



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GEORGE FERNANDO CAMPOS ANCHIETA ASSIS

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO A PARTIR DA
VARIAÇÃO DA TEMPERATURA: UMA AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE
PROPRIEDADES FÍSICAS**

São Luís

2015

GEORGE FERNANDO CAMPOS ANCHIETA ASSIS

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO A PARTIR DA
VARIAÇÃO DA TEMPERATURA: UMA AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE
PROPRIEDADES FÍSICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica na Universidade Estadual do Maranhão - UEMA.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

São Luís

2015

Assis, George Fernando Campos Anchieta.

Estudo da usinabilidade do ferro fundido cinzento a partir da variação de temperatura: uma avaliação com base no teste de propriedades físicas / George Fernando Campos Anchieta Assis. – São Luís, 2015.

94 f

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

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.

1.Ferro fundido cinzento. 2.Condutividade térmica. 3.Variação da temperatura. 4.Teste de propriedades físicas. I.Título

CDU: 621.9.01

GEORGE FERNANDO CAMPOS ANCHIETA ASSIS

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO CINZENTO A PARTIR DA
VARIAÇÃO DA TEMPERATURA: UMA AVALIAÇÃO COM BASE NO TESTE DE
PROPRIEDADES FÍSICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica na Universidade Estadual do Maranhão - UEMA.

Qualificação aprovada em, ____ de _____ de 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues
(Orientador)

Esp. Eng. Mec. Hércules Araújo Oliveira
(Co-Orientador)

Prof. Dr. Denilson Moreira Santos
(Membro da Banca Examinadora)

Prof. Dr. Elson César Moraes
(Membro da Banca Examinadora)

Dedico este trabalho aos meus pais, que tanto
contribuíram para minha formação acadêmica e
pessoal.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de crescimento espiritual nessa reencarnação, que com sua bondade infinita me enviou para um lar com bastante amor e compressão, um lugar ideal, com as pessoas certas para meu desenvolvimento. Dito André Luiz *"Quando provações e dificuldades lhe pareçam aumentadas, guarde paciência e otimismo, trabalhando e servindo na certeza de que Deus faz sempre o melhor"*.

Ao Professor Dr. Jean Robert P. Rodrigues pela oportunidade e pela confiança que depositou em mim. Por ter me auxiliado com um excelente tema a ser trabalhado, por nunca ter faltado o compromisso comigo e com os demais alunos orientados e pelos trabalhos realizados na universidade.

Aos meus queridos pais Fernando Rodrigues de Assis e Mírian Campos de Anchieta Assis, que são o caminho da minha evolução, cuidaram de mim por toda a vida com paciência e compreensão, que sempre estiveram do meu lado nessa longa e complicada jornada universitária, me dando todo o suporte para garantir uma boa formação, sempre fazendo o possível para me dá a melhor educação, sempre seguida de muito amor e carinho.

Ao meu avô Francisco das Chagas Assis (em memória) que contribuiu, auxiliando em meus estudos por um curto período de tempo, e aos ensinamentos que me deixou nessa vida.

Ao meu irmão Fernando Rodrigues de Assis Júnior, que muitas vezes me ajudou com livros, aulas e apoio.

A minha namorada Camila de Sousa Muniz, que me deu suporte na parte experimental e na formatação, além do apoio moral. Porém o mais importante de tudo é todo o amor, carinho e compreensão, que me motivam a alcançar meus objetivos e me tornar cada vez mais digno da mulher a qual escolhi como companheira.

Aos meus amigos mais próximos: Italo Simões, Yuri Pereira, Rafael Muniz, Rodrigo dos Reis e Lucas Victor, pelo incentivo, apoio e moral que me deram. Me ajudando a superar momentos difíceis e a fazer as escolhas certas.

RESUMO

A usinabilidade é a capacidade que um material tem de ser usinado, vários fatores interferem nesse desempenho: material da ferramenta, ferramenta de corte e o processo/máquina. Dentre todos esses fatores, existem subfatores que devem ser analisados separadamente, como a temperatura no processo de usinagem. O presente trabalho visa demonstrar, por meio do teste de propriedades físicas, desenvolvido por Henkin, a interferência da variação de temperatura no ferro fundido cinzento. Foram realizados testes com três tipos de ferros fundido cinzentos (FC 150, FC 200 e FC 250), e os resultados obtidos foram dados em velocidade de usinabilidade, critério esse utilizado para medir o índice de usinabilidade do material. Montou-se um banco de dados com todas propriedades encontradas e unidades determinadas, e utilizou-se um programa de processamento de dados, no qual foram criados quadros com os resultados obtidos e gráficos que demonstraram o comportamento dos materiais nas determinadas temperaturas. Os resultados mostraram que a dureza tem maior influência na velocidade de usinabilidade, devido a ser a variável com maior oscilação. Também foi possível notar que o FC 150 destacou-se como o material com maior índice de usinabilidade, o que pôde ser explicado por meio de sua superior condutividade térmica e sua dureza que é a menor entre os materiais.

Palavras-chaves: ferro fundido cinzento; condutividade térmica; variação de temperatura; teste de propriedades físicas.

ABSTRACT

The machinability is the ability of a material must be machined, several factors interfere in this performance: tool material, cutting tool and process / machine. Among all these factors, there are sub-factors to be examined separately, as the temperature in the machining process. This paper aims to demonstrate, through testing physical properties, developed by Henkin, the interference of temperature variation in gray cast iron. Tests were conducted with three types of gray cast iron (FC 150, FC 200 and FC 250), and the results were given in machinability speed, this criterion used to measure the machinability index of the material. It was mounted on a database with all found certain properties and units, and used at a data processing program, in which tables were created with the obtained results and graphs which show the behavior of materials in certain temperature. The results showed that the hardness has a greater influence on machinability speed due to the variable with the largest oscillation. It was also noted that the FC 150 stood out as the material with higher machinability index, which could be explained through its superior thermal conductivity and hardness which is the lowest among the materials.

