

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE TECNOLOGIA EM MECÂNICA INDUSTRIAL
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

ELVIS PRESLEY MONTEIRO
NIVALDO FREIRE

ESTUDO DE VIDA DE FERRAMENTAS DE CORTE DE UMA
EMPRESA DO SETOR METALMECÂNICO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

ELVIS PRESLEY MONTEIRO
NIVALDO FREIRE

**ESTUDO DE VIDA DE FERRAMENTAS DE CORTE DE UMA
EMPRESA DO SETOR METALMECÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Tecnólogo em
Manutenção Industrial, do Departamento
Acadêmico de Tecnologia em Mecânica
Industrial – COMIN, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Orientador: Prof. MSC José Fernandes

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

Estudo de vida de ferramentas de corte de uma empresa do setor metalmeccânico

por

Elvis Presley Monteiro e Nivaldo Freire

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 31 de Julho de 2014, como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. MSC José Fernandes
Orientador

Prof. MSC Jefferson Luiz César Salles
Membro titular

Professor Pós Dr. Celso Naves de Souza
Membro titular

Cornélio Procópio 31 de Julho de 2014.

Dedicamos este trabalho:

A todos que caminharam juntos,
pelo apoio e paciência nos momentos
difíceis.

A Deus, por nos permitir passar por mais
esta evolução em nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Queremos aqui registrar os nossos mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de nossas vidas. Portanto, desde já pedimos desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte dos nossos pensamentos e de nossa gratidão.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. MSC José Fernandes, pela sabedoria com que nos guiou nesta trajetória, por nos ajudar a encontrar repostas e a crescer em cada etapa da realização deste trabalho.

À Empresa, que viabilizou a realização desse sonho.

A todas as empresas que abriram suas portas, permitindo que a pesquisa fosse realizada.

Aos nossos queridos professores por nos passar o conhecimento ao longo desta jornada e sendo não apenas nossos mestres, mas também amigos.

Aos nossos amigos de sala.

A todos os profissionais entrevistados, que dedicaram tempo e atenção, participando com interesse das entrevistas realizadas.

Gostaria de deixar registrado também, o nosso reconhecimento às nossas famílias, pois acreditamos que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

“Uma inteligência modesta aliada a muito trabalho frequentemente pode mais que uma inteligência brilhante e vadia.”

(Paulo Boulos e Ivan de Camargo)

RESUMO

MONTEIRO, Elvis Presley. FREIRE, Nivaldo. **ESTUDO DE VIDA DE FERRAMENTAS DE CORTE DE UMA EMPRESA DO SETOR METALMECÂNICO.** 2014. 96 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Tecnologia em Manutenção Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

O mercado exige das empresas agilidade, flexibilidade no atendimento à demanda, foco intenso nos clientes, ciclos de vida de produtos abreviados, desenvolvimento constante de novas tecnologias, desafio da redução de custos e alta qualidade de fabricação. Parcelas significativas dos custos nesse segmento são representadas pelos processos de usinagem de componentes, e grande parcela destes custos é referente ao uso de ferramentas de corte. Dentro desse contexto, o gerenciamento eficiente de ferramentas de corte torna-se elemento importante para reduzir custos e eliminar desperdícios. O presente estudo de caso foi realizado em uma empresa do setor metalmeccânico, onde trabalha com produção de peças seriadas para a indústria automobilística. O devido estudo especificou-se ao processo de torneamento, onde houve a correta seleção da ferramenta, analisou-se o consumo das arestas de corte e treinando os operadores para possíveis substituições e correta adequação dos parâmetros de corte para que se tornem o mais adequado ao caso. Também procurou-se reduzir tempos passivos que envolva tarefas humanas, ou a redução de tempos produtivos, quando analisa o processo de usinagem. A redução de tempos passivos pode ser obtida com implantação de ferramentas gerenciais ou técnicas, como Kanban, POKA YOKE, ou outras ferramentas. Os tempos produtivos também podem ser reduzidos, com aquisição de máquinas novas, ferramentas, dispositivos e também com parâmetros de corte, redução de sobre metal ou através de estudo de estratégia de corte que define o caminho de corte durante o percurso da ferramenta de usinagem. Para tanto, a metodologia usada consistiu em pesquisa descritiva e observação direta dos processos para redução de custo total de usinagem de uma peça em produção seriada e identificar e debater, sob a ótica da produção, as principais práticas relacionadas ao gerenciamento de ferramentas de corte na indústria. Para isto, experimentos foram realizados variando-se os parâmetros de velocidade e avanço de corte, mantendo fixa a profundidade de usinagem. Os resultados de tempo de vida encontrados para as ferramentas revestidas mostraram a intensidade das alterações que ocorrem nos dois mecanismos de desgaste predominantes, adesão e abrasão. Onde tanto no processamento de diferentes volumes de produção quanto na diminuição dos tempos de processamento, ou ainda, na minimização de trocas de ferramentas.

Palavras-chave: Redução de custos. Ferramentas de Corte. Arestas de Corte

ABSTRACT

MONTEIRO, Elvis Presley. FREIRE, Nivaldo. **STUDY OF LIFE OF A CUTTING TOOL COMPANY SECTOR MECHANICAL ENGINEERING**. 2014. 96 pages. Trabalho de Conclusão de Curso Tecnologia em Manutenção Industrial - Federal Technology University - Parana. Cornélio Procópio, 2014.

The market demands of business agility, flexibility to meet demands, intense customer focus, shortened life cycles of products, constant development of new technologies, the challenge of reducing costs and high quality manufacturing. Significant portions of costs in this segment are represented by processes of machining components, and a large portion of these costs is related to the use of cutting tools. Within this context, the efficient management of cutting tools becomes important element to reduce costs and eliminate waste. This case study was performed in a mechanical engineering company in the industry, where he works with serial production of parts for the automotive industry. The study was specified due to the turning process, which was the correct tool selection, we analyzed the consumption of cutting edges and training operators for possible replacements and correct adaptation of cutting parameters to become the most appropriate to case. Also sought to reduce liabilities times involving human tasks, or reduction of productive time, when considering the machining process. The reduction of liabilities times can be achieved with implementation of management techniques or tools like Kanban, Poka Yoke, or other tools. The productive time can also be reduced by acquiring new machines, tools, devices and also with cutting parameters, reduction of metal or by cutting study that defines the cutting path during the course of machining tool strategy. Therefore, the methodology used consisted of descriptive research and direct observation of processes to reduce total cost of machining a part in serial production and identify and discuss the perspective of production, the main practices related to the management of cutting tools in industry. For this, experiments were carried out varying the parameters of the cutting speed and feed, while maintaining fixed depth of machining. The lifetime results found for the coated tools showed the intensity of the changes that occur in the two predominant mechanisms of wear, adhesion and abrasion. Where in the processing of different volumes of production and in decreasing processing times, or, in the minimization of tool switches.

Keywords: Cost reduction. Cutting Tools. Cutting Edges.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais movimentos e parâmetros de corte existentes no processo de torneamento	18
Figura 2: Mecanismo de formação de cavaco	21
Figura 3: Representação da zona de cisalhamento	22
Figura 4: Zonas de aderência e escorregamento	24
Figura 5: Áreas de contato de uma superfície levemente carregada	25
Figura 6: Modelo de distribuição das tensões normal e cisalhante	27
Figura 7: Zona de fluxo no cavaco	28
Figura 8: Diferentes zonas de geração de calor	30
Figura 9: Variação da distribuição da energia de corte com a velocidade	31
Figura 10: Distribuição típica da temperatura em °C de uma ferramenta de metal duro: (a) vista de perfil, (b) vista da superfície de saída da ferramenta	32
Figura 11: Representação esquemática da dissipação do calor na peça, cavaco e ferramenta.	33
Figura 12: - Formas das grafitas dos ferros fundidos: (a) cinzentos, (b) vermiculares e (c) nodulares.	36
Figura 13: Classificação da grafita	42
Figura 14: Usinabilidade dos ferros fundidos	46
Figura 15: Avarias e desgastes que ocorrem em ferramenta de corte: (a) cratera, (b) flanco e (c,d) entalhe	56
Figura 16: Mecanismos de Avarias e Temperaturas de Corte	58
Figura 17: Trincas térmicas na aresta de corte de uma ferramenta	60
Figura 18: Desgaste por abrasão com detalhamento dos sulcos formados por este tipo de mecanismo	61
Figura 19: Desgaste de entalhe no flanco da ferramenta.....	62
Figura 20: Micrografia de uma ferramenta de metal duro WC-TaC-Co, em que ocorreu deformação plástica	64
Figura 21: Micrografia de uma ferramenta de metal duro WC-Co deformada. A linha branca indica a forma original da ferramenta	65
Figura 22: Curvas de temperatura oriundas de mudanças estruturais em ferramentas de aço rápido durante usinagem de aço de baixo carbono	66
Figura 23: – Desgaste de cratera devido ao mecanismo de difusão.....	67
Figura 24: Parâmetros de desgaste estabelecidos pela norma ISO 3685	69
Figura 25: Gráfico de Consumo de Ferramentas de Corte.....	78
Figura 26: Torno Cosmos 30 Romi	80
Figura 27: Imagem fotografada do inserto ensaiado.	81
Figura 28: Imagem fotografada do inserto ensaiado.	82
Figura 29: Desgaste de Entalhe	83
Figura 30: Classificação dos Metais Duros em ferramentas de corte.	84
Figura 31: Tabela de Classificação de Inserto – 1ª Parte.....	85

Figura 32: Tabela de Classificação de Inserto – 2ª Parte.....	86
Figura 33: Rugosidade Ra, em função da velocidade de corte (Vc) e avanço (f).....	87
Figura 34: Rugosidade Rq, medida , em função da velocidade de corte (Vc) e avanço (f).	87
Figura 35: Gráfico de Peças Produzidas por insertos.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades médias dos ferros fundidos	37
Tabela 2 - Classes de ferro fundido cinzento	39
Tabela 3 - Classes de ferro fundido cinzento automotivos	40
Tabela 4 - Composição química para as classes de ferro fundido cinzento automotivos	40
Tabela 5 - Relação das propriedades do ferro fundido, da classe ASTM 20 para ASTM 80 que se alteram conforme a variação do limite de resistência à tração.	41
Tabela 6 - Efeito da microestrutura sobre a usinabilidade quando se utilizam ferramentas de corte convencionais.....	48
Tabela 7 - Principais propriedades da ferramenta de metal duro K10 (H1P) comparadas às ferramentas de aço rápido e cerâmica.....	53
Tabela 8 - Estudo de Consumo Inserto CNMA 12 04 12.....	76
Tabela 9 - Estudo de Consumo Inserto WNMA 08 04 12.....	77
Tabela 10 - Tempo de Produção.....	78
Tabela 11 - Composição Química.	79
Tabela 12 - Parâmetros de corte.....	80

LISTAS DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Velocidade de Corte.....	18
Equação 2 – Volume de Usinagem.....	19
Equação 3 – Coeficiente de Atrito.....	25

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [mm ²]
A _v	Área real ou efetiva
f	Avanço [mm/rev]
φ	Ângulo de Cisalhamento
μ	Coefficiente de Atrito
d	Diâmetro da peça [mm]
F	Força [N]
N	Força Normal [F _n]
a _p	Profundidade de Corte [mm]
n	Rotação por minuto [RPM]
Q	Taxa de Remoção do cavaco [cm ³ /min]
V _c	Velocidade de Corte [m/min]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	17
2.1 TORNEAMENTO.....	17
2.1.1 Mecânica do Torneamento	20
2.1.2 Interface Cavaco e Ferramenta	23
2.1.2.1 Temperaturas geradas no processo.....	29
2.2 FERRO FUNDIDO.....	34
2.2.1 Classificações dos Ferros Fundidos.....	35
2.2.2 Propriedades dos Ferros Fundidos	37
2.2.3 Ferros Fundidos Cinzentos	38
2.2.3.1 Classes dos ferros fundidos cinzentos	39
2.2.3.2 Efeitos da microestrutura.....	41
2.2.3.3 Usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos	45
2.3 FERRAMENTAS DE CORTE	49
2.3.1 Materiais para Ferramentas de Corte.....	50
2.3.2 Ferramentas de Metal Duro.....	51
2.3.3 Revestimentos para Ferramentas de Corte.....	54
2.3.4 Processos Para Revestimentos.....	55
2.3.5 Identificação do Desgaste	56
2.3.5.1 Mecanismos causadores de avarias e desgastes	57
2.3.5.2 Mecanismo de desgaste por adesão (Attrition)	59
2.3.5.3 Trincas.....	60
2.3.5.4 Mecanismo de desgaste por abrasão.....	60
2.3.5.5 Entalhe e lascamento (Chipping).....	61
2.3.5.6 Quebra	62
2.3.5.7 Desgaste por deformação plástica	63
2.3.5.8 Desgaste por difusão.....	66
2.3.5.9 Desgaste por reações químicas	67
2.3.5.10 Parâmetros de desgaste	68
2.4 ACABAMENTO DE SUPERFÍCIE	70
2.4.1 Fatores de Influência na Rugosidade	70
3 MATERIAIS E MÉTODOS	72
3.1 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	73
3.2 SUJEITO E OBJETIVO DA PESQUISA	73
3.3 TIPO DE PESQUISA	73
4 PROJETO	75
4.1 DADOS TÉCNICOS DO PRODUTO	75
4.2 DADOS DE PROCESSO	79

4.3 RESULTADOS	81
5 CONCLUSÃO	90
REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

As indústrias do setor metalmeccânico, principalmente a do setor de usinagem (automotiva) vem procurando cada vez mais otimizar seus processos, e trabalharem cada vez mais com a produção enxuta, e com maior flexibilidade e qualidade aliando a competitividade no mercado. No seguimento de usinagem uma grande parte dos custos é oriunda das ferramentas de corte. Portanto, a busca constante por tecnologias e conhecimentos científicos que garantam uma maior qualidade e produtividade durante o processamento das matérias primas é uma realidade.

Por isso o tema é de extrema importância para as indústrias de usinagem, o gerenciamento do ferramental de corte é um método de aproveitar de forma econômica à redução de custos e no aumento da produtividade.

Deste modo, todas essas mudanças estão alterando significativamente as condições de usinagem, redefinindo parâmetros de corte e viabilizando novas técnicas produtivas, as quais promovem a economia de tempos e custos.

Para STEMMER (2005), a vida da ferramenta, a força de corte, a potência consumida e o acabamento da superfície são os critérios fundamentais para avaliar o grau de usinabilidade de um material e, ao mesmo tempo, são os principais fatores que definem o custo de usinagem. Assim sendo, quando buscamos qualidade e redução de custos, a otimização do processo inicia-se na seleção da ferramenta, na sua geometria, no material e na correta adequação dos parâmetros de corte, fatores estes que se alteram em função do material a ser usinado, da qualidade de acabamento desejável e da máquina ferramenta utilizado.

Atualmente, busca-se incrementar a produtividade pela redução dos tempos de processamento que, segundo XAVIER e SCHRAMM (2007), podem ser obtidos pela otimização do projeto da peça e pelo aumento considerável das velocidades de avanço e corte.

Neste contexto, um dos principais fatores de preocupação é a qualidade das peças usinadas, as quais são avaliadas não só dimensionamento, mas também, através dos seus desvios macro geométricos e pelo acabamento das superfícies dos componentes fabricados. Todos estes indicadores de qualidade são fortemente influenciados pelas condições reais de usinagem estabelecidas nos processos de

fabricação usualmente adotados, sejam eles o torneamento, fresamento, furação ou quaisquer outros disponibilizados. Ou seja, os parâmetros de corte, a configuração das ferramentas de corte empregadas e a utilização, ou não, de fluidos refrigerantes são, entre outras, variáveis que influenciam direta e significativamente o resultado final do processo produtivo (DINIZ, 2006).

Segundo STAPPEN (1995), no torneamento a remoção de cavaco para a confecção de uma peça tem como princípio básico um sistema tribológico específico. Este sistema está diretamente relacionado com as condições de usinagem, as quais irão influenciar o movimento relativo entre a ferramenta e a peça, modificando as forças aplicadas e as temperaturas de trabalho. Assim, os mecanismos de desgaste que ocorrem na ferramenta são também muito particulares, pois as solicitações mecânicas e térmicas variam conforme os parâmetros de corte adotados e a resistência mecânica do material utilizado (ÀVILA, 2003).

As ferramentas vêm evoluindo de forma surpreendente nas últimas décadas. A grande variedade de suas geometrias, associadas aos diferentes materiais com que são fabricadas, ampliam em muito as opções de processamento, permitindo que a seleção das mesmas seja realizada de forma mais adequada, principalmente se observada à relação existente entre o seu desgaste, o tempo de processamento e a qualidade de acabamento. Da mesma forma, caminhando na mesma direção, e com objetivos semelhantes, foram desenvolvidos revestimentos para estas ferramentas, os quais buscam permitir o processamento dos materiais em condições mais severas, proporcionando ganhos na relação qualidade x produtividade e consolidando a importância dos novos materiais para o desenvolvimento industrial.

KWON e FISCHER (2003) acrescentam ainda que determinar a sobrevida de uma ferramenta em utilização impede a sua troca prematura, minimizando os custos e os tempos improdutivos inerentes a esse procedimento.

Assim, diante deste quadro evolutivo, que agrega processos com tecnologias distintas e novos materiais com diferentes configurações, fica claro o interesse científico e a necessidade de melhor se analisar a influência e o desempenho das ferramentas revestidas na usinagem e no acabamento do ferro fundido de forma que se tenham indicativos sobre os quais seriam as condições reais de trabalho mais adequadas para otimização dos sistemas produtivos.

No presente estudo será avaliado, de forma comparativa e condições reais de usinagem, o desempenho das ferramentas de metal duro no processo de

torneamento de ferro fundido cinzento. Nele, busca-se explorar a correlação existente entre os parâmetros de usinagem, velocidade de corte e avanço, os quais alteram significativamente os mecanismos de atrito entre peça e ferramenta, bem como constatar a influências das características no tempo de vida útil das ferramentas e no acabamento das superfícies das peças usinadas.

Portanto, os principais objetivos deste trabalho são:

- Verificar as influências sobre parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, sobre o desgaste de flanco das ferramentas e sobre o acabamento de superfície;
- Analisar o desempenho das ferramentas revestidas através do monitoramento dos seus tempos de vida útil.

Assim, buscando atingir esses objetivos o capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica com os fundamentos teóricos do processo de torneamento e sobre o acabamento de superfície, além de uma descrição das principais características e propriedades do ferro fundido, das ferramentas de corte e de seus revestimentos, bem como uma revisão sobre os mecanismos de desgastes a que estas ferramentas são submetidas durante a usinagem.

O Capítulo III detalha os procedimentos e as matrizes de testes adotados para a realização dos experimentos, as técnicas utilizadas para avaliação dos desgastes das ferramentas, do acabamento de superfície e quais os equipamentos utilizados. Quanto aos resultados e avaliações dos resultados realizados, estes são disponibilizados no Capítulo IV considerando-se os efeitos das condições de corte e dos revestimentos utilizados.

Finalizando, são apresentadas as conclusões deste estudo e algumas sugestões para continuidade deste trabalho, com o qual se pretende colaborar para a melhoria na qualidade no acabamento, no controle dimensional, no desempenho produtivo e na formação de banco de dados que poderão ser utilizados em sistemas integrados de manufatura.

2 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

2.1 TORNEAMENTO

Entre os diferentes processos de fabricação existentes, o torneamento se destaca por ser uma operação de usinagem das mais utilizadas nas indústrias de transformação.

Com a utilização da máquina-ferramenta chamada torno e com o auxílio de uma ou mais ferramentas, o torneamento, segundo FERRARESI (1977), é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução. Para tanto, uma peça cilíndrica é fixada à máquina, a qual lhe transmite movimento de rotação em torno do seu eixo principal, sendo que, simultaneamente, a ferramenta se desloca segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

Esse processo ocorre mediante a retirada progressiva do cavaco, pequena porção de material do componente trabalhado, que é função do sistema tribológico gerado pela penetração da ferramenta na referida peça, e movimentos controlados, o de rotação da peça e o de deslocamento da ferramenta.

A norma brasileira NBR 6162 (1989) define os movimentos fundamentais que permitem, em essência, a ocorrência dos processos de usinagem. No torneamento, três movimentos relativos entre a peça e ferramenta são essenciais: o movimento de corte, o movimento de avanço e o movimento de profundidade ou ajuste, os quais serão definidos a seguir com o auxílio da Fig.1.

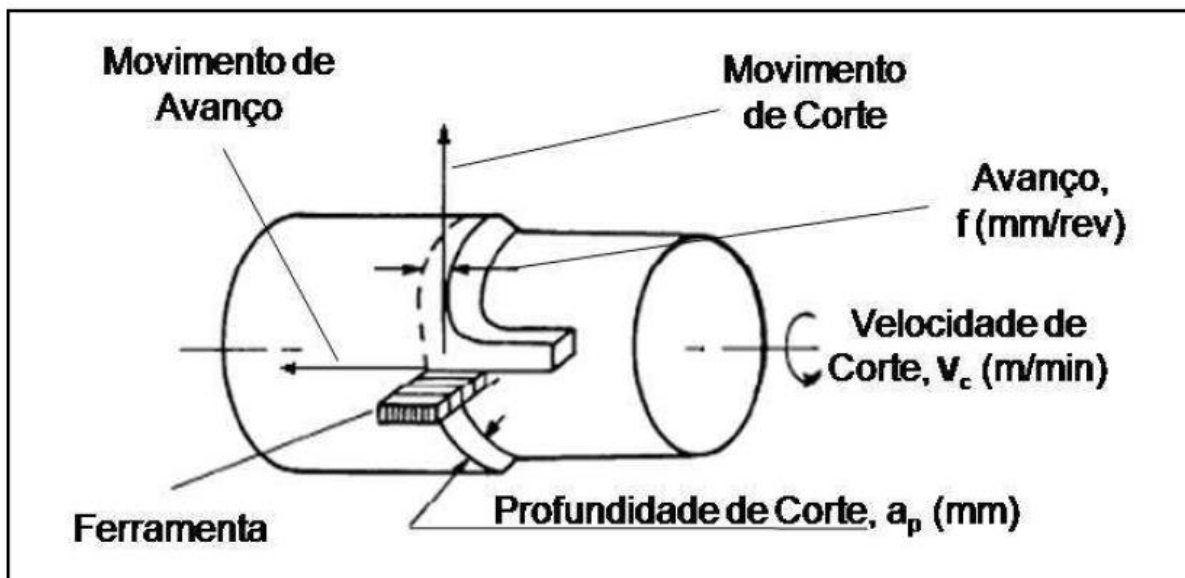


Figura 1 – Principais movimentos e parâmetros de corte existentes no processo de torneamento
Fonte: CHILDS, (2000)

O movimento de corte é o movimento entre a peça e a ferramenta, em que a mera rotação da peça promove a remoção de cavaco apenas na primeira revolução.

O movimento de avanço é o movimento entre a peça e a ferramenta, que ocorre simultaneamente ao movimento de corte, com o deslocamento da ferramenta sobre a superfície trabalhada e que promove a remoção do cavaco de forma contínua.

O movimento de profundidade ou ajuste é aquele movimento entre a peça e a ferramenta, que vai determinar de quanto será a penetração da ferramenta sobre a superfície trabalhada, determinando assim a espessura da camada de material que se deseja retirar a cada passe da ferramenta.

Destes movimentos resultam as grandezas, velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) que são os principais parâmetros desse processo.

A velocidade de corte é a velocidade instantânea do movimento de corte considerando-se o ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte e pode ser calculada pela Eq. (1):

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad [\text{m/min}], \quad (1)$$

onde d é o diâmetro da peça em mm e n é o número de rotações por minuto.

Juntas, essas três grandezas são responsáveis pela taxa de remoção do material usinado – vide Eq. (2) –, onde Q é o volume de usinagem por unidade de tempo, parâmetro este, muito utilizado para estimar a eficiência da usinagem:

$$Q = V_c f_a p \quad [\text{cm}^3/\text{min}]. \quad (2)$$

A taxa de remoção de material efetuada em cada operação será função de sua finalidade. Assim, as operações de torneamento são classificadas em operações de desbaste ou de acabamento. Toda peça usinada, na maioria das vezes, sofre as duas operações: primeiro a de desbaste e posteriormente a de acabamento. Na primeira, o volume de material retirado é bem superior, tendo como objetivo principal atingir rapidamente, na peça, uma medida bem próxima da sua dimensão final. Para tanto, normalmente, a profundidade de corte e o avanço são altos e as velocidades de corte são menores, resultando, porém, em um acabamento de superfície inferior. Na operação de acabamento o volume de material retirado é pequeno, resultado de condições de corte menos severas, em que o processamento se faz com menores avanços, menores profundidades de corte e maiores velocidades de corte, resultando na dimensão e no acabamento de superfície desejado para a peça, este último bem superior ao da operação de desbaste.

