



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DOS DIFERENTES MÉTODOS PRÁTICOS EMPREGADOS
PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DE CORTE GERADA DURANTE
O PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO**

Marcus Vinicius Ribeiro Rodrigues

São Luís

2015

Marcus Vinicius Ribeiro Rodrigues

**ESTUDO DOS DIFERENTES MÉTODOS PRÁTICOS EMPREGADOS
PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DE CORTE GERADA DURANTE
O PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual do Maranhão, UEMA, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Coorientador:

Esp. Eng Mec. Hércules Araújo Oliveira

São Luís

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Rodrigues, Marcus Vinicius Ribeiro

Estudo dos diferentes métodos práticos empregados para medição da temperatura de corte gerada durante o processo de usinagem por torneamento / Marcus Vinicius Ribeiro Rodrigues – São Luis, 2015.

76 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica- Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Coorientador: Esp. Eng Mec. Hércules Araújo Oliveira

1. Temperatura de corte. 2. Medição de temperatura. 3. Técnicas de medição. I. Título

CDU:621.7.016

MARCUS VINICIUS RIBEIRO RODRIGUES – 0912230

**ESTUDO DOS DIFERENTES MÉTODOS PRÁTICOS EMPREGADOS
PARA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DE CORTE GERADA DURANTE
O PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Qualificação aprovada em: ____ de _____ de 2015

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Coorientador: Esp. Eng Mec. Hércules Araújo Oliveira

Banca Examinadora1: Prof. Msc Jorge De Jesus Passinho E Silva

Banca Examinadora2: Prof. Dr. Keyll Carlos Ribeiro Martins

Dedico este trabalho a toda minha família
que sempre me deu apoio e suporte
necessário para que tal feito ocorresse.

Agradecimentos

Agradecer primeiramente à minha família por sempre estar ao meu lado e não deixar em nenhum momento de acreditar em mim e no meu potencial, ser grato principalmente aos meus pais Francisco José e Antonia do Perpetuo Socorro que não me deixaram desanimar e me auxiliaram da melhor maneira possível sempre incentivando e ensinando que não há vitória sem luta e que papai do céu sempre olha por todos nós e nos premia sempre de acordo com nossas ações não só para com a sociedade, mas também de acordo com nossa luta, cada esforço será recompensado, afinal, agente só colhe o que planta.

Ao meu orientador professor Jean Robert pela paciência, pelo conhecimento adquirido em sala, pelos puxões de orelha e pela determinação e preocupação que o mesmo teve desde o primeiro dia de aula.

Agradecer aos meus tios Paulo Rodrigues e Cinthia Rodrigues que nunca deixaram de acreditar no meu potencial me ajudando a superar obstáculos que a vida sempre impôs e me deram sustentação para que não só momentos como esse, mas que muitos outros que envolvam alegria e felicidade ocorram em minha vida.

Ao meu irmão Matheus Ribeiro Rodrigues por me auxiliar quando eu precisei de silêncio, conselhos e principalmente da paciência dele por estar estressado.

A minha amada namorada Yanca Ribeiro por sempre me fornecer momentos de alegria com muito amor e carinho, me aturar em momentos de chatices, me colocar em primeiro lugar quando eu menos esperava, estar comigo em momentos bem difíceis como perda de entes queridos e principalmente dividir bem mais alegrias do que tristeza comigo.

Ser grato a minha madrinha Socorro Aranha que mesmo distante sempre se importou comigo e me auxiliou em todos os aspectos necessários para chegar onde estou.

Ao meu avô Helio Aranha por sempre dedicar seu tempo e conhecimento da vida com seu neto me ensinando que sempre temos escolhas e temos que ser sábios o bastante para saber que decisão tomar.

Um agradecimento especial as minhas avós falecidas Severina Rodrigues e Jurandir Martins que sempre me ensinaram o caminho correto com muito amor e carinho sempre guiando meus passos, me ajudando a superar dificuldades, dividindo sonhos principalmente sempre com os pés no chão não esquecendo que o melhor sempre está por vir e nós nunca podemos perder a esperança de um mundo melhor onde você mesmo fará o seu próprio futuro.

Agradecimento especial também aos meus amigos que em nenhum momento deixaram de acreditar em meu potencial, aos meus colegas da Uema que fizeram parte desse momento único em minha vida.

Agradeço também as minhas primas que sempre me colocaram para cima, me dando forças em todos os sentidos e me fazendo acreditar sempre conseguimos o que queremos com muito esforço e determinação

“A inteligência é o único meio que possuímos para dominar nossos instintos”.

(Sigmund Freud)

Resumo

Durante a usinagem de metais, altas temperaturas são geradas na interface de cavaco-ferramenta. Essas temperaturas, por sua vez, têm forte influência no controle da taxa de remoção de material e no atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte. Observa-se, entretanto que a medição direta de temperaturas nessa região é de difícil execução devido ao movimento da peça e a presença do cavaco. Este trabalho tem como principal objetivo estudar os diferentes métodos práticos empregados para medição da temperatura de corte gerada durante o processo de usinagem por torneamento, determinando o campo temperatura em várias regiões da ferramenta, algumas até inacessíveis, perceber através de análises de aparatos experimentais realizados em alguns dos métodos utilizados no trabalho a importância de cada elemento presente no processo e descrever os critérios de utilização, bem como, avaliar os vários fatores que podem influenciar para que a temperatura de corte aumente ou diminua e saber qual método de medição utilizar para cada caso específico, visando uma melhor compreensão sobre o tema. Alguns autores exploram bastante o tema com considerações e análises individuais, outros levam em consideração a importância de uma análise computacional até mesmo para garantir a precisão na hora do resultado visto que atualmente existem alguns softwares que garantem não só confiança no resultado final mas também auxiliam em fatores como precisão dimensional e conservação da microestrutura.

Palavras-chave: Temperatura de Corte, Medição de Temperatura, Técnicas de Medição.

Abstract

During the machining of metals, high temperatures are generated in the chip-tool interface. These temperatures, in turn, have a strong influence in controlling the removal rate of material and friction between the chip and the cutting tool. It is noted, however that the direct measurement of temperature in this region is difficult to implement due to the movement of the piece and the presence of the chip. This work aims to study the different practical methods used for measurement of the cut generated during the machining process by turning temperature, determining the temperature field in various regions of the tool, some even inaccessible, realize through experimental apparatus analyzes conducted in some of the methods used at work the importance of each element in the process and describe the use of criteria as well as to assess the various factors that can influence so that the cutting temperature increase or decrease and know which measurement method used in each case particular, to improve understanding of the subject. Some authors rather explore the topic with regards individual analysis, others take into account the importance of computational analysis even to ensure accuracy at the time of the visa currently there are some software that guarantee results not only confidence in the final result but also assist in factors such as dimensional accuracy and maintenance of the microstructure.

Keywords: Cutting Temperature, Temperature Measurement, Measurement Techniques

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Processo de usinagem por Torneamento	21
Figura 1.2	Representação dos planos de corte no processo de torneamento	22
Figura 1.3	Forças de corte para a aresta de corte	24
Figura 1.4	Temperaturas máximas na interface cavaco-ferramenta em função da velocidade de corte	27
Figura 1.5	Zonas de geração de Calor	28
Figura 1.6	Representação do calor gerado e o valor atingido pela temperatura	29
Figura 1.7	Cavaco	30
Figura 1.8	Regiões de formação do cavaco	32
Figura 1.9	Formas de cavaco	34
Figura 1.10	Utilização do quebra-cavaco	38
Figura 1.11	Tipos de quebra cavaco	39
Figura 1.12	Diferentes geometrias de insertos utilizadas na usinagem	39
Figura 1.13	Uso dos fluidos de corte	41
Figura 1.14	Calorímetro de água	48
Figura 1.15	Distribuição de temperatura na ferramenta de corte	49
Figura 1.16	Método do termopar ferramenta-peça	52
Figura 1.17	Ilustração esquemática de um sistema termopar ferramenta-peça no torneamento	54
Figura 1.18	Ilustração de aplicações de mancal de mercúrio	55
Figura 1.19	Ilustração de implantação de um mancal de mercúrio em uma contra ponta rotativa.....	57
Figura 1.20	Termopar inserido na ferramenta	58
Figura 1.21	Medição da energia de radiação	59
Figura 1.22	Aparato experimental do método por radiação térmica	62
Figura 1.23	Utilização do lápis térmico	64
Figura 1.24	Desenho esquemático do método de medição com utilização de sais.....	65
Figura 1.25	Limites de fusão de NaCl,PbCl e KNO ₃	66
Figura 1.26	Identificação das zonas de filme fundido e não fundido	69
Figura 1.27	Aplicação de termopares para monitoramento	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.0	Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte	43
Tabela 2.1	Pontos fortes e restrições do método de medição por técnicas metalográficas ...	50
Tabela 2.2	Tabela contendo 8 tipos diferentes de termopares com combinações de metais nobres	51
Tabela 2.3	Pontos fortes e restrições do método de radiação por termopares ópticos	60
Tabela 2.4	Pontos fortes e restrições do método de radiação por pirômetro de fibra óptica..	61
Tabela 2.5	Pontos fortes e restrições do método de radiação por câmeras infravermelha	61
Tabela 2.6	Pontos fortes e restrições do método de medição por vernizes térmicos	64
Tabela 2.7	Pós químicos e seus respectivos pontos de fusão e ebulição	66
Tabela 2.8	Pontos fortes e restrições do método de medição por pós Químicos	67
Tabela 2.9	Pontos de fusão de alguns materiais	68
Tabela 2.10	Pontos fortes e restrições do método de medição por filme pvd	69

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1.1	Equação da distribuição da energia térmica entre os meios participantes	20
Fórmula 1.2	Equação do balanço energético	29
Fórmula 1.3	Equação do calorímetro	47

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A – Zona primaria de Cisalhamento	[adimensional]
a_p - Profundidade de corte	[mm]
B – Zona secundaria de Cisalhamento	[adimensional]
C – Zona terciaria de Cisalhamento	[adimensional]
C_{cv} = Calor específico do cavaco	[cal]
C_{ec} = Calor específico do calorímetro	[cal]
F_c - Força de corte	[N]
$f.e.m$ – Força Eletromotriz	[Volt]
f_n – Avanço	[mm]
M_a = Massa da água no calorímetro	[gramas,g]
M_c = Massa do cavaco	[gramas,g]
P - Taxa de energia consumida durante o corte	[W]
Q_{a1} - Calor gerado na zona de cisalhamento secundário	[J]
Q_{a2} - Calor gerado na zona de interface peça-superfície de folga da ferramenta	[J]
Q_c - Calor dissipado pelo cavaco	[J]
Q_f - Calor dissipado pela ferramenta de corte	[J]
Q_m - Calor dissipado pelo meio-ambiente	[J]
Q_p - Calor dissipado pela peça	[J]
Q_z - Calor gerado na zona de cisalhamento primário	[J]
T_c = Temperatura do cavaco	[°C]
T_{ic} - Temperatura de usinagem medida na interface de corte	[°C]
T_R -Temperatura da junção de referência	[°C]
T_1 = Temperatura inicial da água e do calorímetro	[°C]
T_2 = Temperatura final da água,do cavaco e do calorímetro	[°C]
V_c - Velocidade de corte	[m/min]
V_e – Velocidade Efetiva	[mm/min]
V_f – Velocidade de Avanço	[mm/min]

Letras gregas

α – Ângulo de folga	[grau]
Φ_c – Maior parcela de energia	[J]
Φ_p – Menor parcela de energia	[J]
Φ_f – Parcela da ferramenta	[J]
μ - Ângulo de Cisalhamento	[grau]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2	DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	20
3.3	PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO	20
3.3.1	PARÂMETROS DO PROCESSO	22
3.3.2	CONDIÇÕES DE CORTE	24
3.4	CALOR GERADO NA ZONA DE CISALHAMENTO PRIMÁRIA	24
3.5	CALOR GERADO NA ZONA DE CISALHAMENTO SECUNDÁRIA	25
3.6	CALOR GERADO NA ZONA DA INTERFACE ENTRE A PEÇA E A SUPERFÍCIE DE FOLGA DA FERRAMENTA	26
3.7	PARÂMETROS METALÚRGICOS QUE INFLUENCIAM NA TEMPERATURA DA FERRAMENTA	26
4	TEMPERATURA DE CORTE	27
5	ESTUDO DO CAVACO	30
5.1	ETAPAS DOS MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO	31
5.2	CLASSIFICAÇÃO DO CAVACO	32
5.2.1	QUANTO AOS TIPOS	32
5.2.2	QUANTO À FORMA	33
5.3	TEMPERATURA NA INTERFACE FERRAMENTA-CAVACO	34
5.4	MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NA INTERFACE PEÇA-FERRAMENTA / CAVACO	36
5.5	QUEBRA-CAVACO	37
5.5.1	TIPOS DE QUEBRA-CAVACO	38
6	FLUIDOS DE CORTE	40
6.1	FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE	41
6.2	CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	42

6.3	SELEÇÃO DO FLUIDO DE CORTE	45
6.3.1	CONDIÇÕES DE USINAGEM	45
6.3.2	MATERIAL DA FERRAMENTA	45
6.3.3	MATERIAL DA PEÇA	46
6.3.4	OPERAÇÕES DE USINAGEM	46
7	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE CORTE	47
7.1	MÉTODO CALORIMÉTRICO	47
7.2	MEDIÇÃO POR TÉCNICAS METALGRÁFICAS	49
7.3	MÉTODO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA	50
7.3.1	APARATO EXPERIMENTAL NO SISTEMA TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA NO TORNEAMENTO	53
7.4	INSERÇÃO DE TERMOPARES NA FERRAMENTA DE CORTE	57
7.5	MEDIÇÃO DA TEMPERATURA ATRAVÉS DA RADIAÇÃO TÉRMICA	58
7.5.1	MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO NA FAIXA DE ESPECTRO INFRAVERMELHO	59
7.5.2	MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO POR TERMOPARES ÓPTICOS	60
7.5.3	MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO POR PIRÔMETRO DE FIBRA ÓPTICA.....	60
7.5.4	MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO POR CÂMERAS INFRAVERMELHAS.....	61
7.5.5	APARATO EXPERIMENTAL MAIS ATUALIZADO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO POR RADIAÇÃO TÉRMICA	62
7.6	MEDIÇÃO INDIRETA POR MEIO DE VERNIZES TÉRMICOS	63
7.7	MEDIÇÃO UTILIZANDO PÓS-QUÍMICOS	65
7.8	MEDIÇÃO UTILIZANDO FILMES PVD	67
7.9	MEDIÇÃO DA TEMPERATURA POR MEIO DA TÉCNICA DE MÉTODOS INVERSOS	70
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Dentre os vários fatores que afetam diretamente as condições de trabalho entre a ferramenta e a peça, a temperatura de corte é um fator que limita bastante a produtividade das operações de usinagem, principalmente quando são desenvolvidas elevadas temperaturas durante o processo de usinagem, às quais afetam drasticamente o desempenho das ferramentas de corte, responsáveis em grande parte pela produtividade destas operações (FERRARESI, 1977; DINIZ, 1999 e CHIAVERINI, 1986). No processo de torneamento apenas 8 a 10% do total de calor gerado é transferido para a ferramenta, a maior parte deste calor é dissipado pelo cavaco, mas uma pequena parcela é conduzida na peça, e aumenta a sua temperatura, podendo às vezes causar problemas de precisão dimensional (MACHADO e SILVA, 1999; TRENT e WRIGHT, 2000). A temperatura de corte é um fator determinante que pode influenciar no desgaste da ferramenta, restringindo a aplicação de regimes de corte mais severos fixando as condições máximas de produtividade (CARVALHO, 2005; RODRIGUES, *et al.*, 2005).

Para aumentar a produtividade da ferramenta deve-se aumentar a velocidade, o avanço e a profundidade de corte. Todos estes fatores aumentam a temperatura. Portanto deve-se procurar diminuir esta temperatura além de empregar materiais de corte resistentes a altas temperaturas e ao desgaste, o meio mais barato para a diminuição da temperatura de corte é o emprego de fluidos de corte.

Elevadas temperaturas desenvolvidas na ferramenta de corte beneficiam o aparecimento de mecanismos de desgaste que promovem a sua falha prematura (LAZOGLU e ALTINTAS, 2002). Dentre os mecanismos termicamente ativados, pode-se citar a difusão, a deformação plástica superficial por cisalhamento e a deformação plástica da aresta de corte sob elevadas tensões de compressão. Esses mecanismos surgem com frequência nas ferramentas que executam corte contínuo. Neste caso, existem diversos métodos que possibilitam a obtenção da temperatura de usinagem e, desta forma, escolher os melhores parâmetros de corte para uma maior vida da ferramenta (RODRIGUES, *et al.*, 2005). São exemplos de alguns métodos utilizados na construção deste trabalho o método calorimétrico, termopar ferramenta-peça, por pós-químicos entre outros.