Keywords: gray cast iron; thermal conductivity; temperature variation; physical properties test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Morfologia típica de grafita cinzento, vermicular e nodular	22
Figura 2 - a) Ferro fundido cinzento, b) Ferro fundido vermicular, c) Ferro fundido nodular e d) Ferro fundido branco	23
Figura 3 – Variação do Limite Máximo de Resistência à Tração pela Temperatura para diferentes composições de ferros fundidos cinzentos não ligados	29
Figura 4 – Classificação dos materiais cerâmicos para ferramentas de usinagem	35
Figura 5 – Alguns exemplos de desgastes da ferramenta no processo de usinagem.....	40
Figura 6 – Comportamento do desgaste de flanco de uma ferramenta	41
Figura 7 – Principais locais de desgaste de uma ferramenta de corte	42
Figura 8 – (a) deformação plástica e (b) lascamentos	43
Figura 9 – Figuras ilustrativas de trincas de origem térmica e mecânica e quebra de ferramentas	44
Figura 10 – Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha.....	45
Figura 11 – Mecanismos de desgaste nos metais	46
Figura 12 – Mecanismo de desgaste abrasivo: (a) microcorte, (b) fratura, (c) fadiga e (d) arrancamento de grãos	47
Figura 13 – Sentidos práticos da aplicação do fluido de corte	50
Figura 14 – Suposta rugosidade superficial ocasionada pelas marcas de avanço	53
Figura 15 – Componentes da força de usinagem. a) no torneamento; b) no fresamento	54
Figura 16 – Diagrama da cunha cortante.....	60
Figura 17 – Influência da forma de cavaco no valor do coeficiente volumétrico	62
Figura 18 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos	63
Figura 19 – Formação do cavaco no ferro fundido	64

Figura 20 - Classificação dos ensaios de usinabilidade.....	65
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre temperatura x usinabilidade do ferro fundido cinzento 150.....	80
Gráfico 2 – Relação entre temperatura x usinabilidade do ferro fundido cinzento 200.....	81
Gráfico 3 – Relação entre temperatura x usinabilidade do ferro fundido cinzento 250.....	81
Gráfico 4 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregados a 212 °F	82
Gráfico 5 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 392 °F	83
Gráfico 6 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 752 °F	84
Gráfico 7 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 752 °F	85
Gráfico 8 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 932 °F	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos	25
Quadro 2 – Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento vermicular e nodular	26
Quadro 3 – Condutividade térmica dos constituintes metalográficos dos ferros fundidos	26
Quadro 4 – Resultados de condutividade térmica com ferro fundido vermicular e cinzento em diferentes temperaturas.....	27
Quadro 5 – Efeito dos elementos de liga na condutividade térmica do ferro fundido cinzento	28
Quadro 6 – O efeito da microestrutura e dureza da matriz sobre o índice de vida da ferramenta de corte dos ferros fundidos cinzentos	33
Quadro 7 – Variáveis da equação do teste de propriedades físicas com suas respectivas unidades.....	67
Quadro 8 – Condutividades térmicas dos ferros fundidos cinzentos.....	68
Quadro 9 – Temperaturas em fahrenheit	69
Quadro 10 – Propriedades físicas do FC 150	69
Quadro 11 – Propriedades mecânicas do FC 200.....	70
Quadro 12 – Propriedades mecânicas do FC 250.....	70
Quadro 13 – Propriedades e unidades da equação do comprimento característico.....	71
Quadro 14 – Relação entre geometria de corte e comprimento característico	71
Quadro 15 – Dados de entrada para o ferro fundido cinzento 150 (FC 150)	73
Quadro 16 – Dados de entrada para o ferro fundido cinzento 200 (FC 200)	73
Quadro 17 – Dados de entrada para o ferro fundido cinzento 250 (FC 150)	73
Quadro 18 – Dados para conversão de unidades	75

Quadro 19– Resultado do ensaio de usinabilidade com base no teste de propriedades físicas do ferro fundido cinzento 150	78
Quadro 20 - Resultado do ensaio de usinabilidade com base no teste de propriedades físicas do ferro fundido cinzento 200	79
Quadro 21 - Resultado do ensaio de usinabilidade com base no teste de propriedades físicas do ferro fundido cinzento 250	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular	22
Tabela 2 - Classificação metais duros	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVO	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 EMBASAMENTO TEÓRICO	20
3.1 FERRO FUNDIDO	20
3.1.2 FERRO FUNDIDO BRANCO.....	20
3.1.3 FERRO FUNDIDO VERMICULAR.....	21
3.1.4 FERRO FUNDIDO NODULAR.....	22
3.1.5 FERRO FUNDIDO CINZENTO	24
3.1.6 PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	24
3.1.7 CONDUTIVIDADE TÉRMICA NO FERRO FUNDIDO CINZENTO	25
3.1.8 EFEITO DA ELAVADA TEMPERATURA NO FERRO FUNDIDO CINZENTO	28
3.1.9 MICROESTRUTURA	29
3.2 USINABILIDADE	30
3.3 USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS	32
3.4 FERRAMENTAS DE CORTE UTILIZADAS NA USINAGEM DO FERRO FUNDIDO CINZENTO	33
3.4.1 CERÂMICAS.....	34
3.4.2 METAL DURO	37
3.5 VIDA DA FERRAMENTA E DESGASTES	38
3.5.1 TIPOS DE DESGASTES	40
3.5.3 MECANISMOS DE DESGASTE.....	45
3.5.4 MECANISMOS DE DESGASTES NO FERRO FUNDIDO CINZENTO..	47
3.6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	49

3.5.2 APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE	50
3.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	52
3.7 FORÇAS DE USINAGEM	54
3.7.1 COMPORTAMENTO DA FORÇA DE USINAGEM	55
3.8 POTÊNCIA DE USINAGEM.....	57
3.9 FORMAÇÃO DO CAVACO.....	59
3.9.1 TIPOS DE CAVACOS.....	60
3.9.2 FORMAÇÃO DE CAVACO EM FERRO FUNDIDO CINZENTO	63
3.10 ENSAIO DE USINABILIDADE	65
3.11.1 ENSAIOS DE USINABILIDADE SEM USINAGEM	66
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	67
4.1 METODOLOGIA.....	67
4.2 MATERIAL ENSAIADO	68
4.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL	72
4.4 DADOS DE ENTRADA	72
4.4 DESENVOLVIMENTO DAS UNIDADES	74
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
6 CONCLUSÃO.....	87
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

De acordo com MILLS E REDFORD (1983) a definição de “usinabilidade” apresenta um pouco de dificuldade. Sendo, portanto, a propriedade que rege a dificuldade ou facilidade de usinagem que um material pode ter por uma ferramenta de corte. Porém, nas tentativas de achar uma definição adequada para usinabilidade, levaram a relacioná-la a uma ou várias características específicas do processo de corte, tais como o tempo de vida das ferramentas de corte, a taxa de desgaste da ferramenta, a energia necessária para uma taxa padrão e constante de remoção de metal, ou a qualidade de superfície usinada.

A usinabilidade de um metal pode ser conceituada como uma grandeza tecnológica, expressa por meio de um índice ou porcentagem, um conjunto de propriedades de usinagem do metal relacionado a outro definido como padrão. Entende-se como propriedades de usinagem do metal aquelas que demonstram o seu efeito sobre grandezas mensuráveis ligadas ao processo de usinagem, tais como, vida da ferramenta, a força de usinagem, acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco (ANSELMO DINIZ, 1999).

A usinabilidade é um fator que interessa fabricantes de metais, fabricantes de ferramentas e consumidores da área metal-mecânica em geral. Tendo grande influência na produção industrial, razão pela qual se tem grande interesse em desenvolver e estabelecer métodos de ensaio, que permitem determinar a usinabilidade de tal metal em uso, seja no controle de qualidade de uma metalúrgica, ou na inspeção do comprador, em um tempo não longo e com melhor precisão (FERRARESI, D., 1970).