Outras formas de classificação também são utilizadas no processo de torneamento.

Segundo FERRARESI (1977), o torneamento apresenta basicamente seis tipos de operações que podem ser executadas em função da posição de montagem da ferramenta no torno, de sua forma e, principalmente, do tipo de trajetória por ela efetuada durante a operação de corte:

a) Torneamento cilíndrico: o deslocamento da ferramenta é retilíneo e paralelo ao eixo principal da máquina.

b) Torneamento cônico: o deslocamento da ferramenta é retilíneo, porém sua trajetória é inclinada em relação ao eixo principal da máquina.

c) Torneamento radial: o deslocamento da ferramenta é retilíneo com a sua trajetória perpendicular ao eixo principal da máquina.

d) Perfilamento: o deslocamento da ferramenta é retilíneo seguindo uma trajetória radial ou axial sendo que o perfil da ferramenta irá definir a forma final da peça trabalhada.

e) Torneamento curvilíneo: nesse processo, o deslocamento da ferramenta segue uma trajetória curvilínea.

Como se pode observar, o torneamento é bastante versátil. Independente do tipo de operação de corte realizada é a taxa de remoção de material que caracteriza, através da sua amplitude, o acabamento de superfície obtido e um maior ou menor controle sobre a dimensão final da peça usinada. A magnitude das variáveis que a compõem permite gerar inúmeras combinações de utilização, as quais são interdependentes a várias outras condicionantes utilizadas, como por exemplo, características da ferramenta, do torno e do material a ser usinado.

2.1.1 Mecânica do Torneamento

Quando a ferramenta de corte penetra o material da peça a ser usinada dá origem a um mecanismo que é o responsável pela formação do cavaco. Compreender o que acontece nesta região é importante, pois sua formação influencia diversos fatores ligados à usinagem dos metais como temperaturas, forças de usinagem, desgaste da ferramenta, entre outros.

A formação do cavaco pode ser mais bem entendida e detalhada através da Fig. 2, onde o corte de uma pequena porção do material “klmn”, ainda solidária à peça, é submetido a tensões de compressão progressivas até encontrar a ferramenta. Durante este período de tempo o pequeno volume “klmn” sofre em função das forças de compressão a que é submetido, deformações elásticas até atingir o seu limite, a partir de então começa a se deformar plasticamente até se romper parcialmente, por cisalhamento, quando atingir o ponto “O” da ferramenta, gerando uma trinca e, conseqüentemente, a formação de duas novas superfícies: a da peça usinada e a base do cavaco.

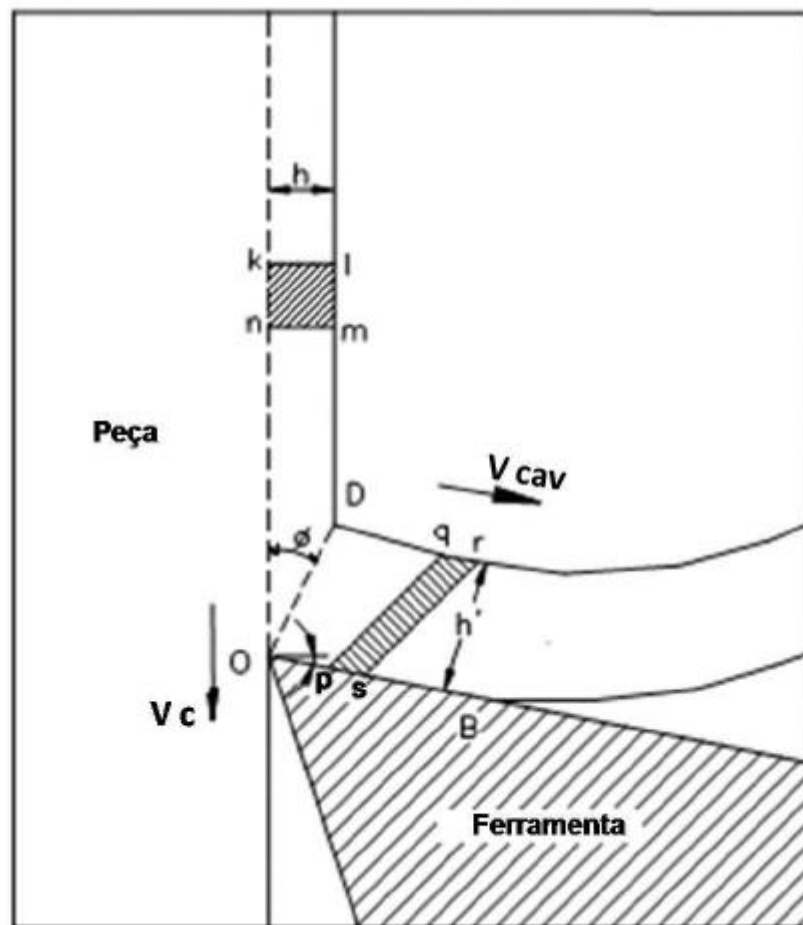


Figura 2: Mecanismo de formação de cavaco
Fonte: TRENT (1991)

Segundo FERRARESI (1977) essas tensões de cisalhamento crescem até que se inicie um deslizamento entre a porção do material “klmn” e a peça. Esse deslizamento, que ocorre segundo os planos de cisalhamento dos cristais pertencentes à estrutura da porção “klmn” recalcada, vai definir uma região entre a peça e o cavaco denominada região de cisalhamento, a qual pode ser mais bem visualizada na Fig. 3. Para efeito de simplificação, a zona de cisalhamento é representada pelo plano de cisalhamento “OD” definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ .

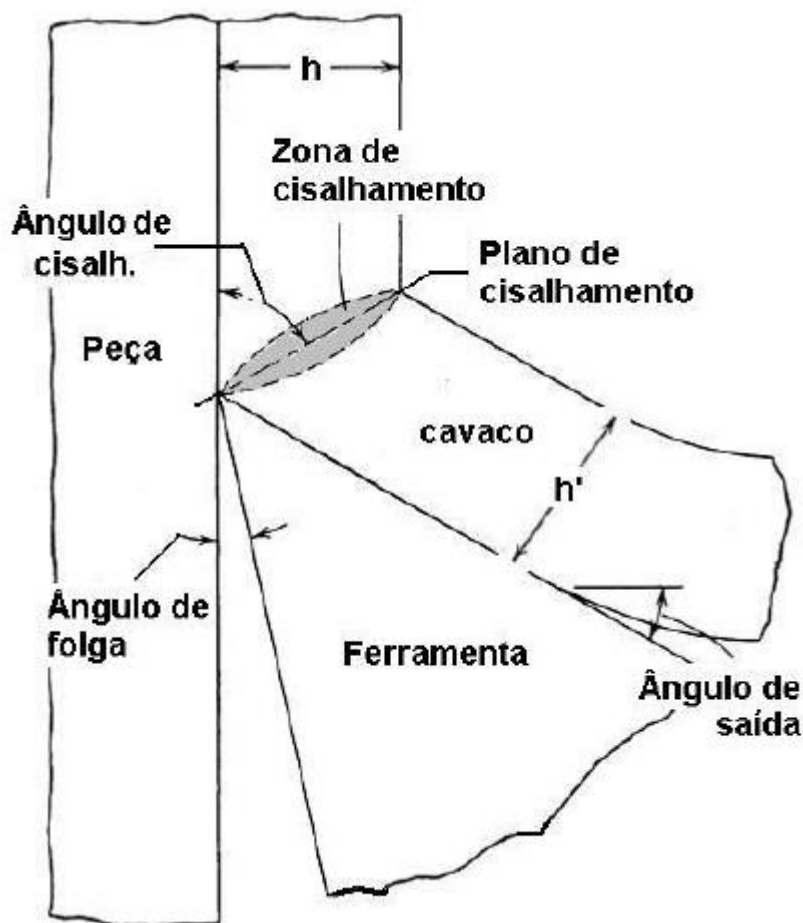


Figura 3: Representação da zona de cisalhamento
Fonte: KENDAL (1995)

O ângulo de cisalhamento ϕ é função da ductibilidade do material usinado. Quanto maior a deformação do cavaco, menor é o ângulo de cisalhamento e maiores são os esforços de corte. Nos materiais dúcteis, a zona plástica é maior, resultando em um cavaco mais deformado e contínuo. Nos materiais frágeis, a deformação é menor e o cavaco se rompe rapidamente e de forma total, ou seja, se desprende da peça e das porções anteriores e posteriores do cavaco, originando um cavaco curto e segmentado denominado cisalhamento ou ruptura (DINIZ, 2006).

Com o cisalhamento, a porção “klmn” fica deformada transformando-se em cavaco e passa a ter o formato “pqrs” conforme apresentado anteriormente na Fig.2. Enquanto não houver seu rompimento, o cavaco prossegue seu movimento relativo à peça através do escorregamento sobre a superfície de saída da ferramenta. Quando o cavaco atingir o ponto “B” da ferramenta, a pressão normal, neste ponto, passa a ser zero e, só então, o cavaco se descola da superfície de saída da ferramenta. Ao mesmo tempo, uma nova porção “klmn” adjacente à anterior está

sendo recalçada e cisalhada para posteriormente escorregar sobre a ferramenta, dando continuidade ao processo e, ao mesmo tempo, demonstrando que o mecanismo de formação de cavaco é um fenômeno periódico, inclusive na formação do cavaco contínuo (FERRARESI, 1977).

Assim, pode-se resumir que em condições normais de usinagem o processo de formação do cavaco é composto de quatro fases: deformação elástica, deformação plástica, ruptura e pelo deslizamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta.

2.1.2 Interface Cavaco e Ferramenta

As operações de corte e, conseqüentemente, a formação do cavaco têm sido motivo de diferentes análises e teorias.

Segundo SANTOS e SALES (2004), uma das teorias mais aceitas é a de Trent, na qual se define a existência de uma zona de aderência e outra de escorregamento na interface cavaco e ferramenta, conforme pode ser visualizado na Fig. 4.

Para TRENT (1991), entender o mecanismo de cisalhamento e a formação da zona de cisalhamento não é suficiente. Também é fundamental avaliar o contato e o deslocamento do cavaco sobre a ferramenta e suas arestas para, assim, compreender o desempenho das ferramentas no corte e a usinabilidade dos materiais.

A mais importante conclusão de suas observações é em relação à condição de atrito existente nessas regiões. Para o autor, o conceito tradicional de atrito, lei de Amonton, utilizado em diversos estudos sobre esse tema, é uma abordagem inadequada para a maioria das condições de corte dos metais.

O atrito entre sólidos depende da área de contato entre as suas superfícies justapostas.

Quando dois sólidos estão sobrepostos um ao outro se pode dizer que existe uma área de contato aparente (A) e outra de área menor, denominada de efetiva ou real (A_r), que é função das irregularidades existentes em cada uma das superfícies em contato.

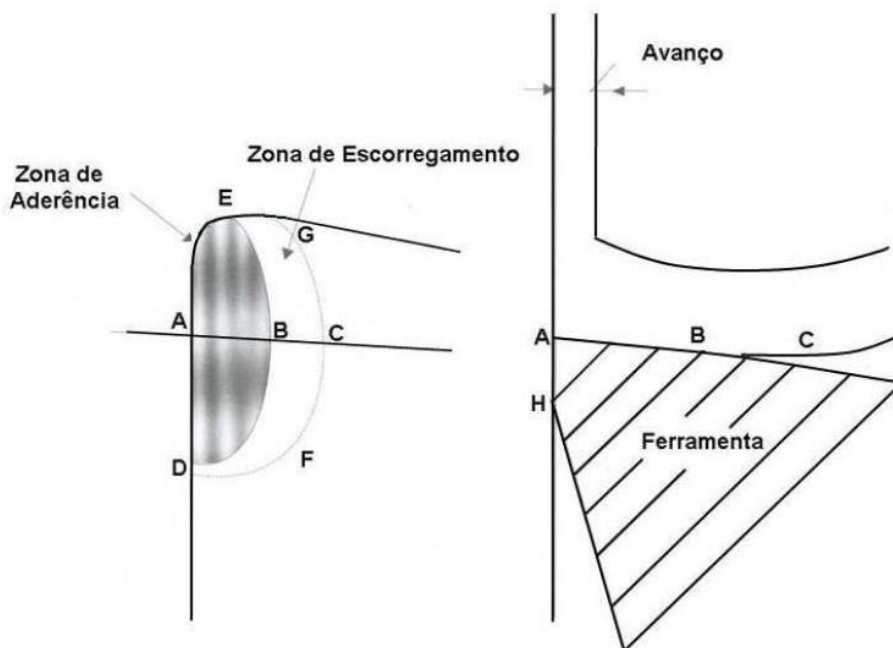


Figura 4: Zonas de aderência e escorregamento
Fonte: TRENT (1991)

Conforme ilustrado na Fig.5, observado o contato de forma microscópica, pode-se perceber que o mesmo não ocorre em toda a superfície aparente, mas somente em um número relativamente pequeno de pontos, aqueles mais elevados, que vão determinar a superfície real de contato.

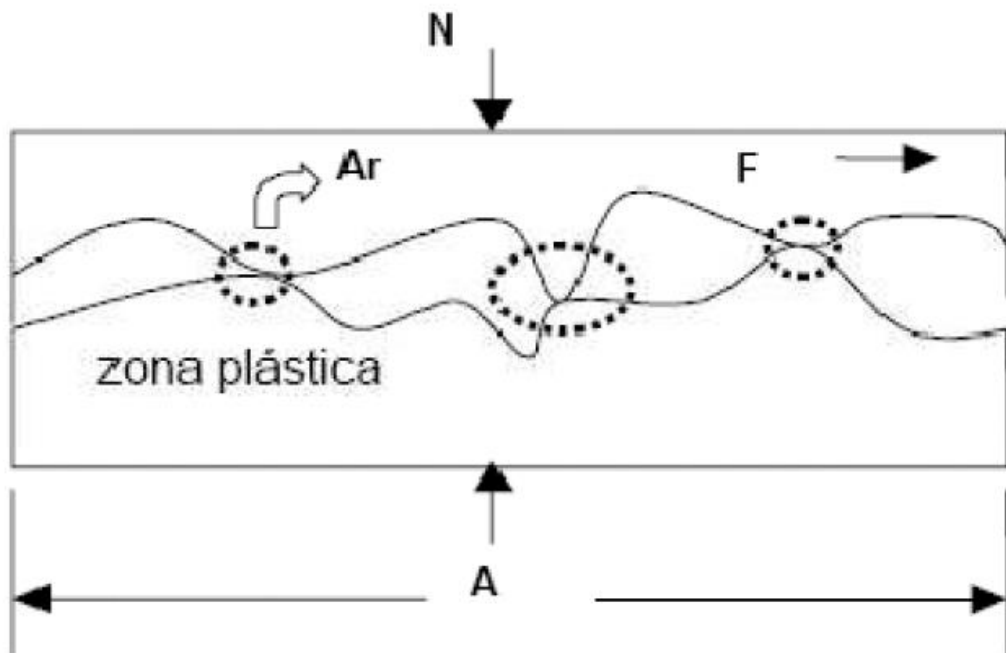


Figura 5: Áreas de contato de uma superfície levemente carregada
Fonte: ÁVILA (2003)

Assim, TRENT (1991) e SHAW (1984) descrevem os regimes de atrito sólido possíveis de ocorrer.

No primeiro regime, baseado em Amonton e Coulomb, a existência de uma força F , necessária para iniciar ou dar continuidade ao deslizamento de uma superfície sobre a outra, é proporcional à força normal N dos corpos em contato. O valor da força de atrito é função das forças atuantes e independe da área de contato entre os dois sólidos, que apresenta, neste modelo, a área de contato real sendo bem menor que a área aparente, resultando em:

$$\mu = \frac{\sigma}{\tau} = \text{constante}, \quad (3)$$

onde μ é o coeficiente de atrito e σ e τ são as tensões normal e cisalhante presentes no contato. Esse regime é adequado para as situações em que as tensões entre as superfícies em contato são pequenas, $Ar \ll A$, se comparadas com a tensão de escoamento dos materiais.

O segundo regime ocorre quando a área de contato real equivale à área de contato aparente, $Ar = A$, praticamente inexistindo superfície livre. Neste regime não é possível ampliar, de forma proporcional, a área de contato quando se acrescenta uma força normal elevada.

Portanto, a força para movimentar, relativamente, um dos sólidos justapostos será aquela necessária para cisalhar o material de menor resistência, demonstrando que a tensão cisalhante independe da tensão normal, porém é diretamente proporcional à área de contato aparente.

Um terceiro regime seria a transição entre dois anteriores, onde $A_r < A$. Nele ocorre uma situação intermediária, em que o coeficiente de atrito diminui com o aumento da carga.

Durante o corte dos metais, o contato entre a ferramenta, peça e cavaco é praticamente total, em sua maior parte, na zona de aderência, onde o deslizamento é impossível de acontecer para a grande maioria das condições de corte. Concomitantemente, ocorre na zona de escorregamento, o modelo de Amonton e Coulomb, onde $A_r \ll A$.

A simultaneidade desses regimes, as condições de contato e as distribuições das tensões existentes, mostradas por KENDALL (1995) na Fig.6, mostram, com bastante propriedade, o modelo existente no processo de usinagem.

Durante o corte, na região definida por Trent como zona de aderência, o contato peça-ferramenta-cavaco é total, sendo $A_r = A$ e, sob uma tensão normal mais elevada, a tensão cisalhante é constante, possuindo valor correlativo ao material da peça ou da ferramenta, aquele que for o menos resistente. A partir da zona de escorregamento o contato se transforma $A_r \ll A$, alterando o regime de atrito e, como consequência, promovendo a diminuição exponencial da tensão cisalhante até o cavaco perder contato com a ferramenta.

Na distribuição da tensão normal, o valor máximo da componente é obtido na ponta da ferramenta decrescendo exponencialmente até chegar a zero. Assim, as zonas de aderência e escorregamento ficam bem caracterizadas e delimitadas pela presença dos dois regimes de atrito.



Figura 6: Modelo de distribuição das tensões normal e cisalhante
Fonte: KENDALL (1995)

Assim, o deslocamento do cavaco por sobre a ferramenta ocorre por cisalhamento.

Entretanto, TRENT (1991) observou que, na zona de aderência, o fluxo do material cisalhado não ocorre exatamente na interface cavaco ferramenta e sim, em toda uma região denominada zona de fluxo, cujo comportamento assemelha-se ao de um líquido extremamente viscoso.

Essa região como assinalada na Fig.7, se caracteriza por apresentar um cisalhamento muito mais severo do que o existente no plano de cisalhamento e determina um gradiente de velocidades ao longo de seus 0,01 a 0,08 mm de espessura. Restrita à região de aderência, a zona de fluxo é limitada na parte inferior pela porção de material estacionário existente na interface com a ferramenta. A delimitação superior é função da velocidade de deslocamento do material que nesta zona é crescente, partindo de zero na interface com a ferramenta, até se tornar constante em sua parte superior, onde se tem a velocidade de cisalhamento igual à velocidade de saída do cavaco.

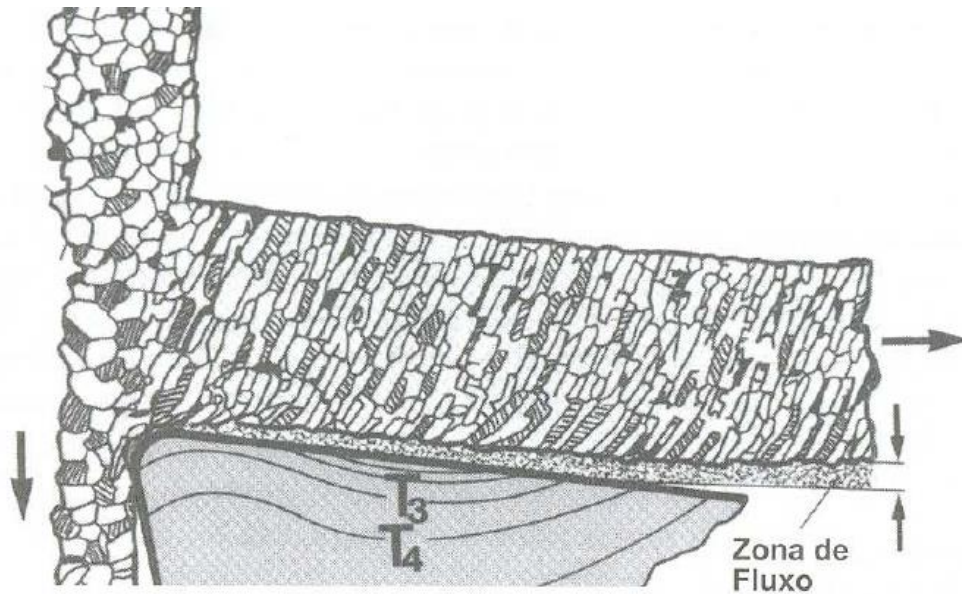


Figura 7: Zona de fluxo no cavaco
Fonte: DINIZ (2006)

Segundo os autores, DINIZ (2006), SANTOS e SALES (2004), ÁVILA (2003) e WRIGHT e BIAGCHI (1981), as variáveis que irão determinar as condições de escorregamento e de aderência estão intimamente ligadas aos materiais da peça e da ferramenta e às condições de usinagem aplicadas. No caso dos materiais, a afinidade química é um dos principais fatores a serem observados. Quanto aos parâmetros utilizados, o emprego de altas velocidades de corte e o uso de tempos de usinagem mais extensos favorece o acréscimo da zona de aderência. As condições atmosféricas presentes no corte também influenciam, principalmente as determinadas pela utilização ou não de fluidos de corte. Sob o aspecto das ferramentas, suas configurações também são determinantes, como a utilização ou não de quebra cavacos e a possibilidade de se utilizar ângulos de saída diferenciados, pois quanto menor o ângulo de saída da ferramenta, maior será o comprimento do contato entre o cavaco e a superfície da ferramenta e, conseqüentemente, maior a possibilidade de se ampliar a zona de aderência.

Portanto, todos esses fatores concorrem para fazer variar as tensões de compressão e cisalhamento, as taxas de deformação, as quantidades de calor gerado e as forças de usinagem, sendo responsáveis pela formação do cavaco e condições de atrito desenvolvidas, as quais definem a existência ou não da zona de fluxo e que, por conseguinte, as áreas de aderência e de escorregamento.

2.1.2.1 Temperaturas geradas no processo

Estima-se que, em um processo de usinagem, cerca de 97% a 99% da energia consumida seja transformada em energia térmica e que a pequena porcentagem restante fica retida no sistema como energia elástica ou é associada à formação de novas superfícies na peça e com a geração de novos cavacos (SANTOS e SALES, 2004).

A ação das altas temperaturas desenvolvidas, durante o processo de corte, demonstra sua influência no dimensional e acabamento final da peça fabricada, no desgaste da ferramenta e nas condições econômicas de usinagem.

Durante o torneamento, o mecanismo de formação do cavaco, o atrito entre o cavaco e a ferramenta e o atrito da peça trabalhada com a ferramenta promovem a transformação da energia mecânica existente em calor e, conseqüentemente, a temperatura do cavaco, da peça e da ferramenta sofrem elevação. O gradiente de temperatura adquirido por cada um desses componentes irá variar conforme o calor específico e a condutibilidade dos materiais em contato, das suas formas e dimensões e, também, das condições de contorno existentes, como por exemplo, o meio ambiente, o tempo de usinagem, os parâmetros de corte e a utilização ou não de fluidos de corte.

Segundo SUTTER e RANC (2007), o aumento da temperatura durante a usinagem determina o comportamento termomecânico da peça trabalhada, resultando em mais um parâmetro a ser observado quando se busca otimizar as condições de corte.

As principais fontes geradoras dessa energia térmica estão definidas na Fig. 8 e são classificadas conforme sua origem. Na zona de aquecimento primária, o calor é gerado pela deformação plástica e pelo cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, enquanto na zona secundária, o aquecimento ocorre pelo atrito na zona de escorregamento e principalmente pelo cisalhamento que ocorre na zona de aderência. Existe, ainda, a zona de aquecimento terciária na interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, onde o atrito promove o aumento progressivo da temperatura nesta região, à medida que a ferramenta desgastada durante o corte tem seu ângulo de folga diminuído.