2.OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar os diferentes tipos de métodos práticos empregados para medição da temperatura de corte utilizada durante o processo de usinagem por torneamento.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estudar os diferentes métodos de medição de temperatura de corte para o processo de usinagem por torneamento.
- Avaliar os vários fatores que podem influenciar para que a temperatura de corte aumente ou diminua e saber qual método de medição utilizar para cada caso especificamente.
- Determinar até que ponto da temperatura de corte poderá ser mais prático o uso de um método específico como o de termopar ou medição calorimétrica por exemplo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A definição de usinagem, segundo a DIN 8580, aplica-se a todos os processos de fabricação, onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco. O estudo da usinagem é baseado na mecânica (Atrito, Deformação), na Termodinâmica (Calor) e nas Características dos materiais.

Segundo (FERRARESI, 1977), operações de usinagem são aquelas que submetem ao material bruto uma dimensão, acabamento ou forma, e quaisquer combinações destes itens produz cavaco. Ainda de acordo com o autor cavaco é todo material retirado da peça pela ferramenta que apresenta uma superfície irregular.

A seleção do material da ferramenta são influenciadas por sete parâmetros principais como: material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina operatriz, forma e dimensionamento da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e condições da operação (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001). Quanto da ferramenta, a escolha do inserto (ferramenta de desbaste) a ser utilizado existem alguns fatores que influenciam sua durabilidade como: a geometria, sua liga (composição do seu material) e seu revestimento (COSTA e SANTOS, 2006). No instante de desbaste o atrito da ferramenta de corte com a peça gera uma grande quantidade de calor, para a alta temperatura ser controlada utiliza-se fluido de corte. Além da refrigeração o fluido serve para prevenção contra corrosão e auxilia na remoção de cavaco da região de corte (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008).

Com a presença de elevadas temperaturas de cortes e penetração periódica do fluido na superfície a ferramenta de corte irá sofrer alterações, dilatações e expansões. Assim, uma ferramenta com boa condutividade e baixo coeficiente de expansão térmica poderá ter os danos térmicos reduzidos pela minimização da flutuação da temperatura na aresta de corte (EZUGWU, WANGE, MACHADO, 1999). Neste presente trabalho demonstraremos alguns dos diferentes métodos práticos para medição dessa temperatura de corte.

3.2 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Nos processos mecânicos em que ocorrem deformações plásticas, a maior parte da energia utilizada é convertida em calor. Nesse caso o material não armazena toda a energia recebida e assim, para que exista equilíbrio no balanço de energia, ocorre a conversão da energia mecânica em energia térmica. Na usinagem de metais o material é submetido a altas tensões de cisalhamento ou deformações plásticas sendo que a deformação elástica representa uma pequena parcela na proporção da deformação total. Assim, considera-se que toda energia mecânica utilizada para o corte é transformada em calor. A energia consumida transformada em energia térmica é distribuída entre o cavaco, a peça, a ferramenta de corte, o fluido de corte e o meio ambiente (MELO, 1998). A distribuição da energia térmica total entre os principais meios participantes pode ser classificada como (TRENT, 1984):

$$P = \Phi_c + \Phi_p + \Phi_f \quad (1.1)$$

onde Φ_c representa a maior parcela de energia devido ao fluxo material do cavaco, com as temperaturas podendo chegar até valores acima de 650 °C; Φ_p representa uma parcela menor que a do cavaco e atua na peça podendo comprometer a acuracidade dimensional; Φ_f representa a parcela da ferramenta de 8 a 10% (FERRARESI, 1977) e que pode resultar em temperaturas de até 1100°C.

A conversão da energia mecânica em energia térmica ocorre teoricamente em três regiões de deformação plástica: a zona de cisalhamento primária, a zona de cisalhamento secundária e a zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, como as explicaremos de forma bem sucinta posteriormente.

3.3 PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO

O torneamento tradicional é usado para a fabricação de peças cilíndricas de corte contínuo ou interrompido em diferentes tipos de materiais. O corte se dá por meio da rotação da

peça em seu próprio eixo fixada na máquina, o qual, em contato com a ferramenta, lhe dá forma e dimensão desejadas e como se sabe os parâmetros de corte é responsável pelos movimentos ativos que promovem a remoção do material ao ocorrerem (DINIZ, MARCONDES, e COPPINI, 2008). A figura 1.1 demonstra o processo de torneamento que é o mais utilizado e/ou um dos mais utilizados na área de usinagem:

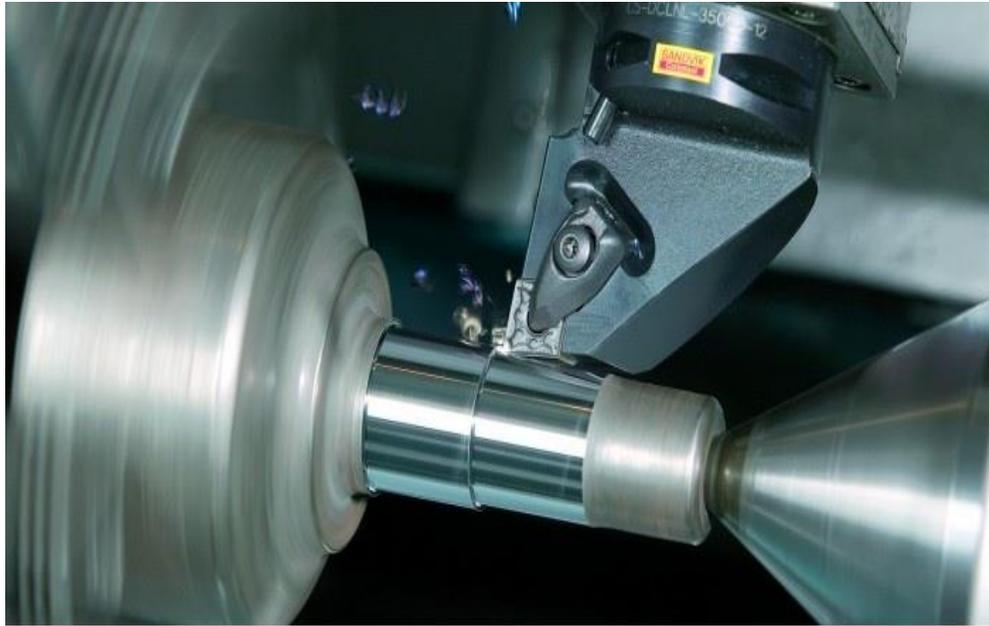


Figura 1.1 – Processo de usinagem por Torneamento

Fonte: Disponível em (http://www.hailtools.com.br/Novo_Site/images/timthumb.jpg), acesso em 10/07/2015

O torneamento, como todos os trabalhos executados com máquinas-ferramenta, acontece mediante a retirada progressiva do cavaco da peça trabalhada. O cavaco é cortado por uma ferramenta de um só gume cortante, que deve ter uma dureza superior à do material a ser cortado. Nesse processo a ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo ao redor de seu eixo permite o corte contínuo e regular do material. A força necessária para retirar o cavaco é feita sobre a peça, enquanto a ferramenta, firmemente presa ao porta-ferramenta, contrabalança a reação dessa força.

3.3.1 PARÂMETROS DO PROCESSO

Para realizar o torneamento, são necessários três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta:

- ✓ Velocidade de corte(V_c): é o movimento principal que permite cortar o material. O movimento é rotativo e realizado pela peça;
- ✓ Avanço(f_n): é o movimento que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça;
- ✓ Profundidade de corte(a_p): é o movimento que determina a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça e assim regular a profundidade do passe e a espessura do cavaco.

A Figura 1.2 mostra a geometria básica do processo de torneamento, onde se observam os parâmetros do processo citados anteriormente: profundidade de corte (a_p) avanço (f_n) e velocidade de corte (V_c).

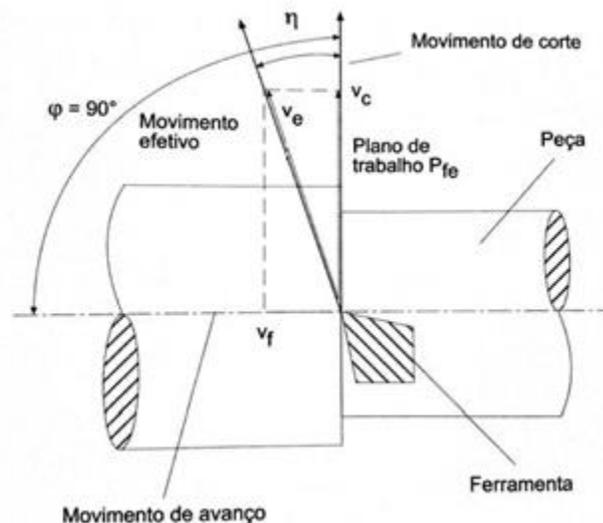


Figura 1.2 – Representação dos parâmetros no processo de torneamento

Fonte: (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2008)

Devemos levar em consideração o material a ser usinado, tal quais suas características físicas por sua vez, influenciam diretamente na escolha das ferramentas,

parâmetros e processo de usinagem, principalmente quando a aplicação exige acabamentos e geometrias complexas e de elevada qualidade. A dureza da peça influencia diretamente no resultado do acabamento superficial da usinagem e a variação das velocidades de corte podem aumentar significativamente a qualidade do resultado de torneamento; (CHAVOSHI e TAJDARI, 2010). O torneamento é um processo extremamente complexo e como mencionado, possui diversas variáveis envolvidas que podem afetar diretamente seu resultado. O estudo das relações entre estas variáveis permite determinar as melhores condições de corte que, por sua vez, trarão os melhores resultados. Muitos trabalhos apresentam as interações entre as ferramentas e a peça usinada, bem como seus parâmetros de corte e características que afetam a qualidade do produto (DÓRIA, 2005) e (MALÈRE, 2006).

No que tange a rugosidade superficial, os parâmetros de corte podem ser considerados como os responsáveis pela integridade e qualidade final (LIMA, 2008). Sendo assim, além dos parâmetros, no processo de torneamento, as ferramentas de corte merecem atenção especial e sua escolha adequada pode significar o sucesso ou não da usinagem.

Normalmente, o processo de seleção de uma ferramenta de corte, pode passar pela análise econômica ou técnica. Na maioria das situações, ambas as análises devem ser consideradas para a decisão final. Neste contexto, é importante que se tenha conhecimento dos critérios de desgaste e vida útil destas ferramentas, visto que o canto vivo destes componentes é comumente vulnerável a desgastes em escala que reduzem significativamente a sua eficiência e influenciam na rugosidade superficial do produto final (DENKENA, 2012).

Variando os movimentos, a posição e o formato da ferramenta, é possível realizar uma grande variedade de operações:

- Tornear superfícies externas e internas
- Tornear superfícies cônicas externas e internas.
- Roscar superfícies externas e internas.
- Perfilar superfícies.

Além dessas operações, também é possível furar, alargar, recartilhar, roscar com machos e cossinetes, mediante o uso de acessórios próprios para a máquina-ferramenta.

3.3.2 CONDIÇÕES DE CORTE

Dentre as variáveis importantes para controle no processo de torneamento, os parâmetros de corte se destacam pela interação e influência no resultado final de acabamento superficial e qualidade dimensional das peças usinadas, principalmente pelo fato de que o processo de corte é resultado de uma interação física entre a aresta de corte da ferramenta e a peça de trabalho. A Figura 1.3 mostra a simulação da força de corte gerada a partir do torneamento de um aço AISI 1045 com ferramenta de metal duro SNMA 120408.

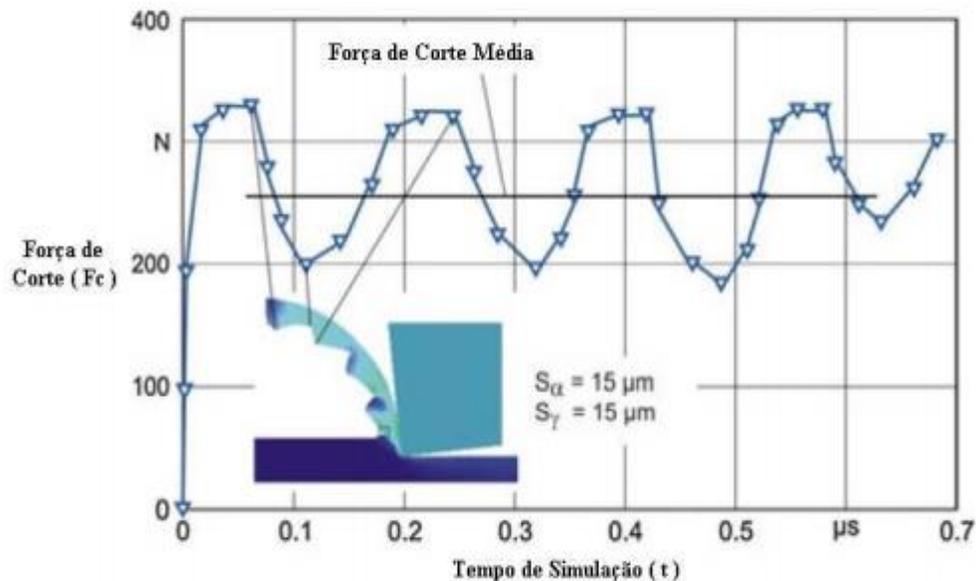


Figura 1.3 - Força de corte para aresta de corte com $V_c = 200$ m/min, $f = 15$ mm/v e $a_p = 0,15$ mm

Fonte:(DENKENA, 2012)

3.4 CALOR GERADO NA ZONA DE CISALHAMENTO PRIMÁRIA

Grande parte do calor gerado na zona de cisalhamento primário é dissipada através do cavaco, mas uma pequena fração M , é transmitida para a peça por condução, e aumenta a sua temperatura, podendo às vezes causar problemas de precisão dimensional.

Nesta região a peça é submetida a uma intensa e irreversível deformação plástica, sendo que a movimentação do cavaco para fora da área de usinagem é a responsável pela maior

dissipação de calor na zona de cisalhamento primário. (NG, et al., 1999) estimam que estas elevadas taxas de deformação plástica se situem na ordem de 10^3 a 10^4 s^{-1} , dependendo da velocidade de corte.

A temperatura no cavaco pode chegar a $650^{\circ}C$ quando usinando aços endurecidos e algumas ligas de níquel, sob certas condições de corte, mas a faixa normal de temperatura do cavaco, quando usinando aços e outros materiais comuns é de $200^{\circ}C$ a $350^{\circ}C$ (TRENT e WRIGHT, 1999). A temperatura do cavaco tem pouca influência na temperatura da ferramenta, pois o tempo com que uma pequena porção do cavaco (lamela) passa sobre a superfície de saída da ferramenta, é muito pequeno (poucos milissegundos) para conduzir calor (TRENT e WRIGHT, 1999). Além disso, na presença da zona de fluxo na zona de cisalhamento secundário, haverá ali o desenvolvimento de temperaturas bem maiores que as temperaturas do cavaco, assim, o calor fluirá da mesma em direção ao cavaco, e não o contrário.

3.5 CALOR GERADO NA ZONA DE CISALHAMENTO SECUNDÁRIA

Esta é a fonte de calor que mais influencia as temperaturas da ferramenta de corte. A temperatura da ferramenta pode não representar grande problema nos materiais macios e de baixo ponto de fusão, como o alumínio e o magnésio, mas se torna o fator controlador da taxa de remoção de material, quando na usinagem de materiais duros e de alto ponto de fusão. A temperatura da interface cavaco-ferramenta aumenta com a velocidade de corte. Haverá, portanto, um limite prático na velocidade de corte, para cada par ferramenta-peça. As altas temperaturas nas ferramentas de corte não só aceleram os mecanismos de desgaste termicamente ativados, mas também reduzem o limite de escoamento dessas ferramentas.

Na presença da zona de fluxo, a quantidade e a taxa de deformação é tão alta e complexa, que (TRENT, 1988) afirmou ser irrealista tentar calcular o aumento de temperatura naquela região, com o presente estado de conhecimento dos fenômenos envolvidos. Tais exuberantes quantidades de deformações sem promover encruamento do material na mesma proporção, só podem ocorrer com o amolecimento adiabático causado pelo aumento da temperatura. A temperatura dessa zona, é portanto, a temperatura da ferramenta dependente da quantidade de trabalho realizado para cisalhar o material e da quantidade de material que passa pela zona de fluxo, e isto varia com o material da peça (TRENT e WRIGHT, 1999).

Temperaturas da ordem de 1000°C na interface cavaco-ferramenta podem ser encontrados e as ferramentas de corte têm que estar preparadas para suportarem estas temperaturas durante o corte.

Pode-se observar temperaturas bastante elevadas em velocidades de corte bem baixas, para certos materiais. Segundo (TRENT, 1991), as condições da interface cavaco-ferramenta (aderência, escorregamento ou aresta postiça de corte) devem ser assumidas como os fatores mais importantes a serem considerados na influência sobre a temperatura da ferramenta de corte. A zona de fluxo, portanto, constitui uma fonte efetiva de calor apesar de se conhecer muito pouco sobre a influência dos elementos de liga e mudanças microestruturais nas bandas de cisalhamentos termoplásticos.