A maior parte da usinagem ocorre em aços e ferros fundidos, e, no corte destes, surgem alguns problemas técnicos que acarretam em prejuízos econômicos. Por esse motivo, é importante estudar e compreender os fatores que influenciam na geração de calor, o modo de distribuição da temperatura na peça e na ferramenta e o fluxo de calor. (MACHADO, 2009)

Os mais comuns ferros fundidos, dentre todos existentes, são os cinzentos, devido ao baixo custo de obtenção (normalmente fabricado a partir da sucata), boa usinabilidade devido a presença de grafita livre em formas de veio, grande fluidez durante o processo de fundição, permitindo fabricação de peças de paredes finas e

complexas, além de não exigir equipamentos modernos e grande complexidade para obtenção e controles de solidificação e fusão (MUÑOZ, 2011).

As condições e propriedades físicas da peça têm uma influência direta sobre a usinabilidade. As diferentes condições e características descritas como "condição do material de trabalho", individualmente e em combinações, determinam diretamente a usinabilidade (CHIAVERINI, 1986). Como será abordado neste trabalho o ferro fundido cinzento, obter-se-á características semelhantes, principalmente no ensaio de usinabilidade, onde será analisada e comentada a interferência da temperatura em sua usinabilidade.

A pesquisa bibliográfica para este trabalho teve com precisão valores de cada material, com o intuito de formar assim um pacote de dados com propriedades físicas e mecânicas das peças, por meio de uma ferramenta computacional; estabelecer a usinabilidade dos materiais com variações de temperaturas para assim verificar a melhor maneira de retirar o máximo proveito a baixo custo, além de analisar a influência da temperatura na usinabilidade dos materiais utilizados.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a usinabilidade do ferro fundido cinzento a partir da variação de temperatura por meio do teste de propriedade física, assim como, os parâmetros que os influenciam na usinabilidade.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o teste de propriedades físicas, para calcular o índice de usinabilidade de três ferros fundidos cinzentos;
- Verificar qual tipo de ferro fundido cinzento possui melhor índice de usinabilidade;
- Criar banco de dados com os valores das propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzentos utilizados.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 FERRO FUNDIDO

Avaliados como uma liga de ferro-carbono, os ferros fundidos possuem grande importância para a indústria, não somente por suas características ligadas ao próprio material, como também aos elementos de liga a ele adicionados e/ou tratamento térmico aplicado, sendo justapostos onde antes só havia espaço para aços. É uma liga ferrosa que contém entre 2 e 4,5 % de carbono, sendo considerado um ferro de segunda fusão, pois é obtido diminuindo a porcentagem de carbono no ferro gusa. É caracterizado por ter a maior porcentagem de ferro, além de outros como silício e manganês. (CHIAVERINI, 2007).

Existem vários ferros fundidos, sendo o ferro fundido cinzento o mais utilizado. De uma forma significativa, quem vem se destacando no mercado é o ferro fundido vermicular, sobretudo na construção automobilística: bloco de motores diesel, disco de freios e cabeçotes de motores. E pelo fato de suas propriedades mecânicas serem superiores às do ferro fundido cinzento (BAGETTI, 2009).

Abaixo segue os principais utilizados na indústria:

- Ferro fundido branco
- Ferro fundido vermicular
- Ferro fundido nodular
- Ferro fundido cinzento

3.1.2 FERRO FUNDIDO BRANCO

Caracterizado principalmente pela coloração clara em sua fratura (de onde vem o nome 'Branco'), este ferro fundido possui ainda em sua estrutura elementos como de liga de carbono e silício, sendo este último, com menor predominância, assim apresenta o carbono quase na forma inteira combinada, mas especificamente, na forma de cementita (Fe_3C). O ferro fundido branco é produzido com controle de velocidade de resfriamento e no ajuste da composição química adequada com teores de carbono e silício. (CHIAVERINI, 2007). É o ferro fundido mais difícil de ser trabalhado por ser

muito duro, requerendo ferramentas de corte especiais para o processo de usinagem, passando algumas vezes por um processo de maleabilização (ferro fundido maleável), que nada mais é que um tratamento térmico. É usado apenas em peças que requerem grande resistência ao desgaste e elevada dureza.

3.1.3 FERRO FUNDIDO VERMICULAR

Ferro fundido que recentemente teve seu crescimento comercial. Conhecido também como ferro fundido de grafita compactado e semi-ondular. É um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Possui titânio em sua estrutura evitando a formação de uma grafita esferoidal. Caracterizado por uma fundibilidade igual ao do ferro fundido cinzento, mas com melhor resistência mecânica e leve ductilidade (SILVA, 2012). Apresenta melhor capacidade de amortecimento e condutividade térmica superior quando comparado ao ferro fundido nodular. Carbono e silício são encontrados em grandes percentagens, para o carbono a faixa é de 3,00 a 3,80%, já para o silício fica por volta de 1,00 a 3,50%. (CHIAVERINI, 2007)

O nome deste material se dá devido a presença de grafita em forma de vermes. Objetivando uma melhora nas suas propriedades físicas, pode ser adicionado elementos de liga, com o M_0 sendo o mais tipicamente usado, além de acrescentar nos teores de Si. (GUESSER e GUEDES, 1997)

Observando suas propriedades físicas na Tabela 1, percebe-se uma certa aproximação de valores com os ferros fundidos cinzentos e nodulares, também se nota que sua usinabilidade é mais baixa comparada ao ferro fundido cinzento, isto, devido as diferenças nos valores de condutividade térmica e dureza.

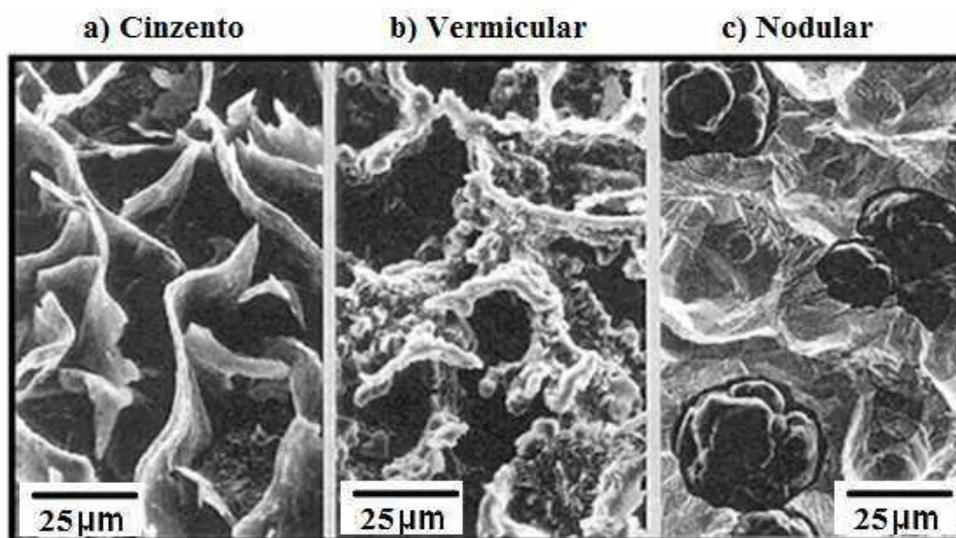
Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [MPa]	235	500	650
Módulo de elasticidade [GPa]	110	140	165
Resistência à fadiga [MPa]	100	205	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	35	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425

Fonte: Mocellin, (2004) apud Dore et al., (2007).