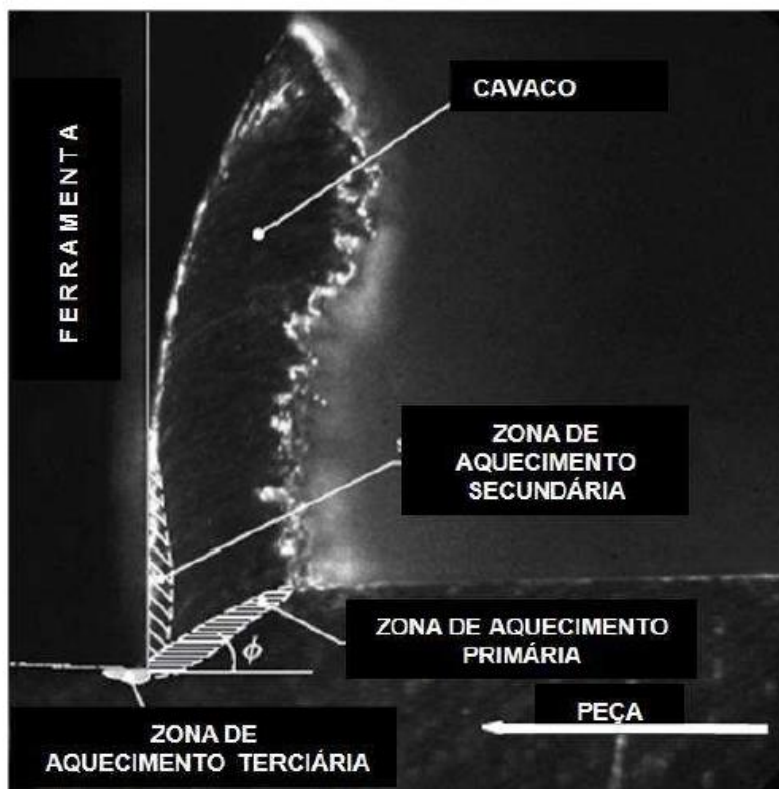


Figura 8: Diferentes zonas de geração de calor
 Fonte: SUTTER e RANC (2007)

Embora a parcela do calor gerado em cada uma dessas zonas possa variar normalmente o calor gerado na zona primária é o principal responsável pelo aquecimento do sistema, seguido pelas zonas secundária e terciária, respectivamente.

No torneamento, desconsiderando-se a utilização de fluidos de corte, a maior parte do calor é dissipada pelo cavaco e, em menor quantidade, pela ferramenta e pela peça. A proporção dos valores dissipados por cada um desses componentes também é variável e pode se alterar em função dos parâmetros de corte utilizados. Diferentes estudos, citados por DINIZ (2006) e SANTOS e SALES (2004), comprovam onde e como estes parâmetros atuam. Na zona de cisalhamento primário, um acréscimo na rotação eleva, por condução, a temperatura da peça usinada resultando em dilatação térmica da mesma, dificultando seu processamento para pequenas tolerâncias dimensionais, além de apresentar risco à integridade de sua superfície. Em contrapartida, essa elevação da temperatura reduz a dureza do material e a sua tensão de cisalhamento, facilitando o corte.

Um acréscimo na velocidade de corte aumenta a temperatura na interface cavaco-ferramenta, zona de cisalhamento secundário, e faz variar a distribuição da energia de corte na peça, cavaco e ferramenta, como se vê na Fig. 9.

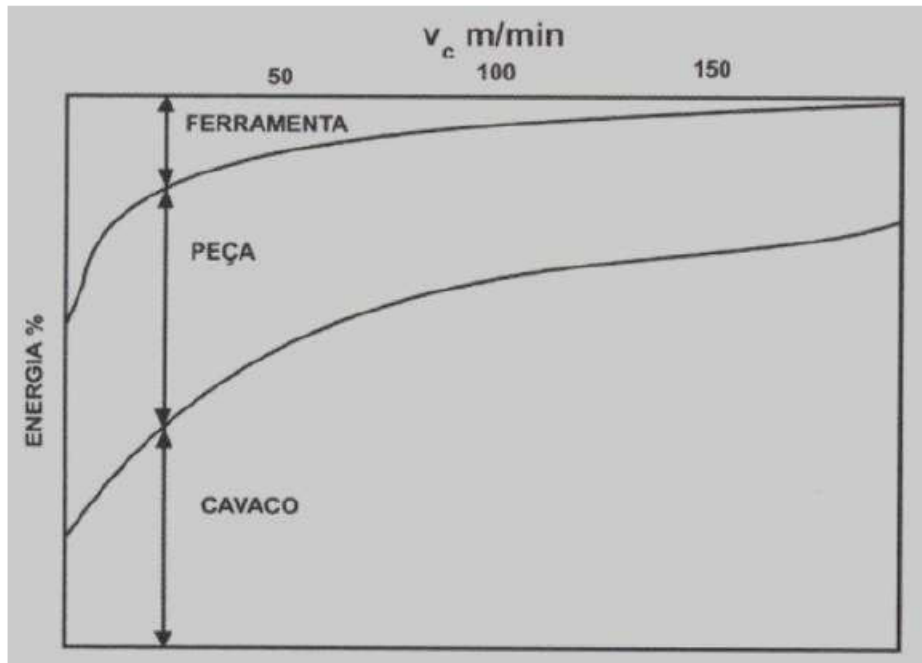


Figura 9: Variação da distribuição da energia de corte com a velocidade
Fonte: DINIZ (2006)

Ainda que o calor desenvolvido na zona de cisalhamento secundária não seja o de maior valor no sistema, as temperaturas, não geradas, são as mais significativas para o processo, pois são as que mais influenciam a temperatura da ferramenta de corte. Embora somente uma parte do calor seja dissipada na ferramenta, sua temperatura de operação pode atingir valores bastante altos como os apresentados na Figura 10.

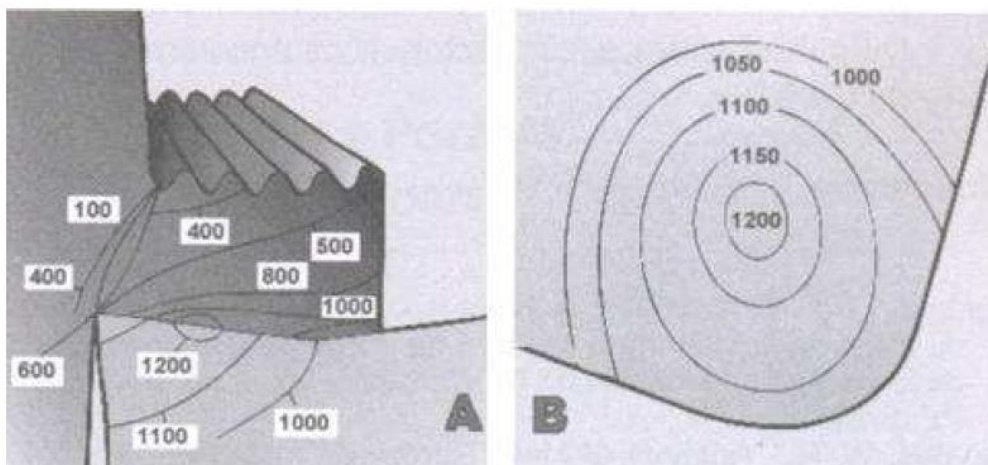


Figura 10: Distribuição típica da temperatura em °C de uma ferramenta de metal duro: (a) vista de perfil, (b) vista da superfície de saída da ferramenta
Fonte: DINIZ (2006)

Ainda que o sistema possa sugerir que o calor despendido seja realizado, em sua maior parte, pelo cavaco e peça, tem-se que a ferramenta mantém sua superfície de saída e de flanco em permanente contato com a peça e a zona de fluxo, justificando as temperaturas alcançadas. Deste modo, como pode ser visto na Fig. 11, estima-se uma distribuição de calor maior para o cavaco (80%), intermediária para a ferramenta (18%) e bem menor para a peça (2%).

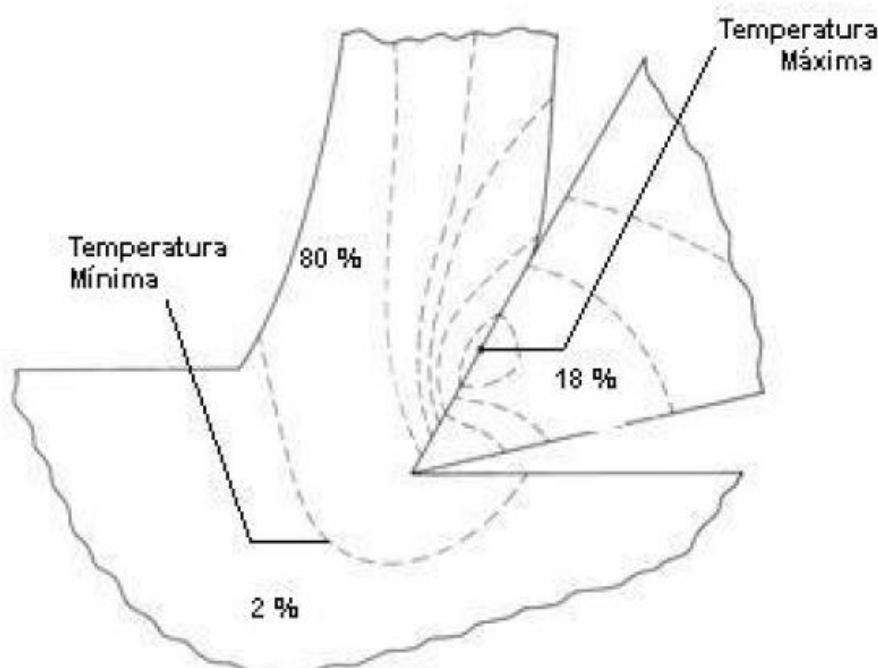


Figura 11: Representação esquemática da dissipação do calor na peça, cavaco e ferramenta.
Fonte: EZEWGU (1993)

As altas temperaturas da ferramenta afetam diretamente a sua vida útil determinando uma evolução mais rápida para o seu desgaste. Maior desgaste implica em maior atrito na interface ferramenta-cavaco e ferramenta-peça facilitando o aumento de temperatura o que, segundo SUTTER e RANC (2007) resulta na ativação de um processo catastrófico.

Nesta região, as deformações existentes, a quantidade de trabalho realizado para cisalhar o material e o volume de material em processamento na zona de fluxo irão determinar a temperatura da ferramenta (MACHADO e SILVA, 1999).

Os materiais das ferramentas, quando submetidos a altas temperaturas, têm o seu limite de escoamento e sua resistência à deformação plástica reduzida. Assim, a usinagem de materiais mais duros e com alto ponto de fusão acabam por limitar as condições de usinagem, pois a temperatura na zona de fluxo aumenta quando se aumenta a taxa de remoção de material e acima de determinadas condições críticas, velocidade de corte e avanço, a vida da ferramenta diminui drasticamente, podendo entrar em colapso pelas tensões e temperaturas a que está submetida (TRENT, 1991).

Assim, TRENT (1988) apud SANTOS e SALES (2004), através de seus estudos concluiu que o gradiente de temperatura ao qual a ferramenta é submetida

está diretamente relacionado a três principais fatores. O primeiro diz respeito ao ponto de fusão do principal elemento do material que será usinado. Este está diretamente relacionado à temperatura que se estabelece na interface cavaco-ferramenta e independe da velocidade de corte aplicada no processo. O segundo fator trata dos elementos de liga presentes no material da peça que são os responsáveis pelo aumento da sua resistência. Neste caso, a elevação da temperatura na interface irá ocorrer independente da taxa de remoção de cavaco utilizada. O último fator está relacionado aos materiais cujas estruturas apresentam fases de baixa resistência ao cisalhamento, como por exemplo, MnS e grafita, as quais limitam o aumento da temperatura na zona de fluxo e, conseqüentemente, podem reduzi-la na ferramenta.

O aquecimento na zona terciária, interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, é definido pela deformação elástica e pelo atrito ali existente. A importância desta zona de calor está diretamente relacionada com o ângulo de folga da ferramenta, no caso, ângulos de folga pequenos, menores que 2°, ou quando ocorrer o desgaste de flanco.

Segundo SUTTER e RANC (2007), o aumento de temperatura nesta região também é determinante para a vida da ferramenta e para a qualidade, tolerância e a integridade da superfície acabada.

2.2 FERRO FUNDIDO

A fundição é uma das indústrias de manufatura mais antigas e, segundo historiadores, teve início entre 3500 e 4000 a.C. É definida por DOYLE (1978) como o processo em que se obtêm objetos, com uma forma final adequada, vazando metal em forma líquida ou viscosa em um recipiente denominado molde.

Com origem na Mesopotâmia e China, os fundidos de metal eram feitos de ligas de cobre, porém somente em 600 a.C., após a descoberta da redução do minério de ferro, é que se tem notícia do primeiro fundido de ferro.

Embora o processo de fundição dos ferros cinzentos e brancos seja bastante antigo, os desenvolvimentos mais significativos passaram a ocorrer a partir de 1772, quando Reamur descobriu a possibilidade de descarbonetar os ferros fundidos

brancos para provê-los de maior ductibilidade. Posteriormente, em 1830, Seth Boyden desenvolveu o tratamento térmico nestes fundidos brancos, de tal forma, que o carboneto de ferro se decompunha para grafita, originando o ferro fundido maleável de núcleo preto (americano). Entretanto, somente com a segunda guerra mundial o processamento dos ferros fundidos ganha impulso através do desenvolvimento do ferro dúctil por Morrogh, Millis e outros. Assim, a família dos fundidos de ferro, hoje conhecida e muito utilizada, data de menos de um século de utilização (LOPER JR, 2002).

2.2.1 Classificações dos Ferros Fundidos

Os ferros fundidos são ligas de ferro e carbono, assim como os aços, mas com teor de carbono variando entre 2,11 a 6,67% os quais, com a presença obrigatória de 1 a 3% de silício, formam uma liga ternária. Assim, o fenômeno de transformação da austenita, no resfriamento lento, é mais complexo do que nos aços, originando estruturas com grafita ou carbono livre (CHIAVERINI, 1986).

Dependendo da sua composição química, da taxa de resfriamento e do tratamento térmico aplicado ou não, o ferro fundido pode solidificar num sistema termodinamicamente metaestável Fe-Fe₃C ou num sistema estável Fe-Gr na forma de grafita (STEFANESCU, 1993).

Portanto, o carbono existente nos fundidos pode se apresentar de forma combinada, Fe₃C (cementita) ou em forma de carbono grafítico, classificando-os inicialmente em dois grandes grupos: os ferros fundidos brancos e os cinzentos, respectivamente.

Além de ferro, carbono e silício outros elementos estão presentes na constituição dos ferros fundidos. Tais elementos, como o manganês, enxofre, fósforo, entre outros, atuam diretamente na sua microestrutura e em suas propriedades, que, associados à velocidade de resfriamento empregada e a tratamentos térmicos contingenciados, permitem que se estenda a sua classificação COLPAERT (1974).

Assim, os ferros fundidos representam uma grande família de ligas ferrosas que são identificados como ferros fundidos brancos, cinzentos, mesclados, nodulares, maleáveis e ligados. Entre estes, os fundidos cinzentos, nodulares e

vermiculares destacam-se, em função de suas características, pela sua utilização quando da fabricação de componentes fundidos que exijam posterior usinagem, principalmente para aqueles com aplicação na indústria automobilística.

Suas propriedades estão diretamente relacionadas pela forma como se apresentam suas partículas de grafita, cujo aspecto pode ser visto na Fig.12, e pela estrutura final obtida, isto é, dependem da matriz metálica apresentada: ferrítica, perlítica, austenítica, martensítica e bainítica (NUNES, 2002 apud ROSARIO, 2006).

Para o ferro fundido cinzento, a grafita se organiza em flocos, ou lamelas, dispostas sem qualquer tipo de orientação e, no ferro nodular, ela se apresenta com uma configuração esferoidal denominada nódulos. Quanto ao fundido vermicular, ela se constitui em forma de vermes, daí a denominação desse tipo de ferro, com partículas alongadas, sem orientação, diferenciando-se, porém, do cinzento por serem mais curtas, densas e com bordas arredondadas. Esse tipo de grafita apresenta, ainda, uma morfologia intrincada e complexa como uma trama de corais que proporciona uma elevada adesão entre ela e a matriz solvente. (ABELE, 2002).

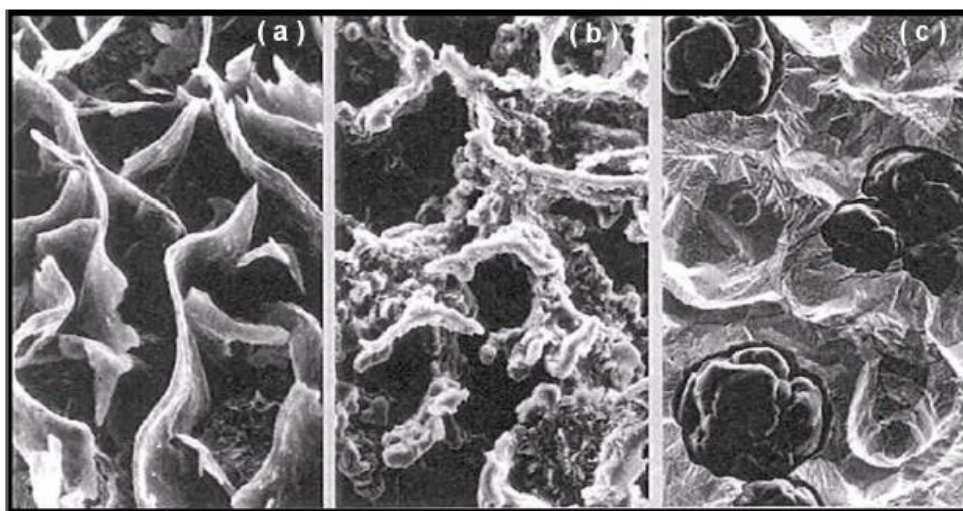


Figura 12: - Formas das grafitas dos ferros fundidos: (a) cinzentos, (b) vermiculares e (c) nodulares.

Fonte: ABELE (2002)

2.2.2 Propriedades dos Ferros Fundidos

As diferenças resultantes das variações nas grafitas são as principais responsáveis pelas distintas propriedades mecânicas de cada um destes fundidos. Conforme pode ser visto na Tab.1, a resistência à tração e ao módulo de elasticidade são maiores no nodular, intermediários no vermicular e menor no cinzento. Porém, quanto à condutividade térmica, os valores se invertem, sendo maior no cinzento e menor no nodular.

Tabela 1 – Propriedades médias dos ferros fundidos

Propriedade	Ferro Cinzento	Ferro Vermicular	Ferro Nodular
Resistência a Tração (Mpa)	250	450	750
Módulo de Elasticidade (Gpa)	105	145	160
Condutividade Térmica (M/mm ² K)	47	37	28

Fonte: DINIZ (2006)

DINIZ (2006) explica que, em se observando os valores das forças de corte e tempo de vida das ferramentas durante o processamento dos fundidos, a menor resistência mecânica e maior condutividade térmica do ferro cinzento tornam sua usinagem mais fácil que a do vermicular. HECK, (2007) confirmam que a usinabilidade do ferro fundido cinzento é maior que a do vermicular, especialmente quando a usinagem é feita em altas velocidades.

Outras características e propriedades também são citadas por diversos autores.

Segundo ABELE (2002), a superfície lisa, relacionada à grafita do ferro cinzento, facilita o aparecimento e o desenvolvimento de trincas, tornando esse tipo de fundido mais fraco e frágil, se comparado ao ferro vermicular, o qual, em função da sua morfologia, impede a clivagem, garantindo proporcionalmente uma maior dureza e tenacidade.

Para DAWSON (2001), o ferro fundido vermicular, se comparado ao nodular, possui melhores propriedades de amortecimento de vibrações e boa fundibilidade.

Quanto aos nodulares, a resistência mecânica, a tenacidade e a ductilidade são consideravelmente maiores que os demais DINIZ (2006).

Como se vê, para cada um dos tipos de fundidos têm-se estas e outras vantagens e desvantagens, todas muito particulares. Portanto, são essas diferenças – morfológicas, de composição química, dureza e demais propriedades mecânicas – que irão determinar as aplicações específicas para cada um desses tipos de fundidos.

2.2.3 Ferros Fundidos Cinzentos

Sua denominação está associada à coloração escura e acinzentada que esse fundido apresenta em uma superfície fraturada, cuja caracterização é devida à forma como se apresentam suas partículas de grafita.

O ferro fundido cinzento apresenta composição química com teores de carbono e silício que variam de 2,5 a 4% de carbono e de 1 a 3% de silício, respectivamente, sendo que o carbono pode ser retido em solução sólida na austenita, na temperatura eutética (STEFANESCU, 1993).

Componentes de liga suplementares estão normalmente presentes em sua fabricação com teores mais baixos, porém, não menos importantes, como o manganês, o fósforo, o enxofre, níquel, cobre entre outros. Segundo DURAND-CHARRE (2003), a microestrutura desejada varia conforme a composição da liga e da taxa de resfriamento aplicada, podendo ter como resultante uma matriz austenítica, ferrítica, ou mesmo uma mistura ferrítica e perlítica.

Portanto, a seleção da composição do ferro fundido cinzento que será utilizado em um determinado componente deve observar três requisitos estruturais básicos (STEFANESCU, 1993):

- A forma e a distribuição da grafita exigida;
- A estrutura dos carbonetos livres (resfriamento livre);
- A matriz exigida.

O controle dessas variáveis, que determinam distintas microestruturas, influencia diretamente as propriedades mecânicas do material, entre as quais se

destaca a dureza. Esta é estabelecida pela dureza da matriz metálica, que é constante, e pela dureza da grafita, a qual varia em função de suas dimensões e distribuição na estrutura. Os ensaios para sua determinação podem ser realizados pelo método Brinell ou, no caso de fundidos endurecidos ou temperados que apresentem dureza elevada, pelo método Rockwell (WHITE, 1993).

2.2.3.1 Classes dos ferros fundidos cinzentos

Os ferros fundidos cinzentos, de uma forma geral, são classificados segundo a resistência à tração e por sua composição química.

Pela norma ASTM – A48, os fundidos cinzentos são agrupados conforme Tab. 2, na qual os números das classes correspondem aos limites de resistência à tração e definem os percentuais mínimos e máximos dos elementos de liga (CHIAVERINI, 1986).

Tabela 2 - Classes de ferro fundido cinzento

Classe ASTM	Composição Química				
	C	Si	Mn	P	S
20	3,10 - 3,80	2,20 - 2,60	0,50 - 0,80	0,20 - 0,80	0,08 - 0,13
25	3,00 - 3,50	1,90 - 2,40	0,50 - 0,80	0,15 - 0,50	0,08 - 0,13
30	2,90 - 3,40	1,70 - 2,30	0,45 - 0,80	0,15 - 0,30	0,08 - 0,12
35	2,80 - 3,30	1,60 - 2,20	0,45 - 0,70	0,10 - 0,30	0,06 - 0,12
40	2,75 - 3,20	1,50 - 2,20	0,45 - 0,70	0,07 - 0,25	0,05 - 0,12
50	2,55 - 3,10	1,40 - 2,10	0,50 - 0,8	0,07 - 0,20	0,06 - 0,12
60	2,50 - 3,00	1,20 - 2,20	0,50 - 1,00	0,05 - 0,20	0,05 - 0,12

Fonte: ASTM - CHIAVERINI (1986)

Assim, para a classe ASTM 35 corresponde um ferro fundido cujo limite de resistência à tração é igual a 35.000 lb/pol² ou 24500 kgf/mm².

Para a norma SAE J431 as propriedades mecânicas consideradas são mais detalhadas e sua verificação é feita por ensaios em uma barra de teste com diâmetro de 30,5 mm, como pode ser observado na Tab. 3 e Tab. 4.