3.6 CALOR GERADO NA ZONA DE INTERFACE ENTRE A PEÇA E A SUPERFÍCIE DE FOLGA DA FERRAMENTA

Em condições normais de usinagem uma fina camada de material da peça é extrudada abaixo da aresta de corte, criando um contato muito fino com a superfície de folga (LONGBOTTOM e LANHAM, 2005).

Se a usinagem ocorrer com ângulos de folga pequenos ($\alpha < 1^\circ$) ou se o desgaste de flanco (VBB, medido na superfície de folga da ferramenta) atingir proporções consideráveis, a interface peça-superfície de folga da ferramenta se torna a terceira fonte importante de geração de calor. Neste caso, a análise é similar à zona de cisalhamento secundário, com a presença da zona de fluxo, o que promove altas temperaturas na superfície de folga, que pode levar a ferramenta de corte ao colapso (TRENT e WRIGHT, 1999 ; MACHADO e DA SILVA, 1999).

3.7 PARÂMETROS METALURGICOS QUE INFLUENCIAM NA TEMPERATURA DA FERRAMENTA

(TRENT, 1988) enumerou pelo menos três parâmetros metalúrgicos que influenciam a temperatura da ferramenta. Na Figura 1.4 mostra-se a temperatura máxima da interface cavaco-ferramenta (e portanto a temperatura máxima na superfície de saída da ferramenta) na usinagem de vários materiais com ferramentas de aço rápido, em função da velocidade de corte.

- Ponto de fusão do principal elemento químico do material da peça. Quanto maior o ponto de fusão deste elemento, maior a temperatura da interface cavaco-ferramenta, para qualquer velocidade de corte.
- Elementos de liga que aumentam a resistência do material da peça. Eles aumentam a temperatura da interface para qualquer taxa de remoção de material.
- Presença de fases de baixa resistência ao cisalhamento na interface (tais como MnS (sulfeto de manganês) e grafita). Elas podem reduzir a temperatura.

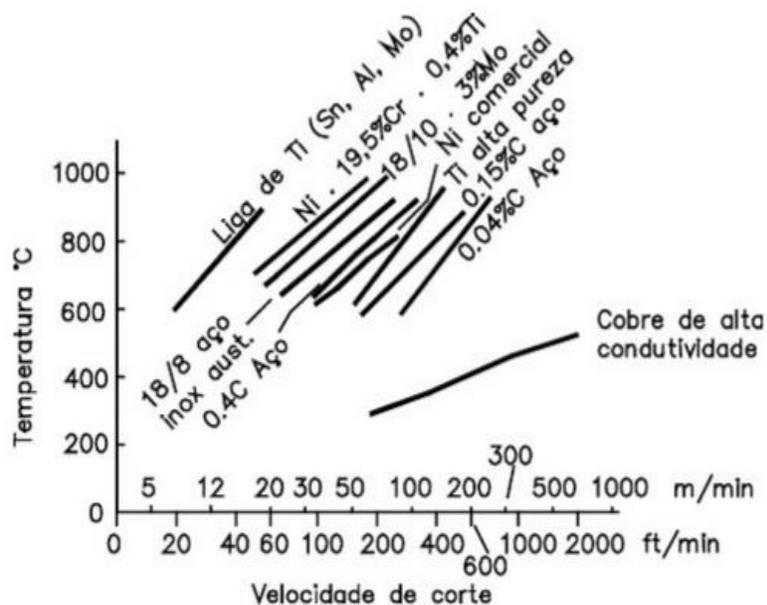


Fig 1.4 - Temperaturas máximas na interface cavaco-ferramenta em função da velocidade de corte

Fonte: (TRENT e WRIGHT, 1999)

4 TEMPERATURA DE CORTE

Praticamente toda energia mecânica associada a formação de cavacos se transforma em energia térmica (calor). Este calor acelera o processo de desgaste da ferramenta e causa problemas técnicos e econômicos nas indústrias, pois o calor excessivo causa alta temperatura indesejada na ferramenta, diminuindo sua dureza, acelerando o desgaste e levando a inutilização da mesma (SACLAM; YALDIZ; UNSACAR, 2006).

Medir a temperatura de corte não é uma tarefa fácil, tendo em vista as condições dinâmicas do processo (BICKEL, 1963). A interface cavaco-ferramenta é praticamente inacessível o que torna os processos de medição um tanto imprecisos. Na Figura 1.5 são representadas as três zonas distintas de geração de calor durante a usinagem:

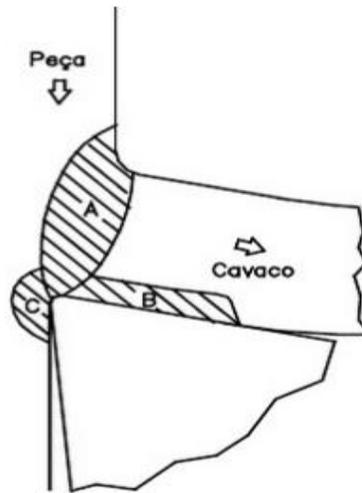


Fig 1.5 – Zonas de geração de calor em usinagem

Fonte: (MACHADO E DA SILVA, 2004)

São elas:

- Zona de cisalhamento primário, zona A;
- Zona de cisalhamento secundário, zona B;
- Zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, zona C (também denominada por alguns autores como zona terciária);

Grande parte do calor gerado é dissipado pelo cavaco, uma pequena porcentagem é dissipada pela peça e uma outra para o meio ambiente. O restante vai para a ferramenta de corte. Apesar de a parcela do calor que é transmitida à ferramenta representar apenas 8 a 10% do total, ela é responsável pela elevação da temperatura, que pode chegar a 1100°C, o que compromete fortemente a resistência da ferramenta. A equação de balanço energético fica:

$$Q_z + Q_{a1} + Q_{a2} = Q_c + Q_p + Q_{ma} + Q_f \quad (1.2)$$

Onde,

Q_z = Calor gerado na zona de cisalhamento primário.

Q_{a1} = Calor gerado na zona de cisalhamento secundário.

Q_{a2} = Calor gerado na zona de interface peça-superfície de folga da ferramenta.

Q_c = Calor dissipado pelo cavaco.

Q_p = Calor dissipado pela peça.

Q_{ma} = Calor dissipado pelo meio-ambiente.

Q_f = Calor dissipado pela ferramenta de corte.

Essa distribuição da temperatura se dá por vários fatores, a depender do tipo de material utilizado, das condições de corte entre outros itens; a seguir a figura 1.6 representa a porcentagem de calor gerado e o valor atingido pela temperatura para um tipo específico de material:

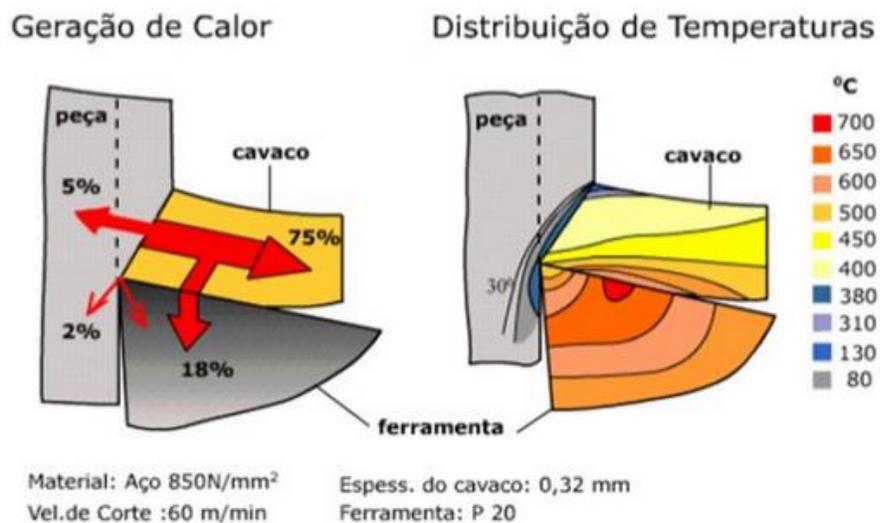


Figura 1.6 – Representação do calor gerado e o valor atingido pela temperatura

Fonte: Disponível em

(http://assets.cimm.com.br/noticias/imagem/Image/material_didatico/usinagem/con-996.gif), acesso em 19/06/2015.

A dificuldade da obtenção da temperatura na interface cavaco-ferramenta mesmo para condições de corte simples, requer, por sua vez, a utilização de métodos distintos, pois veremos posteriormente que existem vários que podem ser aplicados à depender da situação que envolve cada componente do processo.

5. O ESTUDO DO CAVACO

O cavaco é o resultado da retirada do sobremetal da superfície que está sendo usinada. Pelo aspecto e formato do cavaco que está sendo produzido, é possível avaliar se operador escolheu a ferramenta com critério técnico correto e se usou o parâmetro de corte adequado. A Figura 1.7 mostra um exemplo de como o cavaco pode ser retirado da peça:



Figura 1.7 – Cavaco

Fonte: Disponível em (<http://assets.cimm.com.br/noticias/imagem/Image/cavacos2.jpg>), acesso em 14/06/2015.

Posteriormente serão enumeradas as etapas dos mecanismos de formação do cavaco segundo (FERRARESI,1977).

5.1 ETAPAS DOS MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO

Em geral, a formação do cavaco, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido se processa da seguinte forma (FERRARESI, 1977) :

1. Uma pequena porção do material (ainda solidária à peça) é recalçada (deformações elásticas e plásticas) contra a superfície de saída da ferramenta (FERRARESI, 1977).

2. O material recalçado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja com isto uma perda de coesão) entre a porção de material recalçado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais de material recalçado. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento, para facilitar o tratamento matemático dado a formação do cavaco essa região é assimilada a um plano, dito simplesmente plano de cisalhamento (FERRARESI, 1977).

3. Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura (cisalhamento) parcial ou completa na região de cisalhamento dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem. Para os materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante, o cavaco originado é denominado cavaco contínuo. Para os materiais frágeis se origina o cavaco de cisalhamento ou de ruptura (FERRARESI, 1977).

4. Prosseguindo, 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. Enquanto isso, nova porção do material está se formando e cisalhando, a qual irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo o fenômeno (FERRARESI, 1977).

A figura 1.8 abaixo demonstra de uma forma geral as regiões de formação do cavaco:

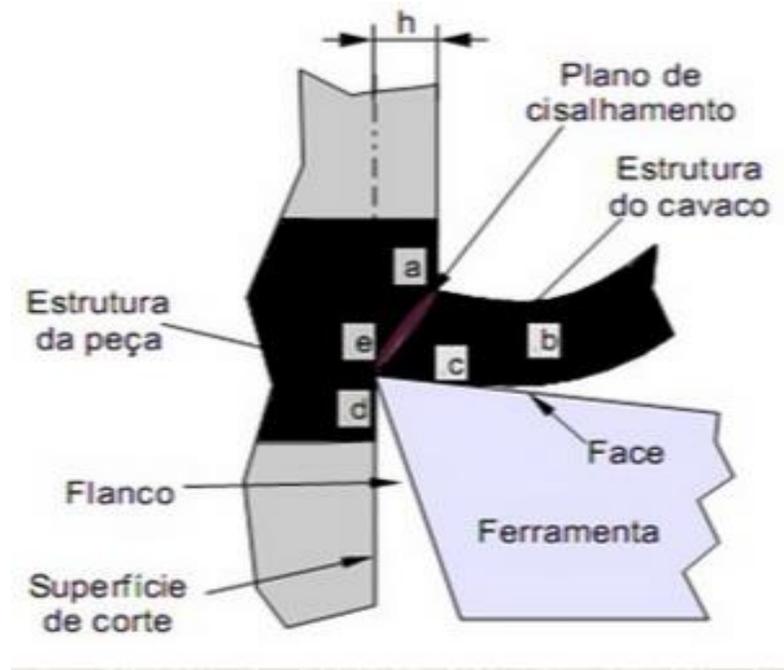


Figura 1.8 – Regiões de formação do cavaco

Fonte: Disponível em (<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAamgAG/a-influencia-cavaco-no-processo-usinagem-com-ferramentas-corte-torno-cnc>), acesso em 14/06/2015.

Onde:

- a) Zonas de cisalhamento
- b) Região de separação do material para materiais frágeis
- c) Superfície do cavaco - deformações devidas a esforços
- d) Superfície de corte – deformações devidas a esforços
- e) Região para separação de materiais dúcteis

5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS

Como o objetivo do trabalho não é explicar sucintamente sobre cavacos, faremos uma breve citação em relação aos tipos e formas.

5.2.1 QUANTO AOS TIPOS

De acordo com (FERRARESI, 1977) os cavacos quanto ao tipo, podem ser :

Contínuo: Apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. O cavaco contínuo se forma na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno e médio avanço (FERRARESI, 1977).

Cavaco de Cisalhamento: Apresenta-se constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos. Estes elementos de cavaco foram cisalhados na região de cisalhamento e parcialmente soldados em seguida (FERRARESI, 1977). Forma-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento da deformação, à heterogeneidade da estrutura metalográfica, ou a vibrações externas que conduzem às variações da espessura do cavaco (FERRARESI, 1977).

Cavaco de Ruptura: Apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região de cisalhamento) os quais permanecem separados. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura homogênea, tais como ferro fundido ou latão (FERRARESI, 1977).

5.2.2 QUANTO À FORMA

Além dos três tipos de cavaco, pode-se diferenciá-lo quanto à forma. Certas formas de cavaco dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e desgastam mais ou menos a ferramenta. Segundo VIEREGGE tem-se quatro formas de cavaco, demonstrados na figura 1.9:

- ✓ Cavaco em Fita
- ✓ Cavaco Helicoidal
- ✓ Cavaco Espiral
- ✓ Cavaco em lascas ou pedaços

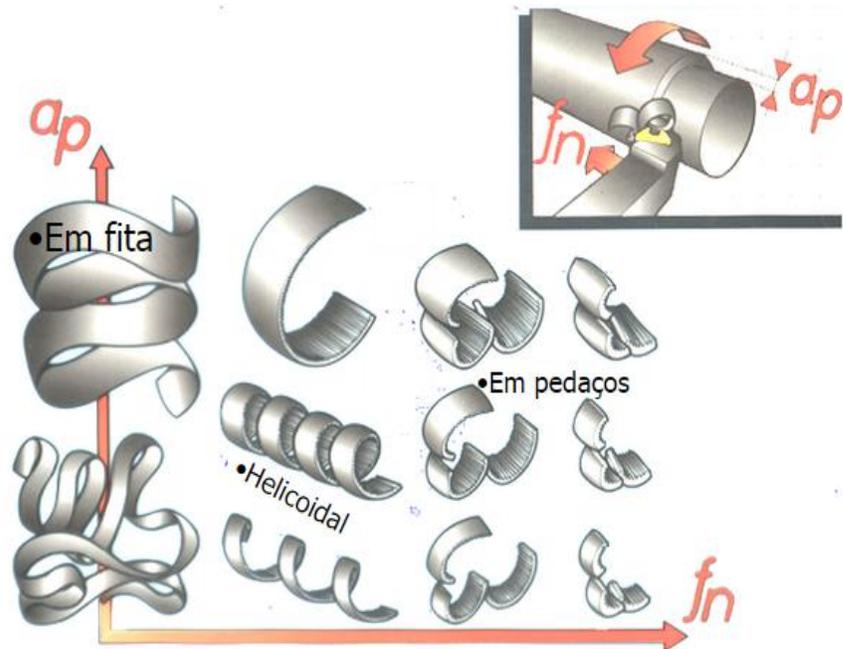


Figura 1.9 – Formas de Cavaco

Fonte: Disponível em (http://images.slideplayer.com.br/3/1222954/slides/slide_43.jpg), acesso em 14/06/2015.

O cavaco em fita pode provocar acidentes, ocupa muito espaço e é difícil de ser transportado. Geralmente a forma mais conveniente é a helicoidal; o cavaco em lascas é preferível apenas quando houver pouco espaço disponível, ou quando o cavaco deve ser removido por fluidos refrigerantes (FERRARESI, 1977).

5.3 TEMPERATURA NA INTERFACE FERRAMENTA-CAVACO

A medida mais intuitiva para se buscar a redução da temperatura da ferramenta em uma determinada situação de usinagem é o uso de meios que possam arrefecer a região de formação do cavaco onde ocorre a geração da maior parte do calor responsável pelo aquecimento dessa ferramenta. Há métodos tecnologicamente sofisticados de arrefecimento que utilizam a criogenia, a aplicação de fluidos de corte a alta pressão ou uma combinação entre fluidos criogênicos e injeção a alta pressão (AHMED, et. al., 2007), (YILDZ e NALBANT, 2008), (KAMINSKI e ALVELID, 2000), (AHMAD-YAZID, et. al., 2010). Além desses, há outros

métodos mais simples de aplicação de fluidos de corte que conseguem reduzir a temperatura da ferramenta, preservando a aresta de corte e reduzindo o seu desgaste, além de outros benefícios como a redução da força de corte. No entanto, as metodologias utilizadas não têm efeito importante diretamente na redução da temperatura da interface ferramenta/cavaco (TRENT, 1984).

