



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS: UMA AVALIAÇÃO COM BASE NO
TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

CARLOS ALBERTO DE CARVALHO DUTRA

São Luís

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS: UMA AVALIAÇÃO COM BASE NO
TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

Carlos Alberto de Carvalho Dutra

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

Coorientador: Eng. Mecânico Hércules Araújo Oliveira

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

São Luís

2015

Dutra, Carlos Alberto de Carvalho

Estudo da usinabilidade dos aços: uma avaliação com base nos testes de composição química, composição química e índice de usinabilidade / Carlos Alberto de Carvalho Dutra – São Luís, 2015.

69 f

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

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues

1. Usinabilidade. 2. Composição química . 3. Aços I. Título

CDU: 621.9.048

CARLOS ALBERTO DE CARVALHO DUTRA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS: UMA AVALIAÇÃO COM BASE NO
TESTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

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

Defesa de TCC aprovada em, _____ de _____ de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues
(Orientador)

Eng. Mecânico Hércules Araújo Oliveira
(Coorientador)

Prof. Msc. Flavio Nunes Pereira
(Membro da Banca Examinadora)

Prof. Msc. Edilson Dantas Nóbrega
(Membro da Banca Examinadora)

Dedico este trabalho à minha mãe Maria
Valderez de Carvalho Dutra.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Ao meu professor e orientador Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues, por desempenhar um papel honrável e excelente como professor e orientador desta universidade e por ter me aceito como orientando, ao meu coorientador Engenheiro Mecânico Hércules Araújo Oliveira e ao Engenheiro Mecânico Jhonatan Peres de Sousa por me sugerirem ideias que melhoraram meu trabalho.

À minha mãe, Maria Valdez de Carvalho Dutra, por me guiar sempre pelo caminho da honestidade e sempre me mostrar que Deus é importante em nossas vidas, por me ensinar valores essenciais para a minha formação, por me mostrar o caminho certo a seguir e por sempre acreditar eu todos os seus esforços para me educar da melhor maneira possível sempre depositando confiança em mim, por acreditar no meu sucesso acadêmico e profissional, e por nunca desistir de mim.

À minha esposa Elizangela Santos Garreto por me incentivar a nunca desistir mesmo nos momentos de fraqueza, sempre me dando uma palavra de conforto para que eu nunca desistisse dos meus sonhos.

Aos meus colegas de faculdade que mesmos distantes sempre me incentivaram para que eu obtivesse êxito nessa jornada.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

"Há um momento especial que acontece na vida de toda pessoa, o momento para o qual ela nasceu. Quando aproveitada, essa oportunidade extraordinária faz com que a pessoa cumpra sua missão, uma missão para a qual somente ela tem as qualificações necessárias. Nesse momento, a pessoa encontra a grandeza. Esse é seu mais maravilhoso instante."

Winston Churchill

RESUMO

Usinabilidade é a capacidade de um metal de ser usinado, ou seja, de ser trabalhado por uma ferramenta manual ou mecânica. Os metais em geral apresentam maior ou menor resistência para ser usinado. Quanto maior a resistência deste metal, mais difícil ele é de ser usinado. No caso dos aços, a composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos têm um efeito acentuado na usinabilidade dessa classe de materiais metálicos, a partir do ensaio de usinabilidade com base na avaliação da composição química. Este trabalho tem como objetivo estudar a usinabilidade dos aços carbono com base no teste de composição química proposto por CZAPLICKI, (1962) levando-se em consideração os elementos químicos residuais presentes nos aços carbono e analisando os efeitos observados de cada elemento presente na equação do teste de composição química e sua influência no índice de usinabilidade dos metais estudados. Por meio da análise de dados gerados por um software de processamento de dados, verificando-se o comportamento de cada composto químico na usinabilidade do aço através de gráficos e Tabelas para uma maior organização de resultados, sendo que estes mostraram que os elementos como o carbono e silício tornam-se prejudiciais quando seus teores percentuais estão elevados e o enxofre, manganês e fósforo são favoráveis à usinabilidade em teores percentuais controlados.

Palavras – chave: Usinabilidade, Propriedades Químicas, Composição Química e Índice de Usinabilidade.

ABSTRACT

Machinability is the ability of a metal to be machined, i.e., to be worked by a manual or mechanical tool. The metals generally exhibit greater or lesser resistance to be machined. The higher resistance of this metal, it is more difficult to be machined. In the case of steel, the chemical composition, microstructure and mechanical and thermal treatments have a marked effect on machinability of this class of metallic materials, from the machinability testing based on the evaluation of the chemical composition. This work aims to study the machinability of carbon steels based on chemical composition test proposed by Czaplicki, (1962) taking into account the residual chemical elements present in carbon steels and analyzing the observed effects of each element present in the equation of chemical composition test and its influence on machinability index of the studied metals. Through the analysis of data generated by a data processing software, was observed the behavior of each chemical compound in the steel machinability, using graphs and tables to a larger organization results, and these showed that elements like carbon and silicon become harmful when their percentage levels are high and sulfur, manganese and phosphorus are favorable to machinability in controlled percentage levels.

Key - words: Machinability, Chemical Properties, Chemical Composition and Machinability Index.

Lista de figuras

Figura 2. 1 – Diagrama da cunha cortante e formação do cavaco.....	24
Figura 2. 2 – Classificação das formas de cavaco	24
Figura 2. 3 – Cunha de corte de uma ferramenta qualquer	30
Figura 2.4 – Elementos de uma cunha de corte de uma fresa frontal.....	30
Figura 2.5 – Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma Ferramenta de torneamento.....	30
Figura 2. 6 – Representação de uma ferramenta com desgaste, revelando as principais localizações e tipos de desgaste que ocorrem	33
Figura 2. 7 – Causas e ações para minimização de avarias e desgastes da ferramenta.....	34
Figura 2. 8 – Aresta Postiça de Corte	36
Figura 2. 9 – Camadas múltiplas de revestimento e suas funções	37
Figura 2. 10 – Componentes ortogonais da força de usinagem nos processos de: (a) torneamento longitudinal externo; (b) furação em cheio; (c) fresamento tangencial discordante	41
Figura 2. 11 – Influência dos ângulos da ferramenta nas componentes da força de usinagem .	43
Figura 2. 12 – Influência de V_c na força de corte para vários materiais	44
Figura 2. 13 – Funções do fluido de corte	46
Figura 2. 14 – Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte.....	47
Figura 2. 15 – Comparação das quantidades de fluido aplicado em furação: (a) normal; (b) MQF.....	48
Figura 2. 16 – Classificação dos ensaios de usinabilidade	55

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Habilidade dos elementos de liga em conferir certas características aos aços para ferramentas e matrizes	21
Tabela 3.1 - Tabela de composição química dos aços os carbono	60
Tabela 4.1 - Teores da composição química dos aços carbono utilizados neste trabalho	64

Lista de gráficos

Gráfico 4.1 – Relação entre o índice de usinabilidade e os aços carbono utilizando como referência uma velocidade de corte para uma vida de 60 min no torneamento	61
Gráfico 4.2 – Relação entre o teor percentual de carbono nos aços testado e o índice de usinabilidade	62
Gráfico 4.3 – Relação entre o percentual de silício e o índice de usinabilidade encontrado nos aços de livre corte testado	62
Gráfico 4.4 – Relação entre o percentual de enxofre e o índice de usinabilidade	63
Gráfico 4.5 – Relação entre o teor de manganês e o índice de usinabilidade	63
Gráfico 4.6 – Relação entre o teor de fósforo e o índice de usinabilidade	64

Lista de siglas e abreviaturas

$A\gamma$ - superfície de saída:

$A\alpha$ – superfície primária de folga

$A'\alpha$ - superfície secundária de folga

S' - aresta secundária de corte

S - aresta principal de corte

A - ângulo de folga

B - ângulo de cunha

γ - ângulo da saída em relação à força de usinagem

χ_r - ângulo de posição principal

ϵ_r - ângulo de quina

χ'_r - ângulo de posição secundário

λ - ângulo de inclinação formado entre a aresta principal de corte e sua projeção sobre o plano

TiN - Nitreto de Titânio

TiCN - Carbonitreto de Titânio

TiC - Carboneto de Titânio

((Ti, Al)N) Nitreto de Alumínio-Titânio

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

v - velocidade instantânea de corte

l_c - espaço percorrido sobre a peça pelo ponto de referência da aresta cortante segundo a direção de corte.

t - tempo

m - minuto

mm - milímetro

F_C - força de corte

b - largura de corte

h - espessura de corte

K_C - força específica de corte

F_f - força de avanço

v_a - velocidade de avanço

F_p - força passiva

b - largura de corte

f - avanço

APC - aresta postiça de corte

A_p - Profundidade de usinagem

g_0 - ângulo de saída da ferramenta

l_s - ângulo de inclinação da ferramenta

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SAE - Society of Automotive Engineers

ISO - International Standard Organization

AISI - American Iron and Steel Institute

Mn - Manganês

Si - Silício

P - Fósforo

S – Enxofre

C- Carbono

Cr – Cromo

V – Vanádio

W – Tungstênio

Co – Cobalto

Ni – Níquel

Mo – Molibdênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO BILIOGRÁFICA	20
2.1 Considerações Iniciais.....	20
2.2 Definição de Usinagem.....	20
2.3 Classificação dos Processos de Usinagem	22
2.3.1 Classificação quanto ao processo de remoção do material	22
2.3.2 Classificação quanto a geometria da ferramenta de corte	22
2.3.3 Classificação quanto a finalidade da operação de corte.....	23
2.4 Definição de Cavaco	23
2.4.1 Formação de Cavaco.....	23
2.4.2 Tipos de cavaco	25
2.4.3 Formas de cavaco.....	26
2.5 Considerações Gerais da ferramenta de corte	27
2.5.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte	28
2.6 Geometria da ferramenta de corte.....	28
2.6.1 Ângulos da ferramenta no plano de medida	31
2.6.2 Ângulos da ferramenta no plano de referência	31
2.7 Desgaste, Avarias e Vida da Ferramenta	32
2.7.1 Conceito de vida da ferramenta	34

2.8 Influência da aresta postiça de corte na usinagem	36
2.9 Revestimento da ferramenta.....	36
2.10 Velocidades na usinagem.....	37
2.10.1 Velocidade de Corte.....	38
2.10.2 Velocidade de Avanço	38
2.10.3 Velocidade Efetiva de Corte.....	38
2.11 Força de Usinagem	39
2.11.1 Forças durante a usinagem	40
2.11.2 Fatores que influenciam a força de usinagem	42
2.12 Fluido de corte.....	45
2.12.1 O fluido de corte como refrigerante.....	45
2.12.2 O fluido de corte como lubrificante	46
2.12.3 Classificação dos fluidos de corte.....	47
2.12.4 Métodos de aplicação dos fluidos de corte.....	48
2.13 Estudo da Usinabilidade.....	49
2.13.1 Principais problemas decorrentes da má Usinabilidade.....	49
2.13.2 Principais grupos que influenciam a Usinabilidade.....	50
2.13.3 Critérios de avaliação da Usinabilidade	51
2.13.4 Fatores ligados ao material da peça que afetam a Usinabilidade	51
2.13.5 Efeitos dos elementos de liga na Usinabilidade dos Aços	52
2.13.6 Efeito das propriedades do material na usinabilidade.....	54

2.13.7 Ensaio de Usabilidade.....	55
2.13.8 Testes de Composição Química.....	57
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	59
3.1 Metodologia.....	59
3.2 Material Ensaado	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
5 CONCLUSÃO.....	65
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

De acordo com CHIAVERINI (2005) e INFOMET (2005), dentre todos os materiais disponíveis, o aço é a mais versátil e a mais importante das ligas metálicas conhecidas pelo ser humano, isso porque este material apresenta uma interessante combinação de propriedades mecânicas que podem ser modificadas dentro de uma ampla faixa variando-se o tipo e a concentração dos elementos de liga por intermédio de tratamentos térmicos.

Segundo CHIAVERINI (2005), a respeito da utilização do ferro e do aço na forma de ferramenta e do conhecimento, mesmo grosseiro, do processo hoje designado têmpera serem muito antigos, foi somente a partir do século XX que o uso do aço se generalizou e ganhou a importância tecnológica vista recentemente. Com forte investimento em estudos e pesquisas tanto em técnicas de fabricação quanto no desenvolvimento de novos tipos de aços, onde a incorporação de novos elementos de liga possibilitou a sua aplicação em condições de serviço cada vez mais exigentes.

Para FERRARESI (1977), dos vários processos utilizados para modificar a estrutura dos aços destaca-se a usinagem, no qual a peça é o resultado de um processo de remoção de material, como torneamento, fresamento, furação, etc.

Com seus estudos FERRAZ, (2002) afirma que outro fator importante na utilização do aço é o tempo de fabricação, sendo que a noção das condições e a seleção de processos adequados proporcionam uma diminuição significativa nos tempos de fabricação, reduzindo os custos de produção. Parâmetros não controlados como, velocidade de corte, lubri-refrigeração e tratamento térmico, podem comprometer o desempenho do material e a vida útil do produto. O alto grau de precisão dimensional, agrupado a uma excelente qualidade de superfície usinada faz com que os processos de usinagem em algumas situações não possam ser substituídos por outros processos de fabricação.

Para TESSLER (1993), a usinabilidade dos materiais é uma propriedade difícil de ser definida, pois esta sujeita a diferentes fatores dos próprios processos de usinagem: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tipos das ferramentas, das máquinas operatrizes e dos fluidos de corte. Cada material apresenta individualidades que ditam as normas mais apropriadas de usinagem.

A usinabilidade de um material pode ser determinada por um valor numérico comparativo, que expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um material em

relação a outro tomado como padrão. Essas propriedades consideradas são: vida da ferramenta de corte; força de usinagem; acabamento superficial da peça; temperatura de corte; produtividade da máquina operatriz; e as características do cavaco. Os resultados dessas medidas são difíceis de serem analisados devido ao número de variáveis que interfere no processo (ARFELD et al., 1977).

A avaliação mais expressiva da usinabilidade do aço se faz através do custo necessário para produzir um grupo de peças em máquina operatriz. As peças devem satisfazer a uma avaliação de qualidade, sendo indispensável que tenham tolerância dimensional, acabamento superficial e integridade funcional. Colocando esses fatores como necessários, o custo mínimo das peças pode ser alcançado somente através de uma alta produtividade alcançada com elevadas velocidades de corte e baixo desgaste das ferramentas (ARFELD et al., 1977).