Tabela 3 - Classes de ferro fundido cinzento automotivos

Classe	Dureza (HB)	Carga transversa mínima (Kg)	Deflexão mínima (mm)	Resistência a tração mínima (Mpa)
G1800	Máx. 187	780	3,6	124
G2500	170 - 229	910	4,6	173
G3000	187 - 241	1000	5,1	207
G3500	207 - 255	1110	6,1	241
G4000	217 - 269	1180	6,9	276

Fonte: SAE J431 e WHITE (1993)

Tabela 4 - Composição química para as classes de ferro fundido cinzento automotivos

Classe	Composição Química				
	C	Mn	Si	P	S
G1800 (b)	3,40 - 3,70	0,50 - 0,80	2,80 - 2,30	0,15	0,15
G2500 (b)	3,20 - 3,50	0,60 - 0,90	2,40 - 2,00	0,12	0,15
G3000 (c)	3,10 - 3,40	0,60 - 0,90	2,30 - 1,90	0,1	0,15
G3500 (c)	3,00 - 3,30	0,60 - 0,90	2,20 - 1,80	0,08	0,15
G4000 (c)	3,00 - 3,30	0,70 - 1,00	2,10 - 1,80	0,07	0,15

(b) - Microestrutura ferrítica-perlita e (c) - Microestrutura perlítica

Fonte: SAE J431 e WHITE – (1993)

Segundo WHITE (1993), algumas propriedades dos ferros fundidos, apresentadas na Tab.5, se alteram conforme o limite de resistência à tração.

Tabela 5 - Relação das propriedades do ferro fundido, da classe ASTM 20 para ASTM 80 que se alteram conforme a variação do limite de resistência à tração.

Com o aumento do limite de resistência à tração, aumentam:	Com o aumento do limite de resistência à tração, diminuem:
- todas as resistências mecânicas, inclusive a resistência a altas temperaturas;	- a usinabilidade;
- facilidade para usinagem de acabamento;	- resistência ao choque térmico;
- o módulo de elasticidade;	- capacidade de amortecimento;
- a resistência ao desgaste.	- facilidade para ser fundido em moldes com seções finas.

Fonte: ASTM 20 e ASTM 80

2.2.3.2 Efeitos da microestrutura

A grande variedade de texturas e a forma de grafitização que podem ser obtidas na constituição dos ferros fundidos cinzentos garantem sua grande aceitação e crescimento na indústria de fundidos de metal.

Suas propriedades únicas são devidas ao ajuste adequado entre a forma da grafita e a respectiva matriz que a contém, tornando-o um dos materiais mais utilizados na indústria em função da sua fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, condutibilidade térmica, usinabilidade, capacidade de absorver vibrações e pela resistência ao desgaste e choque térmico moderado (DINIZ, 2006; DAVIS, 1994; CHIAVERINI, 1986).

No ferro fundido cinzento, o carbono que excede a solubilidade na austenita precipita como flocos de grafita. Embora sua microestrutura usual apresente a grafita dispersa através de uma matriz perlítica, o ferro fundido cinzento pode apresentar diferentes microestruturas e, ainda assim, manter a grafita, que é um lubrificante contínuo (EYRE, 1992; WHITE, 1993).

Durante sua fundição, as propriedades podem ser ressaltadas por meio do controle da nucleação, do crescimento dos flocos de grafita, cujo tamanho e distribuição são importantes, e do resfriamento (WHITE, 1993).

Segundo a norma ASTM A247, a grafita presente nos ferros fundidos cinzentos é classificada em cinco formas principais apresentadas na Fig.13 e, subsequentemente, em oito tamanhos diferentes, numerados de 1 a 8, correspondendo ao N°1 às dimensões maiores, com veios mais longos, e ao N°8 as dimensões menores (STEFANESCU, 1993; COLPAERT, 1974):

Grafita do tipo A: distribuição uniforme com orientação aleatória.

Grafita do tipo B: partículas vermiformes, circundadas por veios com disposição radial, dando ao conjunto aspecto de roseta.

Grafita do tipo C: veios grosseiros com orientação aleatória. Muito comum nos fundidos hipereutéticos.

Grafita do tipo D: interdendrítica de orientação aleatória. Os veios que preenchem o espaço interdendrítico são pequenos e curtos.

Grafita do tipo E: interdendrítica com orientação.

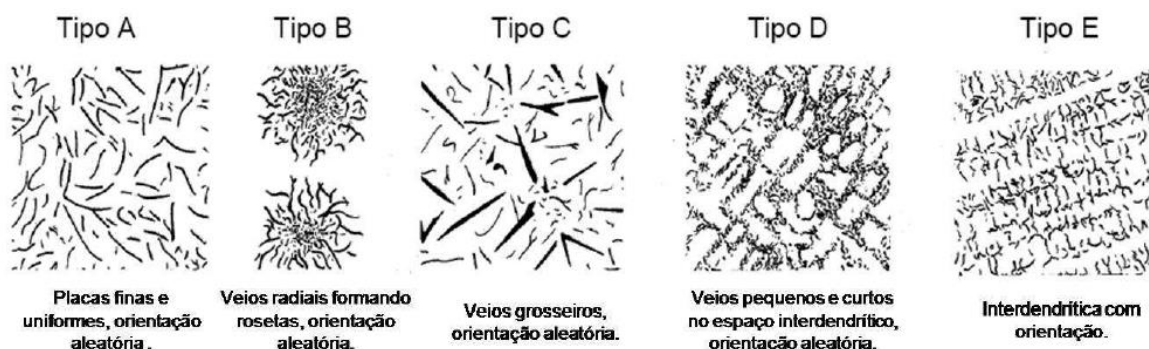


Figura 13: Classificação da grafita
Fonte: Norma ASTM A247 e STEFANESCU (1993)

Quanto à estrutura da matriz, os ferros fundidos cinzentos passam a receber, muitas vezes, designações similares às dos aços comuns, fundido com fundo hipoeutetóide, eutetóide e hipereutetóide, em função de suas texturas micrográficas serem muito semelhantes (COLPAERT, 1974).

Os principais constituintes que formam essas estruturas são descritos a seguir mostrando a sua influência nas características de usinabilidade dos ferros fundidos.

✓ Grafita: A excelente resistência ao desgaste do ferro fundido cinzento é atribuída à inclusão de flocos de grafita e pela formação de um filme de grafita na superfície de contato (RIahi e ALPAS, 2003). Segundo EYRE (1992), a grafita é um excelente lubrificante sólido e, desta forma, facilita o deslizamento, diminuindo o atrito e aumentando a resistência ao desgaste.

Também as descontinuidades nela existentes auxiliam na usinagem, proporcionando maior facilidade na quebra do cavaco o que resulta em uma usinagem mais livre com a formação de cavacos mais curtos. MARWANGA (1999) apud FERRER (2006) relatam que a grafita do tipo A melhora as propriedades mecânicas e favorece a usinabilidade, sendo que este acréscimo está diretamente relacionado a um maior índice de carbono equivalente. Ademais, a grafita do tipo A fornece maior resistência e alongamento que uma grafita do tipo D, a qual apresenta veios mais finos, originando uma maior concentração de tensões. Também, comparativamente, os valores de ductilidade da grafita A são maiores que os do tipo D.

✓ Ferrita: A principal característica da matriz ferrítica é ser praticamente isenta de carbono. Possui baixa resistência e dureza inferior aos demais constituintes, exceto a grafita. Os ferros fundidos dela constituídos são fáceis de usinar apresentando, normalmente, uma dureza menor que 150 HB. A baixa ductilidade da ferrita pode tornar o fundido muito aderente e facilitar a formação da aresta postiça de corte quando usinado em baixas velocidades (SANDVIK, 2003 apud FERRER, 2006).

✓ Perlita: Composta por lamelas alternadas de ferrita e cementita é um constituinte muito comum nos ferros fundidos. A espessura de suas lamelas está associada à velocidade do resfriamento sendo que, quando são finas, atribuem maior dureza e resistência ao fundido, exigindo, assim, velocidades de corte mais baixas. Este constituinte proporciona uma melhor combinação de usinabilidade e resistência ao desgaste deslizante (EYRE, 1992).

✓ **Martensita:** Obtida através de têmpera, a martensita, constituinte que responde pelas durezas mais elevadas presentes nos ferros fundidos, é de difícil usinagem, porém tem alta resistência à abrasão. Um revenimento posterior permite a obtenção de durezas próximas e até menores que a da perlita, tornando-a mais usinável. Conforme o revenimento pode-se obter uma estrutura de carbonetos coalescidos na ferrita com baixíssima dureza e com usinabilidade similar à da ferrita (BEZERRA, 2003).

✓ **Bainita:** O constituinte bainita ou acicular é obtido através de resfriamento isotérmico ou pela adição de elementos de liga apropriados. Possui dureza intermediária e é de difícil usinagem. É mais macio e resistente do que a martensita, porém mais duro e resistente do que a perlita (EYRE, 1992).

✓ **Austenita:** A austenita é o principal constituinte dos ferros fundidos cinzentos com elevados teores de níquel e também de alguns ferros dúcteis. Possui baixa dureza e usinabilidade, se comparada à ferrita (EYRE, 1992).

✓ **Esteadita:** Este constituinte, bastante duro, é formado pela presença do fósforo na composição do ferro fundido, se localizando nos contornos de grão. Tem baixo ponto de fusão, aproximadamente 982°C, e sua concentração deve ser mantida sempre inferior a 10%, utilizando-se, na liga, quantidades de fósforo inferiores a 1%. Em quantidades inferiores a 5% o efeito da esteadita na vida da ferramenta é desprezível (SHAW, 1984).

✓ **Carbonetos:** Os carbonetos são extremamente duros. Quando combinados com o ferro, na estrutura perlítica, apresentam boa usinabilidade em função do fácil cisalhamento. Porém, quando combinados com elementos de liga formando carbonetos livres na matriz, com valores de aproximadamente 5%, causam redução à vida útil da ferramenta. Também podem se concentrar na superfície das peças fundidas por causa do resfriamento mais rápido na periferia (SANDVIK, 2003 apud FERRER, 2006; EYRE, 1992).

Percebe-se, portanto, a grande variedade e alternativas de tipos e classes de ferros fundidos disponíveis para utilização em projetos. Ao mesmo tempo, cada variedade de microestrutura, tipo e tamanho de grafita, a forma como estão distribuídas, bem como suas durezas, podem afetar o processo de fabricação, facilitando ou dificultando a usinabilidade e, desta forma, afetar diretamente o custo efetivo de produção.

2.2.3.3 Usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos

A remoção do cavaco no processo de usinagem está sob a influência de diversos fatores diretamente relacionados à usinabilidade. Todos eles – esforços de corte, energia requerida para o processo, vida da ferramenta, integridade da superfície, temperatura de corte, características do cavaco, propriedades físicas ou mecânicas dos materiais, taxa de remoção do material e a produtividade – podem ser considerados uma medida da usinabilidade. Embora, a usinabilidade não seja uma propriedade exclusiva e particular do material, pois resulta da interação dos muitos fatores, é costumeiramente definida como uma grandeza que indica a facilidade ou a dificuldade de usiná-lo.

O principal inconveniente do ferro fundido cinzento é a falta de tenacidade, associada com a fragilidade e a morfologia da grafita, as quais facilitam a iniciação e a propagação de micro trincas (DURAND-CHARRE, 2003).

Os ferros fundidos atendem a quase todos os critérios de boa usinabilidade. Aspecto como baixa taxa de desgaste nas ferramentas, altas taxas de remoção de material, forças de corte e consumo de energia relativamente baixa, entre outros, são influenciados diretamente pela sua classe e composição (TRENT, 1991).

Segundo FERRARESI (1977), as variáveis que mais influenciam a usinabilidade dos materiais são a composição química, a microestrutura, a dureza e as suas propriedades mecânicas.

Na maioria das vezes, uma usinabilidade ótima está relacionada com a dureza e a ductilidade do material. A baixa ductilidade provoca o desenvolvimento de cavacos curtos, minimizando o atrito na superfície de saída da ferramenta e diminuindo a perda de energia no processo. Quanto à dureza, tem-se que a

elevação de seus valores e, conseqüentemente, os da resistência mecânica, afetam negativamente a usinabilidade (DINIZ, 2006).

A melhor maneira de avaliar a usinabilidade do ferro fundido é combinar o teste de dureza com uma avaliação da microestrutura, por causa de alguns microconstituintes que adversamente afetam a usinabilidade (BEZERRA, 2003).

O ferro fundido cinzento apresenta melhor usinabilidade quando comparado a outros tipos de ferro fundido. Como pode ser visto na Fig.14 a usinabilidade entre eles varia conforme as ligas, podendo apresentar diferenças significativas como no caso do ferro fundido branco.

A microestrutura do ferro fundido cinzento é o principal indicador de usinabilidade e os constituintes da matriz particularizam suas propriedades.

Segundo TRENT e WRIGHT (2000), a grande maioria dos fundidos cinzentos utilizados são dos tipos ferrítico ou perlítico. Aqueles, cuja composição fundamental é ferrita e grafita, possuem baixa resistência, porém maior usinabilidade e, assim, admitem taxas de remoção mais elevadas.

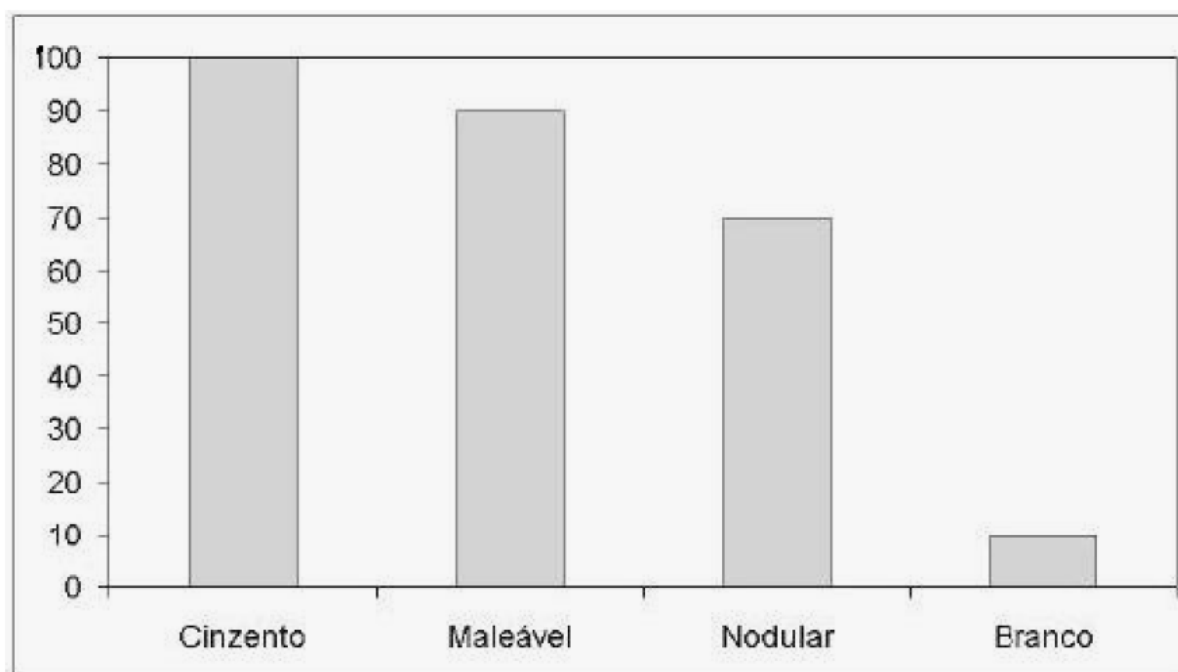


Figura 14: Usinabilidade dos ferros fundidos
Fonte: DINIZ (2006)

Quando a proporção de ferrita livre é reduzida, aumenta a proporção da perlita em matrizes perlita/ferrítica e, conseqüentemente, ocorre a diminuição do

espaçamento Inter lamelar da perlita. Assim, o refinamento da perlita, como pode ser visto na Tab.6, altera a usinabilidade do fundido, aumentando a dureza do material e o desgaste da ferramenta. O excesso de carboneto de ferro na matriz perlítica aumenta a resistência mecânica do fundido e diminui a sua usinabilidade (BEZERRA, 2003; HEATH, 1995).

Tabela 6 - Efeito da microestrutura sobre a usinabilidade quando se utilizam ferramentas de corte convencionais

Microestrutura da Matriz	Dureza Brinell	Índice de vida da ferramenta
Ferrita	120	20
50% de ferrita e 50 % de perlita	150	10
Perlita grossa	195	2
Perlita média	215	1,5
Perlita fina	218	1
Perlita fina com 50% de ferrita livre	240	0,3

Fonte: HEAT (1995)

A diminuição do conteúdo de ferrita e o aumento da porcentagem de perlita e cementita atuam diretamente sobre a ferramenta, diminuindo seu tempo de vida (MACHADO e SILVA, 1999; KENNAMETAL, 2003 apud FERRER, 2006).

A usinagem do ferro fundido cinzento se distingue em muito de outros materiais. Seu comportamento, durante o corte, no plano de cisalhamento é bastante peculiar com sua fratura, ocorrendo em intervalos de tempo muito pequenos, em função dos seus flocos de grafita, que, além de frágeis, podem ser largos e ocupar uma extensa área nos planos de cisalhamento. O cavaco resultante é composto por fragmentos finos, muito pequenos e com poucos milímetros de extensão. Essas características, principalmente sua descontinuidade, limitam seu contato com a superfície de saída da ferramenta, minimizando a força de corte e a potência consumida (TRENT E WRIGHT, 2000).

Para as temperaturas geradas durante o corte, as diferenças em relação ao aço são significativas. Como os cavacos gerados são curtos, as regiões de maior temperatura passam a ser aquelas próximas à aresta de corte e, não mais, à superfície de saída da ferramenta. Assim, devido às tensões de compressão e temperatura elevadas que ali se formam, a taxa de remoção do material fica limitada à deformação plástica da aresta de corte. (TRENT e WRIGHT, 2000).

Outra distinção refere-se às forças de avanço. Tal fato é constatado pelas diferentes quantidades de deformação plástica nos planos de cisalhamento, maiores nos secundários e menores no primário. Na zona de fluxo, os ferros fundidos cinzentos ferríticos com flocos de grafita e os ferros fundidos cinzentos perlíticos se

comportam como materiais plásticos e, diferentemente dos aços, muitas vezes, a força de avanço é maior do que a força de corte (TRENT E WRIGHT, 2000).

Durante a usinagem do ferro fundido cinzento pode ocorrer o surgimento de pequenas cavidades na superfície da peça trabalhada. Essas cavidades, distribuídas uniformemente, afetam principalmente o acabamento de sua superfície. Esse fenômeno, denominado open grain, ocorre pelo arrancamento da grafita e do próprio metal durante a usinagem da peça, sendo que sua magnitude é diretamente proporcional à quantidade de carbono existente. Normalmente ocorre quando são utilizadas condições de corte inadequadas, principalmente em operações de desbaste, nas quais valores excessivos de profundidade de corte são adotados (SANTOS e SALES, 2004).

Outro fenômeno relacionado à usinabilidade dos ferros fundidos é o side flow, um fluxo lateral de material observado na superfície da peça próximo às marcas de avanço da ferramenta. Neste caso, o material sofre deformação plástica no sentido oposto ao deslocamento da ferramenta e ocorre quando a espessura do cavaco é inferior a um valor mínimo, o qual é determinado em função do material da peça e da ferramenta, das condições de corte e da geometria da ferramenta (SANTOS e SALES, 2004).

2.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Uma ferramenta de corte é um dispositivo, que é utilizado na indústria para cortar uma variedade de materiais. Tipicamente, o seu propósito é o de fabricar metais que não podem ser facilmente cortados ou moldados de forma manual. Existem literalmente centenas de diferentes tipos de projetos para as ferramentas de corte em uma determinada máquina, o que resulta em uma classificação pelo tipo de corte que eles realizam. As classificações comuns incluem os tornos destinados a fazer o corte de rotação em torno de um eixo horizontal, sondagem e perfuração de máquinas para o corte de furos ou ranhuras na superfície, e outros dispositivos que cortam a peça projetando contornos e sulcos na superfície.

2.3.1 Materiais para Ferramentas de Corte

Para se determinar de forma criteriosa o material de uma ferramenta de corte, vários fatores devem ser considerados. A seleção se inicia pelo tipo do material que será usinado e perpassa pelo processo de usinagem e máquina operatriz escolhidos, prosseguindo com a geometria da ferramenta adotada e as condições de usinagem adequadas ao acabamento, ou ao desbaste. Também importante, entre estes e outros fatores, é avaliar a relação custo benefício para as diferentes opções de materiais disponíveis visto que, em função de suas características, dependendo da escolha, pode-se ampliar o tempo de vida da ferramenta e ou aumentar as velocidades de produção (DINIZ, 2006).

De uma forma geral, os materiais para ferramentas devem possuir determinadas propriedades consideradas básicas para sua utilização. Essas características, diretamente relacionadas aos diferentes mecanismos de desgaste e avarias vistos anteriormente, buscam ampliar o desempenho das ferramentas ampliando o seu tempo de vida útil.

Segundo STEMMER (2005) as exigências básicas para um material de corte são:

- Dureza a frio bem superior à da peça que será usinada;
- Dureza a quente elevada em função das altas temperaturas que ocorrem durante o processo de corte;
- Tenacidade para resistir aos esforços de corte e impactos a que será submetido;
- Resistência a abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

O homem sempre utilizou os mais variados materiais para obter ferramentas de corte adequadas às suas necessidades. Entretanto, os adventos da Revolução Industrial e da Segunda Guerra Mundial propuseram mudanças tecnológicas e novos valores econômicos que resultaram em severas alterações e demandas aos processos produtivos. Para atender a essas exigências, novos materiais e processos de fabricação foram desenvolvidos e testados até se tornarem comercialmente

viáveis e aptos a satisfazerem as necessidades impostas (TRENT, 1991; FERRAREZI, 1977). Embora um grande número de materiais esteja hoje disponibilizado, nenhum deles é capaz de apresentar características que atendam plenamente todas as exigências de uma ferramenta de corte, pois muitas das propriedades intrínsecas dos materiais são inversamente proporcionais. Assim, para cada trabalho específico é necessário avaliar quais as principais propriedades que o material deve contemplar (STEMMER, 2005).

Segundo ÁVILA (2003), a melhor ferramenta não é necessariamente aquela que apresenta o maior tempo de vida ou aquela que seja a mais barata, e sim a que mantém certa confiabilidade durante todo o processo.

De forma geral, os materiais para ferramentas, ainda hoje utilizados, podem ser agrupados segundo suas características químicas, e em ordem crescente de dureza a quente e de resistência ao desgaste por abrasão: aço rápido, metal duro, cermets, cerâmicas, CBN (nitreto de boro cúbico) e diamante (DINIZ, 2006).

2.3.2 Ferramentas de Metal Duro

Esse material, também conhecido como carboneto de tungstênio, é um dos materiais mais utilizados na fabricação de ferramentas de corte. Tem por base o tungstênio, que é o metal de maior ponto de fusão, 3387°C, com mais alta resistência à tração de 4200 N/m² e de menor coeficiente de dilatação térmica, $4,4 \times 10^{-6}$ mm/mm°C (STEMMER, 2005).

Sua utilização só foi possível após o desenvolvimento do processo de sinterização, conhecido como metalurgia do pó, no qual, essencialmente, dois constituintes tomam parte, o carboneto de tungstênio e um elemento aglomerante, este último normalmente o cobalto.

Para sua obtenção, o carboneto de tungstênio é dividido em pequenas partículas que variam geralmente entre 1 a 10 µm e, posteriormente, misturado com pó muito puro e fino de cobalto. Após a mistura, sofre compressão em forma de briquetes ou pastilhas a uma pressão da ordem de 400 MPa. Então, são levadas a um forno onde, aquecidas a temperaturas próximas a 900°C, são pré-sinterizadas em uma atmosfera de hidrogênio que proporcionará a consistência adequada a sua utilização. Resfriadas as pastilhas, elas são cortadas e ou usinadas às dimensões

definitivas, visto que ainda não possuem dureza significativa. Finalmente são sinterizadas em forno sob vácuo ou em atmosfera de hidrogênio a temperaturas que variam de 1400 a 1600°C aproximadamente. Após resfriamento, caso necessário, sofrem retificação para ajuste das tolerâncias dimensionais.

Desse processo, resultam ferramentas com características de altíssima resistência à compressão, dureza a frio e a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, coeficiente de dilatação metade ao do aço e elevada condutibilidade térmica.

Hoje os metais duros possuem também em sua composição os carbonetos de titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC), que contribuem para o aumento da dureza, resistência e tenacidade.

Diferentes tipos de metal duro são comercializados e, conforme sua aplicação, a norma ISO classifica-os em três grupos designados por P, K e M. Os da classe P são constituídos de elevados teores de TiC e TaC sendo indicados para a usinagem de metais e ligas dúcteis que produzem cavacos contínuos. Os da classe K, primeiros a serem desenvolvidos, possuem baixos teores de TiC, TaC e NbC e são utilizados na usinagem de aços temperados, ferros fundidos e materiais não metálicos que apresentam cavaco curto. Quanto aos da classe M, estes possuem propriedades intermediárias e podem ser utilizados na usinagem de metais e ligas ferrosas que originam tanto cavacos longos como curtos, sendo hoje usualmente empregados na usinagem do aço inoxidável.