Segundo (TRENT, 1984), a aplicação de fluidos de corte pode mudar a distribuição de calor na periferia da interface ferramenta/cavaco - com o arrefecimento do cavaco e da ferramenta (da aresta de corte), porém, a ação desses fluidos não pode alterar significativamente a temperatura máxima naquela região. Especialmente em presença de uma zona fluxo, que representa a principal fonte de aquecimento da ferramenta, os fluidos de corte não podem atingir a interface ferramenta/cavaco porque essa se torna uma região de intensa deformação plástica cisalhante e elevadas temperaturas, onde ocorre a junção dos materiais da peça e da ferramenta em escala atômica, num contato contínuo com duração de milésimos de segundo. O cavaco se move sobre a superfície de saída da ferramenta num movimento relativo resultante da ruptura do material do cavaco, por cisalhamento termoplástico. Nessas condições, a zona fluxo se comporta como um fluido viscoso em escoamento sob altíssimas tensões cisalhantes e de compressão que impedem a penetração de outros elementos nessa região.

Por isso, a aplicação de fluidos de corte é ineficiente para a redução significativa da temperatura na interface ferramenta/cavaco e, conseqüentemente, na eliminação dos mecanismos de desgaste da ferramenta especialmente aqueles que ocorrem em presença de zona de fluxo (cisalhamento plástico a altas temperaturas, abrasão, adesão ou atrition, difusão e oxidação). Deve-se observar, no entanto, que a utilização de fluidos de corte promove a alteração da forma ou o mecanismo de desgaste, contribuindo para o aumento da vida da ferramenta, como está amplamente difundido na literatura.

Apesar das características da interface ferramenta/cavaco, principalmente, em presença de zona de aderência que impossibilitam a penetração de outros elementos durante a usinagem nessas condições, a temperatura na interface ferramenta/cavaco pode ser influenciada pela perda de calor por condução da zona de fluxo para o cavaco e para o interior da ferramenta (TRENT, 1984).

TRENT (1984) afirma que a transferência de calor entre a zona de fluxo e a ferramenta depende da condutividade térmica e da forma ou geometria da ferramenta, além do

método de arrefecimento usado para abaixar as temperaturas da ferramenta. No entanto, afirma, também, que a temperatura da ferramenta na superfície do contato com a zona de fluxo, é a mesma do material dessa zona de fluxo, ou seja, que a interface ferramenta/cavaco atinge a mesma temperatura da zona de fluxo.

Em um trabalho experimental usando o método do termopar ferramenta-peça, (CHEN e HO, 1976) verificaram que as diferenças na condutividade térmica das ferramentas de metal duro geometricamente idênticas, afetaram as temperaturas na interface ferramenta/cavaco, obtidas nas operações de torneamento de aço inoxidável realizado sob as mesmas condições de corte. Portanto, a análise anterior indica que a temperatura da ferramenta na interface ferramenta/cavaco é a temperatura máxima que ocorre na ferramenta, pois o seu valor é determinado pela geração de calor na zona de fluxo, no contato ferramenta-peça, e que as elevadas temperaturas que ocorrem nessa interface são provocadas pela inexistência de uma técnica capaz de produzir uma elevada taxa de transferência de calor dessa região.

5.4 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NA INTERFACE PEÇA-FERRAMENTA/CAVACO

Como já mencionado, a literatura reconhece que mecanismos ativados pelas altas temperaturas que ocorrem durante a usinagem são responsáveis pelos desgastes das ferramentas de corte. Este é um dos principais motivos para que se monitore ou se controle a temperatura na interface de corte durante testes de usinagem (STEPHENSON, 1993). Observa-se, entretanto, que nenhuma técnica existente em laboratório é simples e confiável o suficiente para o uso de forma rotineira, como observaram (YEO e ONG 2000) ; (MATIVENGA E SHEIKH 2006).

Os métodos que utilizam radiação infravermelha (STEPHENSON, 1991), (LIN, LEE e WENG, 1992), (LIN e LIU, 2001) apresentam certa dificuldade de utilização devido à interferência da saída de cavacos quentes que prejudicam as imagens de interesse. Esses métodos permitem determinar a temperatura de corte baseando-se na radiação térmica que é emitida na zona de corte. Outra desvantagem deste método deve-se a medições não pontuais, uma vez que representam o valor médio da temperatura na área de focalização ou área de sensibilidade do instrumento. Além disso, a dependência do conhecimento da emissividade térmica da superfície analisada é fator limitante, principalmente devido à variação de temperatura dos materiais (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Os métodos que empregam termopares remotos ou inseridos na peça como descritos por (YEN e WRIGHT, 1986); (LIANG, 1997); (MAEKAWA, 1997) também apresentam dificuldades devido aos altos gradientes presentes na ferramenta e ao tempo de resposta devido a distância da interface. Normalmente extrapolações a partir de modelos térmicos são usadas para estimativas das temperaturas de interface. Nos trabalhos de TRENT (1984) e EU-GENE (1995) verifica-se o uso dessa técnica para medir a temperatura durante o processo de torneamento e há aplicações dessa técnica na medição de temperatura em processos de furação (AGAPIOU e DEVRIES, 1990); (AGAPIOU e STEPHENSON, 1994) e no fresamento (LONGBOTTOM e LANTHAM, 2005).

Do ponto de vista de medição direta de temperatura, a técnica do termopar ferramenta-peça se apresenta como uma boa alternativa quando se deseja apenas a medição da temperatura média da interface de corte (STEPHENSON, 1993).

5.5 QUEBRA-CAVACO

De acordo com (MAITY e DAS, 1998) cavacos longos se enrolam em torno da ferramenta e podem causar sérios riscos à superfície da peça, ao operador e às operações da máquina-ferramenta. Para superar esta dificuldade, um número de pesquisadores tem investigado o controle efetivo do fluxo do cavaco e a quebra do mesmo. A curvatura do cavaco pode ser controlada pelo uso de um obstáculo ao longo da direção de fluxo do cavaco, comumente conhecido como quebra-cavacos. Existem numerosas tentativas de apresentar ferramentas com quebra-cavacos adequados para formar o cavaco com uma curvatura “forçada” e assim, facilitar a subsequente quebra do mesmo por ação mecânica (RAHMAN, et al., 1995).

O quebra-cavaco consiste em uma modificação geométrica da superfície de saída do inserto de corte para controlar ou quebrar o cavaco podendo ser tanto uma cratera integral ou um anteparo postiço ou integral (BOOTHROYD e KNIGHT, 1989). A principal função do mesmo é promover uma obstrução adjacente a aresta de corte que irá direcionar o cavaco de forma que este venha entrar em contato com a superfície não usinada da peça ou com a superfície de folga da ferramenta. O momento torçor resultante irá então, quebrar o cavaco (ARSECULARATNE, 2004). A figura 1.10 á seguir demonstra a utilização do quebra-cavaco:



Figura 1.10– Utilização do quebra-cavaco

Fonte: Disponível em (http://www.ntkcuttingtools.com/br/newproduct/images/npr_j7-1.jpg), acesso em 20/06/2015.

5.5.1 TIPOS DE QUEBRA CAVACOS

Existem basicamente dois tipos de quebra-cavaco. O tipo cratera e o tipo anteparo. O primeiro consiste em uma cratera moldada de forma integral na superfície de saída do inserto. O segundo consiste em uma obstrução situada na superfície de saída do inserto que pode ser integral ou postíço. A figura 1.11 ilustra os diferentes tipos de quebra-cavaco segundo (BOOTHROYD e KNIGHT, 1989)

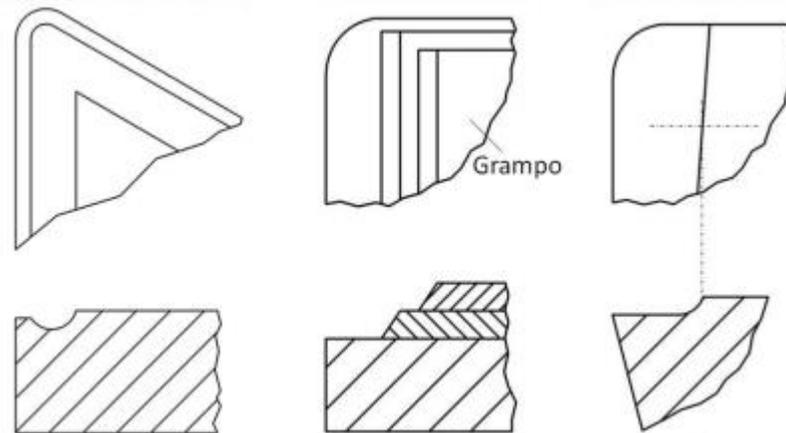


Figura 1.11 - Tipos de quebra-cavaco: (a) tipo cratera; (b) tipo anteparo postiço; e (c) tipo anteparo integral

Fonte: (Adaptado de BOOTHROYD e KNIGHT, 1989)

O tipo de quebra-cavaco mais popular é o cratera. Segundo ARSECULARATNE (2004), neste tipo de quebra-cavaco (figura 1.11(a)), há uma cratera situada na superfície de saída da ferramenta, na qual o cavaco tende a fluir devido a um mecanismo de restrição do contato entre o cavaco e a ferramenta. Para garantir que os cavacos irão fluir desta maneira, o comprimento da superfície de contato restrito da ferramenta (figura 1.12(a)) deve ser menor que o comprimento de contato natural entre o cavaco e a ferramenta, sendo este último o comprimento de contato existente quando aplicadas ferramentas com superfície de saída lisa (figura 1.12(b)).

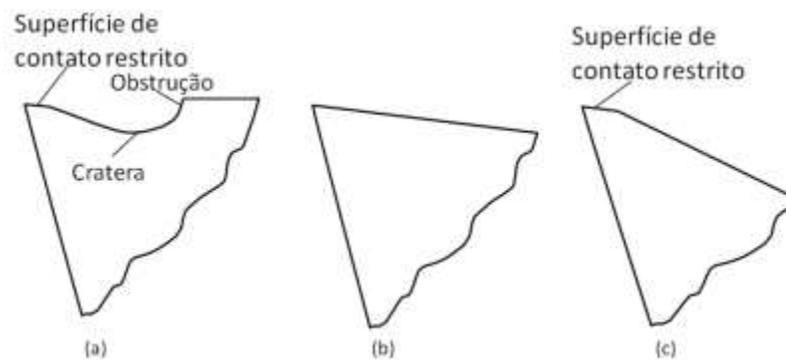


Figura 1.12 - Diferentes geometrias de insertos usados na usinagem. (a) inserto com quebra – cavacos tipo cratera; (b) inserto com superfície de saída lisa; (c) inserto com contato restrito

Fonte: (ARSECULARATNE, 2004).

De acordo com ARSECULARATNE (2004), quando parte da superfície de saída do inserto é retirada de forma que o comprimento de contato seja menor que o comprimento de contato natural, a ferramenta é chamada de ferramenta (inserto) com contato restrito (Figura 1.12(c))

6. FLUIDOS DE CORTE

Até há pouco tempo, os fluídos de corte eram descartados no meio ambiente sem restrições. Atualmente, esta prática é dificultada não apenas pelo rigor das leis e da fiscalização, como em virtude do padrão de produção com a adoção do “selo verde”, que indica se os processos utilizados para a produção de uma determinada peça não prejudica o meio ambiente (PEREIRA, et al., 2005). Outros fatores importantes e que precisam ser levados em consideração são os custos operacionais da produção e a preservação da saúde do ser humano (MACHADO e DINIZ, 2000). Ao longo do tempo, vários experimentos foram realizados e novos meios-refrigerantes surgiram (óleos graxos, óleos minerais, combinação de óleos e aditivos, óleos emulsionáveis). Neste cenário, tendências tecnológicas e de aplicação visam à redução ou à eliminação do uso dos fluidos de corte nos processos de usinagem. (VACARO, 2009); (SOUZA, 2011); (LAWAL, et al., 2012).

A figura 1.13 abaixo mostra o uso dos fluidos de corte na usinagem e no tópico posterior serão mencionadas suas principais funções:



Figura 1.13 – Uso dos fluidos de corte

Fonte: Disponível em http://www.cuiket.com.br/imagenes/company_photo/24785_big.jpg),
acesso em 25/06/2015.

6.1 FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE

A grande quantidade de calor gerado nas operações de corte, devido à energia que se deve ter para conseguir retirar o cavaco e à energia derivada do atrito entre o cavaco-ferramenta e entre a ferramenta-peça, provoca resultados indesejáveis na superfície de trabalho, na ferramenta, influenciando na qualidade e no custo do produto final. Assim, surgem os fluidos de corte, que “são aqueles líquidos e gases aplicados na ferramenta e no material que está sendo usinado, a fim de facilitar a operação de corte” (AVALLONE, et al., 1978 e APUD CIMM), tendo como principais funções:

- Refrigerar a região de corte;
- Lubrificar as áreas em atrito;

-Retirar o cavaco da zona de corte;

-Proteger a ferramenta, a peça e a máquina da corrosão e oxidação. (CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA)

Para desempenhar suas funções, entretanto, os fluidos de corte precisam apresentar algumas propriedades. Um fluido de corte deve ter como um bom refrigerante:

- Baixa viscosidade a fim de que flua facilmente;
- Capacidade de envolver “molhar” para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica. (DINIZ, 1999)

Estas características facilitarão a dissipação rápida do calor. Mesmo quando o material da ferramenta é resistente ao desgaste, o refrigerante é utilizado para garantir as “qualidades dimensionais, geométricas e de superfície” da peça (DINIZ, 1999). E deve ter como um bom lubrificante:

- ✓ Resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- ✓ Boas propriedades antifricção e antissoldantes;
- ✓ Viscosidade adequada – a viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta. (DINIZ, 1999).

Estas propriedades permitem que o fluido consiga chegar à região de corte, diminuindo o seu coeficiente de atrito, ainda que submetido a altas velocidades de corte.

6.2 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE

Existem diversas formas de classificar os fluidos de corte e não há uma padronização única estabelecida entre as empresas fabricantes. A classificação dos fluidos de corte segundo (MACHADO e DINIZ, 2000) é colocada abaixo; posteriormente será demonstrado na tabela 2.0 a representação de alguns dos tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte segundo (FERRARESI, 1977) e (DINIZ, 1999):

- Ar: Pouco utilizado, aplica-se principalmente na usinagem de ferro fundido cinzento.
- Água: Primeiro fluido a ser utilizado. Foi substituído por óleos integrais e óleo emulsionáveis devido a sua alta taxa de evaporação, deficiência em lubrificar e também provocar corrosão em materiais ferrosos.
- Emulsões: São uma solução de água com partículas de óleo solúvel dispersas em seu interior.
- Óleos: Em operações na qual o calor gerado pelo atrito é muito grande, recomenda-se o uso de óleo puro que são divididos em minerais, graxos, compostos, de extrema pressão e óleos de uso múltiplo.

Tabela 2.0 – Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte

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

Fonte: Adaptado de (FERRARESI, 1977) e (DINIZ, 1999)

O uso dos fluidos à base de água requer cuidados especiais. Por apresentarem densidade baixa, se comparados aos fluidos à base de óleo, acabam por se dispersar muito, caso sejam usados com bocais convencionais. Para compensar essa dispersão, são necessárias grandes

quantidades de fluídos e, portanto, a adoção de máquinas de grande porte, enormes reservatórios de fluído, unidades de refrigeração e bombas de alta potência.

Os óleos integrais apresentam como vantagens a propriedade lubrificante inclusive dos componentes de máquina. Mas, como desvantagens, destacam-se o acelerado processo de deteriorização, custos, riscos de incêndio, ineficiência lubrificante a altas velocidades de corte, baixo poder de refrigeração, formação de fumos, ataque à saúde do operador e altos custos de recuperação para reutilização. Porém eles são empregados como aditivos nos fluídos minerais, objetivando melhorar as propriedades lubrificantes, (MACHADO e DINIZ, 2000) e (PEREIRA et al., 2005).

Os fluídos solúveis dividem-se em emulsões e soluções. São formados pela mistura de óleos minerais solúveis em água e aditivos com propriedades anti-solda, anticorrosão, antioxidação e extrema pressão. As soluções têm fluído sintético formado a partir de materiais inorgânicos dissolvidos em água com a presença de aminas, nitrato de sódio, fósforo, boratos, cloro, glicóis e germicidas, (MACHADO e DINIZ, 2000; PEREIRA, et al., 2005).

Já as emulsões segundo (MACHADO e DINIZ, 2000), têm acrescentadas em suas fórmulas compostos bactericidas. Além delas, há os fluídos semi-sintéticos, aos quais, além de água, são adicionados emulsificadores e agentes umectantes biocidas que também estão presentes nas emulsões. As emulsões apresentam maiores vantagens operacionais em comparação com os óleos integrais: têm menor custo operacional, além de atender um número maior de exigências normalmente encontradas em processos de usinagem. Elas são compostas por óleos solúveis adicionados à água em proporções que variam de 1/5 a 1/100, dependendo dos requisitos operacionais, por emulgadores, que estabilizam a mistura, por aditivos com propriedades anticorrosivas, antidesgastes e de extrema pressão, além dos biocidas, que combatem a ação dos agentes naturais, como bactérias, microorganismos e fungos.