Com o tema do trabalho “Estudo da usinabilidade dos aços: uma avaliação com base no teste de composição química” foi montado um banco de dados para a aplicação da equação de teste de composição química. Foi realizada uma revisão bibliográfica geral sobre o assunto de usinabilidade até esclarecer e desenvolver a maneira correta de cálculo do índice de usinabilidade através da equação de teste de composição química. Com a geração do banco de dados, coletaram-se os dados necessários e a simulação foi executada por um software de análise de dados. Assim foi criada uma Tabela com os resultados e também foram gerados os gráficos para melhor comparação dos resultados encontrados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

De acordo CHIAVERINI (1965), o aço é uma liga de natureza relativamente complicada e sua definição não é fácil, os aços comerciais não são ligas binárias. De fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contem sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação.

Para FERRARESI (1977), o aço, basicamente é formado por uma liga de ferro e carbono, entretanto, apresenta uma variedade muito grande de composição; desde os aços de baixo carbono até os aços – ligas contendo alta concentração de um ou mais elementos, como o níquel, cromo, vanádio, tungstênio, molibdênio, etc. A especificação e a identificação pode ser feita através de índices numéricos instituídos pela AISI e SAE norte americanas e adotados pela ABNT, no Brasil.

Os aços podem ser classificados de várias maneiras, conforme o processo de fabricação. Uma classificação muito utilizada leva a quantificação em porcentagem de elementos de liga (Aços de baixa liga, até 5% de elementos de liga, Aços de média liga, de 5,0% a 10,0% de elementos de liga, e Aços de alta liga, acima de 10% de elementos de liga) entre outras possibilidades, outra forma de classificação para aços fundidos é baseada em sua composição química (CHIAVERINI, 1965).

Segundo DINIZ (2006), os aços com baixo teor de carbono têm tendência à formação da aresta postiça de corte por causa da baixa dureza e alta ductilidade. Isso gera uma menor vida útil da ferramenta e prejudica o acabamento superficial da peça.

Para BAS (1995), os aços de livre corte são aqueles que satisfazem a um tipo de material que sob um processo de usinagem oferecem um melhor retorno de resposta. Nesses aços em que se encontra baixa ou média concentração de carbono é conveniente adicionar enxofre e chumbo em sua composição para melhor resultados em processos de usinagem. Eles tornam-se necessários para aperfeiçoar a usinabilidade dessa liga ferro-carbono e ainda oferece certa lubrificação das ferramentas de corte utilizadas, permitindo ainda uma velocidade de corte aumentada e conseqüentemente um melhor acabamento superficial.

2.2 Definição de Usinagem

Na usinagem de um metal, no começo do corte, a ferramenta penetra no material da peça, e este sofre uma deformação elástica e plástica. Quando o mesmo atinge a tensão máxima de cisalhamento do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte. O desempenho do material frente a esse trabalho de usinagem é que vai caracterizar a usinabilidade do mesmo (FERRARESI, 1977).

De acordo com FERRARESI (1977), a Usinagem pode ser definida de uma forma simples: “Processo de fabricação com remoção de cavaco”. A usinabilidade interessa além dos fabricantes dos metais, aos consumidores, aos fabricantes de ferramentas, enfim, a todos que se envolvem na produção de peças, por meio da formação do cavaco.

Algumas características fundamentais dos aços para ferramentas são a dureza, resistência ao desgaste, temperabilidade, tenacidade e resistência mecânica. As principais condições que possibilitam o atendimento das exigências de qualidade dos aços considerados se dão essencialmente através da composição química e de tratamentos térmicos. A habilidade dos elementos de liga em conferir certos característicos aos aços para ferramentas é mostrada na Tabela 2.1. Cada elemento é apresentado na ordem aproximada de potencialidade para conferir cada requisito. O tratamento térmico, por sua vez, irá determinar a estrutura e as propriedades finais do aço ferramenta. (CHIAVERINI, 2005; RAUTER, 1974).

Tabela 2.1 - Habilidade dos elementos de liga em conferir certas características aos aços para ferramentas e matrizes.

Característicos	Elementos de liga
Dureza a quente	W, Mo, Co (com W ou MoI), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste	V, W, Mo Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	Mn, Mo, Cr, Si, Ni, V (a)
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Tenacidade pelo refino de grão	V, W, Mo, Mn, Cr
(a) O vanádio fornece elevada profundidade de endurecimento se austenizado a temperatura suficientemente elevada para dissolver o carboneto de vanádio.	

Fonte: (CHIAVERINI, 2005)

Na usinagem de um metal, no início do corte, a ferramenta penetra no material da peça, e este se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão máxima de cisalhamento do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte. O desempenho do material frente a esse trabalho de usinagem é que vai caracterizar a usinabilidade do mesmo (FERRARESI, 1977).

2.3 Classificação dos Processos de Usinagem

Os processos de usinagem envolvem operações de corte que removem excessos de um material bruto com auxílio de uma ferramenta até que o resultado seja uma peça pronta que irá compor algum equipamento mecânico que, por sua vez, fará parte de bem durável. Nestas operações, são gerados resíduos que se costumam designar de cavacos. Então, processos de usinagem, invariavelmente, implicam na geração de cavacos (DE SOUZA, 2011).

De acordo com DE SOUZA, (2011) e STOETERAU et al. (2004), os processos de usinagem podem ser divididos em classes considerando os seguintes parâmetros de classificação:

2.3.1 Classificação quanto ao processo de remoção de material

Para DE SOUZA (2011), processo de remoção por usinagem pode ser dividido em duas grandes categorias:

Processos convencionais, em que as operações de corte empregam energia mecânica na remoção do material, principalmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça – ex: torneamento, furação e retificação.

Processos especiais (não convencionais), em que as operações se utilizam de outros tipos de energia de usinagem (p.ex. termelétrica), não geram marcas-padrão na superfície da peça e a taxa volumétrica de remoção de material é muito menor que a dos processos convencionais – ex: laser (radiação), eletroerosão (elétrons) e plasma (gases quentes).

2.3.2 Classificação quanto à geometria da Ferramenta de Corte

Ainda de acordo com DE SOUZA (2011), os processos convencionais de usinagem ainda podem ser subdivididos em duas classes:

✓ Operações de corte com ferramentas de geometria definida (arestas cortantes com formato e tamanho conhecidos) – p.ex. torneamento, furação, fresamento.

✓ Operações de corte com ferramentas de geometria não-definida (partículas abrasivas com formatos aleatórios e compostas por arestas minúsculas de corte) – p.ex. retificação, brunimento, lapidação .

2.3.3 Classificação quanto à finalidade da Operação de Corte

✓ Operações de desbaste

O desbaste é o processo de redução controlada, acelerada ou não, em função do material a ser desbastado ou usinado. Essa operação é executada antes do acabamento, visando obter na peça dimensões e formas próximas das finais (FERRARESI, 1977).

✓ Operações de acabamento.

É destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento especificado, ou ambos. O acabamento é realizado após a operação de desbaste, por ser um processo mais delicado, tende mais à precisão e a conclusão da peça que a retirada de material (FERRARESI, 1977).

No acabamento, quando o sobremetal deixado pela operação de desbaste é removido, a qualidade final do componente é prioritária.

2.4 Definição de Cavaco

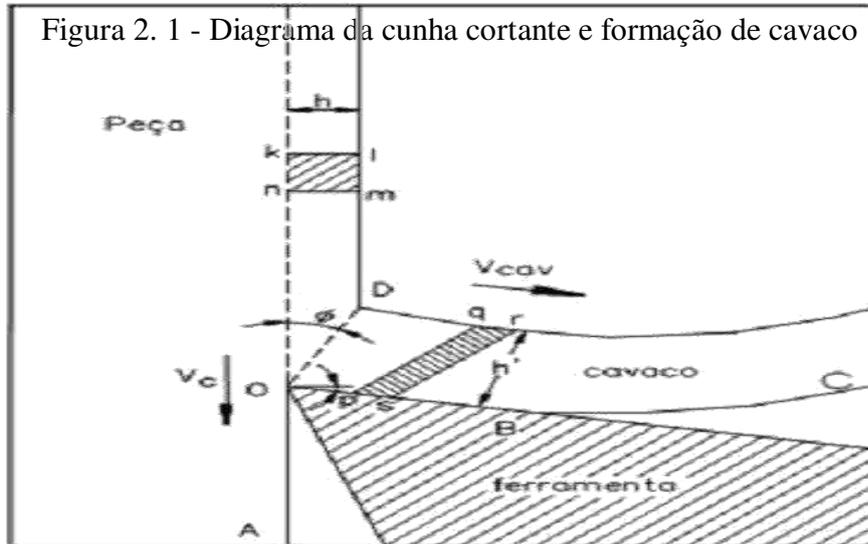
De acordo com STOETERAU et al. (2004), cavaco é definido como a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma irregular.

O cavaco é definido por FERRARESI (1977), como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. Há muitos anos os estudos de Dino Ferraresi se solidificaram e têm sido usados como referências nos estudos de usinagem.

2.4.1 Formação de Cavaco

Para SHAW (1986), diversas variáveis podem influenciar a natureza e a extensão da fratura que ocorre durante o processo de formação de cavaco. Entre estas estão as características do material (número, tamanho, forma e dureza relativa das heterogeneidades, dureza produzida por tratamento térmico ou por encruamento) e a geometria da ferramenta,

sendo que, segundo KLOSE (1993), ângulos de saída negativos ou arredondamentos da ponta da ferramenta aumentam a deformação plástica durante a formação do cavaco. O diagrama da cunha cortante e formação do cavaco são mostrados na figura 2.1.



Fonte: (TRENT, et al., 2000)

A figura 2.2 mostra a classificação da forma dos cavacos e as várias formas de cavaco que se obtém no processo de usinagem.

Figura 2. 2 - Classificação da forma dos cavacos

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

2.4.2 Tipos de cavaco

De acordo com FERRARESI, (1977), os cavacos podem ser classificados como:

Cavaco contínuo:

Características:

- ✓ lamelas justapostas numa disposição contínua - lado de baixo geralmente suave

Formação do cavaco: - fluxo contínuo do material (materiais dúcteis) - elementos do cavaco não se separam em zonas de cisalhamento

Condições de formação:

- ✓ alta velocidade de corte
- ✓ grandes ângulos de usinagem

Acabamento Superficial:

✓ Como a força de corte varia muito pouco devido a contínua formação do cavaco, a qualidade superficial é muita boa.

Cavaco de cisalhamento (ou lamelar):

Características:

- ✓ superfície fortemente indentada

Formação do cavaco:

- ✓ fluxo não contínuo do material
- ✓ cavacos lamelares são levemente deformados no plano de cisalhamento e novamente soldados.

- ✓ serrilhado nas bordas o difere do cavaco contínuo.

Condições de formação:

✓ materiais com baixa ductilidade. A descontinuidade é causada por irregularidades no material, vibrações, ângulo efetivo de corte muito pequeno, elevada profundidade de corte, baixa velocidade de corte, etc. (FERRARESI, 1977).

Acabamento Superficial:

✓ A qualidade superficial é inferior a obtida com cavaco contínuo, devido a variação da força de corte. Tal força cresce com a formação do cavaco e diminui bruscamente com sua ruptura, gerando fortes vibrações e uma superfície com ondulações.

Cavaco de ruptura:

Características:

✓ fragmentos arrancados de peças usinadas

Formação do cavaco:

✓ fluxo não contínuo do material

✓ completa desintegração do cavaco

Condições de formação:

✓ materiais com baixa ductilidade (frágeis)

✓ condições desfavoráveis de usinagem (ângulo de saída com valores muito baixos, nulos ou negativos)

Acabamento Superficial:

✓ o cavaco rompe em forma de concha gerando uma superfície com qualidade superficial inferior

2.4.3 Formas de cavaco

De acordo com as formas, usualmente, os cavacos classificam-se em (FERRARESI, 1977):

- Cavaco em fita;
- Cavaco helicoidal;
- Cavaco espiral;
- Cavaco em lascas ou pedaços.

O cavaco em fita é o que apresenta maiores inconvenientes, pode provocar acidentes, ocupa muito espaço e é difícil de ser transportado, deve ser evitado.

Cavaco em lascas é preferido quando houver pouco espaço disponível ou quando o cavaco é removido por fluido sob pressão.

Os cavacos helicoidais deixam com maior facilidade o espaço entre os dentes da ferramenta quando a remoção de material é elevada.

A forma do cavaco influencia os seguintes fatores (FERRARESI, 1977):

- ✓ Segurança do operador;
- ✓ Possível dano à ferramenta ou à peça;
- ✓ Manuseio e armazenagem;
- ✓ Forças de corte;
- ✓ Temperatura e vida da ferramenta.

Materiais dúcteis tendem a produzir cavacos longos e contínuos que são os mais prejudiciais. Materiais frágeis produzem cavacos em forma de pequenas partículas.

2.5 Considerações gerais da ferramenta de corte

De acordo com FERRARESI (1977), o essencial para a execução do processo é a ferramenta de usinagem, ela deve ser fabricada com material adequado que de acordo com as temperaturas, esforços e fatores de corte possa atender a essas exigências. Deve-se considerar uma série de fatores para selecionar uma ferramenta de corte:

- ✓ Material a ser usinado – dureza do material e tipo de cavaco;
- ✓ Processo de usinagem – ferramentas rotativas de pequenos diâmetros utilizam materiais mais antigos (tipo aço rápido) devido às dificuldades de se obter as velocidades indicadas para materiais mais nobres;
- ✓ Condição da máquina – máquinas antigas, com folgas, exigem materiais mais tenazes que não requeiram altas velocidades;
- ✓ Custo do material da ferramenta – relação custo / benefício;
- ✓ Condições de usinagem – condições de acabamento exigem ferramentas mais resistentes ao desgaste, operações de desbaste exigem ferramentas mais tenazes, etc.;
- ✓ Condições de operação – corte interrompido e/ou sistema de fixação pouco rígido, exigem ferramentas mais tenazes.

Principais características dos materiais para ferramentas:

- a) Dureza a quente – temperaturas podem ultrapassar os 1000°C;
- b) Resistência ao desgaste – resistência ao desgaste por abrasão, por atrito;
- c) Tenacidade – ferramenta mais tenaz resiste melhor aos choques inerentes ao processo;
- d) Estabilidade química – evitar o desgaste por difusão.