Do ponto de vista químico, o ferro fundido vermicular não apresenta uma diferença significativa em relação ao ferro fundido cinzento e nodular. A diferença entre essas ligas se deve principalmente ao tipo da morfologia de suas grafitas (MUÑOZ DIAS, 2011) como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Morfologia típica de grafita cinzento, vermicular e nodular



Fonte: Sintercast (2008).

3.1.4 FERRO FUNDIDO NODULAR

Caracterizado por apresentar carbono livre na forma de grafita esferoidal, devido um tratamento realizado ainda no estado líquido, conferindo ao material uma boa ductilidade, daí a denominação frequentemente para esse material de ferro fundido dúctil. O ferro fundido nodular caracteriza-se pela sua ductilidade, tenacidade e

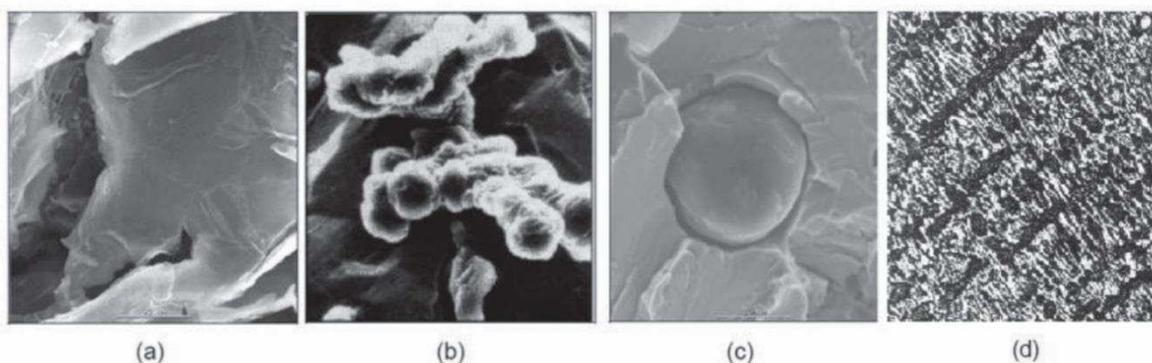
resistência mecânica. Com seu limite de escoamento mais elevado que o do ferro fundido cinzento, mais alta pressão específica de corte e resistência, possui uma boa usinabilidade (CHIAVERINI, 1990).

De acordo com (CHIAVERINI, 2007), no geral, possuem quatro tipos de ferro fundido nodular, sendo eles:

- 1º tipo: possui estrutura perlítica, após condição primária de fusão e até mesmo seguinte o processo de normalização a qual é tratado.
- 2º tipo: estrutura com composição normal ferrítico-perlítica.
- 3º tipo: obtido por intermédio de ferritização, possui estrutura ferrítica, no estado bruto.
- 4º tipo: encontrado no estado bruto de fusão ou por tratamento térmico, chama-se ferro fundido nodular ferrítico.

As faixas de propriedades de ductilidade e resistência desse material é vasta, o que possibilita escolha do material adequado vista a operação requerida do elemento mecânico ou máquina, acrescentando, ainda, sua alta resistência ao desgaste e corrosão, usinabilidade satisfatória e alta ductilidade se comparado aos aços. Tem a possibilidade de redução da energia utilizada na sua fabricação, devidos a suas propriedades de fundição serem melhores e a baixa temperatura no processo na qual é vazado no molde. (DRONYUK e EKSANOV, 1989).

Figura 2 - a) Ferro fundido cinzento, b) Ferro fundido vermicular, c) Ferro fundido nodular e d) Ferro fundido branco



Fonte: Silva (2012).

3.1.5 FERRO FUNDIDO CINZENTO

O ferro fundido cinzento é uma liga ternária (ferro, carbono e silício) amplamente utilizada no setor automobilístico. Com sua microestrutura formada de carbonos livres na forma de lamelas (grafitas) e também podendo apresentar parte do carbono combinado na forma de perlita (PIESKE; CHAVES FILHO; REIMER, 1974). Sendo o ferro fundido mais utilizado dentre todos, devido as suas características:

- Facilidade em sua fundição e na moldagem de peças
- Excelente usinabilidade
- Boa capacidade de amortecimento, absorvendo melhor as vibrações, sendo assim ideal para base de máquinas.

3.1.6 PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

A grafita tem influência direta nas propriedades dos ferros fundidos cinzentos, por meio de seu tamanho, forma e distribuição na estrutura, além da dureza relativa da matriz metálica que cobre a grafita. A quantidade de carbono e silício junto a velocidade de resfriamento são os principais controladores da formação da grafita. Uma estrutura de matriz ferrítica menos resistente e o crescimento e quantidade dos veios de grafita são obtidos com um resfriamento lento e um alto percentual de carbono e silício. Mais importante que a dureza e outras propriedades físicas na usinabilidade do ferro fundido cinzento é a microestrutura. A usinabilidade deste material é crescente perante os fatores que geram a grafitização, sendo que os que o inibem, geram efeito contrário. (ASM, 1982).

Peças com formatos mais complexos e de paredes finas quando fabricadas com ferro fundido cinzento costumam se utilizar com a estrutura de grafita lamelar, devido a facilidade na sua fabricação. Além disso, possui muitas outras vantagens, como: boa temperabilidade superficial, excelente usinabilidade, boa resistência a corrosão e ao desgaste, e elevada capacidade de amortecimento das vibrações (BONNIER, 2001).