Segundo (SANTOS, et al., 2007), o descarte das emulsões é menos oneroso que o das soluções, podendo ser reaproveitada após separação da água. A separação do óleo e água para que seja feito o descarte poder ser físico, químico ou uma combinação dos dois. A seleção destes depende do estado de contaminação das emulsões, da sua composição, das condições locais, da legislação do meio ambiente na região e do custo. Nos processos químicos, são adicionados ácidos para quebrar as emulsões pela degradação dos emulgadores. Nos físico-químicos, a reação química é reforçada pelo aquecimento da emulsão. No físico é feito a filtragem separando o óleo

da água. Outro processo físico é a quebra térmica através de evaporação. O óleo permanece presente por apresentar ponto de ebulição elevado.

6.3 SELEÇÃO DO FLUIDO DE CORTE

Ao selecionar o fluido de corte adequado para determinada operação de usinagem é necessário se ter claro o objetivo que se deseja alcançar com a utilização do fluido de corte e levar em conta alguns fatores comentados a seguir.

6.3.1 CONDIÇÕES DE USINAGEM

Em usinagem de condições severas (usinagem onde se tem alto avanço e profundidade e baixa velocidade de corte) e com forças de corte elevadas, é usado como fluido de corte lubrificante o óleo puro, que é aplicado nas partes em contato. Já na usinagem branda ou leve, onde há velocidade de corte alta, usa-se a emulsão, pois é necessária principalmente a refrigeração (DINIZ, 1999) .

6.3.2 MATERIAL DA FERRAMENTA

A escolha do material, para as ferramentas utilizadas nos processos de usinagem é muito importante para se ter sucesso na operação. Alguns destes materiais como o aço rápido, o metal duro, a cerâmica e o diamante; devem conter as seguintes propriedades, segundo (FERRARESI, 1977) e (DINIZ, 1999):

- ✓ Elevada dureza a quente;
- ✓ Elevada dureza a frio;
- ✓ Tenacidade;
- ✓ Resistência à abrasão;
- ✓ Estabilidade química;
- ✓ Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Porém, nenhum material tem todas essas características, logo, é necessário listar as propriedades principais e as secundárias que se quer ter. O aço rápido, por exemplo, mantém a

dureza até temperaturas em torno de 600°C, possuindo maior resistência à abrasão, possui como fluido de corte as emulsões com aditivos antiferruginosos, pois não podem ser expostos à água devido à corrosão. (FERRARESI, 1977; DINIZ, 1999)

6.3.3 MATERIAL DA PEÇA

Segundo (FERRARESI, 1977), conhecer o material da peça a ser usinada e o seu comportamento é decisivo para uma escolha correta do fluido de corte. Assim, surge o conceito de usinabilidade, que nada mais é do que a propriedade que os materiais têm de se deixarem ser usinados. Muitos fatores exercem influência na usinabilidade dos materiais como: variação da composição do material da peça, o quanto deformou a frio, as propriedades mecânicas, entre outros.

6.3.4 OPERAÇÕES DE USINAGEM

Cada operação de corte tem objetivos e parâmetros de usinagem diferentes entre si. Sendo assim, cada processo tem o fluido de corte que mais se adequa a ele, levando-se em conta a finalidade da operação e o material da peça a ser usinada. Outros fatores a serem levados em consideração são:

- ✓ Máquina-ferramenta e produção;
- ✓ Aspectos ecológicos(operadores e meio ambiente);
- ✓ Análise econômica;
- ✓ Recomendações do fabricante;

7. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE CORTE

Existem atualmente na literatura vários modelos físicos juntamente com métodos matemáticos e computacionais tem sido usados para calcular a temperatura de usinagem. Basicamente, o princípio de medição utilizado pelos vários métodos pode ser resumido em (FERRARESI, 1977 e SHAW, 1984):

- Método calorimétrico;
- Medição por técnicas metalográficas (WRIGHT e TRENT, 1973);
- Medição da força termoelétrica entre a ferramenta e a peça (método termopar ferramenta-peça);
- Medição direta por inserção de termopares na ferramenta de corte;
- Medição da energia de radiação na faixa do espectro infravermelho;
- Medição indireta por meio de vernizes térmicos;
- Pós químicos;
- Deposição de filmes PVD (KATO, et al., 1996);
- Técnicas de problemas inversos (TAY, et al., 1974 e MELO, 1998);

7.1 MÉTODO CALORIMÉTRICO

Neste método os cavacos são coletados em um recipiente contendo água e, por meio de termometria, é feita a avaliação da temperatura anterior e posterior ao processo de corte. Também é medida a massa do cavaco gerado e da água contida no recipiente, sabendo-se o calor específico de cada um dos dois elementos, faz-se o cálculo com a equação que (FERRARESI, 1977) chama de “equação do calorímetro” como segue abaixo:

$$M_c.C_{cv}(T_c - T_2) = (M_a + M_e.C_{ec})(T_2 - T_1) \quad (1.3)$$

Onde

M_c = Massa do cavaco ;

C_{cv} = Calor específico do cavaco ;

T_c = Temperatura do cavaco, a ser admitida, em °C ;

T_2 = Temperatura final da água no calorímetro, em °C ;

M_a = Massa da água no calorímetro, em gr ;

C_{ec} = Calor específico do calorímetro ;

T_1 = Temperatura inicial da água no calorímetro, em °C

Exemplo: Num ensaio achou-se $M_c = 1200\text{g}$, $M_a = 1500\text{g}$, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $C_{vc} = 0,115\text{cal}$, sabendo-se que $M_c.C_{ec} = 0$, desprezando-se as trocas de calor com o calorímetro, temos que a temperatura do cavaco ao entrar no calorímetro será:

$$1200 \cdot 0,115(T_c - 60) = (1500)(60 - 20)$$

$$138T_c - 8280 = 60000$$

$$T_c = 68280/138 = 495^\circ\text{C}$$

É de prática a utilização de um calorímetro para realizar a medição como demonstrado na figura 1.14 :

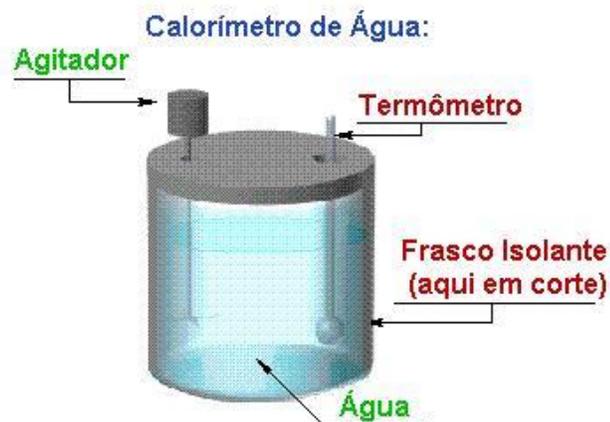


Figura 1.14 – Calorímetro de água

Fonte: Disponível em (<http://wmnett.com.br/wp-content/uploads/2015/03/calorimetrodeagua.JPG>), acesso em 25/06/2015.

7.2 MEDIÇÃO POR TÉCNICAS METALGRÁFICAS

O método consiste em submeter às ferramentas de aço-rápido a testes de usinagem e em seguida a uma análise metalográfica com o objetivo de relacionar alterações da microestrutura do material com a temperatura necessária para que ocorram as transformações observadas. Por meio do método de “medição por técnicas metalográficas”, desenvolvido por (TRENT, 1991), a distribuição de temperatura foi determinada numa seção transversal à aresta principal de corte da ferramenta, após usinar uma peça de aço de baixo carbono sob diversas velocidade de corte. Os resultados são apresentados na figura 1.15. Observa-se que a máxima temperatura ocorre à determinada distância da aresta principal de corte e que elas crescem com o aumento da velocidade de corte. Esse método apresenta como vantagens o fato de os testes serem realizados com a ferramenta em condições normais de utilização e a confiabilidade dos resultados. Como limitações, pode-se citar que o método só é aplicável em ferramentas de aço-rápido e requer trabalho exaustivo para a revelação da microestrutura.

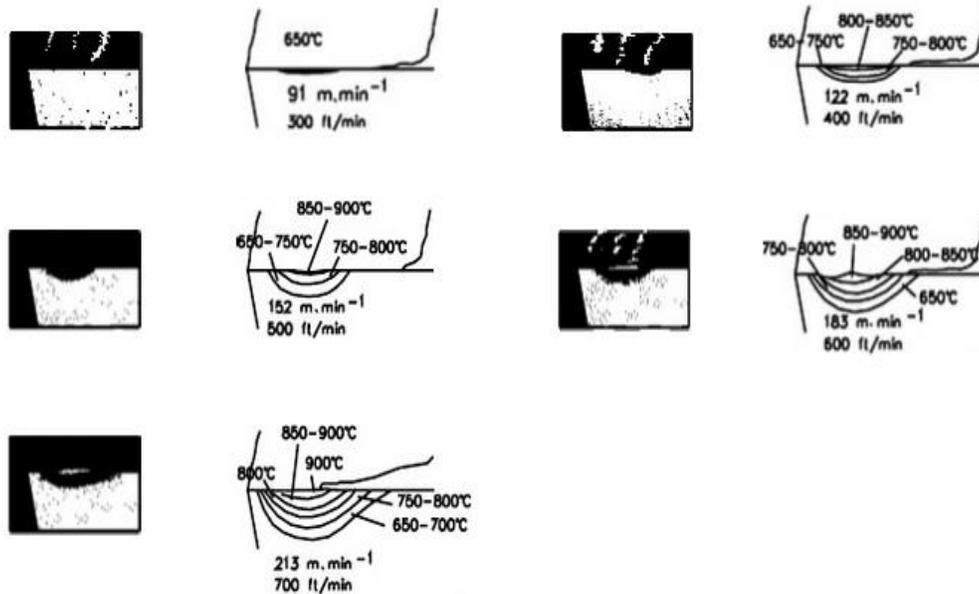


Figura 1.15 - Distribuição de temperatura na ferramenta de corte, após usinar aço de baixo carbono por 30 segundos, com avanço 0,25mm/ver e várias velocidades de corte

Fonte: (TRENT e WRIGHT, 1999).

O método por técnicas Metalográficas utilizam o princípio: a micro-estrutura pode ser correlacionada com a temperatura a que o material tenha sido exposto. A microestrutura da amostra experimental é comparado com microestruturas de referência, e a temperatura é determinada. De um modo semelhante a dureza - utilizando um ensaio de micro-dureza - é comparado com os dados de referência. Ao iniciar a sessão os dados da microestrutura e os valores de dureza em pontos desejados em uma amostra de material, isotérmicas de temperatura podem ser traçados e a temperatura pode ser determinada. A seguir será demonstrado na tabela 2.1 com os pontos fortes e também as restrições desse método:

Tabela 2.1- Pontos fortes e restrições do método de medição por Técnicas Metalográficas

PONTOS FORTES	RESTRICÇÕES
Relativamente, resultados precisos são obtidos	Forte correlação de microestrutural mudança com a exposição à temperatura é um pré-requisito
O método é adequado para utilização de arrefecimento	Vários materiais de corte mais usados incluindo carbonetos, tungstênio ou cerâmica não são adequados
Adequado para exposição a altas temperaturas que também está associada a um desgaste excessivo	Banco de dados abrangente necessária para a exatidão. Análise subjetiva é aplicada, exigindo habilidade e tempo

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

Este método é bastante prático para usinagem de trabalho investigativo, como ele pode ser usado com o arrefecimento que se tornou uma parte essencial da prática de usinagem moderna. Para obter uma boa discriminação com esta técnica, é necessário para operar a altas temperaturas, que produz um desgaste excessivo ferramenta que não é representativa das condições de produção. Isso diminui a utilidade e a atratividade da técnica.

7.3 MÉTODO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA

Quando existe um gradiente de temperatura ao longo do comprimento de um condutor elétrico, um fenômeno conhecido como o efeito de Seebeck ocorre. Uma corrente é

induzida termicamente, provocando uma queda de tensão. Este é o caso de qualquer material condutor tendo um gradiente térmico. Este gradiente pode existir em duas junções (quente e fria), resultando em uma força eletromotriz (f.e.m). A f.e.m é característica para os materiais condutores utilizados, e também é dependente das temperaturas das junções. Desta forma, um dispositivo de medição de temperatura altamente repetível é construído, vulgarmente conhecido como um termopar. A respeito do método de medição de termopar ferramenta-peça será demonstrada uma tabela 2.2 abaixo contendo os intervalos de oito tipos diferentes de termopares:

Tabela 2.2 – Tabela contendo 8 tipos diferentes de Termopares com combinações de metais nobres

TIPO	NOME	MATERIAL E COMPOSIÇÃO	GAMA DE TEMPERATURAS	COEFICIENTE DE SEECK A 100°C <i>mV/°C</i>
S	-	PLATINA-10% / PLATINA-RÓDIO	-50°C ATÉ 1767°C	7.3
R	-	PLATINA-13% / PLATINA-RÓDIO	-50°C ATÉ 1767°C	7.5
B	-	PLATINA-30% / 6%PLATINA-RÓDIO	0 ATÉ 1820°C	0.9
T	COBRE-CONSTANTE	COBRE AZUL/COBRE-NÍQUEL VERMELHO	-270°C ATÉ 400°C	46.8
J	FERRO-CONSTANTE	FERRO BRANCO/COBRE-NÍQUEL/ COBRE-NÍQUEL VERMELHO	-210°C ATÉ 760°C	54.4
E	CROMEL-CONSTANTE	NÍQUEL-CROMO ROXO/ COBRE-NÍQUEL VERMELHO	-270°C ATÉ 1000°C	67.5
K	CROMEL-ALUMEL	NÍQUEL-CROMO AMARELO/COBRE-NÍQUEL VERMELHO	-270°C ATÉ 1372°C	41.4
N	NISIL-NICROSIL	NÍQUEL-CROMO-SILICONE LARANJA/ NÍQUEL-CROMO-MAGNÉSIO VERMELHO	-270°C ATÉ 1300°C	29.6

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 22/06/2015.

Termopares contendo metais nobres, tais como combinações de platina e de platina-ródio são referidos como 'termopares de metal nobre', e são designados como Tipo B, R, e S. Outros tipos são referidos como 'termopares de metal', e são designados como Tipos e, J, K, e T, que pode ser escolhido tendo em conta a gama de temperaturas.

O método de medição Termopar ferramenta-peça é um dos mais conhecidos para medição de temperatura. Baseia-se no princípio da força eletromotriz induzida produzida pelo calor gerado no contato peça-ferramenta durante o processo de usinagem. Tem aplicação restrita a testes de laboratório, pela necessidade de cuidadosa preparação do experimento, conforme esquema de montagem apresentado na figura 1.16 (LONGBOTTOM e LANHAM, 2005).

É necessário que a peça a ser testada seja adequadamente isolada do torno e seja instalado um anel de contato elétrico que deslize numa das pontas do corpo de prova de forma que não ocorra a perda da corrente gerada no circuito durante o teste. É possível substituir este anel por um disco acoplado à ponta do corpo de prova, de forma que gire dentro de uma cuba contendo mercúrio, garantindo mais confiabilidade ao procedimento (MACHADO e DA SILVA, 1999).

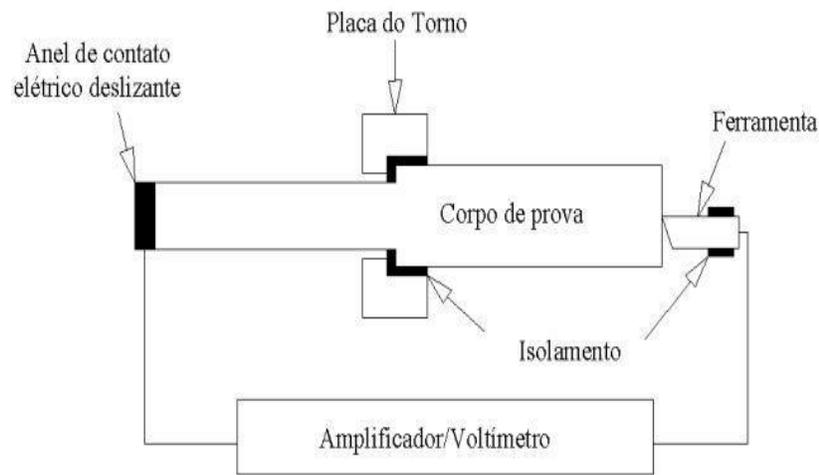


Figura 1.16 – Método do termopar peça-ferramenta (LONGBOTTOM e LANHAM, 2005).

Fonte: LONGBOTTOM e LANHAM, 2005)

7.3.1 APARATO EXPERIMENTAL NO SISTEMA TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA NO TORNEAMENTO

A seguir será apresentada uma ilustração com os principais componentes do sistema termopar ferramenta-peça para a medição da temperatura de usinagem, no torneamento.