2.5.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte

De acordo com KALPAKJIAN (2001), as ferramentas de usinagem normalmente estão sujeitas as seguintes solicitações: altas tensões localizadas; altas temperaturas, escoamento do cavaco ao longo da superfície de saída e o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada. Estas solicitações provocam o desgaste da ferramenta, ou seja, diminuem a vida útil da mesma, afetando também a qualidade da superfície usinada, a precisão dimensional e conseqüentemente a viabilidade econômica do processo são bastante influenciados pela vida da ferramenta.

STOETERAU et al. (2004) nomeia os seguintes requisitos:

- ✓ Resistência à compressão;
- ✓ Resistência ao cisalhamento;
- Dureza;
- ✓ Resistência à flexão e tenacidade;
- ✓ Resistência do gume;
- ✓ Resistência interna de ligação;
- ✓ Resistência a quente;
- ✓ Resistência à oxidação;
- ✓ Pequena tendência à fusão e caldeamento;
- ✓ Resistência à abrasão;
- ✓ Boas propriedades térmicas e mecânicas em altas temperaturas;
- ✓ Resistência ao choque térmico;
- ✓ Resistência ao impacto.

2.6 Geometria da ferramenta de corte

Para MACHADO et al. (2009), a forma da geometria da ferramenta de corte exerce influência no desempenho da usinagem. Se a sua geometria não tiver sido preparada adequadamente, não haverá êxito na operação. A sua importância é tão grande que se faz necessário normalizar, da maneira mais adequada possível, os ângulos da cunha cortante para uniformizar a nomenclatura entre os profissionais e a literatura especializada. As definições a seguir, baseiam-se na norma brasileira NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia.

DINIZ, MARCONDES E COPPINI (2001), definem as ferramentas de usinagem, geralmente, compostas com as seguintes partes construtivas:

✓ Parte de corte: parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte. A parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte ou cabo da ferramenta, através do qual é possível fixar a ferramenta para construção, afiação, reparo, controle e trabalho. A Figura mostra que a ferramenta poderá ser fixada pelo seu eixo.

✓ Cunha de corte: é a cunha da ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e folga (Figura 2.3).

✓ Superfície de saída (A_y): é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoa durante sua saída da região do trabalho de usinagem (Figuras 2.3 e 2,4).

✓ Superfície principal de folga (A_α): é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal (Figuras 2.3 e 2.4).

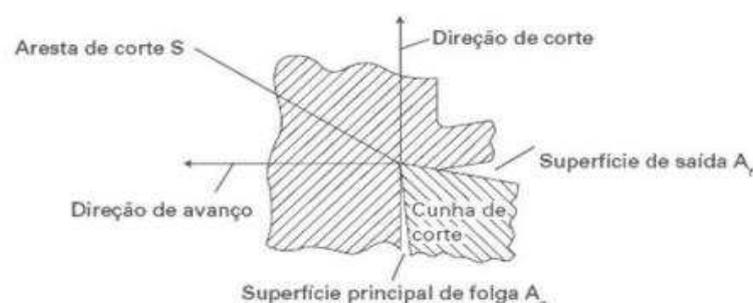
✓ Superfície secundária de folga ($A'\alpha$): é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundária e que defronta com a superfície em usinagem secundária (Figuras 2.3 e 2.4).

✓ Aresta principal de corte S: é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal (Figura 2.3). Gera na peça a superfície em usinagem principal (Figura 2.3).

✓ Aresta secundária de corte S': é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária (Figura 2.3).

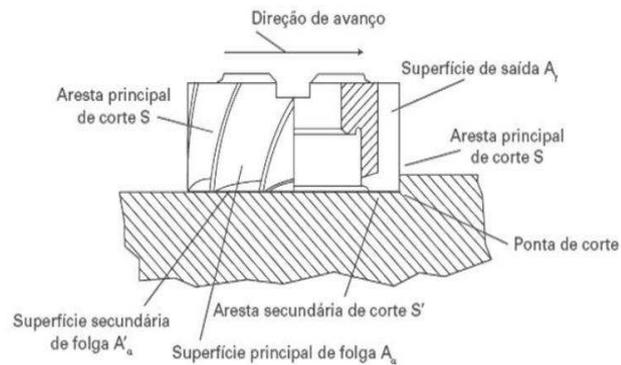
✓ Ponta de corte: é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte (Figura 2.3 e 2.4). A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro.

Figura 2.3 -- Cunha de corte de uma ferramenta qualquer



Fonte: (MACHADO et al., 2011)

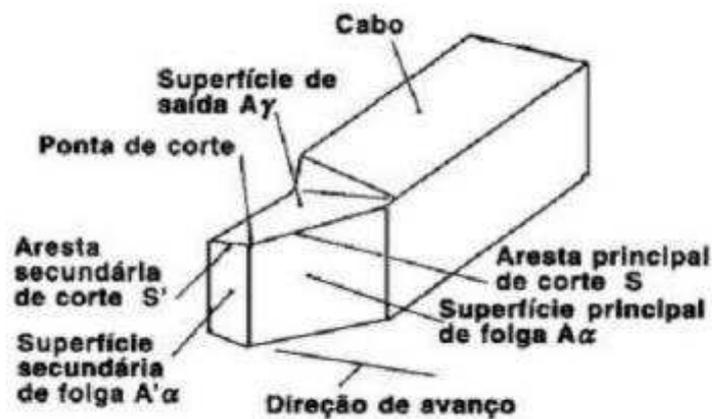
Figura 2.4 - Elementos da cunha de corte de uma fresa frontal



Fonte: (MACHADO et al., 2011)

A Figura 2.5 identifica as arestas de corte e as superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.

Figura 2.5 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento



Fonte: (DINIZ, et al., 2000)

2.6.1 Ângulos da ferramenta no plano de medida

De acordo com as definições de DE SOUZA (2011):

✓ Ângulo de folga (α).

Formado entre a superfície de folga e o plano de corte medido no plano de medida da cunha cortante; influencia na diminuição do atrito entre a peça e a superfície principal de folga. A função do ângulo de folga (α) é evitar o atrito entre a superfície transitória da peça e a superfície de incidência (flanco) da ferramenta e permitir que a aresta de corte penetre no material e corte livremente. A grandeza de α depende principalmente dos seguintes fatores: resistência do material da ferramenta de corte; resistência e dureza do material da peça a ser usinada.

✓ Ângulo de cunha (β).

Formado pelas superfícies de folga e de saída; é medido no plano de medida da cunha cortante. A principal função do ângulo β é aumentar a resistência mecânica da ferramenta, visto que materiais de difícil corte exercem maior pressão próxima à aresta de corte e por isso exigem uma cunha menos aguda. Consequentemente, tais materiais provocam maior aquecimento na região mais próxima à ponta da ferramenta (cunha e quina). Portanto, quanto maior for β , maior a área de dissipação de calor e maior a resistência da ferramenta de corte.

✓ Ângulo da saída (γ).

Formado pela superfície de saída da ferramenta e pelo plano de referência medido no plano de medida; é determinado em função do material, uma vez que tem influência sobre a formação do cavaco e sobre a força de corte. Este é um dos ângulos mais importantes da ferramenta, pois influi decisivamente na força e na potência necessária ao corte, no acabamento da superfície usinada e no calor gerado. A grandeza de γ depende principalmente dos seguintes fatores: resistência do material da ferramenta de corte; resistência e dureza do material da peça a ser usinada; quantidade de calor gerado pelo corte; aumento da velocidade de avanço.

2.6.2 - Ângulos da ferramenta no plano de referência

De acordo com as definições de DE SOUZA (2011):

✓ Ângulo de posição principal (χ_r).

Formado pela projeção da aresta principal de corte sobre o plano de referência e pela direção do avanço medido no plano de referência. O ângulo χ_r tem as seguintes funções: controlar o choque de entrada da ferramenta; distribuir as tensões de corte favoravelmente no início e no fim de corte; alterar a espessura do cavaco e o comprimento

atuante da aresta de corte; aumentar o ângulo de quina (ϵ_r); gerar uma força passiva na ferramenta que ajuda a eliminar eventuais vibrações; influir na direção de saída do cavaco. Em trabalhos de desbaste usuais, o ângulo χ_r pode variar de 30° a 60° . Na ferramenta de sangrar e no bedame, $\chi_r = 90^\circ$. Não se aconselha usar $\chi_r > 90^\circ$ para não acunhar a ponta da ferramenta no material.

✓ Ângulo de quina (ϵ_r).

Formado pela projeção das arestas lateral e principal de corte sobre o plano de referência e medido no plano de referência. É determinado conforme o avanço. A principal função do ângulo ϵ_r (assim como do ângulo β) é aumentar a resistência mecânica da ferramenta, visto que materiais de difícil corte exercem maior pressão próxima à aresta de corte e por isso exigem uma quina menos aguda. Conseqüentemente, tais materiais provocam maior aquecimento na região mais próxima à ponta da ferramenta (cunha e quina). Portanto, quanto maior for ϵ_r , maior a área de dissipação de calor e maior a resistência da ferramenta de corte.

✓ Ângulo de posição secundário (χ'_r).

Formado entre a projeção da aresta lateral de corte sobre o plano de referência e a direção de avanço medido no plano de referência. O ângulo χ'_r indica a posição da aresta secundária de corte. Sua principal função é controlar o acabamento, ou seja, permitir que apenas uma pequena parte da aresta secundária entre em contato com a superfície usinada, evitando assim vibrações. No entanto, deve-se lembrar que o acabamento da superfície usinada depende também do raio de quina da ferramenta ($r\epsilon$).

✓ O ângulo de inclinação (λ).

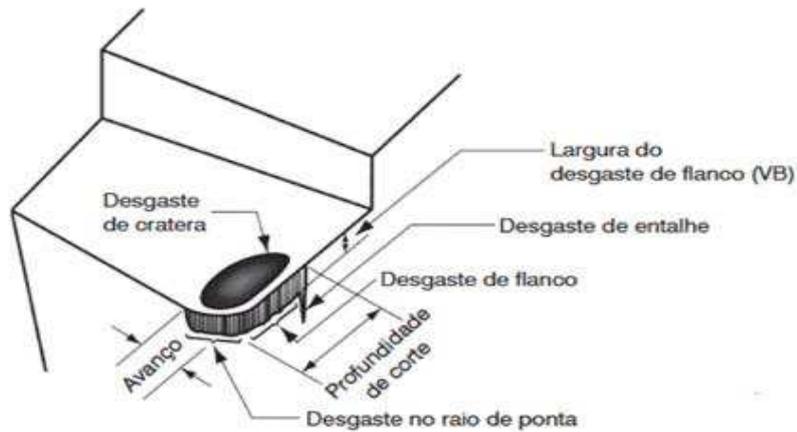
É o ângulo formado entre a aresta principal de corte e sua projeção sobre o plano de referência medido no plano de corte. Tem por finalidade controlar a direção do escoamento do cavaco, proteger a quina da ferramenta contra impactos e atenuar vibrações.

2.7 Desgaste, Avarias e Vida da Ferramenta

De acordo com DUARTE (2006) Um ponto essencial, talvez o mais crítico na fabricação de um componente, é saber o momento exato da troca da ferramenta de corte, considerando sua máxima utilização e, obviamente, respeitando os limites da qualidade da peça produzida. Portanto, o monitoramento do processo de usinagem é de extrema importância para a otimização da vida da ferramenta e prevenção de quebra, possibilitando, uma diminuição do custo de produção.

Existem vários tipos de desgaste de ferramenta, o desgaste de entalhe, o desgaste de cratera, mas, o mais utilizado como critério de fim de vida de ferramenta é o desgaste de flanco. Este tipo de desgaste ocorre na superfície de folga da ferramenta, afetando sua afiação, e está presente em todas as operações de usinagem (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Representação de uma ferramenta com desgaste, revelando as principais localizações e tipos de desgaste que ocorrem.



Fonte: Fundamentals of Modern Manufacturing, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010.

De acordo com SOUTO (2007) a avaria, que acontece de maneira repentina e inesperada, é quando ocorre um lascamento ou trinca. As avarias tornam-se mais comuns nos processos de corte interrompido, principalmente com relação a choques térmicos e mecânicos, onde as ferramentas estão submetidas a exigências extremas.

DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2001), citam alguns tipos de avarias:

✓ Lascamento: acontece quando partículas maiores são retiradas de uma só vez, ao contrário dos desgastes de cratera e de flanco, que retiram partículas muito pequenas da ferramenta de forma contínua.

✓ Trincas: são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. Alguns fatores que causam isso são: corte interrompido, dificuldade de penetração do fluido de corte e variação da espessura de corte (típica do fresamento).

A Figura 2.7 mostra as causas e ações para a minimização das avarias e desgastes da ferramenta.

Figura 2.7 - Causas e ações para minimização de avarias e desgastes da ferramenta

Tipo de Desgaste e/ou Avaria	Possíveis Causas	Ações para Minimização
Desgaste de Flanco	<ul style="list-style-type: none"> ● Velocidade de corte muito alta ou muito baixa (se a causa for a presença da APC). ● Resistência ao desgaste insuficiente da ferramenta. ● Abrasão ● Aresta Postiça de Corte. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Redução da velocidade de corte. ● Seleção de classe de ferramenta mais resistente ao desgaste. ● Aumento da velocidade de corte se o desgaste for causado pela APC.
Desgaste de Entalhe	<ul style="list-style-type: none"> ● Oxidação 	<ul style="list-style-type: none"> ● Seleção de fluido de corte com agentes anti-oxidantes.

Fonte: (DINIZ, et al., 2000)

2.7.1 Conceito de vida da ferramenta

MACHADO (2009) afirma que a vida de uma ferramenta de corte é definida pelo tempo no qual ela efetivamente trabalha entre duas afiações sucessivas ou a troca da aresta de corte do inserto., diz que por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas e por menor que seja a resistência mecânica da peça, a ferramenta de corte sempre sofrerá desgaste e precisará ser substituída. Isso ocorre, pois durante o processo de usinagem, a ferramenta é exposta a uma combinação de vários fatores de origem abrasiva, mecânica, química e térmica. Como tanto o material da peça como o da ferramenta de corte não são homogêneos, os desgastes e as avarias podem ser observados na ferramenta durante o uso.

