramenta.

Segundo o modelo, o calor total produzido é a soma do calor devido ao cisalhamento e o calor devido ao atrito na interface ferramenta/cavaco. As expressões para calcular o aumento médio da temperatura de deformação do cavaco devido ao cisalhamento, e o aumento de temperatura devido ao atrito ferramenta/cavaco na superfície são as seguintes – conforme apresentado no decorrer do trabalho:

$$T_z - T_o = \frac{A_1 [F_c \cdot v_c \cdot (B_1) - F_f \cdot v_{cav}]}{c \cdot \rho \cdot v_{cav} \cdot S_z} \cdot 10^6 \quad [K]$$

$$T_f - T_o = \frac{B_2 \cdot F_T}{9 \cdot (5\pi)^{1/2} \cdot k \cdot b} \left[\frac{\alpha \cdot v_{cav}}{60 \cdot l_c} \right] \cdot 10^6 \quad [K]$$

Onde alguns valores são conhecidos, e outros calculados, conforme as condições/parâmetros da usinagem e as equações que seguem:

$$A_1 = 0,875$$

$$B_1 = 0,9$$

$$B_2 = 0,9$$

$$c = 486 \text{ J/kg.K}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 51,9 \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = k/c \cdot \rho = 1,36 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Os valores acima são constantes, e os valores a seguir dependem das variáveis dos parâmetros de corte. Serão explicitados os valores para o cálculo do valor de temperatura para o primeiro corpo de prova, e as seguintes variáveis serão utilizadas:

Corpo de prova: 01

$$n = 1600 \text{ rpm}$$

$$f = 0,402 \text{ mm/rev}$$

$$a_p = 0,125 \text{ mm}$$

$$\text{Diâmetro da peça} = 25,4 \text{ mm} \rightarrow v_c = 127,6743254 \text{ m/min}$$

$$\chi = 93^\circ \rightarrow \text{sen } \chi = 0,998629535 \text{ (de acordo com o suporte para ferramenta utilizado)}$$

$$\phi = 12^\circ \text{ (base na literatura – experimentos com características semelhantes que}$$

buscaram determinar o ângulo de cisalhamento)

$$\gamma = 14^\circ \text{ (geometria da ferramenta)}$$

$$S_z = \frac{a_p \cdot f}{\text{sen } \phi} = 0,025251 \text{ mm}^2$$

$$b = \frac{a_p}{\text{sen } \chi} = 0,12517154 \text{ mm}$$

$$h = f \cdot \text{sen } \chi = 0,041942 \text{ mm}$$

$$R_c = \frac{\text{sen } \gamma + \text{cos } \gamma}{\tan \phi} = 4,8068$$

$$h' = h \cdot R_c = 0,201609 \rightarrow l_c = 2 \cdot h' = 0,403218 \text{ mm}$$

$$K_{S(0,4)} = 2100 \text{ N/mm}^2 \rightarrow F_c = 18,90286 \text{ N} \rightarrow F_f = F_c/4,5 = 4,200635 \text{ N}$$

$$F_T = F_f \cdot \text{cos } \gamma + F_c \cdot \text{sen } \gamma = 8,648873 \text{ N}$$

$$V_{\text{cav}} = V_c/R_c = 26,56116522 \text{ m/min}$$

$$T_o = 293,15 \text{ K}$$

A partir dos dados obtidos nas relações acima, podemos determinar o valor de T_z e T_f através das duas equações citadas. Então, temos:

$$T_z - 293,15 = \frac{0,875 [18,90286 \cdot 127,6743254 \cdot 0,9 - 4,200635 \cdot 26,56116522]}{486 \cdot 7850 \cdot 26,56226522 \cdot 0,025251} \cdot 10^6$$

$$T_z = 997,7557 \text{ K}$$

$$T_f - 293,15 = \frac{0,9 \cdot 8,648873}{9 \cdot (5\pi)^{1/2} \cdot 51,9 \cdot 0,12517154} \left[\frac{1,36 \cdot 10^{-5} \cdot 26,26116522}{60 \cdot 0,403218} \right] \cdot 10^6 \quad [K]$$

$$T_f = 293,6517 \text{ K}$$

$$T_{\text{final}} = T_z + T_f = 1291,4074 \text{ K} = 1018,2574 \text{ }^\circ\text{C}$$

ANEXO 2 – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.