Nessa representação, T_I é a temperatura de usinagem, medida na interface de corte, e T_R é a temperatura da junção de referência. Pode-se observar nessa ilustração, além da junção de medição formada pelos materiais da peça (A) e da ferramenta (B), a existência de três outras junções (A e D; D e C; B e C). Estas junções devem ser mantidas à mesma temperatura T_R para, assim, configurarem as junções de referência ou juntas frias. Dessa forma, a influência de cada uma dessas juntas frias, à temperatura T_R , sobre a *f.e.m.* do sistema é minimizada (BYRNE, 1987).

A existência de diversos materiais na composição do sistema termopar determina a quantidade de junções entre os mesmos; se forem muitas, pode haver dificuldade em se manter essas junções a uma temperatura T_R constante.

O aparato experimental de um sistema termopar ferramenta-peça, no torneamento, difere da montagem usual dessa operação em dois quesitos fundamentais, o estabelecimento do circuito elétrico físico para a medição da diferença de potencial elétrico; e a aplicação de isolamento elétrica na ferramenta e na peça em relação ao torno. Há, ainda, a necessidade de se manter a temperatura das junções de referência T_R constante.

O circuito elétrico desse sistema pode ser visualizado na ilustração simplificada da figura 1.17 De modo geral, as conexões elétricas entre um voltímetro (V) e os demais elementos do sistema são feitas com fios ou cabos elétricos (de cobre) (STEPHENSON,1993).

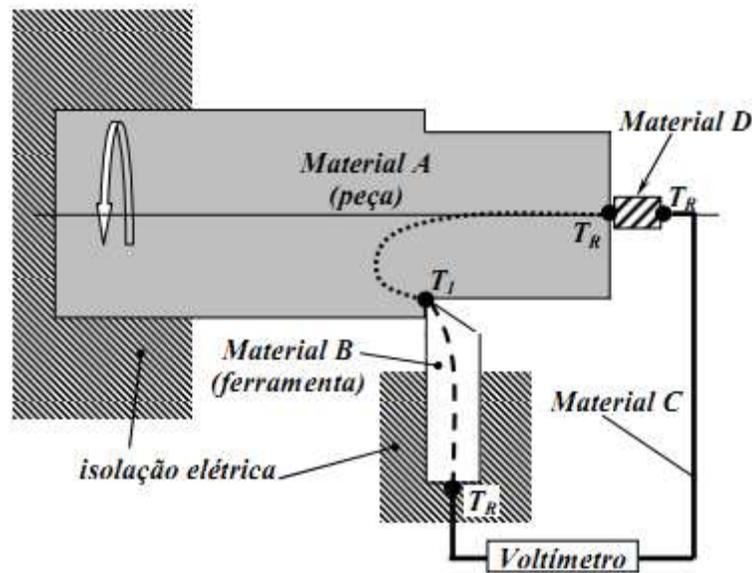


Figura 1.17 - Ilustração esquemática de um sistema termopar ferramenta-peça no torneamento

Fonte: (DAVIES, et al., 2007)

Verifica-se na Figura 1.17 que o circuito elétrico desse sistema é constituído pelo material da peça (material A), da ferramenta (material B), pelos condutores elétricos (material C) e por um elemento genericamente denominado por material *D*. O material *D* representa aqui diversas aplicações para a condução do sinal elétrico entre a peça (material A), em movimento, e o condutor elétrico (material C) que é estacionário. A conexão entre a peça A e o condutor C é de suma importância na aplicação dessa técnica (ALVELID, 1970).

As soluções mais eficientes para a condução do sinal elétrico da peça em rotação até o condutor estacionário usam um mancal de mercúrio. Nesses sistemas, um elemento rotativo (composto D), acoplado à peça, é conectado a um condutor elétrico através de “um banho” em mercúrio. O movimento relativo entre o elemento rotativo e o mercúrio não provoca a elevação significativa da temperatura nesse contato elétrico que, assim, pode ser uma das junções de referência do sistema, à temperatura T_R .

Há duas configurações para realização da referida transferência do sinal elétrico no mancal de mercúrio: através de um eixo apropriado conectado à peça por dentro do eixo árvore do torno ou por meio da ponta rotativa do contra ponta.

Na primeira configuração, um eixo contendo um disco em uma das suas extremidades, é conectado concentricamente à extremidade da peça, presa pela placa do torno. A

instalação desse eixo é feita com isolamento elétrico, por dentro do eixo árvore do torno, de forma que o disco fica exposto externamente à máquina. Assim, o disco e o fio condutor elétrico são alojados no interior de uma cuba e o contato elétrico é estabelecido com mercúrio, como está ilustrado na figura 1.18 a). Diversos trabalhos foram desenvolvidos com esse sistema, por exemplo, (BYRNE, 1987), (STEPHENSON, 1991,1993), (GRZESIK, 1999, 2003), (GÖKKAYA, 2006), (INGRACI NETO,et. al., 2011), dentre outros.

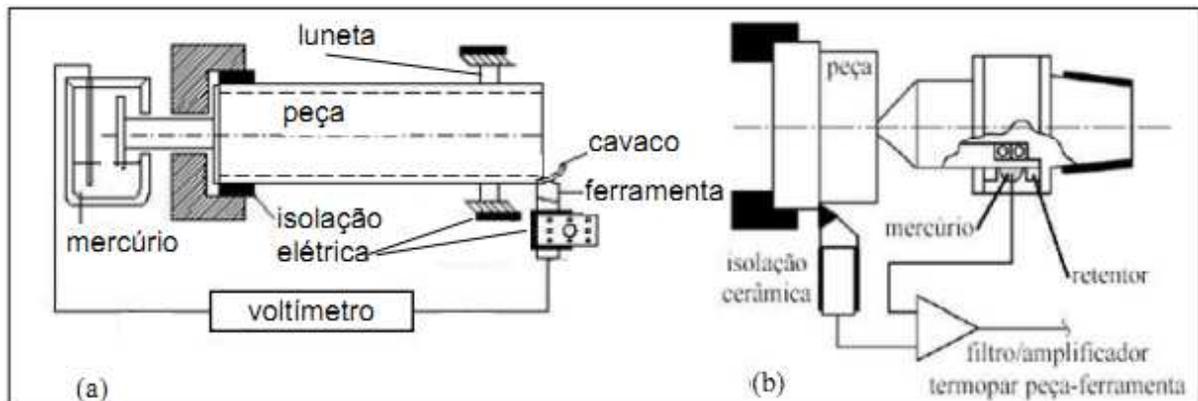


Figura 1.18 - Ilustrações de aplicações de mancal de mercúrio: (a) através do eixo árvore do torno; (b) através da ponta rotativa da contra ponta.

Fonte: (GÖKKAYA, 2006) e INGRACI NETO, et al, 2011)

Na segunda configuração, o mancal de mercúrio pode ser agregado a uma contra ponta rotativa especialmente projetada para promover rigidez e estabilidade da peça e para servir de condutor elétrico no termopar ferramenta-peça. O contato elétrico entre a ponta rotativa, conectada à peça, e o condutor é feito com mercúrio em uma câmara existente no corpo da contra ponta, como ilustra a Figura 1.18(b). A vedação ao vazamento de mercúrio é feito com elementos de vedação (retentores ou anéis *O-ring*). Outra forma de se utilizar a própria contra ponta para se estabelecer o contato elétrico é apresentada em (ALVELID, 1970), conforme mostra a Figura 1.19. Nesse caso, uma contra ponta rotativa comercial foi modificada para que a transferência do sinal elétrico entre a ponta rotativa e o condutor elétrico fosse feita em uma câmara de mercúrio instalada no seu cone Morse.

Fez-se o contato elétrico com um pino de aço instalado concentricamente na ponta rotativa e o invólucro da câmara de mercúrio foi confeccionado em material isolante com o objetivo de se manter a temperatura constante T_R da junta fria, no contato elétrico do mercúrio.

A transferência do sinal elétrico entre a peça e ramo estacionário do circuito pode ser feita, também, com o uso de escovas de grafite e anéis de escorregamento do próprio material da peça (TRIGGER, et al., 1948). Mas esses métodos podem introduzir *f.e.m.* prejudiciais (MACHADO e DA SILVA, 2004) que causam distorções na *f.e.m.* resultante do termopar ferramenta-peça.

Quanto à isolação elétrica da peça e da ferramenta, como ilustrado na Figura 1.19, (STEPHENSON, 1993) argumenta que não é necessário a isolação de ambas simultaneamente, mas apenas de uma delas. No entanto, embora seja necessário o aterramento da máquina, a isolação de ambas, peça e ferramenta, significa a isolação do circuito do termopar e tem o objetivo de evitar os efeitos de possíveis *f.e.m.* externas.

A isolação da peça é realizada com a aplicação de revestimentos isolantes nas castanhas da placa do torno ou na forma de uma luva de material isolante, ajustada à peça na região da sua fixação pela placa. A isolação do cone *Morse* da contra ponta ou o uso de um acoplamento isolante colocado entre a ponta rotativa da contra ponta e a peça são métodos que completam a isolação da peça. As castanhas da placa podem ser isoladas com revestimento cerâmico (FIOCHI; SANCHEZ e MELLO, 2008) e o cone *Morse* pode ser isolado com revestimento cerâmico ou à base de tinta *epoxy* (STEPHENSON, 1993), (FIOCHI; SANCHEZ e MELLO, 2008).

A isolação do inserto pode ser feita com lâminas finas de mica colocadas no alojamento do suporte porta ferramenta (STEPHENSON, 1993) e, no caso da isolação suporte, pode-se usar placas ou lâminas de materiais isolantes como fórmica, baquelite, *Celeron* ou mica, no seu entorno.

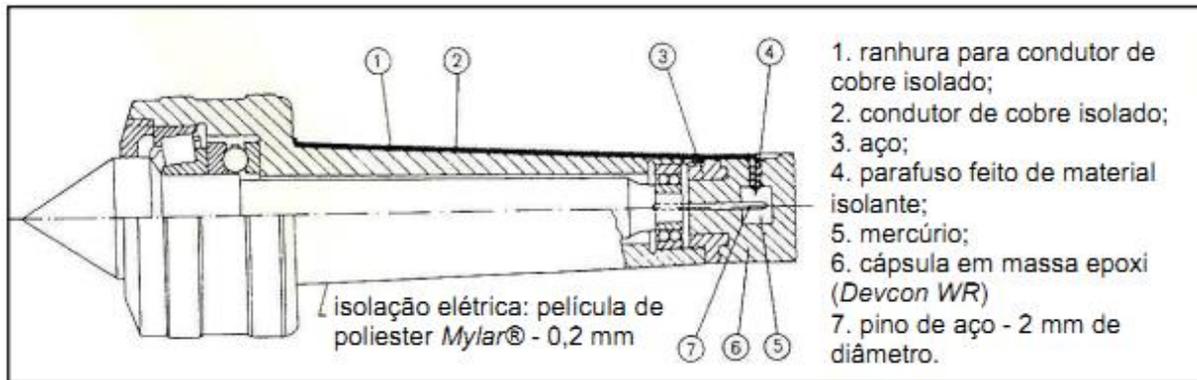


Figura 1.19 - Ilustração da implantação do mancal de mercúrio em uma contra ponta rotativa convencional para uso no método do termopar ferramenta-peça.

Fonte: (ALVELID, 1970).

7.4 INSERÇÃO DE TERMOPARES NA FERRAMENTA DE CORTE

O método do termopar inserido na ferramenta de corte utiliza o mesmo princípio da força eletromotriz induzida anteriormente descrito, mas é inserido num orifício na ferramenta ou na peça a ser usinada, geralmente de diâmetro muito reduzido. Este furo é normalmente produzido por eletroerosão ou ultra-som (NG, et al., 1999);(KOMANDURI e HOU, 2001) e deve permitir que a ponta do termopar se situe o mais próximo possível da região onde ocorrerá o processo de usinagem, onde se deseja medir o calor gerado. Caso contrário, o termopar medirá a temperatura no interior da peça ou da ferramenta e não o calor gerado na região de contato.

(NG, et al. 1999) citam que, a metodologia de medição com o termopar inserido na ferramenta de corte, não apresenta resultados totalmente confiáveis, uma vez que tanto os fios do termopar como o furo para a passagem dos mesmos, por menores que sejam, serão sempre um elemento estranho ao material que se deseja medir. (DEWES, et al., 1999) citam que a presença dos furos na ferramenta podem alterar a distribuição do calor e, assim, não é possível medir diretamente a temperatura na interface cavaco-ferramenta. (KATO e FUJII, 1997) e (LONGBOTTOM e LANHAM, 2005) citam que a própria presença do termopar no corpo de prova produz erros que podem chegar a 50% do valor verdadeiro, devido a pequenos espaços

entre o furo e os fios do termopar com presença de ar e à própria transiência da condução do calor do termopar no corpo de prova. Para finalizar, a calibração é considerada difícil a altas temperaturas e a resposta à variação das temperaturas é considerada lenta.

Por meio deste método pode-se realizar a medição da temperatura em qualquer ponto da ferramenta como é demonstrado na figura 1.20:

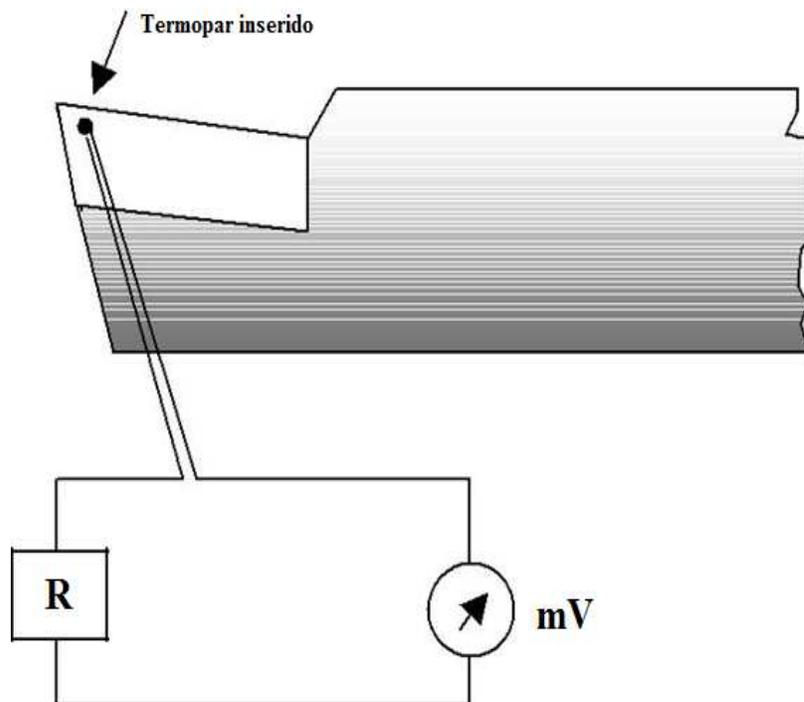


Figura 1.20 – Termopar inserido na ferramenta

Fonte: Disponível em

(http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/crichigno/materiais/6_Temperatura_corte_.pdf)

acesso em 05/07/2015

7.5 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA ATRAVÉS DA RADIAÇÃO TÉRMICA

O Método de medição através da energia de radiação compreende vários modelos de estudo, porém, neste presente trabalho iremos dar uma ênfase maior aos modelos mais atuais visto que a tecnologia avança sempre e novos objetos vão sendo criados.

7.5.1 MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO NA FAIXA DO ESPECTRO INFRAVERMELHO

Os métodos que utilizam radiação infravermelha (STEPHENSON, 1991), (LIN, LEE e WENG, 1992), (LIN e LIU, 2001) apresentam certa dificuldade de utilização devido à interferência da saída de cavacos quentes que prejudicam as imagens de interesse. Esses métodos permitem determinar a temperatura de corte baseando-se na radiação térmica que é emitida na zona de corte. Além disso, a dependência do conhecimento da emissividade térmica da superfície analisada é fator limitante, principalmente devido à variação de temperatura dos materiais (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Este método consiste em medir a irradiação térmica emitida por uma pequena área do cavaco ou da ponta da ferramenta. Fazendo-se com que esta radiação, através de um sistema de lentes, seja focada em um sensor que possa identificar a qual temperatura deveria estar o corpo com aquela composição para irradiar tal energia, geralmente utilizam um termopar. A f.e.m gerada nesse sensor será medida pelo milivoltímetro. A figura 1.21 a seguir mostra esse método:

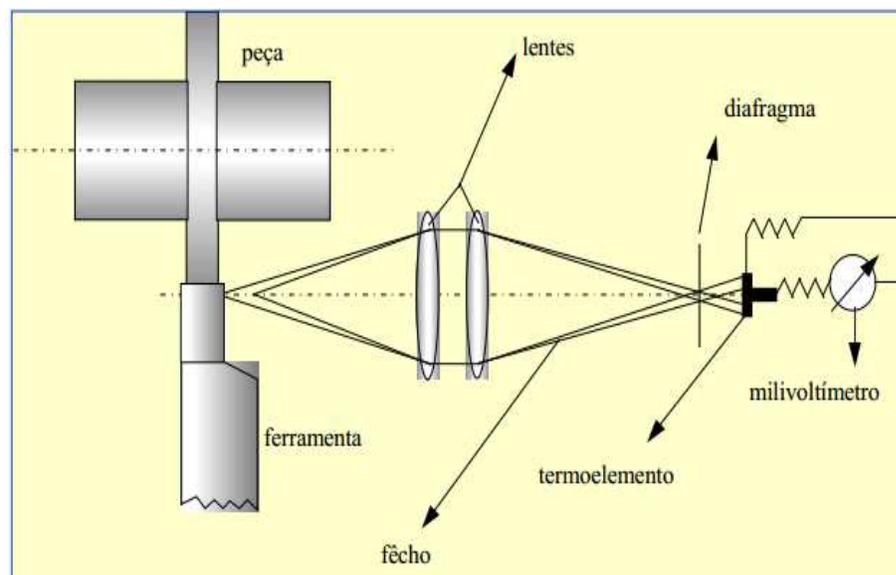


Figura 1.21 – Medição da energia de radiação

Fonte: Disponível em

(http://www.joinville.udesc.br/porta/professores/crichigno/materiais/6_Temperatura_corte.pdf),
acesso em 27/06/2015.