DINIZ (2010) conceitua quatro fatores para o fim de vida das ferramentas de corte:

- ✓ Quando o desgaste é tão elevado que se receia a quebra da aresta de corte, sendo mais crítico em operações de desbaste.
- ✓ Quando não é mais possível conseguir tolerâncias apertadas ou acabamento superficial na peça, devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta.
- ✓ O desgaste eleva-se muito, fazendo a temperatura da aresta ultrapassar a

temperatura na qual a ferramenta perde o fio, sendo mais crítico em ferramentas de aço rápido que suportam temperaturas menores.

✓ Ocorre aumento da força de usinagem que interfere no funcionamento da máquina.

Segundo MACHADO et al. (2009), existem três fenômenos como responsáveis pela perda da eficiência das ferramentas de corte: *desgaste*, *avaria* e *deformação plástica*.

O *desgaste* é definido pela norma ISO 3685 (1993), como a mudança da forma original da ferramenta durante o corte, resultante da perda gradual de material. A progressão do desgaste apresenta-se como uma falha contínua e progressiva e em proporções pequenas, podendo ocorrer por vários mecanismos entre os quais a deformação plástica. Por ser um processo contínuo, o comportamento do desgaste pode ser modelado matematicamente ao longo do seu progresso, até o dano completo da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

As *avarias* são falhas transitórias que ocorrem de forma aleatória e inesperada, levando a ferramenta ao colapso, através da quebra, lascamento ou perda de considerável de material da aresta de corte, sendo detectadas apenas após ocorrerem, sendo subdivididas em: deformações plásticas, trincas e fraturas.

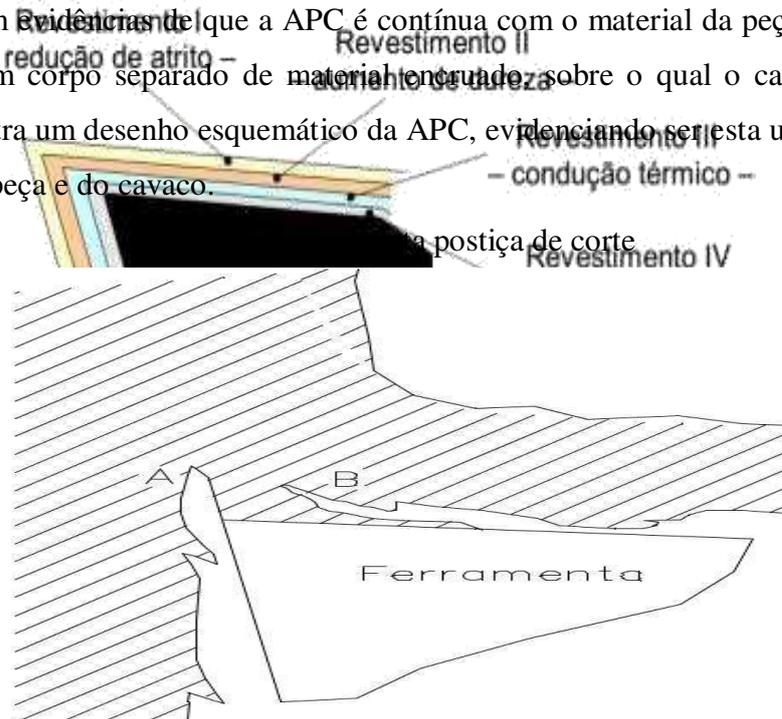
A *deformação plástica* é, segundo MACHADO (2009), a mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material, sendo causada pelas altas tensões cisalhantes que ocorrem na superfície da ferramenta de corte. Trent e Wright, 2000, dizem que a deformação plástica pode ser tratada como desgaste, uma vez que ambas promovem mudanças na geometria da ferramenta podendo causar a destruição da aresta de corte.

Além do desgaste, o atrito e a deformação plástica causados no processo resultam altas temperaturas na região de corte, ocasionando uma diminuição da resistência ao desgaste da ferramenta. Com isso, a aresta da ferramenta tem sua capacidade de corte reduzida, fazendo a força de usinagem aumentar. Esse aumento da força de corte produz um incremento da temperatura na região, tornando o desgaste mais acelerado.

2.8 Influência da aresta postiça de corte na usinagem

Segundo TRENT (1963) a aresta postiça de corte (APC) é um acúmulo de material encruado da peça que pode se formar na superfície de saída da ferramenta de corte durante a usinagem. Sua ocorrência está intimamente ligada às condições de corte e às características microestruturais do material da peça.

Quando se usina em baixas velocidades de corte, a aresta postiça de corte pode se formar. Existem evidências de que a APC é contínua com o material da peça e do cavaco, ao invés de ser um corpo separado de material endurecido sobre o qual o cavaco se escoou. A Figura 2.8 mostra um desenho esquemático da APC, evidenciando ser esta um corpo solidário ao material da peça e do cavaco.



Fonte: (TRENT, 1963)

2.9 Revestimento da ferramenta

De acordo com STOETERAU et al. (2004), possui as seguintes propriedades:

- ✓ Proteção do material de base da ferramenta;
- ✓ Redução de atrito na interface cavaco/ferramenta;
- ✓ Aumento da dureza na interface cavaco/ferramenta;
- ✓ Condução rápida de calor para longe da região de corte;
- ✓ Isolamento térmico do material de base da ferramenta.

A Figura 2.9 relaciona as camadas múltiplas de revestimento e suas funções.

Figura 2. 9 - Camadas múltiplas de revestimento e suas funções

Fonte: (STOETERAU, et al., 2004)

Principais propriedades das camadas de revestimento Carboneto de titânio (TiC):

- ✓ Alta dureza;
- ✓ Proteção contra o desgaste na superfície de saída;
- ✓ Tendência à difusão relativamente baixa.

Nitreto de titânio (TiN):

- ✓ Estabilidade termodinâmica;
- ✓ Baixa tendência à difusão. Carbonitreto de titânio (Ti(C,N)):
- ✓ Alta dureza;
- ✓ Comportamento frágil;
- ✓ Estabilidade térmica.

Nitreto de Alumínio-titânio ((Ti, Al)N):

- ✓ Boa resistência à oxidação;
- ✓ Boa dureza à quente. Óxido de alumínio (Al₂O₃):
- ✓ Boa resistência à abrasão;
- ✓ Boa resistência à oxidação.

2.10 Velocidades na usinagem

Para PAULO (2008) é a decorrência do deslocamento da ferramenta diante da peça, avaliado no tempo, para operações do tipo aplainamento e brochamento, onde os movimentos de corte e de avanço não ocorrem simultaneamente.

Deve-se distinguir a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a velocidade efetiva de corte (COSTA, 2006).

2.10.1 Velocidade de corte

De acordo com FERRARESI (1977), a velocidade de corte exerce uma grande influência sobre o acabamento de superfície, principalmente nos metais onde há formação de aresta postiça.

Conceitua-se como a velocidade de corte v a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte, a equação (1) é mostrada a seguir:

$$v = \frac{Ic}{100.t} \quad (1)$$

onde:

v = [m/min] - é a velocidade instantânea

Ic = [mm] - é o espaço percorrido sobre a peça pelo ponto de referência da aresta cortante segundo a direção de corte.

t = tempo (min)

2.10.2 Velocidade do avanço

A velocidade de avanço v_a é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço.

$$v_a = \frac{Ia}{t} \quad (2)$$

2.10.3 Velocidade efetiva de corte

A velocidade efetiva de corte v_e é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção efetiva de corte. Podem-se ter ainda as velocidades de posicionamento, de profundidade e de ajuste.

$$v_e = \sqrt{\left(\frac{va}{100}\right)^2 + v^2 + 2\left(\frac{va}{1000}\right) + v \cdot \cos\theta} \quad (3)$$

2.11 Força de usinagem

STOETERAU (2004), afirma que as forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta. A força total resultante que age sobre a cunha cortante durante a usinagem é chamada de força de usinagem (F_u). Como o processo de usinagem é extremamente complexo e cheio de variáveis e condições, não se conhece a direção nem o sentido da força de usinagem, tornando-se impossível medi-la e conhecer melhor as influências de diversos parâmetros no seu valor. Então, não se trabalha com a força de usinagem propriamente dita, mas com suas componentes segundo diversas direções conhecidas.

De acordo com WEINGAERTNER (1991), existem dois fenômenos importantes no corte: cisalhamento do metal diante do ângulo de corte; e atrito na interface ferramenta-cavaco. O trabalho indispensável ao corte é composto pelos trabalhos de cisalhamento e pelo de atrito. Qualquer redução desses trabalhos provoca a redução do aquecimento e dos esforços no corte e, conseqüentemente, há um menor desgaste das ferramentas.

A grandeza da força de usinagem, que pode ser demudada em força de corte, força de avanço e força passiva, é um critério de usinabilidade, pois, geralmente, materiais de difícil usinagem também apresentam forças de trabalho maiores.

As componentes da força de usinagem são influenciadas principalmente pelo material da peça, pelas condições de corte e pela geometria da ferramenta. Elas correspondem à fórmula de Kienzle (empírica), que relaciona as características do material, a seção de usinagem e a força de corte.

Para a força de corte F_C vale:

$$F_C / b = K_{C 1.1} \cdot h^{(1-m_C)} \quad (4)$$

Onde :

F_C = força de corte [N]

b = largura de corte [mm]

h = espessura de corte [mm]

$1 - m_C$ = coeficiente angular

$K_{C 1.1}$ = força específica de corte para seção de 1 mm^2

A influência do material é determinada pelo expoente $1 - m_c$ e pela força específica $K_{C1.1}$.

2.11.1 Forças durante a usinagem

DE SOUZA, (2011) afirma que o conhecimento da força de usinagem F ou de suas componentes: força de corte F_c , força de avanço F_f e da força passiva F_p , é a base:

- ✓ Para o projeto de uma máquina ferramenta (dimensionamento das estruturas, acionamentos, fixações, etc.);
- ✓ Para a determinação das condições de corte em condições de trabalho;
- ✓ Para a avaliação da precisão de uma máquina ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça);
- ✓ Para a explicação de mecanismos de desgaste.

A força de usinagem é também um critério para a determinação da usinabilidade de um material de peça. Os componentes da força de usinagem (F_c , F_f e F_p) diminuem com o aumento da velocidade de corte v_c devido à diminuição da resistência do material com o aumento da temperatura.

Os componentes da força de usinagem aumentam com o aumento da profundidade de corte a_p de uma forma proporcional (só vale para a_p maior que o raio de quina).

Influência do ângulo de saída γ e do ângulo de inclinação λ lateral sobre os componentes da força de usinagem:

Uma variação do ângulo de incidência na faixa de $3^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ não tem influência considerável sobre as componentes da força de usinagem.

Uma variação do raio de quina não influencia a força de usinagem, desde que a condição $2r \leq a_p$ seja satisfeita.

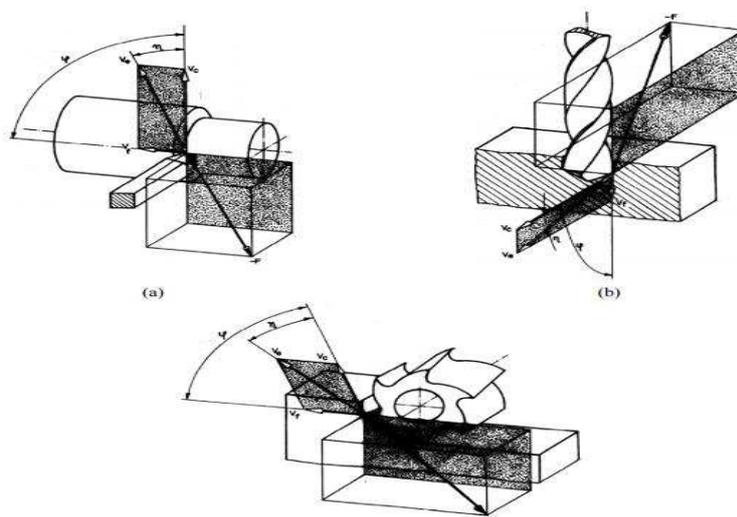
A força de usinagem aumenta linearmente com o aumento do teor de carbono da peça e da ferramenta.

O tipo de material da ferramenta, atua principalmente no coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e em decorrência disso, principalmente sobre a força passiva e a força de avanço. Com o aumento da condutividade térmica do material da ferramenta, em

regra geral, verifica-se o aumento da força de corte. O desgaste de cratera sobre a face da ferramenta que leva à formação de um ângulo de saída mais positivo, em regra, leva à diminuição das componentes da força de usinagem. O desgaste do flanco da ferramenta aumenta as componentes da força de usinagem devido ao aumento da superfície de atrito entre peça e superfície de incidência.

De acordo com a Norma ABNT NBR 12545 (TB-391/1991), as forças de usinagem (F) geradas nos processos de torneamento, furação e fresamento podem ser esquematizadas através da Figura 2.10.

Figura 2.10 – Componentes ortogonais da força de usinagem nos processos de: (a) torneamento longitudinal externo; (b) furação em cheio; (c) fresamento tangencial discordante.



Fonte: (ABNT NBR 12545)

As forças são importantes, pois influenciam as deflexões na ferramenta e na peça, afetando as dimensões finais do componente usinado. As forças também são responsáveis pelos fenômenos de vibração, comuns em usinagem. Busca-se sempre uma forma de se controlar as forças geradas (e a potência consumida) para assim poder assegurar a integridade do sistema máquina/ferramenta/peça (DE SOUZA, 2011).

Para DINIZ, et al. (2000), é muito importante que se estude a força de (F_p), seu valor e comportamento, pois ela é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte e, por isso, é responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e dimensão apertadas. Assim, tem-se a seguinte relação entre as forças de usinagem, ativa e passiva:

$$F_u = F_p^2 + F_t^2 \quad (05)$$

2.11.2 Fatores que influenciam a força de usinagem

O conhecimento das variáveis que afetam as forças de usinagem é essencial para o andamento correto do processo, levando-se em consideração especialmente os aspectos econômicos relacionados na usinagem.