As ferramentas de metal duro foram disponibilizadas comercialmente em 1930 reestruturando o setor produtivo, de forma análoga às ferramentas de aço rápido em 1900. Devido às suas propriedades distintas, conforme Tab.7, foi possível sua utilização de forma mais eficiente, possibilitando o corte de muitos metais e ligas em velocidades mais elevadas e ainda assim garantir uma sobrevida superior.

Tabela 7 - Principais propriedades da ferramenta de metal duro K10 (H1P) comparadas às ferramentas de aço rápido e cerâmica.

Classe da ferramenta	Aço rápido (M2)	Metal Duro K10 (H1P)	Cerâmica Al ₂ O ₃
Composição típica (%)	(3,75 - 4,25) Cr - (1,6 - 2,7)W - (1 - 4) Mo - (4,75 - 1,25) Co ⁽¹⁾	86 WC - 6 Co - 0,6 Ta - 0,4 NbC - 7TiC ⁽⁴⁾	(90 - 95) Al ₂ O ₃ - (5 - 7) ZrO ₂ ⁽³⁾
Dureza (HV) (25°C)	850 ⁽¹⁾	1400 - 1800 ⁽⁴⁾	2200 ⁽³⁾
Resistência a ruptura transversal (Mpa)	4318 ⁽¹⁾	1472 ⁽⁴⁾	586 ⁽³⁾
Módulo de elasticidade (Gpa)	232 - 273 ⁽¹⁾	390 - 618 ⁽⁴⁾	390 ⁽²⁾
Condutividade Térmica (W/mK)	37 ⁽⁵⁾	85 ⁽⁴⁾	12 - 18 ⁽⁵⁾
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /K)	11 ⁽¹⁾	5,0 ⁽⁴⁾	9,0 ⁽³⁾
Custo Relativo (US\$)	0,50 ⁽³⁾	5,25 ⁽³⁾	12,00 ⁽³⁾
⁽¹⁾ Ferrarezi, 1977, ⁽²⁾ Shaw, 1984, ⁽³⁾ Ávila e Abrão, 1999, ⁽⁴⁾ Sandvik, 2000 e ⁽⁵⁾ Machado e Silva			

Fonte: ÁVILA (2003)

2.3.3 Revestimentos para Ferramentas de Corte

As condições de usinagem que aumentam a eficiência no processo produtivo são, essencialmente, o aumento da velocidade, do avanço e da profundidade de corte. Entretanto, segundo STEMMER (2005), o custo de produção também está relacionado à usinabilidade do material e a todos os fatores que a afetam.

A taxa de remoção de material está diretamente relacionada aos fatores tribológicos existentes no processo, os quais irão determinar a velocidade e o maior ou menor volume de material, por tempo, a ser extraído. Embora o custo de uma ferramenta seja proporcionalmente pequeno em relação ao custo total do produto, quando se diminuem os tempos de processamento do material, aumenta-se o desgaste, e a interrupção da operação para sua troca ou reafiação passa a ser uma parcela significativa do custo total de produção (YUHARA, 2000).

Assim, a diminuição dos custos ultrapassa a simples decisão de se aumentar a velocidade, o avanço e a profundidade de corte da máquina operatriz, pois com o aumento indiscriminado dessas variáveis altera-se a qualidade do acabamento superficial e amplia-se, consideravelmente, o desgaste da ferramenta.

A temperatura máxima na superfície de saída ou na superfície da ferramenta é que irá determinar a máxima taxa de remoção do material. Portanto, a otimização das condições de corte, especialmente a velocidade de corte, irá depender da resistência da ferramenta à temperatura gerada (KOMANDURI e HOU, 2001).

Quando estão sendo trabalhados materiais mais duros como ferros fundidos, aços endurecidos e ligas especiais a dureza a quente e a estabilidade química do material da ferramenta limitam a expansão dos valores que poderiam ser adotados para os parâmetros de corte. Conseqüentemente, é necessário que esses materiais possuam propriedades mecânicas, térmicas e químicas suficientemente adequadas para suportar os fatores tribológicos presentes. Embora muito se tenha avançado no desenvolvimento de novos processos e materiais, não existe nenhum material que conjugue todas as propriedades ideais para o corte, o que motivou o desenvolvimento de técnicas de revestimentos para ferramentas por volta da década de 70.

As propriedades das ferramentas de corte podem ser melhoradas com a introdução de uma ou mais camadas finas e duras de material cerâmico como, por exemplo, o carboneto de titânio (TiC), o nitreto de titânio (TiN) e o óxido de alumínio

(Al₂O₃). Desta forma, busca-se combinar as diferentes propriedades das cerâmicas com as dos materiais de ferramentas tradicionais (SARWAR, 1997; CHO e KOMVOPOULOS, 1997). Através do uso de revestimentos, espera-se a redução do atrito entre as superfícies da ferramenta e da peça usinada, proteção térmica, redução das forças de corte, proteção contra a difusão e resistência a altas temperaturas (TÖNSHOFF e MOHLFELD, 1997; SCHINTLMEISTER, 1984).

2.3.4 Processos Para Revestimentos

O substrato da ferramenta e o material da peça em processamento são separados pelo revestimento. Enquanto o material do substrato dá forma, resistência e rigidez à ferramenta o revestimento possibilita a execução do processamento sem fluido de corte. Na interface ferramenta e peça a principal preocupação é garantir uma boa adesão do revestimento ao substrato da ferramenta. Essa adesividade depende das características químicas do substrato e das tensões térmicas geradas na interface, em que as interações químicas, mecânicas e tribológicas são sempre indesejáveis (TÖNSHOFF e MOHLFELD, 1997).

A finalidade principal dos revestimentos é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça. O núcleo da ferramenta permanece com as características do material antes do revestimento e, assim, torna-se possível conjugar, no mesmo material, características até então inconciliáveis, como por exemplo, tenacidade com resistência ao desgaste e dureza a quente (DINIZ, 2006).

Os processos de revestimentos mais utilizados atualmente para a cobertura de ferramentas de corte são o CVD - Deposição Química de Vapor – e o PVD – Deposição Física de Vapor. O constante aprimoramento desses processos determina suas propriedades mecânicas, composição química e estrutura, permitindo selecionar o revestimento adequado à aplicação desejada (DOBRZANSKI, 2006; RUPPI e HALVARSSON, 1999).

2.3.5 Identificação do Desgaste

Escolher corretamente a ferramenta que será utilizada em um processo produtivo é muito importante para minimizar os custos de produção. Entretanto também é fundamental prever o fim de sua vida útil, pois qualquer avaria ou desgaste excessivo pode prejudicar significativamente o planejamento produtivo, a integridade e a rugosidade da superfície da peça em processamento e as suas tolerâncias dimensionais (CHILDS, 2000).

Os desgastes em uma ferramenta podem ocorrer de três formas básicas, habitualmente designadas por: desgaste de cratera, desgaste de flanco e entalhe. Conforme mostrado na Fig. 15, o desgaste de cratera ocorre na superfície de saída, o desgaste de flanco, na superfície de folga, sendo que o entalhe ocorre, normalmente, junto às arestas de corte.

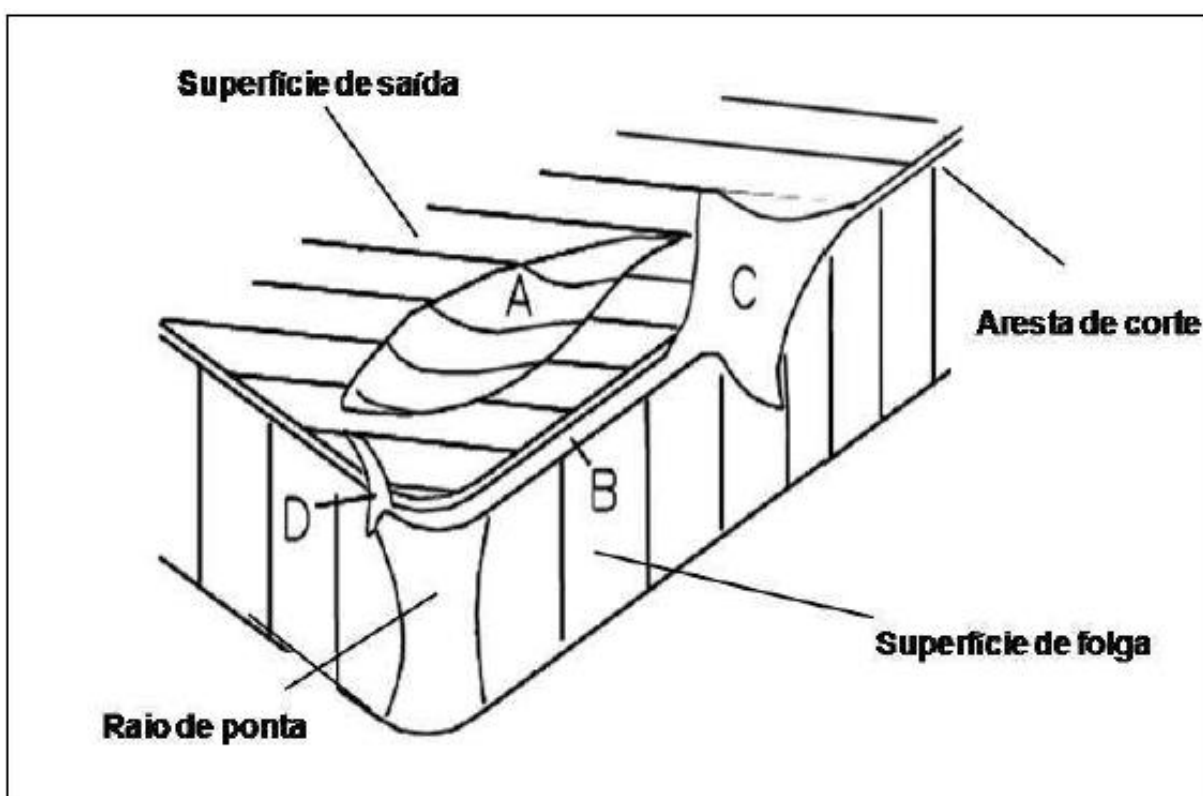


Figura 15: Avarias e desgastes que ocorrem em ferramenta de corte: (a) cratera, (b) flanco e (c,d) entalhe
Fonte: SCHAW (1984)

A vida útil da ferramenta está relacionada às ações desses desgastes, os quais podem atuar de forma isolada ou conjunta, alterando a condição e a qualidade do corte e provocando inclusive o deslocamento da aresta de corte (STEMMER, 2005).

Buscando um melhor entendimento, MELO, (2006) e CHILDS, (2000) diferenciam desgaste e avarias, em função da sua dimensão e progressão. Para eles, o desgaste é a perda de material pela ruptura de micro asperezas ou partículas da superfície da ferramenta, quando em contato com o material da peça usinada. Por outro lado, classificam de avaria ou quebra o tipo de desgaste que acontece de forma rápida e inesperada em uma escala de grandeza bem maior. Ou seja, o volume de material deslocado ou removido da ferramenta é proporcionalmente bem maior que no desgaste.

Assim, para todas estas e outras ocorrências como lascamento, quebras, trincas ou sulcos existem diferentes mecanismos, térmicos e mecânicos, que atuam com maior ou menor intensidade, alterando significativamente a durabilidade da ferramenta e a usinabilidade da peça.

A forma e a frequência com que as avarias e os desgastes ocorrem se alteram de maneira diversificada. Em função disso, quando se busca aumentar a vida útil das ferramentas e determinar o seu fim de vida é indispensável conhecer as causas de seu desgaste e os fatores que modificam as condições de usinabilidade dos materiais. Estes fatores são variáveis dependentes da máquina, da ferramenta, da peça, do fluido de corte e do processo utilizados, comumente designados de condições de corte.

2.3.5.1 Mecanismos causadores de avarias e desgastes

A perda da capacidade de corte de uma ferramenta pode estar associada a um ou mais mecanismos de desgaste, os quais, em função da temperatura de corte, podem ser classificados, como mostra a Fig. 16, em: adesão, avarias e desgastes térmicos e avarias e desgastes mecânicos (CHILDS, 2000).

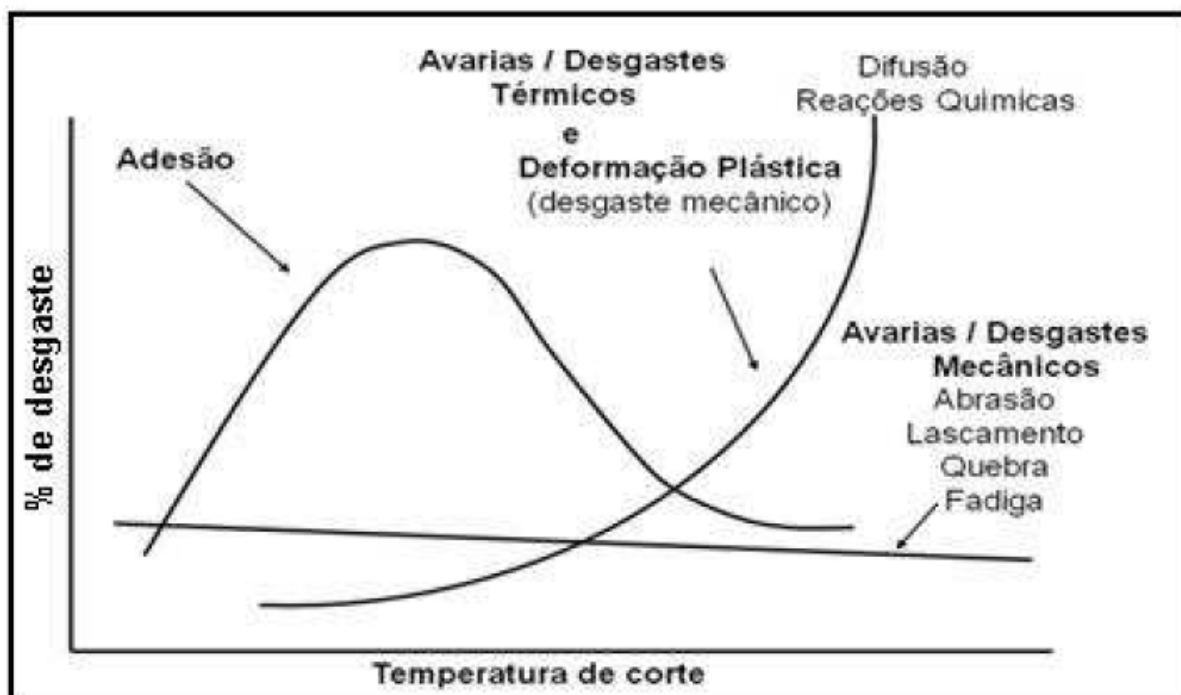


Figura 16: Mecanismos de Avarias e Temperaturas de Corte
 Fonte: Adaptado de CHILDS (2000)

Os mecanismos de desgaste mecânico se subdividem em abrasão, lascamento, quebra fadiga e deformação plástica, enquanto os mecanismos térmicos incluem a difusão e as reações químicas.

Na análise do gráfico desenvolvido por CHILDS (2000) podemos observar que os mecanismos térmicos, a adesão e a deformação plástica são os mais influenciáveis pelo aumento da temperatura e, por consequência, ocasionam um maior desgaste da ferramenta.

A difusão e as reações químicas, embora não sejam diretamente responsáveis pelos desgastes e avarias, são mecanismos importantes na aceleração dos mesmos, tendo sua atuação intensificada na presença de temperaturas mais elevadas.

Como a temperatura de trabalho gerada no processo varia em função dos materiais da peça e ferramenta empregados, item I.1.3 (p. 12), de suas formas, dimensões e das condições de usinagem utilizadas, a evolução das curvas dos mecanismos de desgaste se alteram quantitativamente devendo ser avaliadas caso a caso em função das inúmeras e diferentes possibilidades de processamento.

2.3.5.2 Mecanismo de desgaste por adesão (Attrition)

O contato permanente entre os materiais da peça e a ferramenta, durante o processo de corte, gera as condições de temperatura e pressão necessárias e suficientes para a formação de uma camada, formada por partículas de ambas as superfícies, que se soldam à superfície da ferramenta.

Essa camada se forma pela condição do material do cavaco que, por ter sido recentemente arrancado, mantém sua superfície inferior quimicamente muito ativa em um estado propício para aderir à ferramenta (STEMMER, 2005).

Portanto, essa aderência se conforma por partículas encruadas e duras tornando-se muito resistente, alterando significativamente as condições de corte e causando uma descontinuidade no fluxo do cavaco. Com a continuidade do processo, o atrito aumenta progressivamente até que ocorra a ruptura em um dos materiais ou na própria solda. Assim, partículas microscópicas migram de forma intermitente do material da ferramenta para o cavaco ou peça, e vice versa, prejudicando o acabamento e causando o desgaste imediato na superfície de folga e de saída da ferramenta, ou posteriormente, quando as partículas aderidas ao cavaco deslizarem sobre sua superfície de saída desgastando-as por abrasão. Esse tipo de mecanismo é mais frequente em baixas velocidades de corte sendo normalmente observado na formação da aresta postiça de corte (MELO 2006; DINIZ, 2006; e STEMMER, 2005).

O aumento da velocidade de corte gera pressões e temperaturas crescentes resultando maior adesão e desgaste da ferramenta. Entretanto, conforme pôde ser observado na Fig. 17, a partir de um determinado valor de temperatura alcançado, o desgaste passa a diminuir gradualmente. Esse fenômeno deve-se ao fato de que as temperaturas alcançadas em velocidades de corte maiores permitem o recozimento, ou seja, a recristalização das partículas aderidas provenientes do cavaco. Com durezas menores, essas partículas são arrastadas pelo cavaco, evitando assim a formação da aresta postiça de corte. Como o material da ferramenta é mais resistente ao calor, o inserto não é afetado, deixando então de existir as condições para formação da adesão (FERRARESI, 1977; STEMMER, 2005).

2.3.5.3 Trincas

As trincas podem ter sua origem na variação de esforços mecânicos ou pela variação de temperatura. Observando, na Fig. 17, sua trajetória em relação à aresta de corte, podemos definir sua procedência. Quando surgem paralelas, a aresta de corte tem origem mecânica, caso contrário, se perpendiculares, tem origem térmica (DINIZ, 2006).

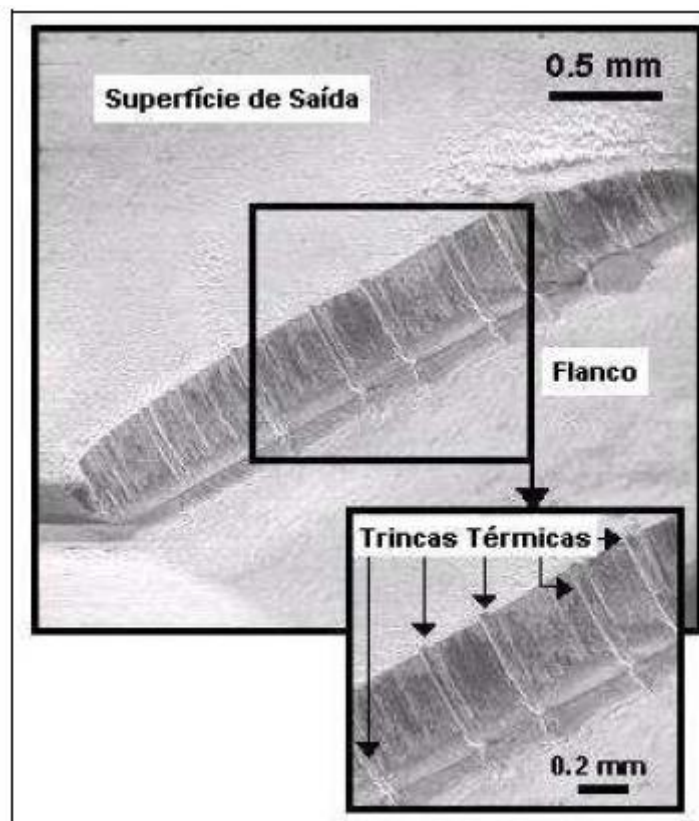


Figura 17: Trincas térmicas na aresta de corte de uma ferramenta
 Fonte: KATO (2002)

2.3.5.4 Mecanismo de desgaste por abrasão

Esse tipo de desgaste ocorre através da remoção de pequenas partículas do material da ferramenta. Os efeitos da abrasão podem ser vistos na Fig. 18 e acontecem pelo escorregamento de outras partículas, normalmente mais duras e abrasivas, provenientes da peça que está sendo processadas ou até mesmo, oriundas da própria ferramenta. Essas partículas, submetidas a altas pressões

decorrentes do processo, atuam sobre o material da ferramenta, o qual tem sua dureza reduzida em função da temperatura de corte causando o desgaste (CHILDS, 2000).

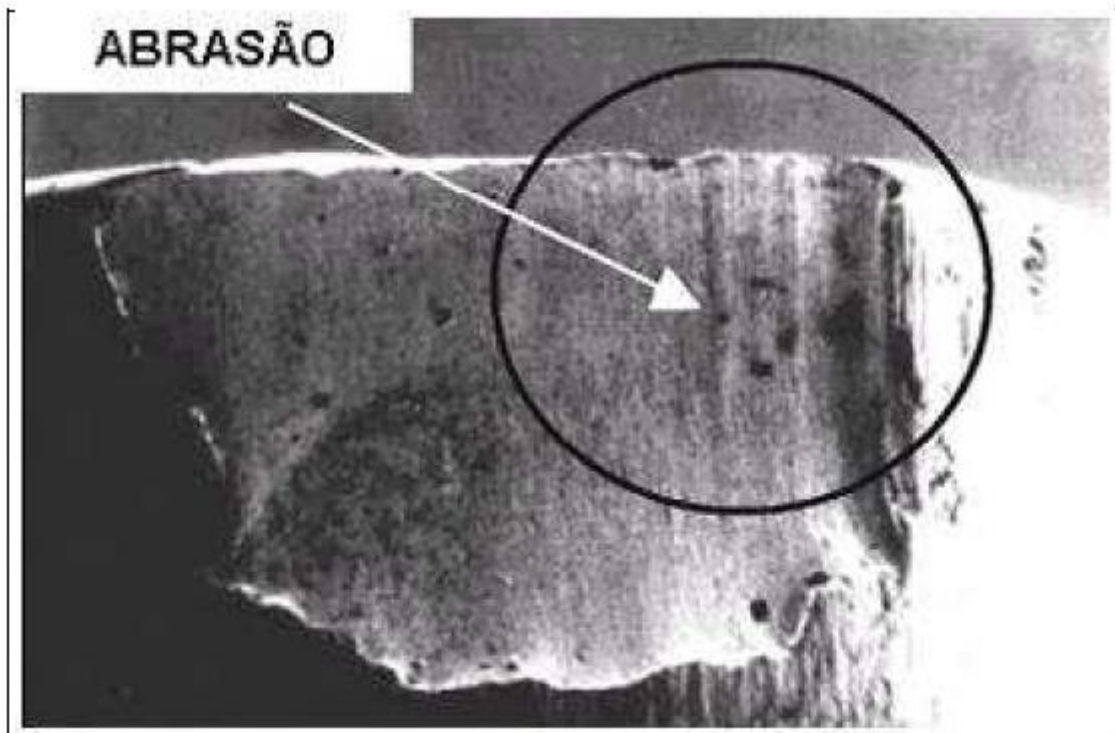


Figura 18: Desgaste por abrasão com detalhamento dos sulcos formados por este tipo de mecanismo
Fonte: CORRÊA (2005)

2.3.5.5 Entalhe e lascamento (Chipping)

O entalhe ou lascamento, como visto na Fig. 19, é um tipo de avaria que ocorre de forma rápida e geralmente de forma prematura, em que um apreciável volume de partículas é retirado de uma só vez. Pode surgir quando se utilizam ferramentas com geometria inadequada, ou quando a escolha do processo, suas condições e material utilizado geram solicitações mecânicas e térmicas aquém do esperado (DINIZ, 2006; STEMMER, 2005).

Segundo CHILDS (2000), o desgaste de entalhe pode, ocasionalmente, ser capaz de prevalecer sobre o desgaste de cratera e de flanco.