7.5.2 MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO POR TERMOPARES ÓPTICOS

Uma fibra óptica é colocado debaixo da peça de trabalho de modo a que uma alteração pode ser detectada no comprimento de onda emitido. As redes de Bragg são feitas através da iluminação do núcleo de uma fibra óptica adequada com um padrão espacialmente variando de luz ultravioleta intensa. Fótons de ultravioleta com comprimento de onda curto tem energia suficiente para quebrar as ligações silício-oxigênio extremamente estáveis, de modo que a estrutura da fibra óptica é danificado, o que leva a um ligeiro aumento do índice de refração. Esta fibra pode então operar adaptado como um espelho seletivo do comprimento de onda. Este comprimento de onda reflexivo é afetada por qualquer variação nas propriedades mecânicas ou físicas da região grade. Uma mudança na temperatura irá conduzir a uma alteração no índice de refração eficaz como um resultado do efeito de termo-óptica. Para implementar esta técnica sobre uma peça de trabalho, ele deve ser colocado sobre o tubo óptico - ou o tubo óptico deve ser colocado em um sanduíche entre a peça que vai ser cortado e um aparelho de suporte. A seguir será montado uma tabela 2.3 com os pontos fortes e restrições do método:

Tabela 2.3 - Pontos fortes e restrições do método de medição de radiação por termopares ópticos

PONTO FORTE	RESTRICÇÕES
Domínio da resolução em um bom tempo	Peça de trabalho modificado, não é prático para a industria
	Impróprio para utilizar com arrefecimento

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

7.5.3 MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO POR PIRÔMETRO DE FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica facilita a detecção remota, permitindo que os sensores de ser fisicamente maior. Detectores arrefecidos podem ser utilizados, aumentando a sensibilidade e, finalmente, a resposta no domínio do tempo. Duas cores pirometria utiliza detectores com comprimentos de onda próximos. Ao calcular a temperatura, a proporção entre os valores de emissividade é usado, eliminando a emissividade como um parâmetro dependente. A seguir será demonstrado na tabela 2.4 os pontos fortes e também as restrições desse método:

Tabela 2.4 - Pontos fortes e restrições do método de medição de radiação por pirômetro de fibra óptica

PONTOS FORTES	RESTRICÇÕES
Nenhuma influência no campo de temperatura	Medidas em um único ponto; local necessita de atenção
Domínio da resolução em um bom tempo	Trabalho modificado - a peça tende a ser uma ferramenta de pesquisa
Independente do valor da emissividade	Geralmente inadequados para usar arrefecimento

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

7.5.4 MEDIÇÃO DA ENERGIA DE RADIAÇÃO POR CÂMERAS INFRAVERMELHAS

Infravermelho (IR) luz é focalizada com uma lente especial, e digitalizados por uma matriz faseada de elementos detectores de infravermelho, criando um termograma. Isto é traduzido em impulsos elétricos que são enviados para uma unidade de processamento de sinal, em que a informação é convertida em dados para o mostrador. É possível adquirir as temperaturas no local, selecionando uma posição e obtendo um valor para esse ponto. A seguir será demonstrado na tabela 2.5 com os pontos fortes e também as restrições desse método:

Tabela 2.5 - Pontos fortes e restrições do método de medição de radiação por câmeras infravermelhas

PONTOS FORTES	RESTRICÇÕES
Não tem influencia no campo de temperatura	Qualquer linha de visão precisa ser desobstruída pois perturba as imagens térmicas
Boa visão espacial da distribuição da temperatura	uso limitado com arrefecimento como resultado da interferência
A tecnologia auxilia no uso do equipamento	

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

7.5.5 APARATO EXPERIMENTAL MAIS ATUALIZADO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO POR RADIAÇÃO TÉRMICA

O processo consiste na exposição do corpo aquecido a um sensor óptico, conhecido como pirômetro ou termômetro infravermelho. Este sensor recebe a radiação térmica e gera uma f.e.m. (força eletromotriz) que pode ser detectada por um milivoltímetro. Os sinais elétricos são então relacionados a uma escala de temperatura fornecendo assim, a temperatura na região observada. Uma desvantagem deste método é que os resultados obtidos na medição não são pontuais, isto é, eles representam o valor médio da temperatura na área de focalização ou área de sensibilidade do instrumento. Além disso, nestes instrumentos só consegue detectar o valor de temperatura a partir do conhecimento prévio da emissividade da superfície analisada, neste caso, se a emissividade da ferramenta variar com o aumento temperatura, este equipamento se torna inadequado para a análise do processo. O esquema de uma medição de temperatura superficial utilizando um pirômetro é apresentado na figura 1.22 abaixo:

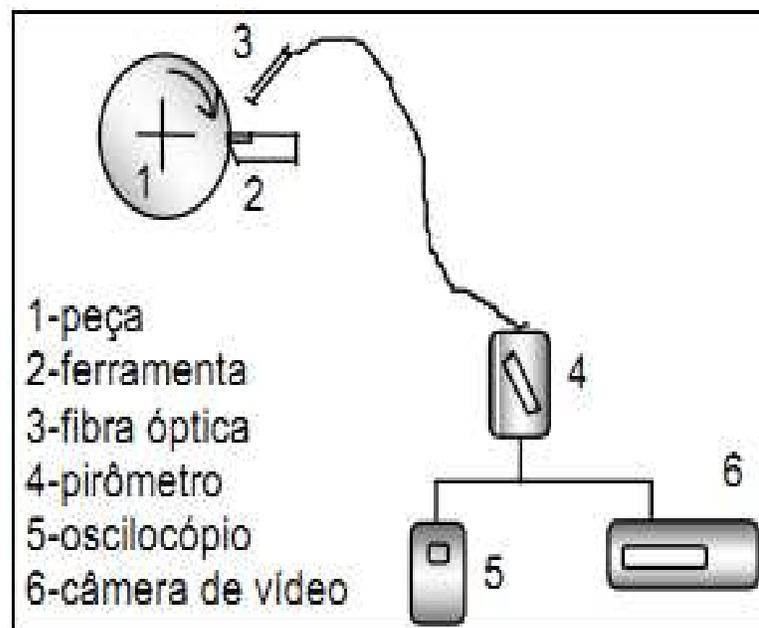


Figura 1.22 – Aparato experimental do método por radiação térmica

Fonte: (LIN, et al,1992)

Na literatura, encontram-se alguns pesquisadores que empregam esta técnica para determinar a temperatura superficial da ferramenta de corte. Dentre eles, podemos citar: (STEPHENSON, 1991), (STEPHENSON e ALI, 1992), (LIN, *et al.*, 1992), (EU-GENE, 1995) em processos de torneamento, e (LIN, 1995) em processo de fresamento.

7.6 MEDIÇÃO INDIRETA POR MEIO DE VERNIZES TÉRMICOS

Os vernizes termosensíveis possuem em sua composição elementos químicos que produzem alterações em sua cor original ao atingirem determinadas temperaturas, este ponto é denominado gatilho. Os fabricantes podem fornecer estes vernizes em estojos, contendo uma variada gama de frascos, sendo que cada um deles corresponde a uma determinada temperatura a se medir.

Dependendo da composição química do verniz, este pode alterar a sua cor original de forma imediata, tão logo a temperatura de gatilho seja atingida. Outras composições químicas exigem que o verniz, ao atingir uma dada temperatura, se mantenha na mesma durante um certo tempo, até que a mudança de cor ocorra. Neste último tipo de verniz outros valores de temperatura ainda mais elevada podem vir a ser medidos com a mesma aplicação de verniz, caso a cor, já alterada ao atingir o primeiro gatilho, venha a passar por uma segunda mudança de tonalidade ou de cor (TMC, 2007).

De forma semelhante ao descrito para os vernizes termosensíveis, são fabricados lápis que, aplicados sobre a superfície que se deseja medir, mudam de cor assim que a temperatura de gatilho é atingida. (FERRARESI, 1977) cita que estes lápis são úteis para o controle de vida de ferramentas multi-arestas como fresas, alargadores, brocas, etc. Segundo o mesmo, se uma aresta estiver sendo submetida a esforços maiores que as demais ela também terá, como consequência, um maior aquecimento do que as outras, o que será demonstrado pela mudança de cor ou tonalidade do tipo de lápis empregado. Na figura 1.23 abaixo ocorre a utilização do lápis térmico:

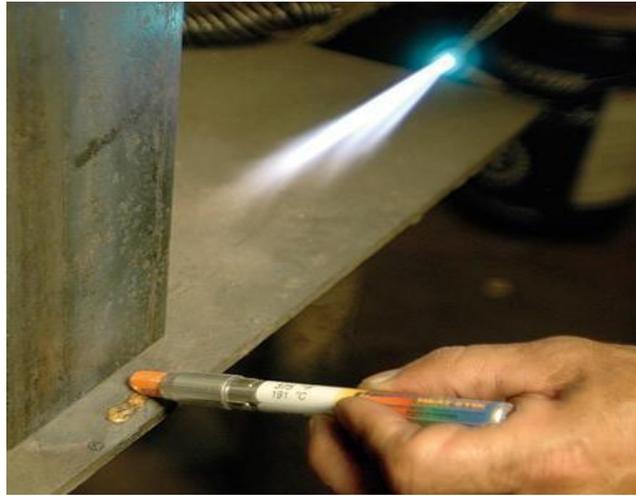


Figura 1.23 – Utilização do lápis térmico

Fonte: Disponível em

(http://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_290/p_apis-termico_7.jpg),
acesso em 28/06/2015

A seguir será demonstrado na tabela 2.6 os pontos fortes e também as restrições desse método:

Tabela 2.6 – Pontos fortes e restrições do método de medição por meio de Vernizes Térmicos

PONTOS FORTES	RESTRICÇÕES
Técnica de fácil utilização	Requer um ambiente de transferência de calor controlado
Técnica de Baixo Custo	A precisão é limitada pela grande final gradiente de temperatura baixa discriminação térmica de cores termicamente sensíveis
Eficaz para distribuição aproximada da temperatura	Não é adequado para uso com refrigeração / lubrificação

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

Vale ressaltar que o fator mais importante é que a técnica é simples e barata de conseguir uma visão geral, apropriado para condições secas, onde a entrada de calor é controlado.

7.7 MEDIÇÃO UTILIZANDO PÓS-QUÍMICOS

De concepção bastante semelhante ao método do filme PVD, este utiliza alguns pós-químicos com ponto de fusão bem definido como NaCl, KCl, CdCl, PbCl₂, AgCl, KNO₃, Zn, Pb, SnCl₂, Sn, etc (KOMANDURI e HOU, 2001). O desenho esquemático é demonstrado na figura 1.24:

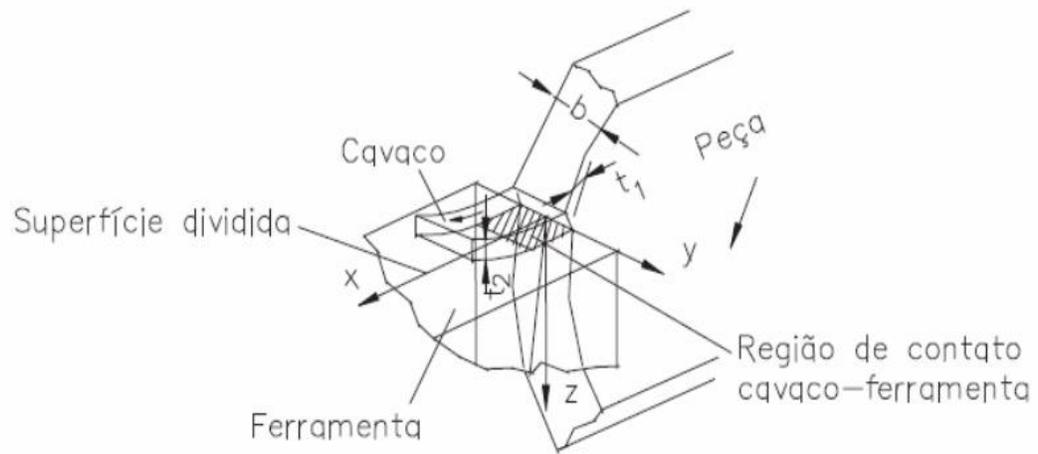


Figura 1.24 - Desenho esquemático do método de medição com utilização de sais.

Fonte: Disponível em (<https://prezi.com/w6ovwu03ir7x/temperatura-de-corte/>), acesso em 19/07/2015.

A ferramenta é dividida por meio de duas ferramentas semelhantes, que são usinadas por abrasão até atingirem metade de sua largura original. As superfícies obtidas são umedecidas com solução de silicato de sódio com o objetivo de facilitar a adesão do sal, que é distribuído sobre a superfície. As duas partes são unidas e tem início a etapa de usinagem, que tem duração suficiente para que o sistema entre em regime. As partes da ferramenta são separadas e observa-se duas regiões uma em que o sal passou pelo processo de fusão e outra em que ele permaneceu no estado sólido. O limite entre essas duas regiões descreve uma isoterma em que a temperatura corresponde ao ponto de fusão do sal. A Tabela 2.7 lista pós frequentemente utilizados com a respectiva fusão e pontos de ebulição:

Tabela 2.7 – Pós Químicos e seus respectivos pontos de fusão e ebulição

SUBSTÂNCIA QUÍMICA	PONTO DE FUSÃO[°C]	PONTO DE EBULIÇÃO[°C]
NaCl (CLORETO DE SÓDIO)	800	1413
KCl (CLORETO DE POTÁSSIO)	776	1500
CdCl (CLORETO DE CÁDMIO)	568	960
PbCl ₂ (CLORETO DE CHUMBO II)	501	964
AgCl (CLORETO DE PRATA)	455	1550
Zn (ZINCO)	419	907
KNO ₃ (NITRATO DE POTÁSSIO)	339	-
Pb (CHUMBO)	327.4	1750
SnCl ₂ (CLORETO DE ESTANHO)	246.8	623
Sn (ESTANHO)	231.9	2270

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

À medida que os resultados são obtidos para um tipo de pó de cada vez, são combinados por meio da sobreposição das linhas de limite dos diferentes testes para determinar as isotérmicas de temperatura. A figura 1.25 abaixo ilustra os limites de fusão de três pós diferentes (NaCl, PbCl₂ e KNO₃) com uma ferramenta de carboneto:

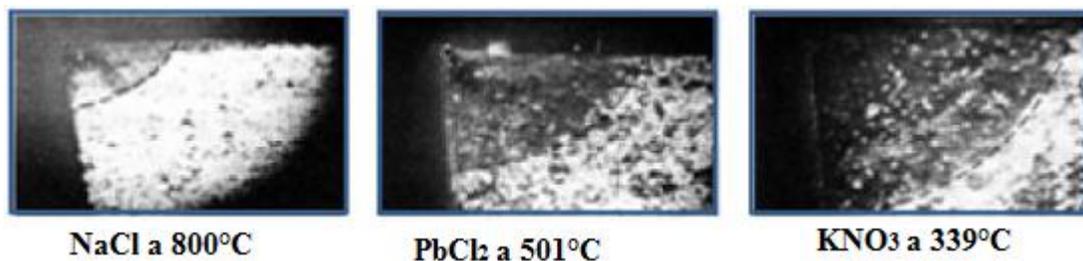


Figura 1.25 – Limites de fusão de NaCl(800°C), PbCl₂(501°C) e KNO₃(339°C)

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

A seguir será demonstrado na tabela 2.8 os pontos fortes e também as restrições desse método:

Tabela 2.8 - Pontos fortes e restrições do método utilizando pós-químicos

PONTOS FORTES	RESTRICÇÕES
Não necessita de calibração, já que os pontos de fusão do pó são constantes	Uma repetição é necessária para cada pó
Método gera isotérmicas que apontam para uma distribuição de temperatura	Não é adequado para uso com refrigeração

Fonte: Disponível em (http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

O uso de pós químicos para a detecção de temperatura é um método repetível, fácil, devido às mudanças de visual e de fusão constante, pontos de vantagem sobre os pós. Uma restrição é as repetições para cada temperatura a ser detectada. Arrefecimento de alta pressão não é utilizável, como o pó seria removido a partir da interface.