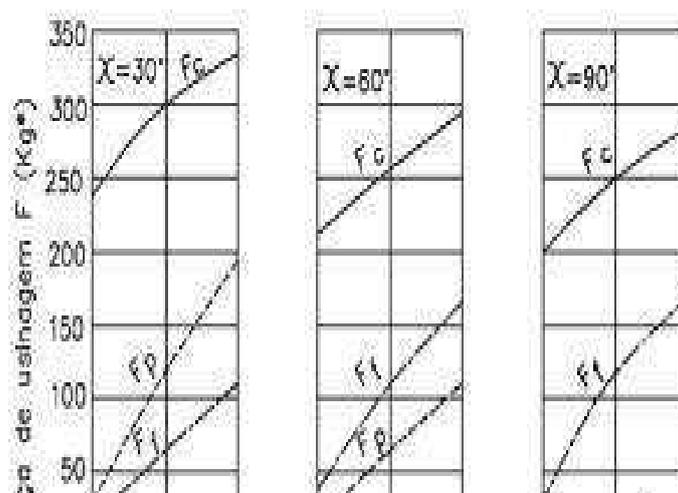
Em seus trabalhos CASAGRANDA (2004) afirma que diversos fatores podem influenciar no aumento ou na diminuição dos esforços de corte resultantes:

✓ **Material da peça** - de forma geral, como o corte dos metais depende da deformação plástica e ruptura por cisalhamento destes, quanto maior a resistência do material maior a força de corte (e K_s). Também a dureza do material afeta a força de corte, que geralmente cresce com o aumento desta. Porém, fatores como o acabamento superficial e um baixo atrito cavaco-ferramenta e ferramenta-peça tendem a reduzir a força de corte, podendo mascarar o aumento causado pela dureza da peça.

✓ **Material da ferramenta** – a ação do material da ferramenta sobre a força de corte costuma ser desprezível, porém, dependendo da afinidade deste com o material da peça, pode ser observada a ocorrência de uma zona de aderência estável e forte, aumentando F_c , ou, no caso contrário, a diminuição do atrito na interface cavaco-ferramenta, o que diminuirá F_c .

✓ **Geometria da ferramenta** – dentre os ângulos de ferramenta, o mais influente é o ângulo de saída (g_o). O aumento deste ângulo acarreta a diminuição da força de corte, devido à menor deformação do cavaco (Figura 2.11). O ângulo de inclinação (l_s) causa o mesmo efeito, ainda que em menor escala.

Figura 2.11 – Influência dos ângulos da ferramenta nas componentes da força de usinagem



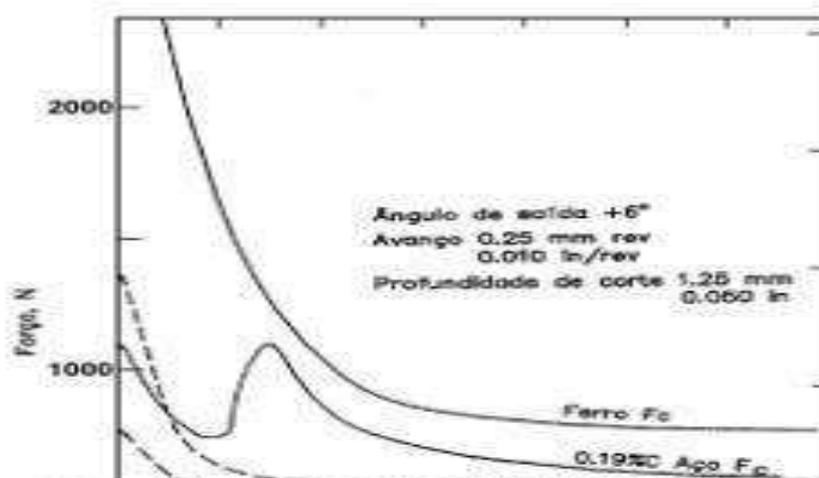
Fonte: (FERRARESI, 1970).

✓ **Avanço (f):** o aumento do avanço provoca um aumento na velocidade de avanço, diminuindo o atrito, uma vez que o corte se torna mais dinâmico.

✓ **Velocidade de corte** – para valores até cerca de 50m/min, o aumento da velocidade de corte (V_c) causa forte redução na força de corte (Figura 2.11) para todos os metais. Este efeito permanece até velocidades de corte de cerca de 100m/min para os materiais nos quais não ocorre APC, onde a força de corte se estabiliza.

Para os aços nos quais ocorre APC, a atenuação das forças ocorre rapidamente a baixas velocidades de corte (onde ocorre a APC), até um ponto mínimo, a partir do qual a força de corte inicia o crescimento. O aço volta ao regime normal no momento em que a APC deixa de existir (velocidade de corte próxima a 50 m/min). A influência de V_c é mostrada na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Influência de V_c na força de corte para vários materiais



(fonte: MACHADO E SILVA, 2009).

O fenômeno da aresta postiça de corte (*APC*) se faz presente na usinagem de todos os metais que possuam segunda fase, causando uma diminuição acentuada de F_c devido ao aumento do ângulo de saída efetivo. Este efeito desaparece a velocidades de corte mais elevadas (como as usadas na usinagem com metal duro), onde cessa a ocorrência de *APC*.

✓ **Profundidade de usinagem** – Profundidade de usinagem (a_p):o aumento da profundidade de usinagem causa um aumento na força de corte na mesma proporção, porém não afeta a pressão específica de corte;

✓ **Lubrificação e Refrigeração** – a ação do fluido de corte sobre a força de corte deve ser encarada de dois pontos de vista, podendo esta influir de maneiras diferentes, dependendo do efeito predominante.

✓ **Estado de afiação da ferramenta** – à medida que a ferramenta é utilizada surgem alguns tipos de desgaste. Um desgaste muito comum é o desgaste de flanco. Com o aumento do desgaste de flanco ocorre um aumento nos esforços de corte devido ao maior atrito entre a peça e a ferramenta.

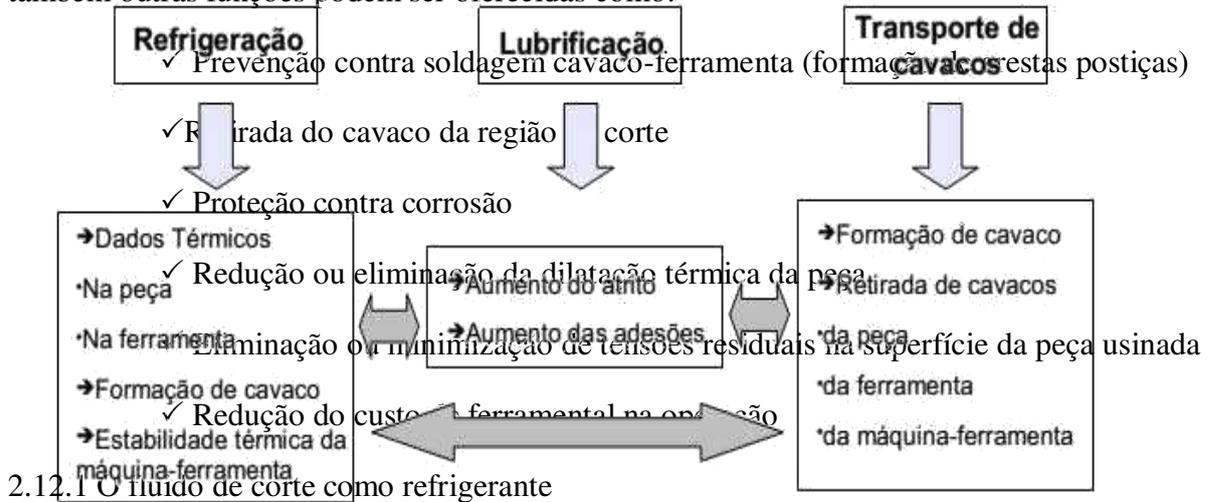
2.12 Fluido de corte

ALVES (2005) trata em seus estudos que todo processo de usinagem gera calor devido à energia decorrente do atrito interno (formação do cavaco) e externo (interface ferramenta-peça-cavaco). Cerca de 97% da energia consumida em um processo de usinagem dos metais é transformado em calor.

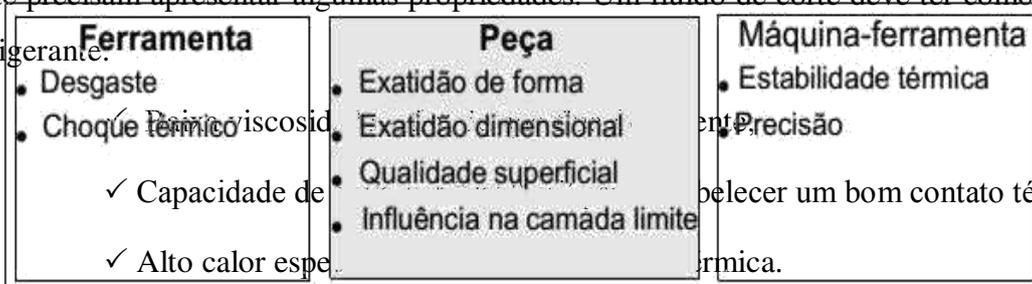
Para SHAW (2004) este calor gerado precisa ser minimizado a fim de evitar alguns inconvenientes, como desgaste da ferramenta, dilatação térmica da peça e dano

térmico à estrutura superficial do produto. Com a utilização de fluidos de corte, pode-se diminuir os atritos externos na zona de corte, reduzindo assim a quantidade de calor gerada no processo em até 30%. A quebra da ferramenta ou formação de aresta postiça de corte são processos que ocorrem com frequência sempre que temperaturas acima de 1000°C são alcançadas na região de corte.

As principais funções dos fluidos de corte são lubrificação e refrigeração, mas também outras funções podem ser oferecidas como:



De acordo com DINIZ (2010), para desempenhar suas funções, os fluidos de corte precisam apresentar algumas propriedades. Um fluido de corte deve ter como um bom refrigerante:



Estas características facilitarão a dissipação rápida do calor. Mesmo quando o material da ferramenta é resistente ao desgaste, o refrigerante é utilizado para garantir as “qualidades dimensionais, geométricas e de superfície” da peça. A figura 2.13 mostra as principais funções dos fluidos de corte.

Figura 2. 13 - Funções do fluido de corte

Fonte: (STOETERAU, et al., 2004)

2.12.2 O fluido do corte como lubrificante

E deve ter como um bom lubrificante de acordo com DINIZ (2010):

- ✓ Resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- ✓ Boas propriedades antifricção e antissoldantes;
- ✓ Viscosidade adequada

✓ A viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta.

Estas propriedades permitem que o fluido consiga chegar à região de corte, diminuindo o seu coeficiente de atrito, ainda que submetido a altas velocidades de corte. Além das propriedades de refrigerar e lubrificar, outras propriedades também são desejáveis em um fluido de corte: ausência de odores desagradáveis, antiespumante, compatibilidade com o meio ambiente, entre outros (DINIZ, 2010).

2.12.3 Classificação dos fluidos de corte

Para FERRARESI, (1977) os fluidos se classificam em três grupos: sólidos, líquidos e gasosos. Por sua vez, DINIZ (2010), classifica-os em: ar, tipos aquosos e óleos.

Em outra referência, os fluidos dividem-se em dois grupos: os não miscíveis em água e os miscíveis em água (DIN 51385, 1991 APUD STOETERAU, 2007). Na tentativa de integrar as classificações existentes, apresenta-se a Figura 2.14 que destaca, também, as principais composições e propriedades dos fluidos de corte.

Figura 2.14 - Tipos, composição e propriedades dos fluidos de corte.

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

Fonte: Adaptado de FERRARESI (1977) E DINIZ (2010)

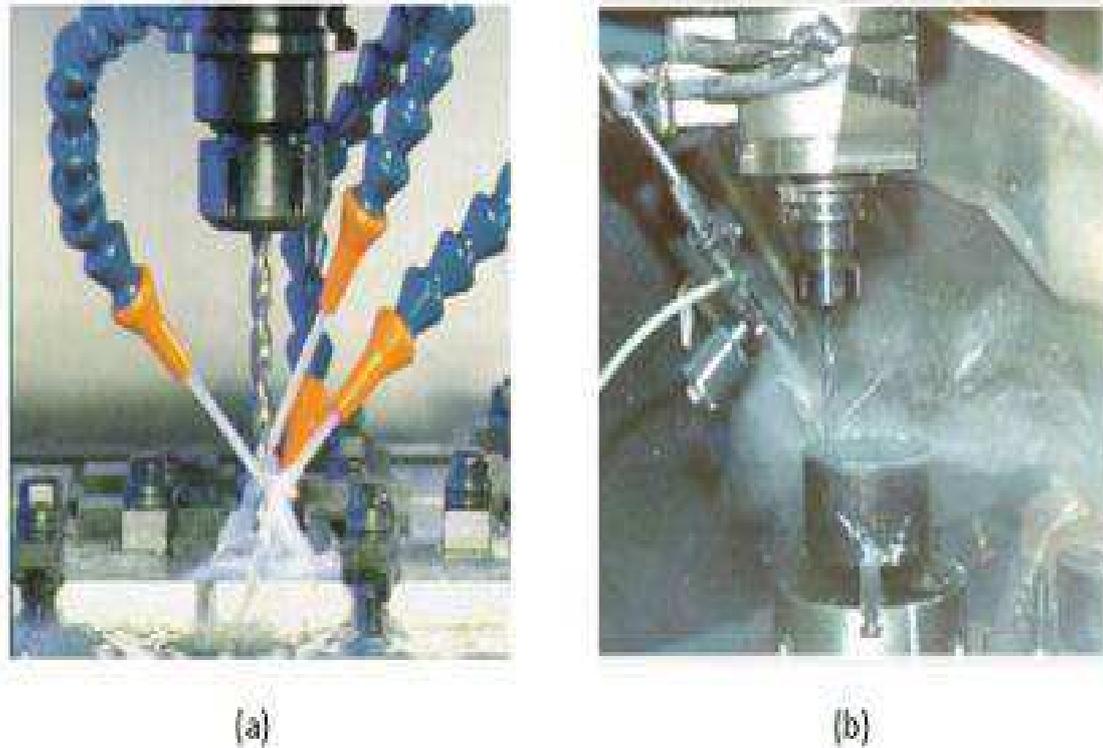
2.12.4 Métodos de aplicação dos fluidos de corte

Para FERRARESI (1977), os fluidos sólidos podem ser aplicados “diretamente na superfície de saída da ferramenta, antes da operação de usinagem”, ou como “aditivo metalúrgico”. Os fluidos de corte líquidos e gasosos “são aplicados diretamente sobre a região de corte”. De uma maneira geral, para que o fluido de corte exerça suas funções deve ser aplicado próximo da aresta de corte, nas interfaces peça/ferramenta/cavaco. Não há uma conformidade em relação para se determinar qual a melhor direção de aplicação de fluido.

Ao definir a forma de aplicação devem-se considerar vários fatores, além do tipo do fluido de corte empregado e as direções do jato, o tipo de operação de usinagem, a

pressão e o volume do fluido. Na figura 2.15, observamos os comparativos de acordo com o processo de furação.