Os veios de grafita são os fatores que justificam a maior capacidade de amortecimento deste material em relação aos aços, devido à ausência de resistência mecânica, lacunas são formadas na estrutura do material, possibilitando uma

deformação plástica em torno dos veios, sendo sob tensões inferiores a outros casos. (MUÑOZ DIAS, 2011)

Quadro 1 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos

Característica			Classe (EN-GJL-)				
			150	200	250	300	350
Matriz			Ferrítico/ perlítica	perlítica			
Limite Resistência	Rm	MPa	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
Limite Escoamento	Rp _{0,1}	MPa	98-165	130-195	165-228	195-260	228-285
Alongamento	A	%	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3
Resistência compressão	σ_{db}	MPa	600	720	840	960	1080
LE compressão	$\sigma_{d0,1}$	MPa	195	260	325	390	455
Resistência flexão	σ_{dB}	MPa	250	290	340	390	490
Resist cizalhamento	σ_{sB}	MPa	170	230	290	345	400
Resistência torção	τ_{tB}	MPa	170	230	290	345	400
Módulo Elasticidade	E	GPa	78-103	88-113	103-118	108-137	123-143
Coeficiente Poisson	ν	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Resist. Fadiga Flexão	σ_{bW}	MPa	70	90	120	140	145
Resist Fadiga Tração-Compressão	σ_{2dW}	MPa	40	50	60	75	85
Tenacidade à Fratura	K_{IC}	(MPa)^{3/2}	320	400	480	560	650

Fonte: Din En 1561(1997).

3.1.7 CONDUTIVIDADE TÉRMICA NO FERRO FUNDIDO CINZENTO

Na indústria automobilística, por exemplo, a condutividade térmica é o principal fator a ser analisado, visto que as peças utilizadas nos componentes do motor e no sistema de freios, estão sujeitas a elevadas temperaturas. O ferro fundido além de possuir uma boa condutividade térmica, apresenta também boas propriedades mecânicas, o que faz dele um material utilizado para compor muitas peças como: bloco de motor, virabrequins, sapatos de freios, cabeçotes, entre outros.

Atualmente tem se utilizado o ferro fundido vermicular na fabricação de cabeçotes, então se fez necessário o estudo de suas propriedades, principalmente a condutividade térmica. No Quadro 2 podemos compará-lo ao ferro fundido cinzento, e notamos sua condutividade térmica inferior, porém apresenta melhores propriedades mecânicas. No entanto, ao ser comparado ao ferro fundido ligado com elementos como Cu, Sn, Cr e Mo, os valores de condutividade se aproximam, em consequência desses elementos reduzirem a condutividade térmica. GUESSER et al.,2005).

Quadro 2 – Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento vermicular e nodular

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração (MPa)	235	500	650
Módulo de elasticidade (GPa)	110	140	165
Resistência à fadiga (MPa)	100	205	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	38	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425
Capacidade de amortecimento	$13,2 \times 10^{-4}$	4 a 6×10^{-4}	2 a 5×10^{-4}

Fonte: (De Technical Articles, 2000; ASM, 1996; GUESSER, 1997; HICK, 2000, modificada por XAVIER, 2003 e SPECTRU, 2007).

Os constituintes metalográficos influenciam diretamente na condutividade térmica, um exemplo é a ferrita, que apresenta maior condutividade térmica do que a perlita e a cementita, como pode-se observar no Quadro 3.

Quadro 3 – Condutividade térmica dos constituintes metalográficos dos ferros fundidos

Constituintes Metalográficos	Condutividade Térmica ($Wm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$)		
	0-100 $^\circ C$	500 $^\circ C$	1000 $^\circ C$
Ferrita	71-80	42	29
Perlita	50	44	40
Cementita	7-8	-	-
Grafita	-	-	-
Plano cristalino paralelo	293-419	84-126	42-63
Plano cristalino perpendicular	84	-	-

Fonte: (STEFANESCU, 2003, modificado de GUESSER et al., 2005).

A temperatura reduz a condutividade térmica dos ferros fundidos cinzentos, e esse efeito é observado mais nitidamente nos que possuem maior quantidade de carbono. Pode-se observar tal efeito por meio do Quadro 4, onde são comparados duas ligas de ferro fundido vermicular e dois ferros fundidos cinzentos, que possuem valores de condutividade térmica obtidos em diferentes faixas de temperaturas. (BAGETTI, 2009).

No Quadro 4 é possível notar a maior condutividade térmica sendo do ferro fundido cinzento, mas conforme a temperatura vai aumentando, a diferença diminui, pois, ambos materiais sofrem efeitos diferentes, a condutividade térmica do ferro fundido cinzento cai enquanto no vermicular não há grandes mudanças significativas. (BAGETTI, 2009).

Quadro 4 – Resultados de condutividade térmica com ferro fundido vermicular e cinzento em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica (W/K.m)			
	CGI350	CGI450	Cinzento 250	Cinzento 300
100	37,0	33,6	50,0	45,5
200	37,4	34,2	46,6	43,15
300	37,2	34,3	43,6	41,2
400	36,5	33,9	40,9	39,7

Fonte: Guessier et al. (2005).

Podemos diminuir a condutividade térmica nos ferros fundidos com a presença de elementos de liga, que agem variando a quantidade desses microconstituintes. (BAGETTI, 2009). Alguns elementos de liga e suas porcentagens, que podem estar presentes no ferro fundido cinzento, são observados no Quadro 5.

Quadro 5 – Efeito dos elementos de liga na condutividade térmica do ferro fundido cinzento

Elemento	Variação (%)	Efeito na condutividade (%)
Silício	1 - 6	-6
	0,65 - 4,15 (nodular)	-14,7
Manganês	0 - 1,5	-2,2
Cromo	0 - 0,39	+21
	0 - 0,5	-30
Cobre	0 - 1,58	-4,7
Níquel	0 - 0,74	-14,5
Molibdênio	0 - 0,58	-12
Tungstênio	0 - 0,475	-5,2
Vanádio	0 - 0,12	0

Fonte: (STEFANESCU, 2003, modificado de GUESSER et al., 2005).

3.1.8 EFEITO DA ELAVADA TEMPERATURA NO FERRO FUNDIDO CINZENTO

Estudo sobre os efeitos da temperatura sobre o ferro fundido cinzento ainda são muito escassos, isso se deve aos altos custos para realização dos testes, em especial os equipamentos necessários.

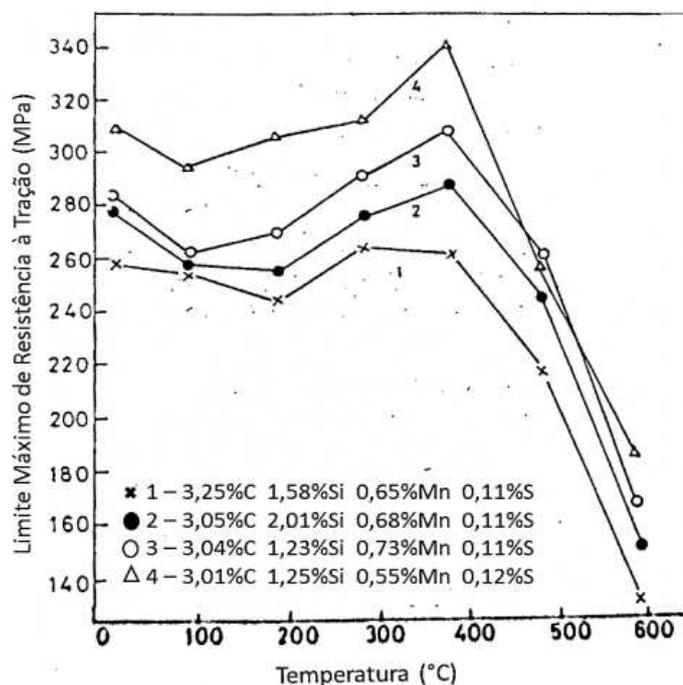
A dureza, a resistência mecânica e resistência a oxidação, e, alterações dimensionais e microestruturais são as propriedades mais afetadas pelo aumento da temperatura (GONÇALVES, 2005). Até 300 °C os materiais apresentam bons valores de estabilidade estrutural, isto se deve a estabilidade termodinâmica, que nesta faixa de temperatura, não sofre mudanças críticas. Entretanto, para temperaturas acima de 350 °C, há uma ligeira queda na resistência à tração. Este comportamento agrava-se para temperaturas superiores a 400 °C. (PALMER, 1977).