7.8 MEDIÇÃO USANDO FILME PVD (Physical vapor deposition)

(MACHADO e DA SILVA, 1999) citam que este método foi publicado inicialmente por KATO e FUJII e vem sendo desenvolvido desde então para variadas técnicas de usinagem mecânica e outros empregos onde se faz necessária a medição de temperaturas no interior de corpos sólidos. Esta técnica consiste no seccionamento do corpo de prova na região onde se deseja avaliar a temperatura e a aplicação em uma das partes de um filme, por meio de deposição física de vapor (PVD), para que aja como sensor térmico, determinando a distribuição da temperatura na região que se deseja medir o calor.

Após polimento e espelhamento da superfície de uma das partes seccionadas o filme PVD, contendo o material com ponto de fusão conhecido, é aplicado um sobre a mesma usando um equipamento de deposição a vácuo. As partes são remontadas por meio de um tornilho ou outro dispositivo que as mantenha unidas e submetidas ao processo de trabalho que gera o calor que se deseja avaliar, como no caso de ferramentas de corte. Foi comprovado em testes que com a utilização de materiais de metal duro e cerâmica a obtenção do êxito é maior.

Após os testes, o conjunto é desmontado e analisado num microscópio, onde se consegue visualizar a zona que delimita o material fundido. A repetição dos testes com outros

materiais, com ponto de fusão conhecidos, permite a composição de linhas isotérmicas e, dessa forma, se pode avaliar o comportamento do fluxo de calor no corpo de prova.

Embora trabalhoso é um dos métodos mais confiáveis para avaliação de temperatura no interior de peças ou ferramentas submetidas ao calor. A tabela 2.9 abaixo apresenta o ponto de fusão de alguns materiais utilizados nos filmes PVD.

Tabela 2.9 – Ponto de Fusão de alguns materiais

Material	Símbolo	Ponto de fusão (°C)	Pureza (%)
Germânio	Ge	938	–
Antimônio	Sb	631	–
Telúrio	Te	450	99,999
Chumbo	Pb	328	99,999
Bismuto	Bi	271 / 272	99,999
Índio	In	156 / 157	99,999
Liga	Bi / Pb	126	–
Liga (wt%)	50 Bi, 28 Pb, 22 Sn	96,6	99,99

Fonte: (KATO e FUJII, 2004) e (LONGBOTTOM e LANHAM, 2005)

Esse procedimento torna a medição mais complexa, porém os filmes possuem topografia mais suave que os sais, o que faz com que a área real de contato entre as metades da ferramenta seja maior e, com isso, exercer menor influência na distribuição de temperatura. A fronteira entre as regiões de filme fundido e não fundido é apresentada na figura 1.26:

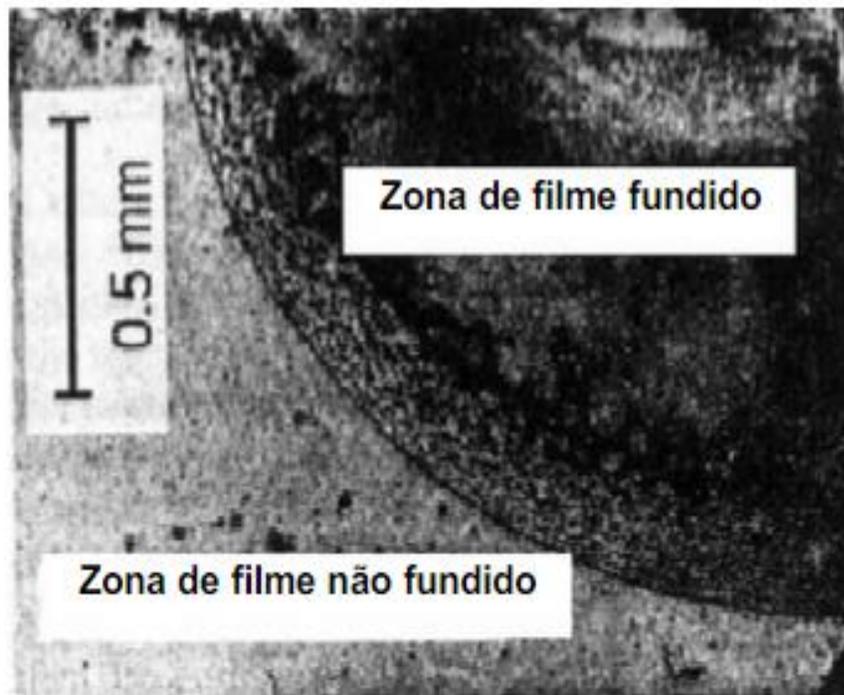


Figura 1.26 – Identificação das zonas de filme fundido e não fundido

Fonte: Disponível em

(http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/crichigno/materiais/6_Temperatura_corte_.pdf),
acesso em 26/07/2015

A seguir será demonstrado na tabela 2.10 os pontos fortes e também as restrições desse método:

Tabela 2.10 – Pontos e restrições do método de medição por filme pvd.

PONTOS FORTES	RESTRICÇÕES
Filmes finos PVD requer baixa energia de ativação para a detecção, afetando minimamente a transferência de calor	Temperaturas em intervalos discretos única, ditada por pontos de fusão das películas de PVD
Esta técnica de medição tem uma influência negligenciável sobre as temperaturas internas	Não é adequado para experimentos refrigerados
Alta resolução espacial da distribuição de temperatura	

Fonte: Disponível em(http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2224-78902012000200012&script=sci_arttext), acesso em 27/06/2015.

A principal força de revestimentos PVD é que a medida tem um efeito mínimo sobre a transferência de calor na peça de trabalho, afetando de forma insignificante temperaturas internas. Resultados micrográficas oferecer interpretação binário claro, levando a detecção confiável de distribuições de temperatura. Embora os contornos são mapeados com precisão no domínio espacial, os materiais PVD limitar o método a detecção de pontos discretos na escala de temperatura, resultando em uma resolução bastante limitado, o método de detecção por passos. A técnica de PVD filme não é adequado para utilização com arrefecimento, como o arrefecimento danos revestimento de PVD.

7.9 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA POR MEIO DA TÉCNICA DE MÉTODOS INVERSOS

As técnicas de métodos inversos consistem em obter o valor de uma variável através da medição de outra grandeza que possa ser mensurada diretamente. Estas técnicas muitas vezes usam algoritmos de otimização, a fim de minimizar o erro entre o valor calculado e real, da variável de interesse. As técnicas inversas consistem em obter o valor de uma variável de interesse, através da medição de outra grandeza que possa ser mensurada diretamente, numa região de fácil acesso. Logo, estas técnicas soam como uma boa alternativa para análise térmica de processos de usinagem uma vez que permitem, por exemplo, conhecer todo o campo de temperatura e fluxo de calor aplicado numa ferramenta de corte, a partir do sinal de temperatura obtido num único ponto de fácil acesso.

Técnicas Inversas já tem sido aplicadas para estudar campos de temperatura em ferramentas de corte, como em (STEPHENSON, 1996), (JEN, et al., 2001). Em situações como estas, as temperaturas na ferramenta de corte são obtidas usando termopares inseridos próximos à aresta de corte, como em (BATTAGLIA, et al., 2005). Uma alternativa ao uso de termopares é o uso de câmeras de infravermelho, como em (CHANG E HUNG, 2005). Devido à natureza do processo, que impossibilita mensurar diretamente o fluxo de calor na aresta de corte, em muitos destes trabalhos, foram usadas técnicas inversas como Seção Áurea, Função Especificada e outras, para estimar o fluxo de calor aplicado na ferramenta durante o processo de usinagem. Essa forma de medição tem por objetivo estimar a temperatura em diferentes pontos da ferramenta, a partir da temperatura medida com a utilização de termopares dispostos em posições conhecidas da ferramenta (Melo, 1997). Como demonstrado na figura 1.27:

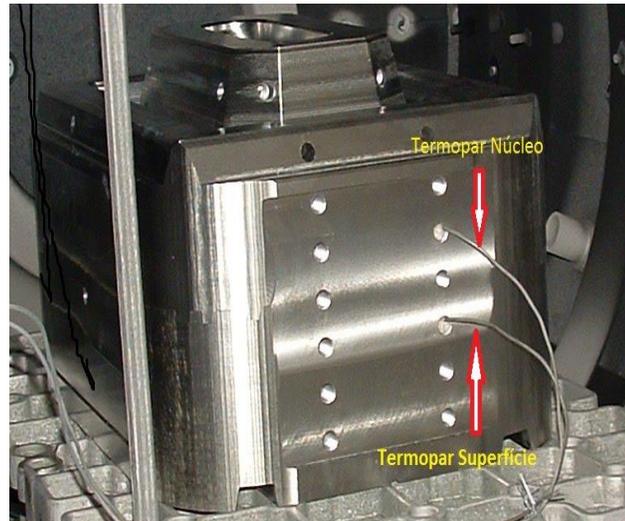


Figura 1.27 - Aplicação de termopares em diferentes pontos conhecidos da matriz para o monitoramento de processo térmico

Fonte: (MELO, 1997)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os vários tipos de métodos de medição de temperatura de corte possuem grande importância no cenário atual do processo de usinagem, são eles que determinam as temperaturas de corte, vimos quais são os mais utilizados e em que casos eles seriam melhor aplicados.

Como técnica de medição mais utilizada poderíamos citar o método do Termopar ferramenta-peça pelo conhecimento na distribuição da temperatura e geração da força eletromotriz; temos o método calorimétrico conhecido pela sua garantia no resultado final; o método das técnicas metalográficas que apesar de se dar apenas em ferramentas de aços rápidos e ser bem exaustivo possui extrema confiabilidade no resultado em função de uma visão bem detalhada da microestrutura do material; o método de radiação infravermelha não é muito usual em função da dificuldade e da obtenção de temperaturas não tão precisas.

O método por vernizes térmicos são bastante utilizados visto que o lápis térmico mostra a cada instante a tonalidade de cor que determina a faixa de temperatura atingida, podendo ou não, ser a convencional a depender do gradiente de temperatura; a medição por filmes pvd(physical vapor deposition) embora trabalhosa é uma das mais confiáveis por não exercer tanta influência na distribuição da temperatura.

O método de medição por utilização de sais assim como o dos filmes pvd possui alta confiabilidade no resultado em função do conhecimento das isothermas que correspondem a distribuição da temperatura; por último a medição por problemas inversos tem uma faixa enorme de confiabilidade em função de serem colocados termopares em pontos conhecidos da mesma, logo as temperaturas são conhecidas e além disso são utilizados algoritmos que determinam todo o fluxo de calor o que aumenta mais ainda a precisão no resultado final.

No presente trabalho obteve-se méritos pois o objetivo central foi alcançado que foi demonstrar os diferentes métodos práticos empregados para medição de temperatura de corte bem como analisar com uma ênfase maior cada método específico e qual parâmetro pode ser providencial para que um determinado tipo de medição seja empregado.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Utilização de softwares para medição da temperatura de corte para cálculos com problemas inversos como o MATLAB e o ANSYS CFX.
- ✓ Soluções Analíticas e numéricas, por exemplo o uso de equações de difusão e modelos tridimensionais, para resolução dos problemas térmicos, visto que, alguns métodos são mais precisos e demorados e outros mais confiáveis e demorados.
- ✓ Desenvolver um sistema de fixação mais eficiente e confiável de termopares de forma a reduzir a incerteza nessas leituras de temperatura.
- ✓ Construção de um instrumento para medição especificamente do método de problemas inversos em condução de calor, em função da tecnologia de hoje ser bem mais avançada este tipo de problema já não deveria existir.

REFERÊNCIAS

BONANDI, Marcelo. O Estudo das Condições de corte no torneamento do aço AISI endurecido utilizando a metodologia de projetos experimentais//Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de mestrado em Engenharia de Produção em 2012 na Universidade Nove de Julho.

CARVALHO, Solidônio Rodrigues. Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento//Tese de Doutorado apresentado na Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

CONRADIE, P.J.T; OOSTHUIZEN, G.A; TREURNICHT, N.F e AL SHAALANE & A. OVERVIEW OF WORK PIECE TEMPERATURE MEASUREMENT TECHNIQUES FOR MACHINING OF Ti6Al4V// Artigo apresentado ao The Southern African Institute for Industrial Engineering em Janeiro de 2012.

DA SILVA, Márcio Aurelio. Investigação Experimental da Formação do Cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular// Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica em 2008 na Universidade federal de Uberlândia.

DE LISBOA, Fabio Cordeiro; DE MORAIS, Jessyca Jordanna Barroso e HIRASHITA, Massako. Fluidos de Corte: Uma abordagem Geral e novas tendências//Artigo apresentado no XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção em Outubro de 2013.

DE SOUZA, André João. Processos de fabricação por usinagem parte 1// Apostila elaborada.

DE SOUZA, Francisco Luclecio. Clima organizacional: Um estudo bibliométrico dos artigos no EnANPAD de 2007 a 2011.

DINIZ, Anselmo Eduardo e et al. Tecnologia da usinagem dos materiais// Livro 5° Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C. COPPINI, N.L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais// Livro, Artliber Editora, São Paulo, 2000, 2ª ed.

FERRARESI, Dino. Fundamentos da Usinagem dos Metais//Livro, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1977.

GOYAL,Ajay; **DHIMAN**,Suresh; **KUMAR**,Shailendra e **SHARMA**,Rajesh. A Study of Experimental Temperature Measuring TECHNIQUES used in Metal Cutting// Artigo do JJMIE Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering em 2014 na Índia.

JARDIM,Joaquim; **KOBAYASHI**,Gustavo; **LAPERUTA**,Conrado; **FISHER**,Fernando; **DA CUNHA**, Marcos Anibal; **MARIANI**,Leonardo Fenato e **DE ALMEIDA**, Silvio Alcântara. Tipos de Cavaco//Relatório apresentado na Escola de Engenharia de Piracicaba.

KAMINISE,Almir Kazuo. O estudo da influência do material do porta-ferramenta sobre temperaturas de usinagem no torneamento// Tese apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica em 2012 na Universidade Federal de Uberlândia-MG.

MARTINS,Joel. Temperatura de corte//Portal dos professores, Joinville, Crichigno UDESC.

NASCIMENTO,Cláudia Hespanholo.O Estudo da distribuição de temperatura na região de formação de cavacos usando Método dos Elementos Finitos// Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos em 2011 na Universidade de São Paulo.

NAVES,Vitor Guimaraes; **LUIZ**,Nelis Evangelista; **MACHADO**,Alisson Rocha; **DANTAS**,Noelio Oliveira.Calibração de um sistema termo-par ferramenta-peça para medição de temperatura de usinagem// Artigo apresentado em um simpósio de Engenharia Mecânica.

RIBEIRO,Carlos Adriano; **FERREIRA**, João Roberto; **VILLA NOVA**, Helcio Francisco; **CARVALHO**,Solidônio Rodrigues; **BRITO**,Rogerio Fernandes e **SILVA**,Sandro Metrevelle. Estimativa de Fluxo de Calor e temperatura numa ferramenta de corte usando técnicas de problemas inversos e ANSYS CFX//Artigo apresentado ao 7ºCongresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação em 2013 na Universidade Federal de Itajubá.

SCHROETER,Bertrand; **STOETERAU**, Rodrigo Lima e **WEINGAERTNER**, Walter Lindolfo. Processos de Usinagem-Fabricação por remoção do material//Apostila elaborada pelos professores, doutores e engenheiros, em 2001/01.

SILVA,José Luiz. Fresamento do aço Vhsuper nos estado recozidos e temperado com metal duro e cermet// Tese apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica em 2007 na Universidade Federal de Minas Gerais.

SILVA,José Luiz; **ABRÃO**, Alexandre Mendes; **DE ANDRADE**, Roberto Márcio e **GEOVANE**, Herberth. Medição da temperatura de usinagem no fresamento do aço Vhsuper com ferramentas de metal duro revestido e cermet// Artigo apresentado no V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação em 2009 na Universidade federal de Minas Gerais

SILVEIRA, Frederico Romagnoli. Modelagem Tridimensional de problemas inversos em condução de calor, aplicação em processos de usinagem// Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica em 2001 na Universidade federal de Uberlândia.

STEMMER, C.E. Ferramentas de corte I, Ed. da UFSC, 1998

STOETERAU, Rodrigo Lima. Fabricação por Remoção do Material// Apostila elaborada em 2004.

TELES, José Marcelo. Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro// Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica em 2007 na Universidade Federal de Itajubá.

WIEDENHOFT, Aldoni Gabriel: Processos de fabricação por usinagem parte 1- Movimentos em usinagem e terminologia de ferramentas// Apostila, Alegrete RS, maio de 2010-08-17