Figura 2.15 - Comparação das quantidades de fluido aplicado em furação: (a) normal; (b) MQF



Fonte: SOUZA (2011)

2.13 Estudo da Usinabilidade

Para TESSLER (1993) a usinabilidade não é uma propriedade inseparável do material, mas, sim, um resultado da interação do metal com a operação de usinagem. As condições de usinagem são instituídas para cada tipo de material e ferramenta. O avanço e a velocidade são limitados pelo calor gerado pelos atritos e pela deformação plástica do cavaco. Quanto maior a usinabilidade do material da peça e a resistência ao desgaste do material da ferramenta, maiores podem ser os avanços e as velocidades de corte levando-se em consideração os fluidos de corte que têm ação lubrificante e refrigerante. Entretanto dependem também de outros fatores como tempo e custos de preparação e colocação das ferramentas nas máquinas.

De acordo com TRENT (1989) ao se proporcionar uma melhoria da usinabilidade, a consequência será em algum dos fatores abaixo relacionados:

- ✓ Aumento da vida útil da ferramenta de corte;
- ✓ Maior taxa de remoção do material que está sendo usinado;
- ✓ Melhoria do acabamento superficial;
- ✓ Melhor controle na formação do cavaco;
- ✓ Diminuição das forças de corte.

De acordo com os estudos de PIMENTEL et al. (2004); MACHADO et al. (2009) e TRENT et al. (1984) a avaliação quantitativa deste parâmetro, no entanto, é um problema de dificuldade considerável, por causa da variedade de conotações associadas com o termo. Não é possível descrever usinabilidade em função de unidades fundamentais, e como resultado, a expressão mais prática usada para avaliar a usinabilidade de um material é relativa, isto quer dizer, comparativa. Diversos métodos têm sido usados para avaliar a usinabilidade de vários materiais. Muitos desses métodos são baseados em resultados de testes de vida da ferramenta, velocidade de corte, ou em medições de forças da ferramenta ou quantidades relacionadas a tais testes.

2.13.1 Principais problemas decorrentes da má Usinabilidade

STOETERAU (2004) classifica esses problemas do seguinte modo:

- ✓ Desgaste rápido;
- ✓ Super aquecimento da ferramenta;
- ✓ Empastamento da ferramenta;
- ✓ Lascamentos no gume de corte;
- ✓ Comprometimento da qualidade superficial;
- ✓ Necessidade de grande potência de usinagem;
- ✓ Grandes esforços de usinagem.

2.13.2 Principais grupos que influenciam a Usinabilidade

De acordo com STOETERAU (2004), podem ser:

I – Variáveis dependentes da máquina-ferramenta:

- ✓ Rigidez estática da máquina e seus constituintes;
- ✓ Características dinâmicas da máquina;
- ✓ Potência e força disponíveis na ponta da ferramenta;
- ✓ Gama de velocidades de corte e avanços.

II – Variáveis dependentes da ferramenta:

- ✓ Geometria da ferramenta;
- ✓ Material da ferramenta.

III – Variáveis dependentes da peça:

- ✓ Formas e dimensões;
- ✓ Rigidez estática da peça;
- ✓ Rigidez dinâmica da peça;
- ✓ Propriedades físicas, químicas e mecânicas do material peça;
- ✓ Temperatura da peça.

IV – Variáveis dependentes do fluido de corte:

- ✓ Propriedades refrigerantes;
- ✓ Propriedades lubrificantes;
- ✓ Temperatura do fluido;
- ✓ Forma e intensidade de aplicação;
- ✓ Nível de contaminação do fluido.

V – Variáveis dependentes do processo:

- ✓ Velocidade de corte;
- ✓ Parâmetros do processo (ap, f, etc.);

2.13.3 Critérios de avaliação da Usinabilidade

STOETERAU (2004) considera estes critérios:

- ✓ Vida da ferramenta entre duas reafiações sucessivas;
- ✓ Grandeza das forças que atuam sobre a ferramentaria e potência consumida;
- ✓ Qualidade do acabamento superficial obtida;
- ✓ Facilidade de formação e remoção do cavaco.

Sendo que os três primeiros, somente, são passíveis de serem quantificados por meio de ensaios de usinagem.

2.13.4 Fatores ligados ao material da peça que afetam a Usinabilidade

Para DINIZ et al. (2010) um material que tenha uma boa usinabilidade, quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, como, por exemplo, a vida da ferramenta e não possuir boa usinabilidade quando se leva em conta outra propriedade, como por exemplo, a rugosidade da peça usinada. A Usinabilidade depende:

- ✓ Estado metalúrgico da peça;
- ✓ Dureza;
- ✓ Propriedades mecânicas do material;
- ✓ Composição química;
- ✓ Operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a frio ou a quente) e de eventual encruamento.

2.13.5 Efeito dos elementos de liga na Usinabilidade de Aços

Os elementos de liga permitem, de um modo geral, um controle sobre as propriedades do material, por vezes condicionado a outras variáveis como tratamentos térmicos e mecânicos.

Devido ao uso frequente em projetos os efeitos decorrentes da adição de alguns desses elementos nas propriedades dos aços são mais estudados e divulgados. No caso do efeito da adição de elementos de liga na usinabilidade dos aços, alguns elementos possuem pouca documentação, especialmente devido ao “sigilo industrial” envolvido na maioria desses estudos.

Para TRENT E WRIGHT (2000), Alguns elementos adicionados aos metais, e seus efeitos na usinabilidade são:

✓ Enxofre – adicionado ao aço em teores que costumam variar entre 0,08 e 0,13% em massa, podendo chegar, em algumas classes de aço, a 0,35%. O enxofre interage com o manganês, resultando na formação de precipitados de sulfeto de manganês (MnS). O MnS causa o aumento da usinabilidade dos materiais devido aos seguintes fatores: · ocorrência de uma camada de MnS, que adere à superfície de saída da ferramenta, reduzindo as forças de corte através da redução do atrito entre cavaco e ferramenta; · aumento na vida da ferramenta, através da proteção oferecida à aresta de corte e à superfície de saída pela camada de MnS, que diminui os desgastes abrasivo e difusivo; redução das forças de corte através da diminuição da resistência ao cisalhamento do material. Dos mecanismos através dos quais o MnS promove o aumento da usinabilidade dos materiais, os dois primeiros foram observados pelos mesmos na usinagem com ferramentas de metal duro (classe P) e algumas ferramentas revestidas.

Para SOMEKAWA et. al. (2001); TSUNEKAGE et. al. (2000) de todos os aditivos usados para gerar aumento na usinabilidade, o enxofre é o mais barato e um dos mais amplamente usados. Seu uso, porém, ocasiona certos efeitos nocivos, como a deterioração das propriedades mecânicas, plasticidade a quente e resistência à corrosão do material usinado, além de causar a anisotropia de metais trabalhados mecanicamente. Desse modo, sua aplicabilidade se condiciona principalmente a uma análise detalhada de custos de usinagem.

MILLS E REDFORD (1983) JHA e SHARMA (1990), tratam em seus estudos que o chumbo adicionado em teores que variam de 0,1 a 0,35% em massa, melhora a usinabilidade dos aços devido à formação de inclusões que facilitam a quebra do cavaco, ao efeito lubrificante que gera na superfície de saída da ferramenta e a uma proteção física das superfícies de ferramenta potencialmente desgastadas.

✓ O fósforo – quando adicionado em teores até 0,12%, dissolve-se na fase ferrita, causando o aumento da dureza e resistência mecânica e a melhora da usinabilidade facilitando a ruptura do cavaco e reduzindo a ocorrência de APC. Acima de 0,12% ocorre o predomínio dos efeitos negativos na usinabilidade.

✓ Manganês – quando adicionado em combinação com enxofre, forma o sulfeto de manganês (MnS), cujo resultado foi descrito anteriormente. Porém, na ausência de enxofre, causa diminuição na usinabilidade devido ao aumento causado na dureza do material.

✓ Cálcio - no caso do cálcio, a desoxidação do aço com cálcio durante a fundição é uma técnica recente que leva a uma melhora na usinabilidade, e apresenta uma vantagem indiscutível em relação ao uso de outros aditivos: a de não causar nenhuma alteração nas propriedades do material, motivo pelo qual seu uso se dá principalmente em aços estruturais.

YAMANE (1991), afirma que a melhora na usinabilidade se deve ao controle da morfologia de inclusões duras (como alumina e silicatos nos aços) e à formação de uma camada protetora de óxido na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem. Este fenômeno promove a diminuição do desgaste da ferramenta a altas velocidades de corte (YAMANE, 1991), quando usinando com ferramentas de metal duro com revestimento de TiN, ferramentas de WC contendo alta quantidade de TiC (MILAN, 1999), aço rápido revestido de TiN (KANKAANPÄÄ, 1987) e cermet (TÖNSHOFF E CASSEL, 1992).

Para BOULGER (1990), a adição de selênio e telúrio, cujas proporções típicas são de 0,04 a 0,05% em massa para cada elemento, é geralmente feita em combinação com enxofre e chumbo. Estes elementos induzem a formação de inclusões esféricas de sulfetos, eliminando os efeitos negativos causados por estes nas propriedades mecânicas. Aços contendo estes elementos não são facilmente encontrados devido ao custo elevado.

O bismuto muitas vezes utilizado como substituto do chumbo (possui densidade e peso molecular semelhante), mas causa danos menores que o chumbo às propriedades mecânicas do material. Outros elementos de liga causam um efeito negativo na usinabilidade de aços são eles: carbono, manganês (na ausência de enxofre), níquel, cobalto e molibdênio.

2.13.6 Efeito das propriedades do material na Usinabilidade

DINIZ et al. (2006) caracteriza algumas propriedades que afetam a usinabilidade dos materiais:

✓ Dureza e resistência mecânica – em altos valores, estas propriedades diminuem a usinabilidade dos materiais, por oferecer demasiada resistência ao processo de corte. Em valores muito baixos, porém, causam a diminuição da usinabilidade devido ao favorecimento à formação de APC a baixas velocidades de corte, e porque o material tende a deformar muito antes de romper, aumentando a área de contato cavaco-ferramenta, o que causa um aumento nas forças de corte devido ao maior atrito na superfície de saída. Logo, deve-se tomar cuidado quanto à dureza do material, de modo a, sempre que possível, usar materiais com durezas intermediárias. Ele sugere um valor médio de dureza próximo a 200 HB como um ponto a partir do qual a variação da dureza, tanto para cima quanto para baixo, afeta de forma negativa um ou mais critérios de usinabilidade.

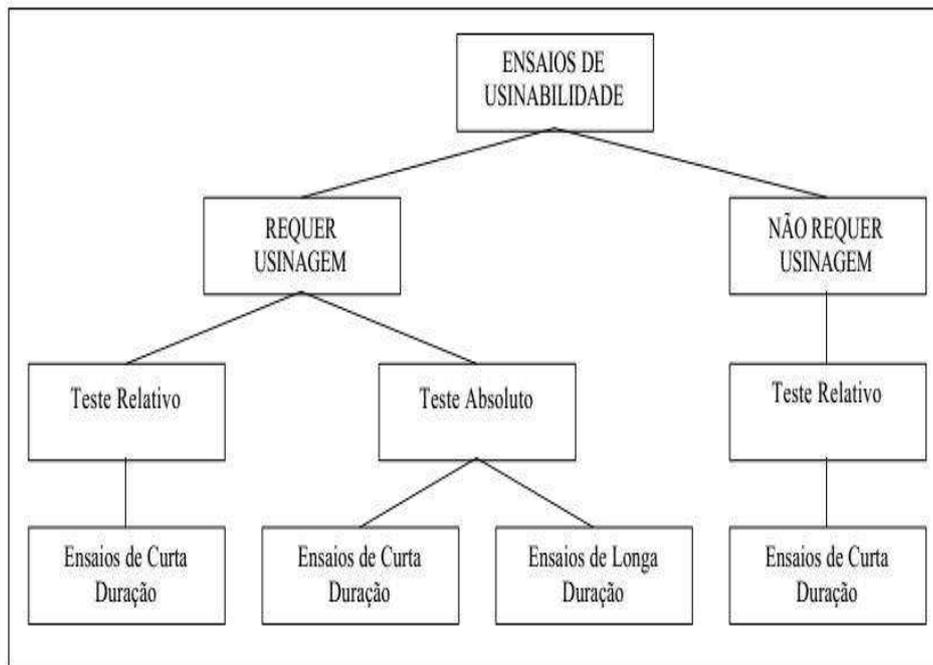
✓ Condutividade Térmica – atua de duas maneiras sobre o material: se este possui uma alta condutividade térmica, o calor gerado no corte é retirado rapidamente da interface peça-ferramenta, de modo que a ferramenta não seja superaquecida, o que diminui seu desgaste. Por outro lado, materiais com baixa condutividade térmica tendem a apresentar altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, causando uma redução na resistência ao cisalhamento do material da peça, facilitando seu corte (DINIZ, et al., 2006).

2.13.7 Ensaio de Usinabilidade

Para MILLS e REDFORD (1983), os ensaios de usinabilidade são divididos em duas categorias básicas, que são ensaios que requerem usinagem e ensaios que não requerem usinagem, com subdivisões entre estas categorias. A primeira destas faz distinção entre os testes relativos (ranking testes), que indicam a usinabilidade relativa entre dois ou mais pares ferramenta-peça para condições específicas de corte, e os testes absolutos, que indicam os méritos de dois ou mais pares ferramenta-peça para uma dada faixa de condições de corte. Adicionalmente, uma outra distinção feita entre os ensaios de usinabilidade diz respeito à duração dos ensaios (curta e longa duração). Os ensaios que não requerem usinagem são sempre testes relativos, enquanto os que requerem usinagem podem ser tanto absolutos quanto relativos. No nível seguinte, os testes relativos são sempre ensaios de curta duração,

enquanto os testes absolutos são, na maioria das vezes, de longa duração. Desse modo, a classificação dos ensaios de usinagem é dada de acordo com a Figura 2.15.

Figura 2.16 - Classificação dos ensaios de usinabilidade



Fonte: (MILLS, et al., 1983)

Os testes relativos são muito usados, especialmente na indústria, onde se fazem necessárias decisões rápidas. Porém, estes testes apresentam duas grandes desvantagens.