Esse tipo de avaria raramente acontece em processos de corte contínuo, diferente do que ocorre com o corte interrompido como o fresamento, em que os impactos mecânicos cíclicos e a fadiga favorecem a sua ocorrência (MELO 2006; TRENT, 1991).

A continuidade desse fenômeno pode provocar a quebra da ferramenta e aumento nos custos de fabricação, como: tempo improdutivo, quebra do porta-ferramenta, perda da peça usinada, entre outros.

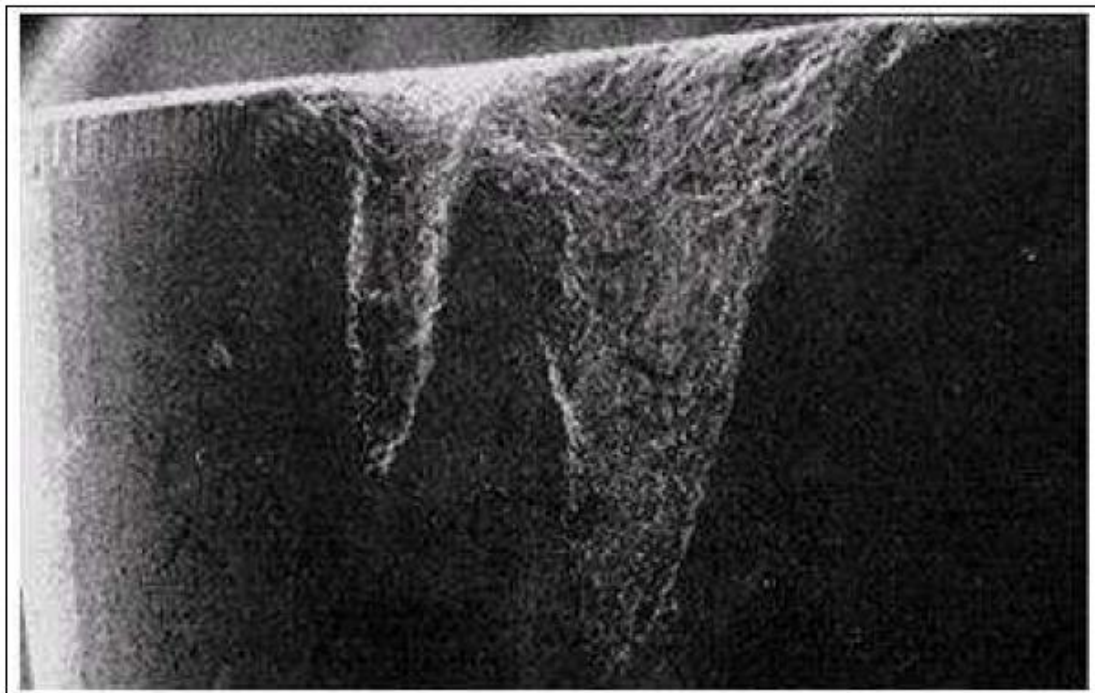


Figura 19: Desgaste de entalhe no flanco da ferramenta
Fonte: KUMAR (2006)

2.3.5.6 Quebra

Quebra é o tipo de avaria que ocorre inesperadamente, antes mesmo da ferramenta apresentar desgaste significativo, seja ele de qualquer tipo. Normalmente tem origem em grandes forças de usinagem que surgem em função de uma geometria de ferramenta inadequada, ou quando submetidas a cargas excessivas. Da mesma forma, a utilização de material de corte muito quebradiço ou a parada instantânea do movimento de corte podem causar a quebra da ferramenta.

Em condições de corte interrompido, como no fresamento, a quebra pode acontecer em função de fadiga mecânica e quando se tem alteração repentina da tensão na aresta de corte. (MELO, 2006; TRENT, 1991).

Igualmente importante é observar e evitar, quando da geração de cavaco contínuo, o entrelaçamento do mesmo junto à ferramenta, que, juntamente com as demais causas já citadas, podem levar não só à quebra da ferramenta, mas também à perda do porta-ferramenta e ou da peça em execução (DINIZ, 2006).

2.3.5.7 Desgaste por deformação plástica

A deformação plástica está diretamente relacionada com os materiais da ferramenta e de trabalho utilizados, com os parâmetros de corte e com a geometria da ferramenta adotada.

Em função dessas condições, das altas pressões desenvolvidas na área de contato da ferramenta com o material usinado e das altas temperaturas atingidas no local, a ferramenta está propensa a sofrer significativas deformações.

Essas deformações são mais frequentes quando se empregam velocidades de corte e avanços elevados, sendo que afetam as ferramentas de aço rápido em maior proporção que as de metal duro em função das respectivas durezas a quente desses materiais (TRENT E WRIGHT, 2000).

Segundo vários autores (MELLO, 2006; DINIZ, 2006, TRENT, 1991), a deformação plástica que ocorre na ponta da ferramenta, conforme ilustrado na Fig. 20 e Fig. 21, é resultante das pressões e altas temperaturas existentes na interface ferramenta/peça, em que as forças de compressão atuantes atingem seu ponto de máxima pressão na própria aresta de corte ou bem próximo dela.

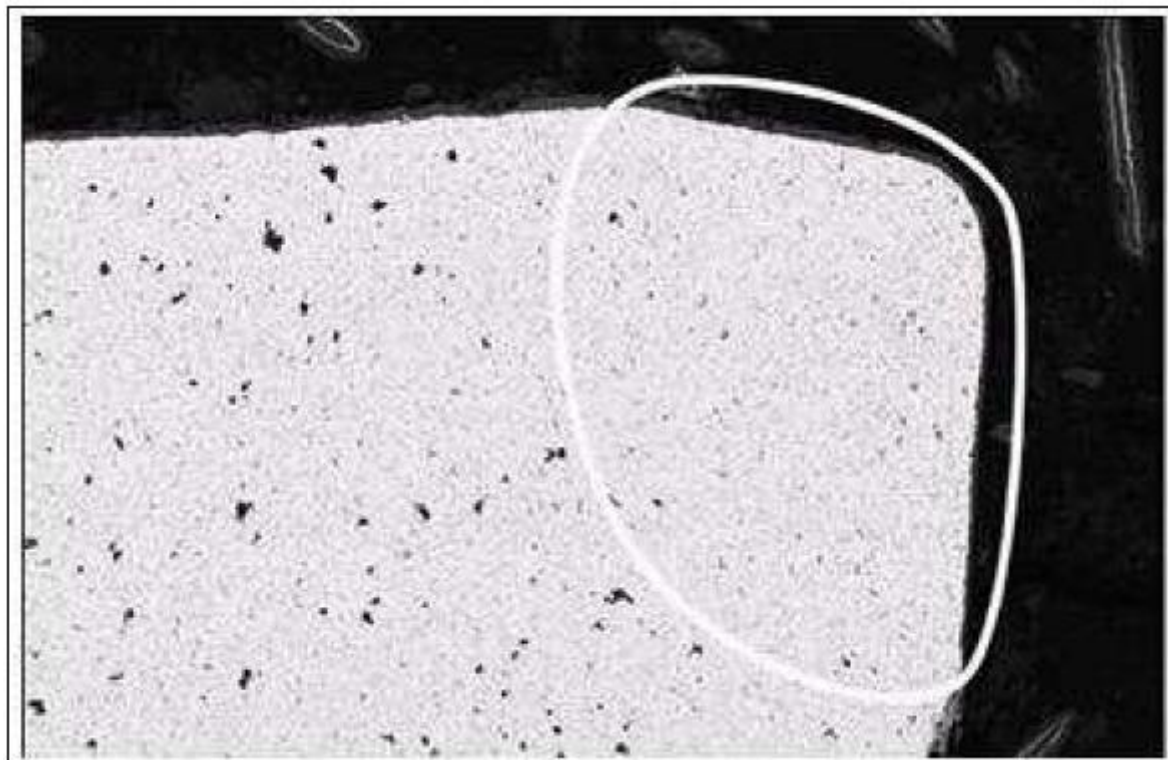


Figura 20: Micrografia de uma ferramenta de metal duro WC-TaC-Co, em que ocorreu deformação plástica
Fonte: ÖSTBERG (2006)

As ferramentas de WC-Co sempre se caracterizam pela sua elevada capacidade de resistência às altas cargas e temperaturas. Assim, na busca por ganhos em produtividade, foram desenvolvidos revestimentos, para essas ferramentas, que apresentam capacidade de alta resistência ao desgaste abrasivo, de forma a permitir o trabalho em condições mais severas, principalmente, com o aumento das velocidades de corte. Assim, é muito frequente ocorrer deformação plástica nesse tipo de ferramenta antes de qualquer outro tipo de desgaste, inclusive em proporções um pouco maiores que o desgaste abrasivo na superfície, podendo, dessa forma, determinar o seu tempo de vida (ÖSTBERG, 2006).

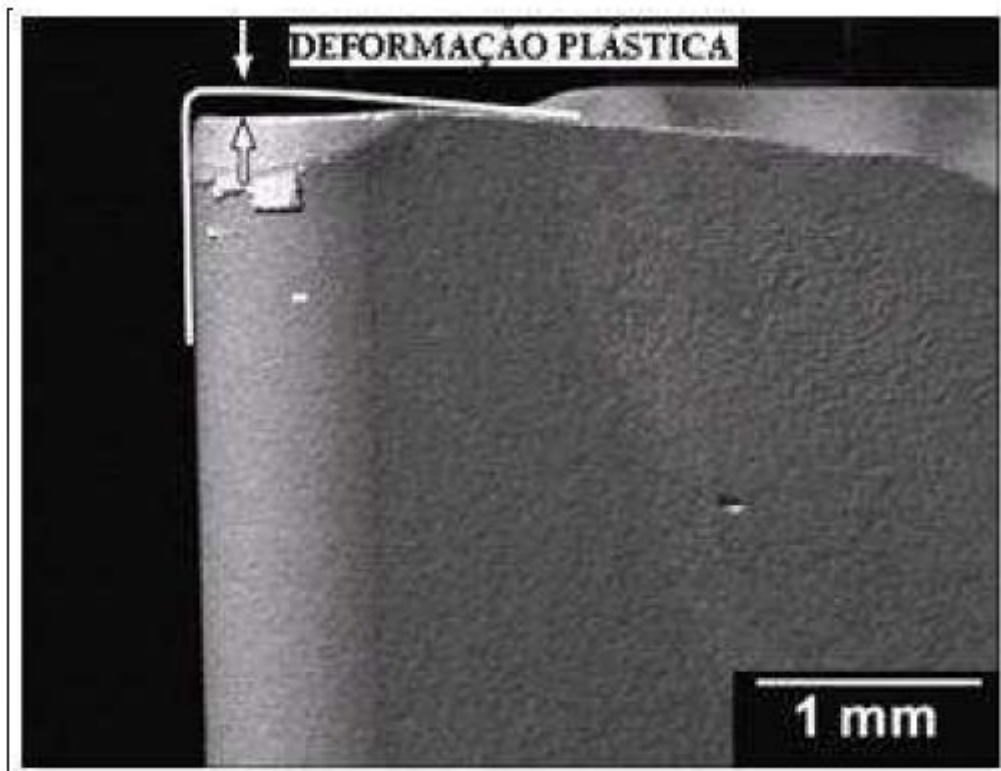


Figura 21: Micrografia de uma ferramenta de metal duro WC-Co deformada. A linha branca indica a forma original da ferramenta
Fonte: ÖSTBERG (2006)

Essa deformação, a princípio, não é um mecanismo de desgaste, porém resulta em um aumento das forças atuantes na ferramenta que, conseqüentemente, aceleram o seu desgaste (TRENT, 1991).

Mantidas as condições de corte, a deformação e o desgaste evoluem rapidamente, o que prejudica o acabamento requerido, podendo, inclusive, levar à quebra da aresta de corte (DINIZ, 2006 e CHILDS, 2000).

Outro mecanismo, relatado por TRENT (1991), é a deformação plástica superficial por cisalhamento, que resulta no desgaste de cratera. Essa deformação que se desenvolve na superfície de saída da ferramenta ocorre na região de maior amplitude térmica, conforme mostrada na Fig. 22. A condição de cisalhamento do material da ferramenta é função de sua resistência à deformação a quente. Quando atingida sua temperatura limite, o material usinado, sujeito às forças de compressão e aderido à superfície de saída da ferramenta, cisalha na direção da zona de fluxo, sendo que, em função da sua velocidade de deformação, acaba também por cisalhar o material da ferramenta.

À medida que o material da ferramenta é cisalhado, nessa região, ele se acumula na parte posterior da cratera formando uma crista. Segundo TRENT (1991), esse mecanismo de desgaste ocorre rapidamente, podendo atingir profundidades que acabam por enfraquecer a aresta de corte e levar a sua fratura.

Assim, quando da usinagem de materiais com alto ponto de fusão, em função do material da ferramenta utilizada, pode haver a necessidade de se trabalhar em condições de corte menos severas, restringindo os valores da velocidade de corte e avanço adotados.

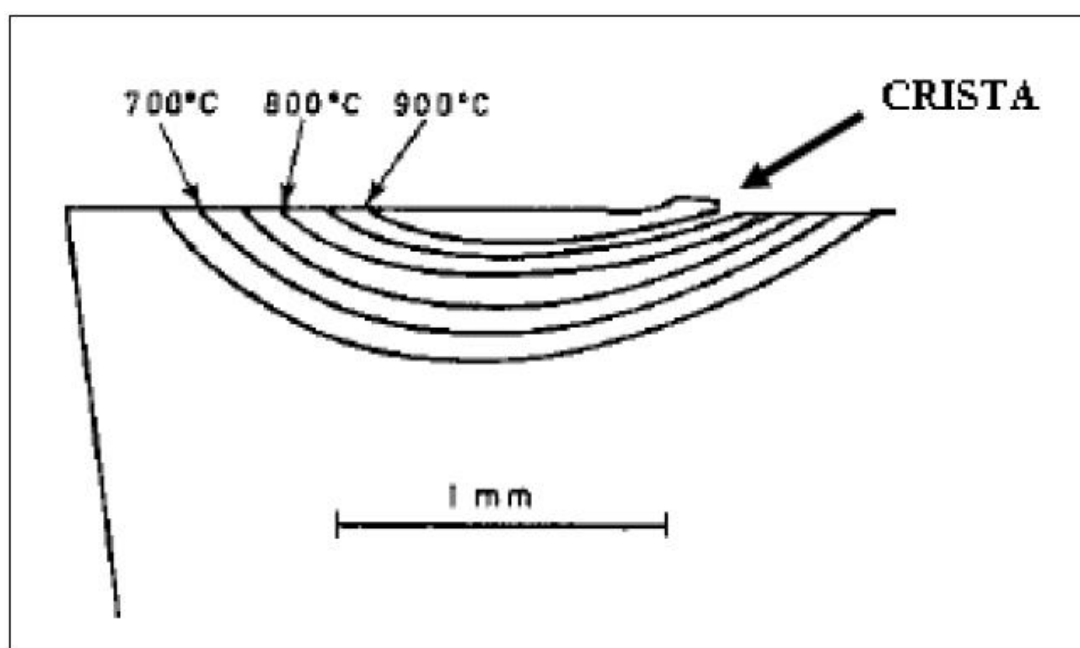


Figura 22: Curvas de temperatura oriundas de mudanças estruturais em ferramentas de aço rápido durante usinagem de aço de baixo carbono
 Fonte: TRENT (1991)

2.3.5.8 Desgaste por difusão

Esse mecanismo de desgaste costuma ocorrer em temperaturas mais elevadas, em que, microscopicamente, pode-se perceber a transferência de átomos entre os materiais do cavaco-ferramenta-cavaco, na superfície de saída, e peça-ferramenta-peça, na superfície de folga da ferramenta.

O desgaste por difusão é mais significativo para ferramentas de metal duro (WC-Co), pois, além de sua dependência às altas temperaturas, está também

vinculado à solubilidade dos elementos presentes na zona de fluxo. A taxa de desgaste ocasionada por este mecanismo é ampliada com o aumento da velocidade de corte e do avanço (TRENT e WRIGHT, 2000).

Segundo MELO (2006) e SANTOS e SALES (2004), o mecanismo de difusão é o principal responsável pelo desgaste de cratera nas ferramentas e apresenta como característica um aspecto polido, como pode ser visto na Fig. 23, em função do seu processamento ocorrer a nível atômico.

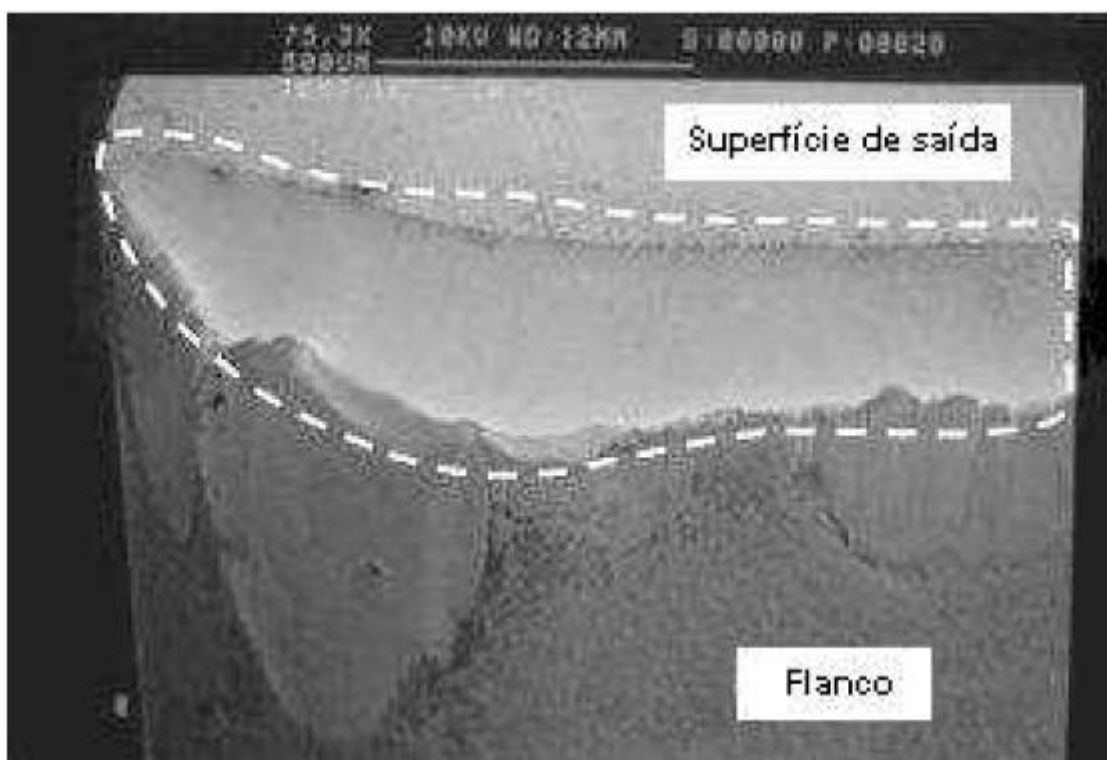


Figura 23: – Desgaste de cratera devido ao mecanismo de difusão
Fonte: MELO (2006)

2.3.5.9 Desgaste por reações químicas

Esse tipo de mecanismo térmico é um dos principais responsáveis pelo desgaste de entalhe. Sua origem está na formação de compostos químicos através da reação dos materiais da peça com a ferramenta ou mesmo com outros materiais como, por exemplo, o oxigênio e a água presente na atmosfera e nos fluidos de corte. A oxidação resultante, geralmente porosa, é facilmente removida pelo atrito do cavaco sobre a superfície de saída, resultando em desgaste.

Sempre presente fora da zona de adesão, o volume de desgaste desenvolvido por ela é dependente das condições de escorregamento do cavaco e, principalmente, pelas interações químicas existentes. Portanto, para esse tipo de desgaste, a composição química da ferramenta é mais importante do que sua dureza ou demais propriedades mecânicas (TRENT, 1991).

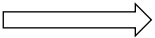
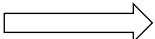
TRENT e WRIGHT (2000) observaram que esse mecanismo sempre ocorre em regiões onde as condições de escorregamento são contínuas e que está sempre associado aos desgastes de abrasão e adesão.

Outros estudos desenvolvidos mostram também que a oxidação pode ser atenuada através do monitoramento e controle da concentração de oxigênio no ambiente de corte, em que menor quantidade de oxigênio resulta em menor taxa de oxidação (TENNENHOUSE e RUNKLE 1987).

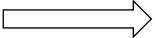
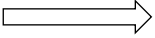
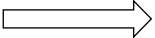
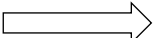
2.3.5.10 Parâmetros de desgaste

Para o monitoramento do desgaste da ferramenta e, conseqüentemente, o controle de sua vida útil, a norma ISO 3685 (1993) estabelece os parâmetros que devem ser medidos e monitorados, conforme mostrado na Fig. 24, e listados abaixo.

a) Na superfície de saída da ferramenta:

- KM  distância do centro da cratera;
- KT  profundidade de cratera.

b) No flanco da ferramenta:

- VB  desgaste de entalhe na superfície lateral de folga;
- VB  desgaste de flanco máximo;
- VB  desgaste de flanco médio;
- VB  desgaste de entalhe na superfície principal de folga.

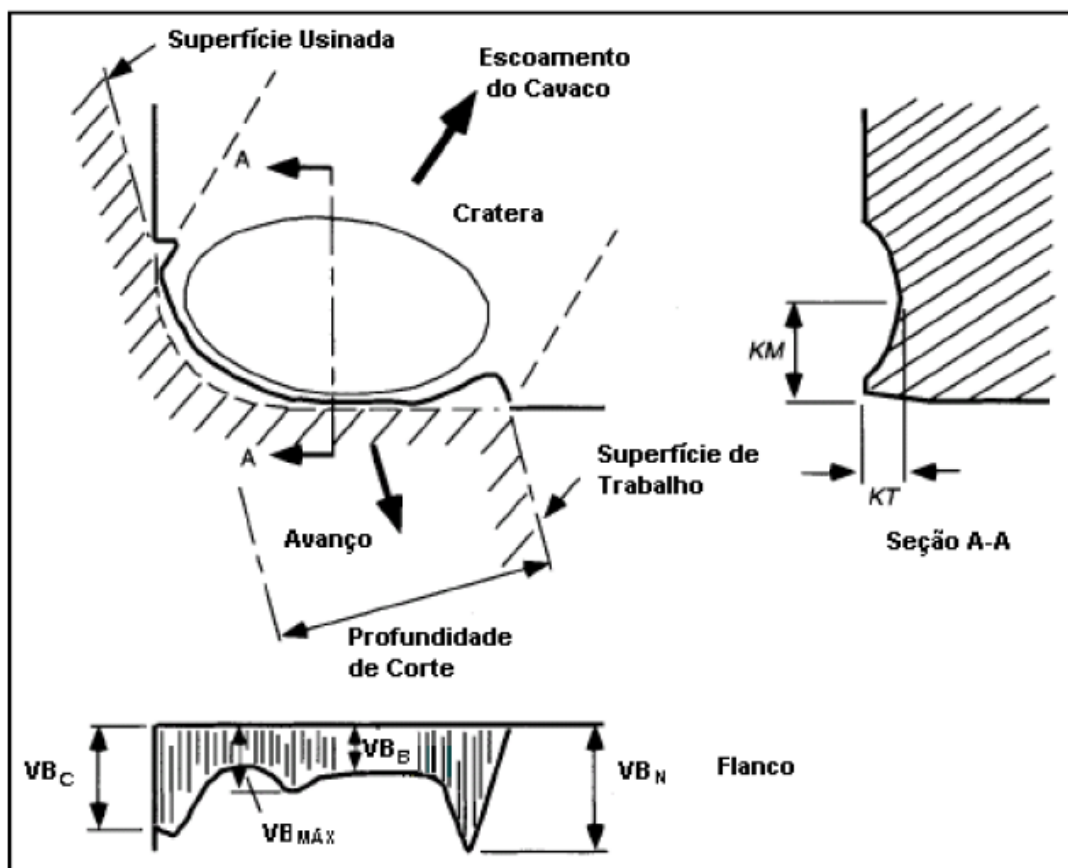


Figura 24: Parâmetros de desgaste estabelecidos pela norma ISO 3685
Fonte: CHILDS (2000)

Os critérios de fim de vida para as ferramentas de aço rápido, metal duros e cerâmicas, quando da usinagem de aços e ferros fundidos, segundo essa norma são:

- Desgaste de flanco: \Rightarrow $VB_{máx} = 0,6 \text{ mm};$
 $VB_b = 0,3 \text{ mm};$
- Profundidade de cratera
 \Rightarrow $KT = 0,06 + 0,3 f,$ onde KT é dado em mm
e “f” é o avanço em mm/ver.;
- Falha Catastrófica.