O início da decomposição da perlita é o principal fator atribuído para a queda da resistência à tração. A esta temperatura a cementita se decompõe em ferrita e grafita, devido a sua instabilidade termodinâmica. Acompanhada da decomposição, pode vir um aumento de volume, comumente chamado de “crescimento” do ferro fundido (NECHTELBERGER, 1980; PALMER, 1976; GILBERT, 1959).

Quando exposto a elevadas temperaturas por longos períodos de tempo, a grafita do ferro fundido cinzento tende a exceder em tamanho e exibir em oxidação interna ao longo dos seus veios. Este crescimento é decorrente das alterações da microestrutura, onde a decomposição em ferrita agrega na formação de grafita explodida. A disseminação do carbono presente na matriz em grafita, e depositando-se nas lamelas de grafitas já existentes, causa a transformação microestrutural do material. (GUNDLACH, 1983; GILBERT, 1959).

A Figura 3 apresenta o resultado de ensaios de tração até ruptura a elevadas temperaturas para ferros fundidos cinzentos perlíticos sem elementos de liga, onde demonstra a brusca queda da resistência à tração acima de 400°C, devido à decomposição da perlita. (GASPARIN, 2015).

Figura 3 – Variação do Limite Máximo de Resistência à Tração pela Temperatura para diferentes composições de ferros fundidos cinzentos não ligados



Fonte: Adaptado, Palmer (1977).

3.1.9 MICROESTRUTURA

A microestrutura de um ferro fundido cinzento é o principal indicador sobre sua usinabilidade. Além da influência da própria matriz ou da porcentagem relativa de

ferrita e perlita, os veios de grafita (quantidade, distribuição e tamanho) também são fatores importantes na usinabilidade do material (COELHO et al., 2001).

No processo de solidificação do ferro fundido cinzento surgem os microconstituintes: austenita e grafita. Em temperaturas próximas a 750° C, a austenita sofre transformações e tendem a se decompor em perlita ou até mesmo, ferrita e grafita. (PIESKE, 1976). Dependendo da composição química e da velocidade de resfriamento, a grafita pode chegar a ocupar uma faixa de 10 a 17% de volume na peça. Durante a solidificação do ferro fundido cinzento a formação da grafita é praticamente que exclusiva. Variando em quantidade, forma e distribuição. (EN-EUROPEAN STANDARD, 1994 apud PIRES, 2006). A grafita agrega ao material efeito lubrificante, contribuindo igualmente para diminuir o atrito entre peça e ferramenta e evitar e/ou minimizar a aderência do cavaco com a peça e, assim, evitar e/ou minimizar fenômenos com a APC e o desgaste por “attrition”. (CHIAVERINI, 2007).

A perlita é o microconstituente mais comum deste tipo de ferro, é formada por lamelas de ferrita e cementita alternadas, é responsável por elevar a dureza e a resistência mecânica. Sua formação é favorecida quando se usa rápidas velocidades de resfriamento sob temperatura próxima a 720°C e quando ocorre a formação de grafita de lamelas finas. (MUÑOZ, 2011).

A ferrita é um constituinte livre de carbono. A ferrita tem a dureza mais baixa que qualquer constituinte do ferro, com a exceção da grafita. No entanto, é mais dura que as ferrita de aços de baixo carbono, porque no ferro fundido, a ferrita contém silício. O efeito moderado de dureza do silício dissolvido promove à ferrita facilidade de corte. Isto deve-se ao fato que, este elemento, nas usuais taxas de 1,5% a 3,0% afeta muito pouco a vida da ferramenta. (IFSI, 1971).

3.2 USINABILIDADE

O termo " usinabilidade " é uma medida relativa da facilidade com que um material pode ser usinado. A classificação de usinabilidade de um metal é levada em consideração pela velocidade de corte, acabamento de superfície e o tempo de vida da ferramenta. Estes fatores são investigados e comparados para chegar a uma classificação final de usinabilidade (GEORGE SCHEINDER, 2009)

(TRENT, 1984) sugere que usinabilidade é o modo com que o material se comporta durante a usinagem, deixando assim, de ser apenas uma propriedade. Porém, por (MILLS E REDFORD, 1983) que foi apresentada a mais simples e melhor definição: “*Usinabilidade é a propriedade de um material que governa a facilidade ou a dificuldade com a qual este material pode ser usinado usando uma ferramenta de corte*”, sugerindo também que, na prática, o termo usinabilidade tende a refletir os interesses imediatos dos fabricantes.

Para (AMORIM, H. J. 2009) a determinação do grau de usinabilidade é complexo devido a quantidade de parâmetros de processo e propriedades dos materiais que podem afetar a usinabilidade de um par ferramenta-peça, e seu uso deve ser bem analisado – pois um material possui um índice de usinabilidade maior ou menor dependendo do critério determinado. Além disso, a usinabilidade depende também do material sob dada condição de corte, influenciada pela ferramenta de corte usada. Assim. Para uma plena utilização do índice de usinabilidade obtido, faz-se necessária uma completa documentação dos tipos de ensaios e critérios usados na sua determinação.

Segundo (DINIZ et al., 2007) o estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas e químicas do material e das operações passadas realizadas sobre o material (tanto a frio quanto a quente) são fatores que influenciam diretamente na usinabilidade. As características e as condições do processo de usinagem, são tão importantes quanto o estado metalúrgico quando se refere a usinabilidade, sendo elas: características da ferramenta, condição de refrigeração, rigidez do sistema máquina – ferramenta – peça – dispositivo de fixação, além dos tipos de operações realizadas pela ferramenta (operações realizadas, situação de entrada e saída da ferramenta e continuidade ou intermitência do corte).