Em primeiro lugar, pode-se verificar através de um ensaio, que um material “A” se comporta melhor que um material “B”, que por sua vez se comporta melhor do que um material “C”. Porém, não há como saber quão melhor este material “A” é do que o material “B” ou “C”, pois a medida de usinabilidade não foi relacionada com alguma escala previsível.

A outra desvantagem é que, uma vez que os testes relativos têm o objetivo de comparar a usinabilidade dos materiais para determinada condição de corte, não há garantia de que a classificação permanecerá igual no caso de alguma condição de corte ser alterada.

Já os testes absolutos costumam abranger grandes amplitudes de velocidades de corte e, em alguns casos (especialmente quando do uso da Equação de Taylor expandida) abrange também outras variáveis envolvidas, como avanço, profundidade de corte e geometria de ferramenta (MILLS, et al., 1983).

Este trabalho tem um ensaio de usinabilidade definido para estudo, portanto, não se prolongará sobre os ensaios de usinabilidade que requerem usinagem.

Para IAM (1980), os ensaios que não requerem usinagem são sempre os Ranking Testes e de curta duração, sendo de mais fácil execução do que os ensaios que requeiram usinagem sejam estes relativos ou não. Estes ensaios são bastante úteis devido a uma resposta rápida à necessidade do projetista de componentes ou mesmo como um embasamento no desenvolvimento de novos materiais.

Alguns ensaios de usinabilidade são:

✓ Teste de composição química: proposto por CZAPLICKI (1962), citado por MILLS (1983); indica que ao se conhecer a composição química do material, pode-se relacioná-la a medida de usinabilidade, sendo descrita pela fórmula:

$$V_{c60} = 161.5 - 141.4 \times \%C - 42.4 \times \%Si - 39.2 \times \%Mn - 179.4 \times \%P + 121.4 \times \%S \quad (6)$$

✓ Teste de microestrutura: proposto por ZLATIN (1950), citado por MILLS (1983); analisa-se a usinabilidade através da microestrutura e relacionando dureza e velocidade;

✓ Teste de pressão constante (Ff): sugerido por BOULGER (1951), citado por MILLS (1983); teste de curta duração, mais usado no processo de furação devido a facilidade, consiste em aplicar uma força de avanço, (Ff), constante e medir o tempo para se furar uma chapa de espessura fixa e padrão, ou fixar um determinado tempo e medir o percurso de avanço;

✓ Teste de faceamento rápido: sugerido por KRAUS (1937) e LORENZ (1970), citado por MILLS (1983); é muito prático e de curta duração, consiste em facear um disco do centro para a periferia, normalmente com ferramenta de aço rápido. A medida de usinagem pode ser o tempo para a falha da ferramenta, ou se pode adotar o percurso de avanço até atingir a falha;

✓ Teste de torneamento cônico: sugerido por HEGINBOTHAM (1966), citado por MILLS (1983); é considerado Teste Absoluto, porém é de curta duração.

✓ Teste de propriedades físicas: leva em considerações propriedades físicas e mecânicas para aplicação da equação geral da usinabilidade.

2.13.8 Teste de Composição Química

De acordo com FERRARESI (1970) as primeiras tentativas de se determinar a usinabilidade de um metal, a partir de sua composição química, foram realizadas em 1948 por J. Sorensen e, dez anos mais tarde, por Bodart e colaboradores.

Para OLIVEIRA JR. (1987), a adição de elementos de liga produz modificações microestruturais, conduzindo a um endurecimento, que tem reflexo sobre as propriedades mecânicas obtidas e sobre a usinabilidade, dependendo da quantidade, forma e distribuição desses elementos.

BAPTISTA (1997) descreve que os átomos de soluto permanecem em solução, aumentando a dureza através dos efeitos endurecedores de solução sólida supersaturada. O notável efeito endurecedor pode ser justificado pela grande diferença de raios atômicos e de eletronegatividade. Os átomos de impurezas interagiram com os campos de tensões hidrostáticas e cisalhantes, formando uma atmosfera com as discordâncias em cunha em hélice, resultando também em um impedimento ao movimento das mesmas, facilitando, assim, o rompimento do cavaco.

De um modo geral, os efeitos dos elementos químicos participantes da composição do material na usinagem podem ser encarados da seguinte maneira: Primeiro, os elementos que aumentam a proporção de perlita e diminuem o teor de carbono no ponto eutetoide, o que causa endurecimento por solução sólida. Segundo, elementos que atuam na fragilização da ferrita. Um terceiro ponto são os elementos residuais e os provenientes da fusão/vazamento, que podem promover efeitos diversos, além da presença de inclusões (ARFELD et al., 1977).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Metodologia

Após a escolha do tema “*Estudo da usinabilidade dos aços: uma avaliação com base no teste de propriedades químicas*” foi realizada uma análise de acordo com os estudos propostos de CZAPLICKI (1962) e MILLS (1983).

CZAPLICKI (1962), no intuito de relacionar os diversos tipos de composição química dos aços e suas propriedades para realização de ensaios que demonstrem a usinabilidade dos materiais utilizados para o estudo de acordo com a equação proposta por este tipo de teste, indica que ao se conhecer a composição química do material, pode-se relaciona-la a uma medida de usinabilidade. relacionam a composição do material à V_{60} (velocidade de corte que acarreta uma vida de ferramenta de 60 minutos) e a um índice de usinabilidade de 0 a 100%, respectivamente. O método desenvolvido para usinagem com

ferramenta de aço rápido garante uma precisão de 8% em relação aos valores obtidos de ensaios de usinabilidade com usinagem (obviamente dentro de uma variedade de materiais, e considerando tratamentos térmicos restritos) para aços.

O mesmo encontrou a seguinte relação para a velocidade de corte para uma vida de 60 min no torneamento de aços:

$$V_{c60} = 161.5 - 141.4 \times \%C - 42.4 \times \%Si - 39.2 \times \%Mn - 179.4 \times \%P + 121.4 \times \%S \quad (6)$$

Podemos quantifica-los de acordo com o seu índice de usinabilidade e com as quantidades percentuais dos elementos químicos presentes nos metais.

De acordo com FERRARESI (1970), esta relação não apresenta resultados coerentes para ferramentas de metal duro.

3.2 Material ensaiado

A grande maioria dos materiais que foram usados neste trabalho foram encontrados/cedidos por “ArcelorMittal” e “ASM Metals Handbook Desk Edition 2001” e a partir desse ponto formou-se um banco de dados com a Tabela dos aços de acordo com sua classe mostrados na Tabela 3.1 e a partir do banco de dados formado, foram selecionados alguns aços para a aplicação dos testes de usinabilidade.

Os aços analisados para o estudo da usinabilidade com base no teste de sua composição química foram os aços carbonos, pois apresentam dados correspondentes com a equação a ser utilizada.

Tabela 3.1 - Tabela de composição química dos aços os carbono

FAMÍLIA	AÇO	% C	% Mn	% P	% S	% Si
AÇOS CARBONO CONFORME SAE J403:2001 (MÁXIMO 1,00%)	1045	0,43-0,50	0,60-0,90	≤0,030	≤0,050	0,15 – 0,35
	1050	0,48-0,55	0,60-0,90	≤0,030	≤0,050	0,15 – 0,35
	1055	0,50-0,60	0,60-0,90	≤0,030	≤0,050	0,15 – 0,35
	1059	0,55-0,65	0,50-0,80	≤0,030	≤0,050	0,15 – 0,35
	1080	0,75-0,88	0,60-0,90	≤0,030	≤0,050	0,15 – 0,35
	1084	0,80-0,93	0,60-0,90	≤0,030	≤0,050	0,15 – 0,35
	1085	0,80-0,93	0,70-1,00	≤0,030	≤0,050	0,15 – 0,35

Nota: Quando requerido o chumbo varia entre uma faixa de 0,15 – 0,35%, uma vez que ele é adicionado ao aço durante o ligamento.

FONTE: (ARCELORMITTAL (2011) E ASM METALS HANDBOOK DESK EDITION (2001))

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a composição química proposta por CZAPLICKI (1962), e utilizando a relação para a velocidade de corte para uma vida de 60 min no torneamento dos aços e com os dados da composição química dos metais testados adotando-se um valor correspondente de acordo com o percentual de cada elemento da equação houve necessidade de utilizar um software de processamento de dados para o entendimento de como a composição química influencia na usinabilidade e nas propriedades químicas de cada metal.

Observam-se no Gráfico 4.1, os resultados dos testes de composição química relacionados com os componentes químicos da equação juntamente com o índice de usinabilidade de cada metal.

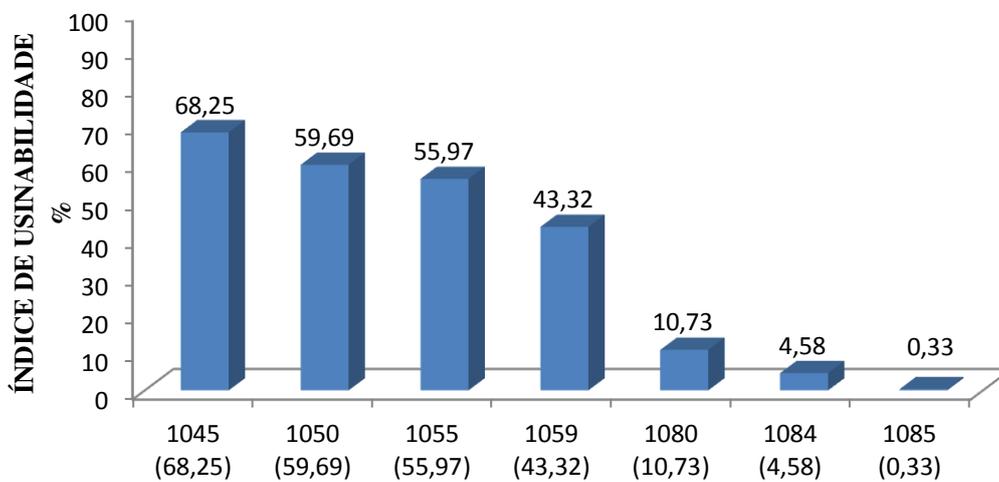
De acordo com os valores encontrados no Gráfico 4.1, verifica-se o índice de usinabilidade de acordo com os dados obtidos da Tabela 3.1, no gráfico observamos certa diferença entre os resultados dos índices de usinabilidade entre os aços carbono. Isso ocorre

devido às diferenças encontradas nos teores percentuais encontrados nos elementos presentes na equação que determina este índice.

A maior parte dos elementos de liga adicionados ao aço para melhorar as propriedades são prejudiciais para a usinabilidade. Os gráficos a seguir mostram como o teor de cada composto influi no índice de usinabilidade dos aços carbonos.

Gráfico 4.1 – Relação percentual entre o índice de usinabilidade e os aços carbono.

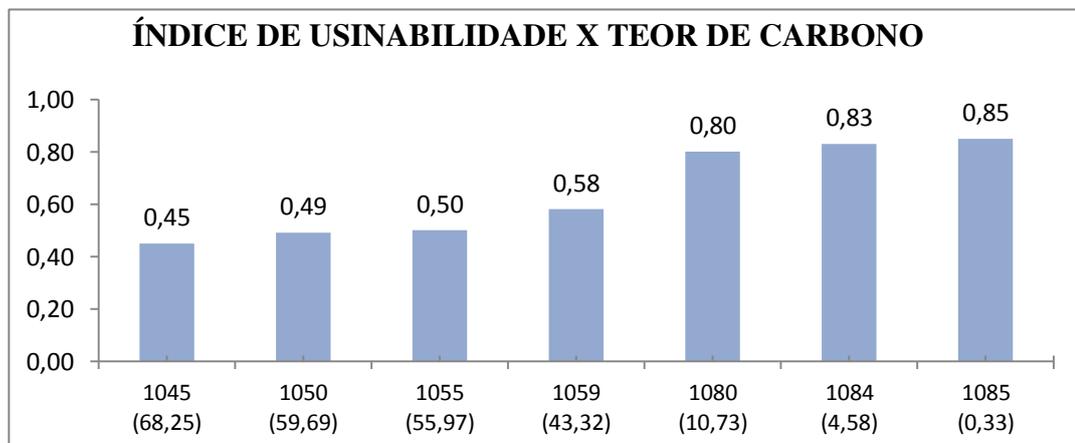
ÁÇOS CARBONO X USINABILIDADE



Fonte: Do autor

No gráfico 4.2, percebe-se que quanto maior for o percentual de carbono, menor será o índice de usinabilidade nos metais testados, pois o carbono age dificultando a usinabilidade dos aços proporcionando mais resistência à usinagem.

Gráfico 4.2 – Relação entre o teor percentual de carbono e o índice de usinabilidade.



Fonte: Do autor

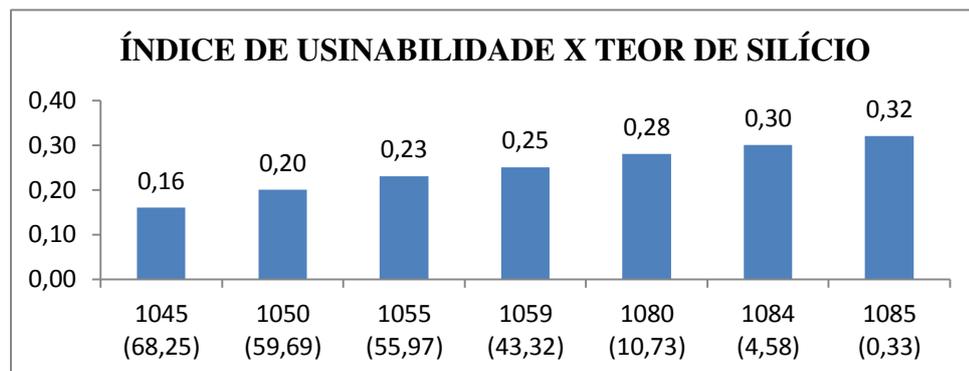
ÍNDICE DE USINABILIDADE
%

Como verificado no gráfico o teor de carbono tem efeito significativo sobre as propriedades do aço. Conforme o carbono aumenta, a resistência e a dureza do aço crescem o que reduz a desempenho na usinagem.

No Gráfico 4.3, observa-se evidenciado a relação dos aços carbono e a relação entre a porcentagem do silício encontrado nos metais e o índice de usinabilidade dos mesmos.

Nota-se neste gráfico, a medida que aumenta sua concentração do silício diminui-se seu índice de usinabilidade dos aços carbono, diminuindo tempo de vida da ferramenta de corte. O silício aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento dos aços, com pequena diminuição da tenacidade, ele também diminui a condutividade térmica.