O desgaste de entalhe foi excluído, segundo a própria norma, em função da necessidade de se avaliar, não só a extensão do entalhe, mas associá-lo também à

sua profundidade. Somente em casos nos quais o entalhe predomina sobre os outros critérios é que o VBn pode ser utilizado como um critério de fim de vida.

2.4 ACABAMENTO DE SUPERFÍCIE

Seja qual for o processo escolhido para a fabricação de um componente, a qualidade do acabamento de sua superfície pode ser de grande influência sobre a funcionalidade e os custos do projeto em desenvolvimento (DAGNALL, 1986).

Segundo AGOSTINHO (1977), muitas vezes, as tolerâncias dimensionais e as tolerâncias de forma, posição e orientação não são suficientes para garantir o funcionamento adequado de um componente ou subconjunto fabricados, sendo fundamental a especificação dos desvios micro geométricos, ou seja, o acabamento da superfície através da rugosidade superficial cujo parâmetro dimensional é o micrômetro (μm).

Portanto, a análise do acabamento é fundamental no comportamento de componentes mecânicos, ficando claro que a rugosidade da superfície tem influência direta onde existam atrito, desgaste, corrosão, resistência à fadiga, transmissão de calor, na qualidade de superfícies com propriedades óticas, no escoamento de fluidos, na vedação, nas superfícies de padrões de medição e na aparência final.

2.4.1 Fatores de Influência na Rugosidade

Para STEMMER (2005), o acabamento da superfície está diretamente relacionado com as marcas do avanço da ferramenta utilizada durante o processo de fabricação e de fragmentos dessa ferramenta, ou da peça usinada, advindos do processo de formação do cavaco e que são depositados sobre a superfície trabalhada. DAGNALL (1986) aponta que a textura da superfície é muito sensível a qualquer alteração do processo de fabricação, sendo que qualquer alteração nas condições de corte, desgaste da ferramenta, tensões internas, estrutura e ou dureza do material corroboram para alterar as condições de acabamento.

Ainda, segundo AGOSTINHO (1977), em um processo de usinagem, já determinado, os principais fatores que podem fazer variar o acabamento são:

- Rigidez da máquina;
- Dureza superficial da peça;
- Geometria da ferramenta,
- Fixação correta da peça.

Portanto, para se realizar um experimento de forma adequada, faz-se necessário ter atenção e cuidados especiais na escolha e preparação da máquina e de seus acessórios, na determinação e caracterização do material a ser trabalhado, bem como na preparação, manuseio e correta identificação dos corpos de prova e ferramentas utilizados.

STEMMER (2005) e DINIZ (2006) apontam, entre os fatores devidos ao processo de fabricação, a geometria da ferramenta de corte como tendo um papel preponderante. Nesta, o raio de ponta da ferramenta pode aumentar ou diminuir a vibração da ferramenta devido ao atrito causado pela área de contato, e um ângulo de saída maior dificulta a formação da aresta postiça de corte. Também a relação avanço e raio de ponta contribui geometricamente para a rugosidade de superfície.

Ainda segundo eles, a profundidade de corte é menos influente que o avanço, porém cabe lembrar que condições mais severas nas dimensões do corte prejudicam o acabamento.

Quanto aos demais parâmetros de corte, de uma forma geral, o acabamento melhora com o aumento da velocidade de corte e com a utilização de pequenos avanços.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa apresenta-se na forma de uma pesquisa descritiva relacionada a melhorias de custos de ferramentas de corte no setor de usinagem em uma indústria metalmecânica. O caso abordado neste trabalho trata de um estudo para otimizar e reduzir custos com ferramentas de corte, pois não havia uma análise de processo para que se aperfeiçoe o nível da produção.

As etapas compreendidas deste trabalho foram: levantamento bibliográfico, compreensão do problema, análise e interpretação de dados e conclusão.

A pesquisa utilizou-se, como metodologia para o seu desenvolvimento, de revisões bibliográficas, estudos de caso voltados a proposta do trabalho e entrevistas com profissionais e especialistas no assunto.

As revisões bibliográficas, fundamentais para um direcionamento adequado do trabalho de pesquisa, no início e também durante todo o desenvolvimento da pesquisa, foram realizadas com o intuito de:

- Identificar o processo de usinagem e ferramentas;
- Analisar as opiniões e experiências dos diversos autores e pesquisadores referenciados.

Este trabalho foi realizado em forma de pesquisa descritiva relacionado ao estudo da vida útil de ferramentas de corte de usinagem, em uma empresa do setor na região.

Iniciaram-se os trabalhos através de pesquisa bibliográfica, e durante estas atividades deparamos com dificuldades de achar trabalhos relacionados ao tema de vida útil de insertos.

A pesquisa foi feita na biblioteca da UTFPR-CP e também por meio da internet, com o resultado da pesquisa deu-se inicio os trabalhos de analise dos métodos que será utilizado para a obtenção do resultado.

3.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

O universo considerado nessa pesquisa é o setor metal-mecânico e abrange a indústria automotiva.

Para realização deste estudo foi escolhida uma indústria da região de londrina que atua no mercado automotivo fornecendo peças para montadoras.

3.2 SUJEITO E OBJETIVO DA PESQUISA

Conforme Ruiz (1996), o sujeito de uma pesquisa pode ser definido como a pessoa, o fato ou fenômeno sobre o qual se quer saber algo. Assim, a empresa estudada compõe o sujeito da pesquisa.

Segundo, o mesmo autor, o objeto da pesquisa é definido como aquilo que se pretende conhecer relativo ao sujeito escolhido. Desta forma, para a pesquisa realizada, o objeto é o estudo de vida de ferramentas de corte.

3.3 TIPO DE PESQUISA

Esta pesquisa pode ser caracterizada como uma pesquisa descritiva, Segundo Andrade (2001), neste tipo de pesquisa, os fatos são observados, registrados, analisados, classificados e interpretados, sem que o pesquisador interfira neles.

De acordo com Barros e Lehfeld (2000), a pesquisa descritiva engloba dois tipos: a pesquisa documental e / ou bibliográfica é a que se efetua tentando resolver um problema ou adquirir conhecimentos a partir do emprego predominante de informações advindas de material gráfico, sonoro e informatizado.

Fachin (2001) aponta que a pesquisa bibliográfica diz respeito ao conjunto de conhecimentos humanos reunidos nas obras. Tem como base fundamental conduzir o leitor a determinado assunto e a produção, coleção, armazenamento, reprodução, utilização e comunicação das informações coletadas para o

desempenho da pesquisa. Para a autora acima citada, a pesquisa documental é toda informação oral, escrita ou visualizada, consistindo na coleta, classificação, seleção difusa e na utilização de toda espécie de informações, compreendendo também as técnicas e métodos que facilitam a sua busca e identificação.

A pesquisa de campo se detém na observação do contexto no qual é detectado um fato social (problema), que a princípio passa a ser examinado e, posteriormente, é encaminhado para explicações por meio de métodos e das técnicas específicas (FACHIN, 2001).

“A pesquisa de campo propriamente dita não deve ser confundida com a simples coleta de dados (...) é algo mais que isso, pois exige contar com controles adequados e com objetivos preestabelecidos que discriminam suficientemente o que deve ser coletado” (TRUJILLO, 1982:229 apud BARROS e LEHFELD, 2000).

Para Barros e Lehfeld (2000), o investigador na pesquisa de campo assume o papel de observador e explorador, coletando diretamente os dados no local (campo) em que se deram ou surgiram os fenômenos. O trabalho de campo se caracteriza pelo contato direto com o fenômeno de estudo.

4 PROJETO

Desenvolver um projeto no formato acadêmico utilizando os conhecimentos adquiridos no Curso de Tecnologia em Manutenção e observando as necessidades inseridas no processo de Usinagem, onde os proponentes atuam.

No processo de produção é extremamente relevante minimizar as perdas que envolvem a fabricação do produto, e notando que havia meio de minimizar as perdas com relação a ferramentas de corte.

4.1 DADOS TÉCNICOS DO PRODUTO

A primeira parte deste trabalho foi de levantar dados referentes ao processo de usinagem e também referente ao consumo de ferramentas de corte, (Tabela 8 e 9), também foi verificado o tempo de fabricação das peças durante o processo (Tabela 10) e suas paradas por trocas de ferramentas.

Tabela 8 - Estudo de Consumo Inserto CNMA 12 04 12

ESTUDO DE CONSUMO						
MÁQUINA N° 232.002		PEÇA : Cubo		OPERAÇÃO 220		
CNMA 12 04 12						
REFRIGERAÇÃO		<input checked="" type="checkbox"/>	SIM			
		<input type="checkbox"/>	NÃO			
TURNO	SUORTE	DESB.	ACAB	QTDE PÇS / Aresta	Arestas	HORAS
C	A40T CCLNR-12	X	X	40	1ª	1ª
C	A40T CCLNR-12	X	X	63,63	2ª	
				75,81	3ª	
				13,6	4ª	
				60,42	1ª	2ª
				51,79	2ª	
				23,5	3ª	
				36,38	4ª	
				60,25	1ª	3ª
				84,08	2ª	
				53,14	3ª	
				69,94	4ª	
				93,63	1ª	4ª
				90,63	2ª	
				29,63	3ª	
				53	4ª	

Fonte: Autoria Própria

Neste estudo a média de fabricação por aresta de corte foi de sessenta e quatro peças. O estudo foi realizado com quatro insertos. Por inserto ficou definido como duzentos e cinquenta e seis peças produzidas.

Tabela 9 - Estudo de Consumo Inserto WNMA 08 04 12

ESTUDO DE CONSUMO						
MÁQUINA N° 232.003		PEÇA : Cubo		OPERAÇÃO 230		
WNMA 08 04 12						
REFRIGERAÇÃO		<input checked="" type="checkbox"/> SIM				
		<input type="checkbox"/> NÃO				
TURNO	SUPORTE	DESB.	ACAB	QTDE PÇS / Aresta	Áresta	Insertos
	PWLNL2525 - 08	X	X	72,75	1ª	1ª
				62,06	2ª	
				67,39	3ª	
				84,83	4ª	
				94	5ª	
				117,5	6ª	
				201	1ª	2ª
				107	2ª	
				28,39	3ª	
				84,08	4ª	
				131,5	5ª	
				101,17	6ª	
				203,33	1ª	3ª
				101,92	2ª	
				203,83	3ª	
				180,75	4ª	
				120,83	5ª	
				158,13	6ª	

Fonte: Autoria própria

O teste feito com a pastilha WNMA 08 04 12, teve uma média de produção de cento e dezoito peças por aresta.

Abaixo segue o gráfico de consumo antes da implantação do estudo realizado com essas ferramentas de corte (Figura 25).

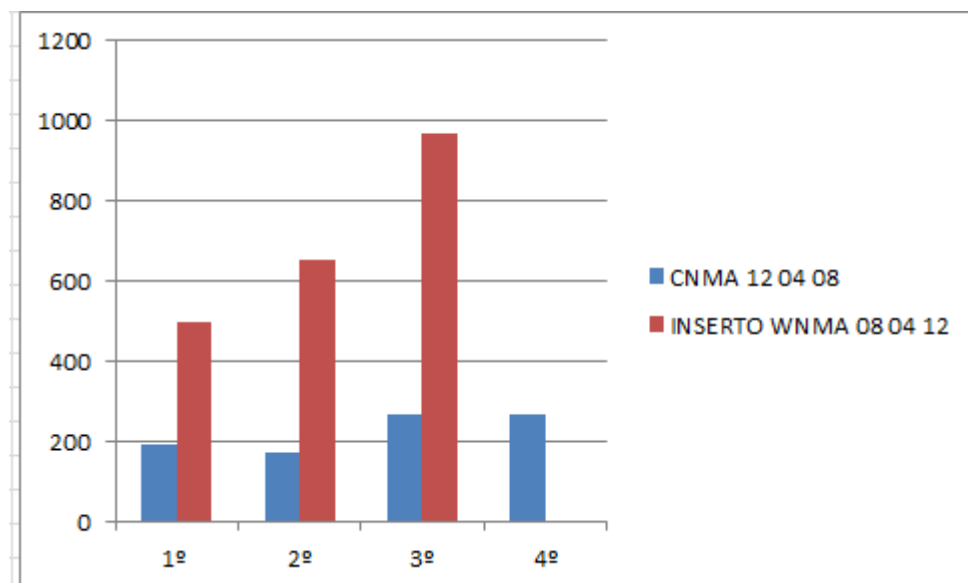


Figura 25: Gráfico de Consumo de Ferramentas de Corte
Fonte: Autoria Própria

Tabela 10 - Tempo de Produção

Peça	Operação	Máquina	Tempo
Cubo	220	232.002	2,30
Cubo	230	232.003	2,32

Fonte: Autoria Própria

Nesse levantamento ficou definido que o consumo médio por aresta de corte era de cento e dezoito peças por aresta. Foi analisado nesse caso 3 insertos.

Logo após a verificação dos dados mencionados acima, foi realizado um treinamento com os operadores com relação ao uso correto e troca de ferramentas de corte, o treinamento foi feito na própria produção, e um acompanhamento durante as primeiras trocas de ferramentas, para a seleção das arestas de corte foram utilizados uma lupa fornecida pelo fabricante. Também foi realizado um estudo de processo referente à peça que seria usinada. Usou como definição de vida útil das arestas de corte, as peças produzidas por insertos, de acordo com a norma ISO 3685.

Na realização deste trabalho, foram utilizadas peças de ferro fundido cinzento, ambas dentro das especificações técnicas conforme a norma ZF103/100-EM -GJL-250.

Não foi feita tratamento térmico em nenhuma das peças analisadas, segue abaixo os dados relacionado a Composição química da peça estudada, conforme tabela 11.

Tabela 11 - Composição Química.

Composição Química	
Material GG25 dureza 185 HB.	
Análise Química	
C	3,10 a 3,15%
Si	1,70 – 1,90 %
Mn	0,60 – 0,70 %
P	0,10 % máx.
S	0,010 % máx.
Cu	0,20 – 0,30%
Cr	0,050 % máx.
Sn	0,020 – 030 %

Fonte: Autoria Própria

Com base nos dados mencionados acima o técnico de processo, solicita a análise de material da peça a ser usinada, para que possa escolher adequadamente o tipo de ferramenta a ser utilizada.

4.2 DADOS DE PROCESSO

Em todo o estudo as ferramentas de corte utilizadas foi a Korloy, tipo CNMA 12 04 12 NC6110 em conjunto com o suporte A32S MCLNL - 12 e WNMA 08 04 12, em conjunto com o suporte PWLNL 2525 – 08.

Os parâmetros de corte utilizados durante a usinagem são apresentados na Tabela 12. As velocidades de corte foram definidas a partir de estudos iniciais, para que a vida da ferramenta de corte não fosse muito pequena e nem excessivamente longa, assim foi escolhido o parâmetro ideal para esse tipo de material.

Tabela 12 - Parâmetros de corte

Ferramenta	Inserto	Vc	Avanço
T01	CNMA120412	560	0,42
T02	WNMA080412	500	0,4

Fonte: Autoria Própria

4.2.1 Equipamentos

Utilizado o Torno: ROMI, modelo Cosmos 30. Ano de Fabricação: 29/12/97 – comando MACH 10 (figura18). Este torno possui como característica potencia de 30 cv, distancia entre as pontas 900 mm, diâmetro máximo de 250 mm e rotação máxima 3000 rpm.



Figura 26: Torno Cosmos 30 Romi

Fonte: Internet

Após a preparação da máquina, baseado nos dados mencionados acima, foi treinado o operador sobre como realizar a troca de insertos e sua vida útil.

A análise foi feita em cima das peças usinadas, até o desgaste das arestas de corte. E foi verificado o seu desgaste.

4.3 RESULTADOS

Os resultados da pesquisa através da metodologia descrita no capítulo 3 poderão ser vistos neste capítulo.

Foram analisadas as ferramentas utilizadas durante o processo de usinagem em produção seriadas. Após a utilização destas ferramentas todas elas passaram por uma análise minuciosa por um técnico para verificar se poderiam ser reutilizadas. E algumas delas apresentaram algum tipo de desgaste.

Segue abaixo alguns tipos de desgaste que foram apresentados:

4.3.1 Desgaste de Flanco

Ocorre nas superfícies de folga, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundárias ou ambas. Quando atinge a aresta principal de corte, resulta num aumento de temperatura e forças envolvidas no corte, podendo causar vibrações tanto na ferramenta como na peça. Já na aresta secundária de corte, da qual depende o controle dimensional e acabamento superficial da peça. A figura 27 mostra o desgaste de flanco, observado na face da ferramenta.



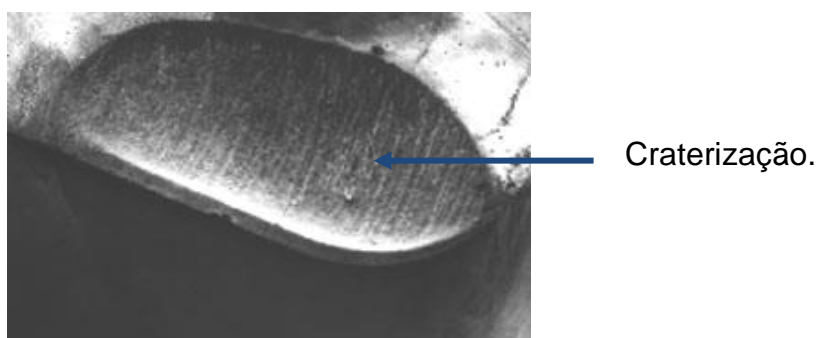
Desgaste no Flanco:

**Figura 27: Imagem fotografada do inserto ensaiado.
Fonte: Própria.**

Típica de Usinagem de Ferro Fundido, causada por abrasão e por partículas dura do material;

4.3.2 Cratera

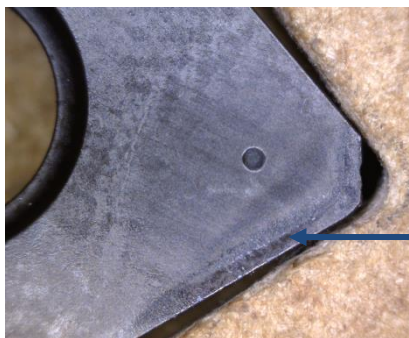
O desgaste de cratera (Figura 28) ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza, durante o corte, a zona de deslizamento do cavaco. Este tipo de desgaste é resultado de uma combinação de entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão, e ocorre principalmente a altas velocidades de corte, devido a altas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Devido a redução da resistência a abrasão causada pela difusão, é favorecido o desgaste abrasivo, sendo então a forma de cratera resultante na distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. O desgaste assume então a forma de cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralelas as arestas de corte.



**Figura 28: Imagem fotografada do inserto ensaiado.
Fonte: Própria.**

4.3.3 Desgaste de Entalhe

É comum o desgaste de flanco ser mais pronunciado na região onde ocorre o contato com a superfície externa da peça do que nas demais regiões, o que pode ocorrer devido a várias causas, como corte de uma camada de material endurecido pelo passe anterior da ferramenta ou ainda oxidado devido às altas temperaturas, exposição ao ar ou ao fluido de corte. Este tipo de desgaste é chamado de desgaste de entalhe (Figura 29).



Desgaste na ponta

Figura 29: Desgaste de Entalhe

Combinação de desgaste no flanco e deformação plástica, localizada na ponta da ferramenta.

Pode ser um problema em usinagem de altas e baixas ligas, materiais pastosos e abrasivos.

Causada pela abrasão e forças de fricção entre a ferramenta e a peça.

4.4 Tipos de Ferramenta de Corte Utilizada

Neste estudo foi utilizada ferramenta de Metal Duro. Que são partículas duras de finos carbonetos de metais refratários sinterizados com um ou mais metais aglomerantes do grupo do ferro (p. ex., ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo único de alta dureza e resistência à compressão;

As partículas duras são carbonetos de tungstênio, junto com outros carbonetos como de titânio, de tântalo e de nióbio. O tamanho varia de 1 a 10 μm ;

Pode-se conseguir metal duro com alta tenacidade bem como metal duro com elevada resistência ao desgaste ou elevada dureza a quente por meio do controle da granulometria dos grãos empregados na sua produção. Geralmente partículas pequenas do metal duro auxiliam na obtenção de maiores dureza, resistência ao desgaste e tenacidade do material.

A norma ISO classifica os metais duros em três grupos, designados pelas letras P, M e K, os quais ainda são subdivididos.







DESIGNAÇÃO ISO	TENACIDADE	DUREZA A QUENTE E RESISTÊNCIA AO DESGASTE
P 01 P 10 P 20 P 30 P 40 P 50		
M 10 M 20 M 30 M 40		
K 10 K 20 K 30 K 40		

Figura 30: Classificação dos Metais Duros em ferramentas de corte.

Grupo P é constituído por metais duros de elevado teor de TiC (carboneto de titânio) + TaC (carboneto de tântalo) que lhes conferem elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. Indicado para usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos (aços e materiais dúcteis em geral), que pelo grande contato do cavaco com a superfície de saída da ferramenta, produzem elevada temperatura de corte e tendem a desgastar muito a ferramenta (produzindo o chamado desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta).

Grupo K foi o primeiro tipo de metal duro a ser desenvolvido. São compostos por carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Não são resistentes ao mecanismo que gera o desgaste de cratera, por isso são indicados para a usinagem de materiais frágeis (como o ferro fundido e latão), que produzem cavacos curtos e quebradiços e por isso não atrim muito com a superfície de saída da ferramenta, pois ao sofrerem uma pequena deformação, já se rompem e pulam para fora da região de corte.

Grupo M é um grupo intermediário sendo indicado para ferramentas com aplicações múltiplas. O principal material geralmente usado por ferramentas desta classe é o aço inoxidável.

Na classificação, a ferramenta P40 é mais tenaz do que a P10, porém menos resistente ao desgaste. Por isso, a ferramenta P40 é recomendada para desbaste de aços (operação que exige maior tenacidade da ferramenta) enquanto a P10 é recomendada para acabamento (onde se requer baixo desgaste para a ferramenta, de maneira a manter a aresta de corte íntegra, sem desgaste). A mesma recomendação pode ser feita, por ex., para uma ferramenta K10 e K40.

Segue abaixo a classificação de pastilhas intercambiáveis conforme a norma NBR-6450 ISO.

C	N	M	G	12	04	12			-	46
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
FORMATO DA PASTILHA										
1										
ANGULO DE INCIDÊNCIA NA ARESTA DE CORTE PRINCIPAL α_n										
2										X - Execução Especial
TOLERÂNCIAS \pm em s e d										
3	Tipo	s	d				Círculo inscrito d (mm)		Tipo de tolerância	
	G		$\pm 0,025$				3,97 - 5,0 - 5,96 - 6,0 - 6,35	M	U	
	M	$\pm 0,13$	$\pm 0,05 - \pm 0,15^{1)}$				8,0 - 9,525 - 10,0			
	U		$\pm 0,08 - \pm 0,25^{1)}$				12,0 - 12,7	$\pm 0,08$	$\pm 0,13$	
							15,875 - 16,0 - 19,05 - 20,0	$\pm 0,10$	$\pm 0,18$	
							25,0 - 25,4	$\pm 0,13$	$\pm 0,25$	
							31,75 - 32,0	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$	

Figura 31: Tabela de Classificação de Inserto – 1ª Parte
Fonte: BRASSINTER

A 1ª letra do inserto se refere ao formato dele, a 2ª letra diz respeito ao ângulo de incidência da aresta de corte principal, a 3ª é a tolerância, a 4ª letra é o tipo de quebra cavaco, se é positivo ou negativo, 5ª é tamanho da pastilha (aresta de corte em mm), 6ª é espessura da pastilha em (mm), 7ª é o raio de ponta do inserto, 8ª é tipo de aresta de corte (canto vivo, aresta arredondada, chanfro negativo ou chanfro negativo arredondado), 9ª Sentido do corte (direita ou esquerda) e 10ª a critério de cada cliente (Símbolos 8, 9 e 10 são opcionais).