A usinabilidade do material também é afetada por outros fatores, como: a condutividade térmica do material da peça e a taxa de encruamento. A condutividade térmica em valores elevados favorece a usinabilidade, visto que, a ferramenta de corte sofrerá menos desgaste devido ao calor durante o processo ser retirado rapidamente, evitando que a mesma seja aquecida em excesso. Com relação a taxa de encruamento, os altos valores, causa o inverso, tornando mais difícil a usinabilidade, devido ao aumento da resistência decorrente a deformação plástica ocasionada, logo necessitando de mais energia para usinar e conseqüentemente levando a um esforço maior da

ferramenta de corte, possibilitando o surgimento da aresta postiça de corte. (DINIZ et al., 2006).

Segundo (BAPTISTA, 2002) avaliar o processo de usinagem requer um estudo isolado ou em conjunto de quatro critérios, considerados mais importantes:

- Vida da ferramenta;
- Força de usinagem;
- Qualidade superficial da peça;
- Formação de cavaco (forma e tamanho).

3.3 USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS

O ferro fundido cinzento, pela sua fácil fusão e moldagem, usinabilidade superior aos outros ferros fundidos de dureza equivalente, resistência mecânica satisfatória, boa capacidade de amortecimento, é, dentre os ferros fundidos, o mais usado (CHIAVERINI, 1986).

Os veios de grafitas dos ferros fundidos cinzentos introduzem descontinuidades na matriz do metal e agem como quebra-cavacos, formando cavacos de rupturas. Além disso, a grafita é um lubrificante natural. (COELHO et al., 2001).

No Quadro 6 observa-se que a taxa de desgaste da ferramenta é diretamente proporcional a quantidade de perlita em matrizes perlita/ferrítica e a redução do espaçamento interlamelar da perlita. Quando a matriz perlítica contém excesso de carboneto de ferro ocorre um aumento extra nas taxas de desgaste da ferramenta de corte. O aumento percentual de perlita e cementita desencadeiam o aumento na dureza do ferro fundido cinzento e por consequência no desgaste da ferramenta. (MILLS e REDFORD, 1983).

Quadro 6 – O efeito da microestrutura e dureza da matriz sobre o índice de vida da ferramenta de corte dos ferros fundidos cinzentos

Microestrutura da matriz	Dureza Brinell	Índice de vida da ferramenta
ferrita	120	20
50% de ferrita e 50% de perlita	150	10
perlita grossa	195	2
perlita média	215	1,5
perlita fina	218	1
perlita fina com 5% em excesso de carboneto de ferro	240	0,3

Fonte: Mills e Redford (1983).

A microestrutura tem influência direta na velocidade de corte e na vida da ferramenta durante o processo de usinagem em ferros fundidos. A alta quantidade de flocos de grafita, que caracteriza a liga do ferro fundido cinzento, acrescentam descontinuidade na matriz do metal que diminuem a ductilidade, gerando quebra fácil dos cavacos (cavacos de ruptura) e originam um pequeno comprimento de contato entre cavaco e ferramenta, baixas forças de usinagem e de potência exaurida, diminuição na taxa de desgaste e elevada remoção de material. A grafita se torna o principal fator na melhora da usinagem dos ferros fundidos cinzentos. (ASM, 1989).

3.4 FERRAMENTAS DE CORTE UTILIZADAS NA USINAGEM DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

Na seleção do material da ferramenta de corte que venha a ser utilizado consideram-se vários fatores, como: microestrutura do material usinado, processo de usinagem, condições de operação das máquinas, dureza e tipos de cavaco, dimensões e forma da ferramenta em questão, custos do material da ferramenta, características do material da ferramenta (elevada dureza a quente, estabilidade química, tenacidade, resistência aos desgastes do processo) e as condições de usinagem (DINIZ, A.E. et. al, 2007).

Na usinagem do ferro fundido cinzento, dois tipos de materiais são amplamente utilizados: o metal-duro e a cerâmica. Estes materiais possuem diferentes características já que há diferentes composições para cada um deles. Todos possuem bons tempos de vida quando comparados com os outros tipos de materiais para

ferramentas de corte, mesmo em maiores velocidades, avanço e profundidade de corte (XAVIER, 2003).

3.4.1 CERÂMICAS

As cerâmicas possuem uma grande variedade de composição e formas, são compostas tanto por elementos metálicos como não metálicos, na forma de óxidos, carbonetos e nitretos. Tendo estrutura cristalina na maioria das ferramentas, porém, diferente dos metais, as ligações entre os elementos são covalentes e iônicas. São pobres condutoras de eletricidade devido a ausência de elétrons livres e em seções finas, sejam transparentes. Por possui fortes ligações primárias, a maioria tem alto ponto de fusão. (MACHADO; SILVA, 2004).

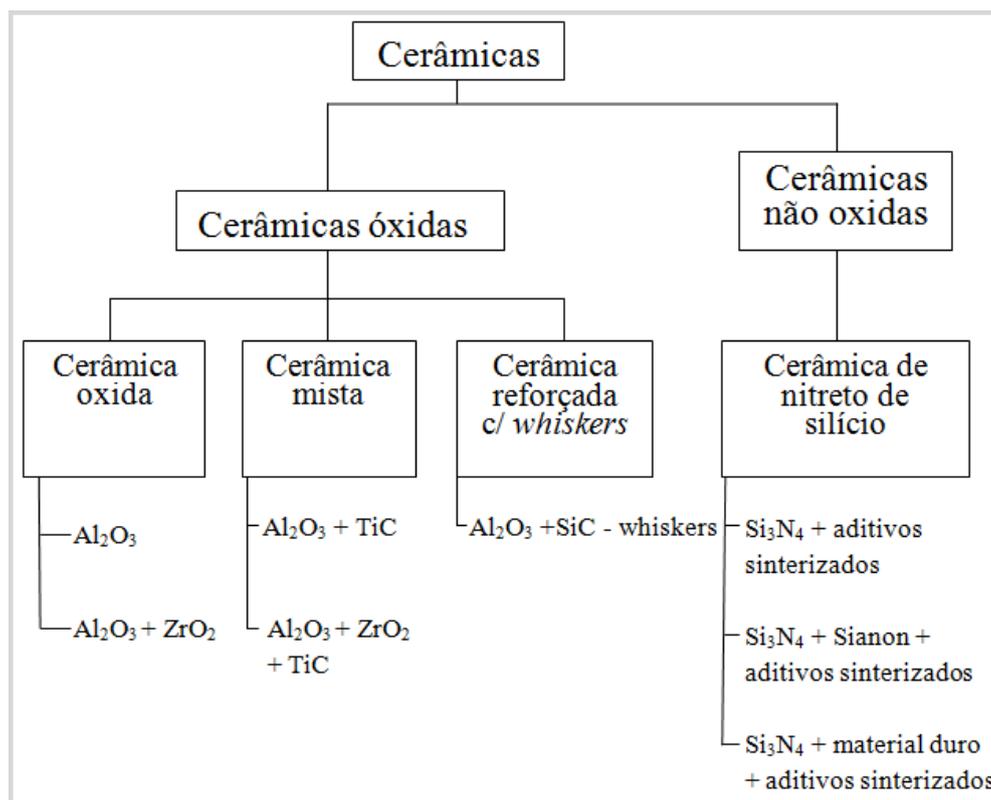
As cerâmicas possuem as seguintes propriedades:

- Resistência as altas temperaturas (material refratário);
- Elevada resistência ao desgaste;
- Elevada dureza;
- Baixa condutividade térmica;
- Boa estabilidade química e térmica;
- Boa resistência à fluência;
- Alta resistência à compressão e baixa resistência à tração.