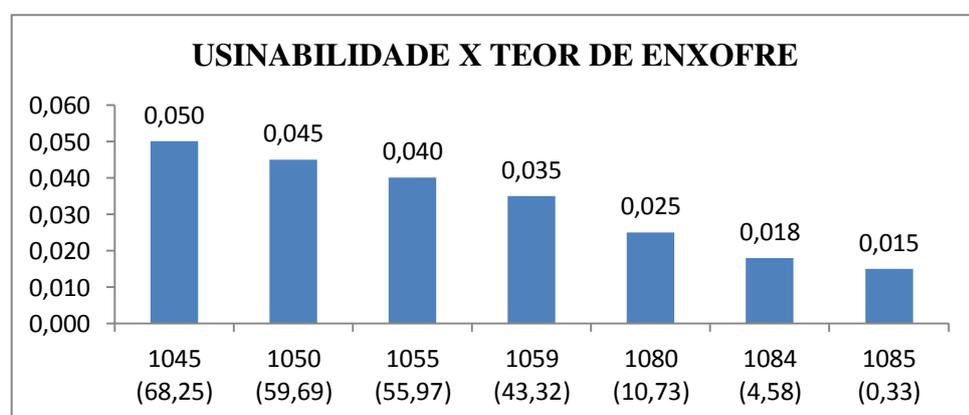
Gráfico 4.3 – Relação entre o percentual de silício e o índice de usinabilidade encontrado nos aços carbono.



Fonte: Do autor

No gráfico 4.4, verificamos a relação entre o enxofre e o índice de usinabilidade, quanto maior o teor de enxofre maior será o índice de usinabilidade. Geralmente em teores baixos (0,10 a 0,30%), é adicionado como desoxidante.

Gráfico 4.4 – Relação entre o percentual de enxofre e o índice de usinabilidade.

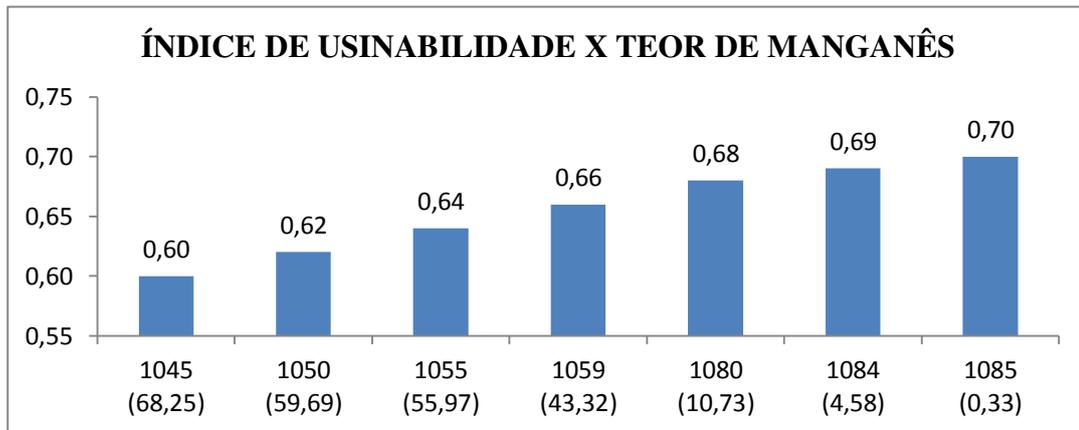


Fonte: Do autor

A adição do manganês reduz a usinabilidade do aço conforme o gráfico 4.5, isso ocasiona uma redução na usinabilidade isso reduz a soldabilidade do aço e permite que o envelhecimento seja retardado e proporciona um aumento no limite da resistência e na tenacidade do aço. Aumenta a temperabilidade e reduz a temperatura de austenização.

O enxofre quando interage com o manganês, resulta na formação de precipitados de sulfeto de manganês (MnS). O sulfeto de manganês causa o aumento da usinabilidade dos materiais.

Gráfico 4.5 – Relação percentual entre o teor de manganês e o índice de usinabilidade.



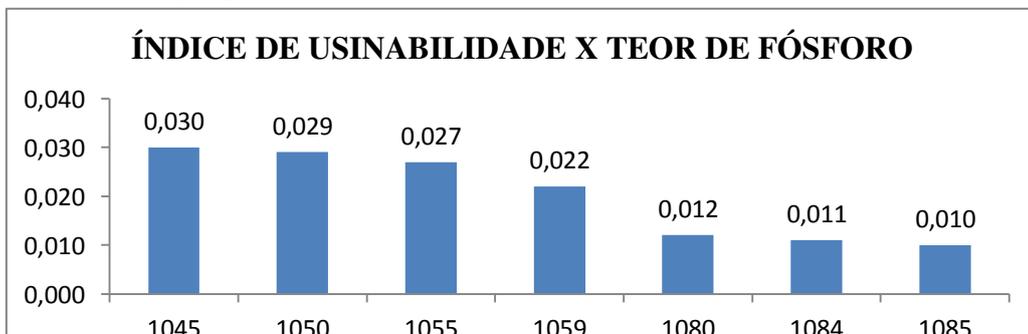
Fonte: Do autor

Na ausência de enxofre, causa diminuição na usinabilidade devido ao aumento causado na dureza do material, daí deve-se tomar cuidado ao adicionarmos o manganês para maior desempenho para a usinabilidade, pois apesar de causar melhores índices quando associado ao enxofre sem ele o resultado não seria tão satisfatório.

No gráfico 5.6, verificamos que quanto maior o teor de fósforo maior será o índice de usinabilidade. Quando adicionado em teores até 0,12%, dissolve-se na fase ferrita, causando o aumento da dureza e resistência mecânica e a melhora da usinabilidade facilitando a ruptura do cavaco e reduzindo a ocorrência da APC. Acima de 0,12% ocorre o predomínio dos efeitos negativos na usinabilidade.

O fósforo é um elemento cuja quantidade presente no aço deve ser monitorada, principalmente, nos aços duros, com alto teor de carbono. Quando ultrapassa certos limites, ele faz o aço ficar mais duro ainda e, por isso, mais frágil a frio.

Gráfico 4.6 – Relação percentual entre o teor de fósforo e o índice de usinabilidade.



Fonte: Do autor

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores adotados de cada composto químico utilizados neste trabalho, considerando os valores de acordo com os índices da Tabela 3.1.

Tabela 4.1 Teores da composição química dos aços carbono utilizados neste trabalho.

AÇO	% C	% Mn	% P	% S	% Si	USINABILIDADE %
1045	0,45	0,60	0,030	0,050	0,16	68,25
1050	0,49	0,62	0,029	0,045	0,20	59,69
1055	0,50	0,64	0,027	0,040	0,23	55,97
1059	0,58	0,66	0,022	0,035	0,25	43,32
1080	0,80	0,68	0,012	0,025	0,28	10,73
1084	0,83	0,69	0,011	0,018	0,30	4,58
1085	0,85	0,70	0,010	0,015	0,32	0,33

Fonte: (ArcelorMittal (2011) e ASM Metals Handbook Desk Edition 2001)

5 CONCLUSÃO

Usando-se a equação proposta por CZAPLICKI, (1962) para a realização dos testes verifica-se a importância dos mesmos para empresas que trabalham com fabricação de peças e na metalurgia, pois além de ser um teste prático e rápido para determinar o índice de usinabilidade pode-se estabelecer uma relação no estudo das composições químicas de um determinado material.

Neste trabalho, alcançamos resultados satisfatórios dos índices de usinabilidade dos materiais ensaiados através do teste de composição química dos metais.

Podemos verificar que alguns elementos quando acrescentados em teores mais elevados tornam-se prejudiciais como o carbono, o manganês e o silício, pois diminuem a vida da ferramenta de corte e aumentam a resistência do material, conseqüentemente diminuem a usinabilidade deles.

De acordo com o que foi testado verificamos que o fósforo melhora o índice de usinabilidade facilitando a ruptura do cavaco e reduz o aparecimento da APC, mas deve ser

monitorado, pois quando ultrapassam certos limites, ele faz o aço ficar mais duro ainda e, por isso, mais frágil a frio.

Verificamos que o enxofre, quando seu teor for maior acarretará o aumento no índice de usinabilidade do aço carbono e quando interage com o manganês, resulta na formação de precipitados de sulfeto de manganês (MnS) que causa o aumento da usinabilidade dos materiais.

A composição química do aço determina uma grande parte de suas características, as ligas e os tratamentos térmicos usados na produção de aço resultam em valores de propriedade e forças diferentes e os testes deverão ser realizados para definir as propriedades finais do aço e para garantir o cumprimento das respectivas normas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a usinabilidade dos aços carbono: com base nos teste de propriedades físicas;
- Avaliar o custo de produção dos aços através do seu índice de usinabilidade;
- Analisar como a composição química dos aços interfere no processo de usinagem;
- Analisar os efeitos da composição química do material na usinagem;
- Estudar como a composição química influencia no aparecimento da APC.

REFERÊNCIAS

ARFELD, E. D., HANUM, A. L. Aços de corte fácil de baixo carbono. *Metalurgia - ABM*, v. 33, n. 241, p.773-776, dezembro de 1977.

BAPTÍSTA, A. L. B. et al. Melhoria das propriedades mecânicas e usinabilidade de ligas de alumínio centrifugadas. Projeto EEIMVR/ETPC, Volta Redonda, 1997.

BAS, J. Aços especiais de usinabilidade melhorada. Máquinas e Metais. Editora Aranda. Ano XXXVII, nº 442. Março de 2001.

BRASIL, ARCELORMITTAL. Guia do aço. Belo Horizonte, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 7ª edição. São Paulo: Publicação ABM (Associação Brasileira de Metais), 2005.

COSTA, Éder Silva; SANTOS, Denis Júnior. Disciplina: Processos de Usinagem. Divinópolis: Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2006.

- CZAPLICKI, L. “L’usinabilite et al Coupe de Metaux”, Res. Soc. Roy. Belge Ingeniere, 12, 1962, pp 708-736.
- DE SOUZA Prof. Dr. André João Apostila de Processos de Fabricação // Processos de Fabricação por Usinagem Parte 1. - Porto Alegre : [s.n.], 2011.
- DINIZ, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. “Tecnologia da usinagem dos materiais”, 7.ed., São Paulo: Artiber, 2010, 262p.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: Artliber, 2006-2008.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- FERRARESI Dino. Fundamentos da Usinagem dos Materiais [Livro]. - São Paulo : Blucher LTDA, 1977. FERRARESI Dino. Fundamentos da Usinagem dos Materiais [Livro]. - São Paulo : Blucher LTDA, 1977.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*, São Paulo: Editora Edgard Blucher. 1970.
- FERRAZ Jr., Fábio. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e supervisão para o processo de torneamento. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- GOMES, M. R., FILHO, E. B. *Propriedades e usos de metais não-ferrosos alumínio, chumbo, cobre, estanho e zinco*. São Paulo: ABM, 1977.
- ISO 3685. “Tool-life Testing with Single-point Turning Tools”, 2.ed., 1993.
- KALPAKJIAN, 2001 – Kalpakjian,S.; Schmid,S.R.; Manufacturing Engineering and Technology, 2001; 4a. edição; Prentice Hall.
- KANKAANPÄÄ, H., Pöntinen, H., Korhonen, A. S., 1987. “Machinability of Calcium Treated Steels Using TiN Coated High Speed Steel Tools”, Materials Science and Technology, v.3.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MALAQUIAS, João Carlos. Otimização e gerenciamento em usinagem para cenário de fabricação flexível. Santa Bárbara d'Oeste: FEMP, UNIMEP, 1999.

MEOLA, T.; DUARTE, M. A. V. Monitoramento on-line de processos de usinagem via medição de vibrações. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2006.

METALS HANDBOOK DESK EDITION, American Society for Metals, 2001.

MILLS B. e Redford A. H. Machinability of Engineering Materials [Livro]. - London : Applied Science Publishers, 1983.

NBR 12545 (1991). Conceitos da técnica de usinagem – forças, energia, trabalho e potências. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT-TB-391, 16p.

OLIVEIRA JR., G. G. Fatores metalúrgicos que condicionam a usinabilidade das ligas de alumínio. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 42. Salvador, Bahia, v. 4, p. 203-216, outubro de 1987.

PAULO, Rafael Gustavo da Rocha. Avaliação da integridade superficial e usinabilidade de engrenagens forjadas utilizando fresamento com alta velocidade de corte. 2008.

PIMENTEL, M. F., PRADO, E. L., MIYADA, K. Avaliação da Usinabilidade dos Aços de Corte Fácil Através da Elaboração de Curvas de Usinabilidade (Curvas de Taylor) com Uso de Ferramentas de Corte de Aço Rápido. In: 59º Congresso Anual da ABM – International, 19 a 22 de Julho de 2004. São Paulo/SP. pp. 1–9.

SOMEKAWA, M., Kaiso, M., Matsushima, Y. and Yaguchi, H., 2001, "Free Cutting Nonlead Steels", Kobelco Technology Review, No 24, pp 9-13.

SOUTO, U. B. Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

STOETERAU Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima e et al. Processos de Usinagem // Fabricação por Remoção de Material. - Florianópolis : [s.n.], 2004.

TESSLER , M. B., BARBOSA , C. A. A usinabilidade dos aços inoxidáveis. *Metalurgia e Materiais - ABM*, v. 49, n. 413, p. 32-41, janeiro de 1993.

TÖNSHOFF, H. K., Cassel, C., 1993. "Effects of Non-Metallic Inclusions in Quenched and Tempered Steel on the Wear Behavior of Cermet Cutting Tools", Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 49.

TRENT, E. M. Metal Cutting, 2nd ed, Butterworth, London, 1984. p. 245.

TRENT, M. C., Wright, P. K., 2000. "Metal cutting principles – 4th edition", Butterworth-Heinemann, USA.

TSUNEKAGE, N., Kobayashi, K. and, Tsubakino, H., 2000, "Machinability and Mechanical Properties of Ferrite-Perlite Type Microalloyed Steels Containing Sulfur-Calcium-Hexagonal Boron Nitride or Bismuth-Boron", Proceedings of the International Conference on Steel and Society, Osaka, Japan, pp.299-302.

YAMANE, Y., Hayashi, K., Narutaki, N.,1991. "Free Cutting Cast Irons Based on NonMetalic Inclusions", Second International Conference on the Behavior of Materials in Machining.