TIPO DE QUEBRA CAVACO									
4	A	G	M	N	R	T	W	X - Especial	

5	TAMANHO DA PASTILHA = ARESTA DE CORTE, l (mm)										ESPESSURA DA PASTILHA, s MM		RAIO DE PONTA, r _E MM					
	d (mm)	d (in.)	C	D	R	S	T	V	W	K	01	04	02	16	04	24	08	32
	3,97	5,32"					06											
	5,0				05													
	5,56	7/32"						09										
	6,0			06							11	11						
	6,35	1/4"	06	07														
	8,0				08													
	9,0				09													
	9,525	3/8"	09	11	09	09	16	16										
	10,0				10													
	12,0				12													
	12,7	1/2"	12	15	12	12	22	22	08									
	15,875	5/8"	16		15	15	27											
	16,0				16													
	19,05	3/4"	19		19	19	33											
	20,0				20													
	25,0				25													
	25,4	1"	25		25	25												
	31,75				31													
	32				32													

TIPO DE ARESTA DE CORTE				
8	Carto vivo F	Aresta Arredondada E	Chanfro Negativo T	Chanfro Negativo e Arredondado S

SENTIDO DE CORTE			
9	Avanço → R	← Avanço L	← Avanço N

10 A CRITÉRIO DO FABRICANTE	
-----------------------------	--

Figura 32: Tabela de Classificação de Inserto – 2ª Parte
Fonte: BRASSINTER

O inserto que utilizamos é uma pastilha CNMA 12 04 12, que e acordo com a classificação ISO significa:

C: Formato Rômbico de 80°;

N: Ângulo de Folga 0°;

M: Tolerância. Altura da aresta $\pm 0.015 \pm 0.38$, Espessura de ± 0.13 e Circulo Inscrito de ± 0.08 e ± 0.25 (mm);

A: Tipo do Inserto;

12: Comprimento da aresta de corte;

04: Espessura da pastilha;

12: Raio da aresta (1.2 mm)

4.5 Rugosidade

Os resultados das rugosidades medidas nas peças, após usinagem, são apresentados na Fig. 33 e Fig.34. Os parâmetros de controle Ra e Rq, foram

respectivamente comparados, em função da velocidade e avanço executados, mantida constante a profundidade de corte, $ap = 0,05$ mm.

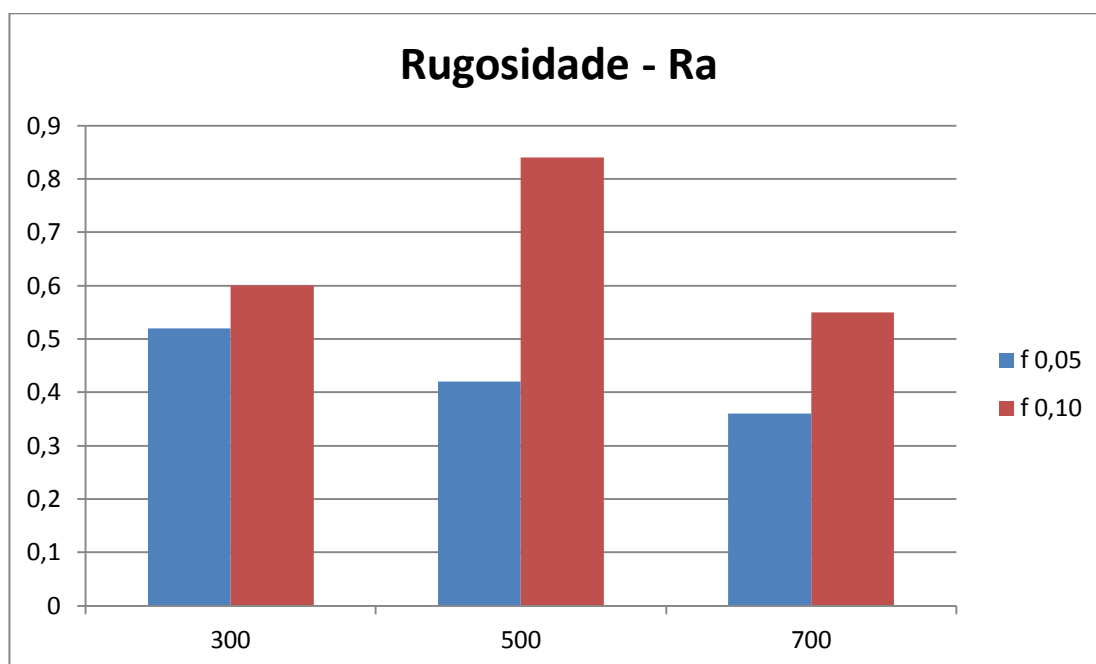


Figura 33: Rugosidade Ra, em função da velocidade de corte (V_c) e avanço (f).

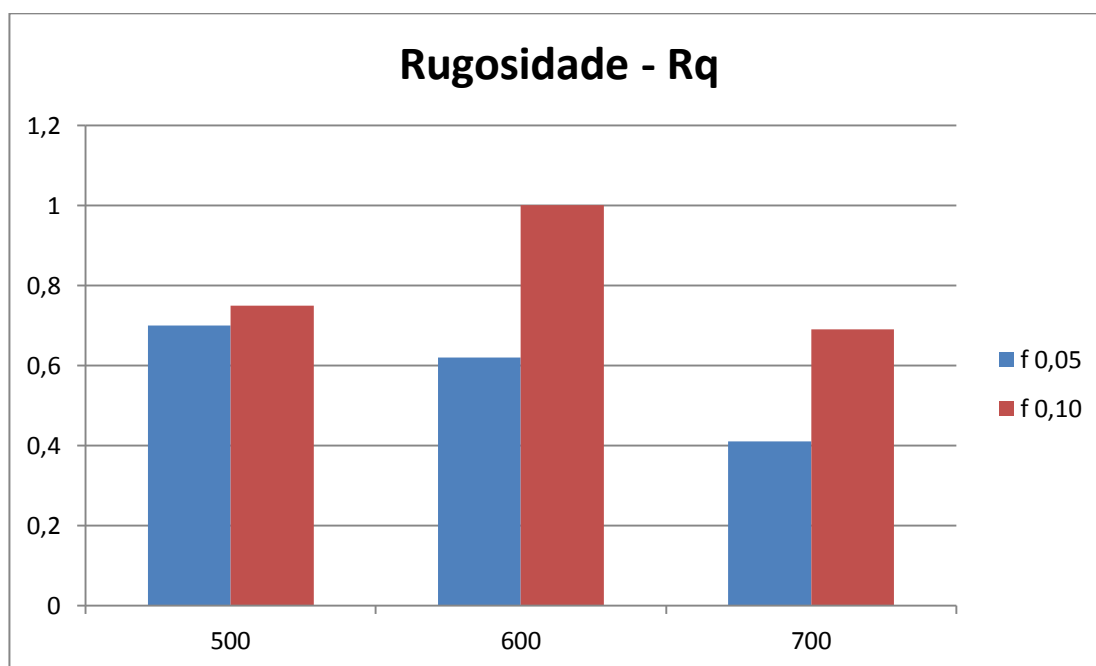


Figura 34: Rugosidade Rq, medida , em função da velocidade de corte (V_c) e avanço (f).

Os resultados demonstram que o avanço menor, $f = 0,05$ mm/rot, proporciona melhores condições de acabamento.

Com relação à velocidade de corte, de uma forma geral, para as velocidades mais elevadas os resultados foram melhores, exceção feita ao ensaio que utilizou uma $V_c = 600$ m/min com um $f = 0,10$ mm/rot.

A análise visual realizada nessa peça especificamente não revelou qualquer anormalidade na superfície, embora durante os ensaios de semi desbaste, e não nos de acabamento, todas peças tenham apresentado, no decorrer do processamento, marcas de segregação em diâmetros variados, maiores ou menores.

Segundo COLPAERT (1974), isso evidencia o acúmulo de impurezas nessa região, especialmente o fósforo e o enxofre, que por não serem tão solúveis no metal sólido, fluem para as zonas mais centrais dos fundidos, que são as últimas a se solidificarem. A variação de composição química localizada, dentro de certos limites, acarreta variação nas propriedades mecânicas, tornando a região segregada mais dura, menos maleável e oferece um campo favorável a propagação de fissuras.

Importante salientar que dois ensaios de desbaste foram refeitos em virtude de encontrarem “vazios” em camadas internas após execução de alguns passes.

Assim, a discordância deste ensaio em relação aos demais pode estar relacionada à condição do material, especificamente aos fatores de sua fundição.

Na utilização do avanço, $f = 0,05$ mm/rot, com as velocidades, $V_c = 600$ m/min e $V_c = 700$ m/min, a variação dos valores de acabamento encontrados é pequena e pode ser considerada, em um primeiro momento, não representativa.

Ficou evidenciado que os ensaios não apresentaram nenhuma divergência motivada pela influencia dos fatores velocidades de corte e avanço e confirmam que maiores velocidades e menores avanços, dentro de determinados limites, atuam favoravelmente a qualidade da superfície, como esperado.

4.6 Monitoramentos do Desgaste

O monitoramento de desgaste das ferramentas foi realizado através do parâmetro de desgaste $VB_{m\acute{a}x}$, em função dos instrumentos opticos disponíveis e utilizados, sendo que o valor máximo admitido pela norma ISO 3685 (1983) é 0,6 mm.

As medições foram executadas no projetos de perfil, com espelho semi refletor e objetiva de 20X, resolução de 0,001 mm.

Após essa medição foi separada os insertos e coletados os dados referentes ao desgaste das ferramentas, e elaborado o gráfico a seguir, baseado em peças produzidas por aresta.

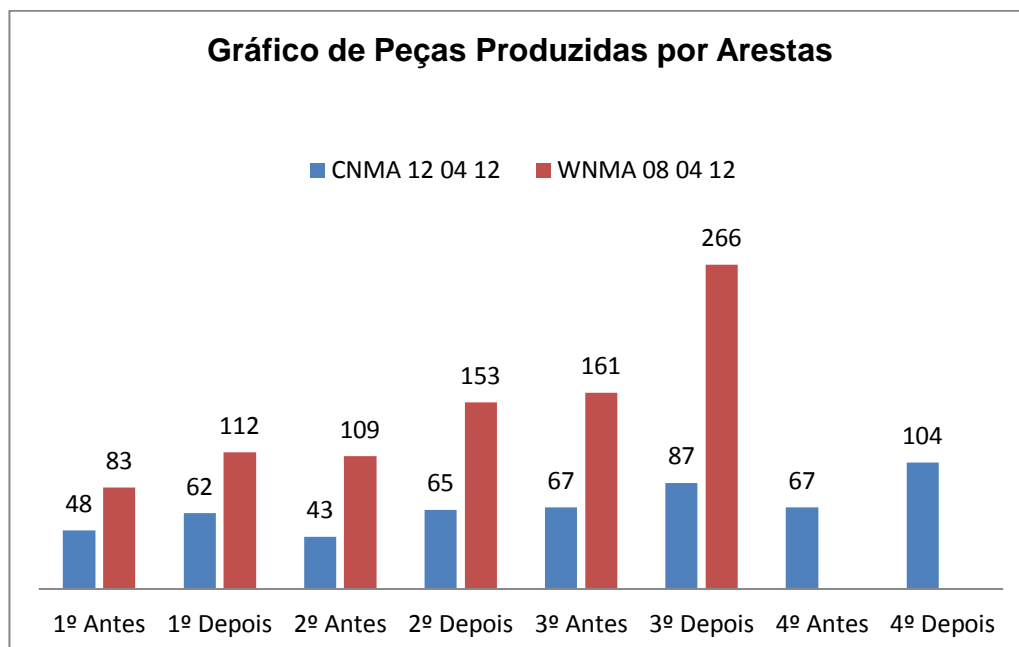


Figura 35: Gráfico de Peças Produzidas por insertos.
Fonte: Autoria Própria

Ficou evidenciado após o monitoramento do desgaste, que ambos os insertos tiveram um aumento considerável em suas vidas uteis, levando em consideração todas as etapas de usinagem.

O valor máximo admitido de desgaste para o teste foi o de 0,6 mm conforme a norma ISO 3685 (1983), que determina que o desgaste máximo deve ser de 0,6 mm.

5 CONCLUSÃO

O desempenho das ferramentas de corte utilizadas, através do torneamento a seco de ferro fundido cinzento foi avaliado. Os insertos adquiridos foram revestidos através do processo PVD – Deposição Física a Vapor.

Notou-se que com a variação da velocidade de corte, o desgaste aumenta, e também ficou evidenciado que o aumento de vida útil das ferramentas está relacionado a menores taxas de avanço e menores velocidades.

No caso do acabamento da peça, ficou evidenciada que com as ferramentas revestidas e com o treinamento adequado do pessoal da fábrica, realizando a troca de inserto nos momentos adequados, a peça se encontra dentro dos parâmetros normais de rugosidade. Assim como maiores velocidades e menores avanços são favoráveis para uma superfície melhor acabada. E futuramente este tema merece um aprofundamento bem mais amplo.

E o ferro fundido cinzento utilizado neste trabalho, embora tenha apresentado variações estruturais e de processo, não influenciou os resultado e nem invalidou o estudo, pois essas variações são comuns neste tipo de material, e conforme encontrado em literatura, os resultados foram compatíveis.

Como sugestões de trabalhos futuros, segue abaixo:

- Estudo da influência do fluido de corte na vida útil das ferramentas;
- Analisar a importância de se ter um controle de ferramentas na indústria de usinagem;
- Usinagem com outros tipos de insertos e materiais.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; SAHM, A.; SCHULTZ, H.; "Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron", **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 5, n.1, pp.53-56, 2002.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J.; **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**, 2º ed., São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda., 1977.

ÁVILA, R. F.; **No Desempenho de Ferramentas de Metal Duro com Ti-N, Ti-C-N E Ti- Al-N no torneamento do aço ABNT 4340 Temperado e Revenido**, Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2003.

AVILA, R. F.; GODOY, C.; ABRÃO, A. M.; LIMA, M. M.; "Topographic Analysis of the Crater Wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti, Al) N Coated Carbide Tools", **Wear** v.265, pp. 48-56, 2008.

ANDRADE, Murilo M. **Competências requeridas pelos gestores de Instituições de ensino superior privadas: um estudo em Curitiba e região Metropolitana**. 2005. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2005. (modelo de referência de dissertação).

BALZERS. Disponível em: GODOY, C.; ABRÃO, A. M.; LIMA, M. M.; "Topographic Analysis of the Crater Wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti, Al) N Coated Carbide Tools", **Wear** v.265, pp. 48-56, 2008.

BARROS, Aidil Jesus da Silveira; LEHFELD, Neide Aparecida de Souza. **Fundamentos de metodologia: um guia para a iniciação científica**. 2. ed. São Paulo: Makron, 2000. (modelo de referência de livro com subtítulo e edição).

BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S.; **Fundamentos da Metodologia Científica**. 2. Ed. São Paulo: Pearson Markron Books, 2000.

BEZERRA, A. A.; **Estudo do Desgaste no Roscamento com Alta Velocidade em Ferro Fundido**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BONIFÁCIO, M. E. R.; **Monitoramento do Processo de Torneamento de Acabamento Via Sinais de Vibração**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 1993.

BRASSINTER, Pastilha de Torneamento. Disponível em: <http://www.brassinter.com.br/>. Acesso em: 09. Jul. 2014.

CHILDS, T.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T., YAMANE, Y.; **Metal Machining – Theory and Applications**, London, Arnold Publishers, 2000.

CHIAVERINI, V.; **Tecnologia Mecânica**, v. III 2ª ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1986.

CHO, S. S.; KOMVOPOULOS, K.; “Wear Mechanisms of Multi-Layer Coated Cemented Carbide Cutting Tools”, **Journal of Tribology**, v. 119, pp. 8-17, 1997.

COLPAERT, H.; **Metalografia do Produtos Siderúrgicos Comuns**, 3ª ed., São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1974.

DAGNALL, H.; **Exploring Surface Texture**, 2ª ed. Leicester, England, Rank Taylor Hobson Limited, 1986.

DAWSON, S. H.; HOLLINGER, I.; ROBBINS, M.; DAETH, J., SCHULZ, H., REUTER, U.; “The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron”, **SAE Technical Paper Series**, 2001-01-0409, 2001.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 5ª ed., São Paulo, Artliber Editora, 2006.

DOYLE, L. E.; MORRIS, J. L.; LEACH, J. L.; SCHRADER, G. F.; **Processo de Fabricação e Materiais para Engenheiros**, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1978.

DOBZANSKI, L. A.; PAKULA, D.; KRIZ, A.; SOKOVIC, M.; KOPAC, J.; “Tribological Properties of PVD and CVD Coatings”, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 175, pp. 179-185, 2006.

DURAND-CHARRE, M.; **Microstructure of Steels and Cast Irons**, Paris, Ed. Sirpe, 2003.

EYRE, T. S.; “Friction and Wear of Cast Irons” In: **Friction, Lubrication, and Wear Technology**, v. 18, **ASM Handbook**, 1992.

EZEUGU, E. O.; “Evaluation of Cermet Cutting Tool Materials when Machining G-17 Cast Iron”, **Lubrication Engineering**, pp. 49-55, 1993.

FACHIN, O. **Fundamentos de Metodologia**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2001.

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

FERRER, J. A. G.; **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento**, Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campina, 2006.

FRIEDRICH, Etiene Beirão. **Análise do desgaste em ferramentas revestidas e do acabamento no torneamento de ferro fundido**, 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) Programa de Pós-Graduação em Tecnologia – CEFET -Rio de Janeiro.

GODOI, Laise: A construção da química para a sustentabilidade – Química Industrial – Ano XXI n 132.

<http://www.mecanicaindustrial.com.br/conteudo/578-o-que-sao-ferramentas-de-corte>, 19/07/2014, 20:11 hrs.

HEAT, P. J.; “Ultrahard Tool Materials”. In: **Machining, ASM**, v. 16, Handbook, 1995.

HECK, M. O.; ORTNER, H. M.; FLEGES, S.; REUTER, U.; ENSINGER, W.; “Analytical Investigations Concerning the Wear Behaviour of Cutting Tools Used for the Machinig of Compacted Graphite Iron And Grey Cast Iron”, **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials** – Article in Press, Received 16 March 2007, accepted 3 May 2007.

ISO 3685; Tool Life Testing with Single Point Turning Tools, 2^a ed., Switzerland, 1993.

KENDAL, L. A.; “Tool Wear and Tool Life”. In: **Machining**, v. 16, **ASM Handbook**, 1995.

KENNAMETAL; **Catalogo de Ferramentas**. 2013. Disponível em: <<http://www.kennametal.com.br>. Acesso: 15 julho. 2014.

KOMANDURI, R.; HOU, Z. B.; “A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology” **Tribology International**, v. 34, n. 10, p. 653-682, 2001.

KWON, Y., FISCHER, G, W.; “A Novel Approach to Quantifying Tool Wear and Tool Life Measurements for Optimal Tool Management”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 43, pp. 369-368, 2003.

LOPER JR., C. R., Cast Irons – “Essential Alloys for the Future”, **65º Congresso Mundial de Fundição**, Coréia do Sul, outubro, 2002, publicado na Revista Foundryman, v. 96, Parte 11, Disponível em: http://www.abifa.com.br/adm/upload/cadernos_tecnicos/17_arq.pdf. Acesso em: 21 de maio 2007.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; **Usinagem dos Metais**, UFU – Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

MARWANGA, R. O.; VOIGT, R. C.; COHEN, P. H.; Influence of Graphite Morphology, Matrix Structure on Gray Iron Machining. Article adapted from an AFS transactions, 080, 1999.

MELO, A. C.; MILAN, J. C. G.; SILVA, M. B.; MACHADO, A. R.; A. R.; “Some Observations on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools”, **Journal of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng**, XXVII, n. 3, pp. 269-277, Ed. ABCM, July-September, 2006.

OLIVEIRA, A. J.; **Otimização das Condições de Usinagem Visando o Torneamento a Seco do Aço ABNT 1045 em Operação de Desbaste**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração em Engenharia de Fabricação, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

OTSBERG, G.; BUSS, K.; CHRISTENSEN, M.; NORGRÉN, S.; ANDRÉN, H. O.; MARI, D.; WAHNSTROM, G.; REINECK, I.; “Mechanisms of Plastic Deformation of WC-Co and Ti(C, N)-WC-Co”, **International Journal of Refractory Metals**, v. 24, pp. 135-144, 2006a.

RIahi, A.R.; ALPAS, A.T.; “Wear Map for Grey Cast Iron”. **Wear**, v. 255, pp. 401-409, 2003.

ROSARIO, J. F. A.; **Avaliação da Integridade da Superfície no Torneamento de um Ferro Fundido Nodular com Carboneto**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

RODRIGUES, Marcelo A, HASSUI A: Análise do desgaste de pastilhas de Inconel 625 – Máquina e Metais – São Paulo – Aranda; Ano XLV n 516 jan. 2009.

RODRIGUES, Marcelo A: Uma técnica sobre nano materiais aplicados em ferramentas de Corte – Máquinas e Metais – São Paulo, jan. 2009 p 74 – 87.

PESCARE, Erik Aparecido: Estudo de reaproveitamento de óleo vegetal (TCC) Ano 2009.

RUPPI, S.; HALVARSSON, M.; “TEM Investigation of Wear Mechanisms During Metal Machining”, **Thin Solid Films**, v. 353, pp. 182-188, 1999.

RUIZ, João Álvaro. **Metodologia científica**: guia para eficiência nos estudos. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1996

SHAW, M. C.; **Metal Cutting Principles**, Oxford, Clarendon Press ed., 1984.

SANDVIK; **Catalogo de Ferramentas**. Disponível em: <http://www.coromant.sandvik.com/>. Acesso em: 02 Abril. 2014.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F.; **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**, CEFET-MG e PUC-MG, Belo Horizonte, agosto, 2004.

SCHINTLMEISTER, W.; WALLGRAM, W.; KANZ, J.; GIGL, K.; “Cutting Tool Materials Coated by Chemical Vapour Deposition”, **Wear**, v. 100, nº 1-3, pp. 153-169, 1984.

STAFENESCU, D. M.; “Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron”. In: **Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**, v. 1, **ASM Handbook**, 1993.

STAPPEN, V.M.; STALS, L. M.; KERKHOFS, M.; QUAEYHAEGENS, C.; “States of the Art for the Industrial Use of Ceramic PVD Coatings”, **Surface and Coatings Technology**, v. 74-75, pp. 629 – 633, 1995.

STEMMER, C. E.; **Ferramentas de Corte I**, Florianópolis, Brasil, Ed. da UFSC, 2005.

SARWAR, M.; ZHANG, X.; GILLIBRAND, D.; “Performance of Titanium Nitride-Coated Carbide-Tipped Circular Saws when Cutting Stainless Steel”, **Surface and Coatings Technology**, v. 94-95, pp. 617-621, 1997.

SUTTER, G.; RANC, N.; “Temperature Fields in a Chip During High-Speed Orthogonal Cutting – An Experimental Investigation”, **International Journal of Machine Tool & Manufacture**, v. 47, pp. 1507-1517, 2007.

TENNENHOUSE, G. J.; RUNKLE, F. D.; “The Effects of Oxygen on the Wear of Tungsten-Carbide-Based Materials”, **Wear**, v. 118, pp. 365-375, 1987.

TRENT, E. M.; **Metal Cutting**, London, Butterworths-Heinemann Ltd., 1991.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K.; **Metal Cutting, 4th Ed. Boston**, Ed. Butterworths-Heinemann, 2000.

TONSHOFF, H. K.; MOHLFELD, A.; “PVD-Coatings for Wear Protection in Dry Cutting Operations”, **Surface and Coatings Technology**, v. 93, nº 1, pp. 88-92, 1997.

WAGNER, Claudiane. **Redução de Custos através da Afiação de ferramentas de corte: O caso de uma empresa do Setor Metal Mecânico**, 2008. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

WHITE, C. V.; “Cast Irons, Gray Iron”. In: **Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**, v.1, **ASM Handbook**, 1993.

WRIGHT, P.K.; BIAGCHI, A.; “Wear Mechanisms that Dominates Tool-Life in Machining”, **Journal Applied Metal Working**, pp. 15-23, ASM ed., 1981.

XAVIER, F. A.,SCHRAMM, B., “Materiais Cerâmicos de Corte”, **Revista Máquinas e Metais**, Ed. Aranda, Ano XIII nº 493, pp . 32-49,2007.

YUHARA, D. A.; **Aplicação de Revestimentos PVD em Ferramentas de Corte**. São Paulo: Brasimet Com. Ind. S. A., 2000. Disponível em: <http://www.brasimet.com.br/artigos/default.asp>. Acesso em: 15 fev. 2008.

ZEILMAN, Panosso Rodrigo; NICOLA Gerson L: Desgaste de brocas de Metal Duro com diferentes condições de uso do fluido do corte – Máquinas e Metais – São Paulo – Aranda Ano XLV abril 2009 p 166 – 179.