De acordo com PEREIRA, (2012) foi realizada uma pesquisa no Instituto para Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-ferramentas da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha) acerca da utilização de ferramentas de corte de alta performance, e não foi identificada uma preferência exata para a utilização desse tipo ferramenta na usinagem de materiais metálicos. Segundo XAVIER; SCHRAMM. (2007) o ferro fundido cinzento é o material mais usinado por essa ferramenta, cerca de 84% das suas utilizações, seguido então pelo aço temperados e ferros fundidos especiais. O alumínio, metais não ferrosos e madeira são outros materiais também usinado com ferramentas cerâmicas.

As cerâmicas podem ser divididas em dois grandes grupos: a base de Al_2O_3 e de Si_3N_4 . Como pode-se observa na Figura 4.

Figura 4 – Classificação dos materiais cerâmicos para ferramentas de usinagem



Fonte: Weingaertner e Schroeter (2002).

1. Cerâmicas com base de Al_2O_3 – Alumina (Óxido de alumínio):

Este tipo de material pode ser dividido em cerâmicas (brancas) quando passam pelo processo de prensagem a frio, ou então cinzas quando passam por prensagem a quente, cerâmicas mistas e alumina reforçada com “*whiskers*”. As brancas são constituídas apenas de óxidos. As aluminas são constituídas basicamente por finos grãos de Al_2O_3 sinterizados, podendo ter outros elementos, como o MgO , que atua inibindo o crescimento de grão, para aumentar a resistência mecânica são utilizados óxido de cromo, titânia e níquel, para aumentar a tenacidade do material é utilizado a alumina com baixos percentuais de de óxido de zircônio (ZrO_2). As mistas possuem, além da alumina, carboneto de titânio (TiC) ou o nitreto de titânio (TiN). As inclusões de monocristais de SiC, que são conhecidos como “*whiskers*”, numa matriz cerâmica (Al_2O_3), constitui a alumina reforçada com “*whiskers*”. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

2. Cerâmicas a base de Si_3N_4 (nitreto de silício)

Nos últimos anos, as cerâmicas sem óxidos, principalmente a Si_3N_4 , obtiveram grande significância como materiais de corte, na usinagem com geometria definida. Estas cerâmicas apresentam maior tenacidade e uma melhor resistência a choques térmicos, levando em comparação com as cerâmicas óxidas. Além de possuírem elevada dureza a quente e serem resistentes ao calor. Comparadas as óxidas e mistas, possuem ainda maior resistência a quebra, graças aos cristais Si_3N_4 hexagonais, ao invés de Al_2O_3 em formas de agulha. (WEINGAERTNER E SCHROETER, 2002)

As boas propriedades do Si_3N_4 o fazem ser empregado cada vez mais na usinagem dos ferros fundidos, principalmente na fabricação de discos de freios, discos de embreagem e blocos de motores. As propriedades muito boas e positivas do Si_3N_4 fazem com que este material seja cada vez mais empregado na usinagem do ferro fundido, principalmente na manufatura de discos de freios, discos de embreagem e blocos de motores. Pesquisas feitas pelo PTW, apontam o Si_3N_4 como o material cada vez mais utilizado na usinagem de componentes de motores, isso devido aos resultados econômicos obtidos. (XAVIER; SCHRAMM, 2007).

XAVIER (2009), realizou experimentos de torneamentos de longa duração utilizando ferramentas de Si_3N_4 , na usinagem de ferros fundidos cinzentos e vermiculares e experimentos na qual analisava a interação químicas entre o corpo de prova e o material da ferramenta, e descobriu que fenômenos químicos, térmicos e mecânicos que ocorrem na interface cavaco/ ferramenta são responsáveis pelo comportamento do desgaste da ferramenta de corte na usinagem dos referidos materiais. No teste que envolvia o ferro fundido cinzento, constatou-se a formação de uma camada protetora de MnS, na superfície da ferramenta, que servia como proteção da ferramenta contra o contato direto do cavaco, evitando possíveis reações triboquímicas como as verificadas no ferro fundido vermicular. Este que durante o processo de usinagem não apresentaram camadas de proteção. Permitindo a exposição da ferramenta a elevadas temperaturas, afetando sua dureza, e submetendo-a a desgaste abrasivos e a reações químicas.

Na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramenta de Si_3N_4 e velocidades de corte entre 300 e 700 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ PEREIRA (2010) indica que a redução do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade de corte se dá em decorrência da formação de uma camada de alumínio fortemente aderida sobre a ferramenta, da

redução das forças de usinagem e da seletiva transferência de inclusões de MnS presente no material da peça para a superfície da ferramenta.

3.4.2 METAL DURO

Recebe o nome de metal duro uma liga de carboneto de tungstênio, produzido a partir da metalurgia do pó. Prensado e sinterizado de uma junção de pós de carbonetos e alguns materiais de ponto de fusão inferior, na qual chamamos aglomerantes (ex: cobalto, níquel, cromo ou uma fusão entre eles) (SÁ, 2010).

O processo de fabricação dos metais duros de acordo com (SÁ, 2010) tem principal especificação o processo de sinterização que se dar após a prensagem e a usinagem (que lhe da forma desejada ou quase), onde as altas temperaturas de aquecimento são suficientes para fundir o aglomerante, que por sua vez preenche os espaços vazios entre os carbonetos. Com tal, obtemos um metal de alta dureza, variando nesse quesito de acordo com o aglomerante, e a dimensão do grão de carboneto.

Na usinagem de ferros fundidos, principalmente no torneamento e fresamento, as ferramentas de metal duro sinterizados são amplamente utilizadas. Podem ser utilizadas em velocidades de cortes superiores aos dos aços rápidos em várias vezes, devido a sua elevada dureza e resistência a abrasão. (IFSI, 1971).

Abaixo podemos ver a Tabela 2, na qual temos a classificação dos metais duros de acordo com a ISO 513/2004:

Tabela 2 - Classificação metais duros

Classificação do metal duro		
Designação ISO	Dureza e resistência ao desgaste	Tenacidade
P 01		
P 10		
P 20		
P 25		
P 30		
P 40		
P 50		
M 10		
M 20		
M 30		
M 40		
K 01		
K 05		
K 10		
K 20		
K 30		
K 40		

Fonte: ISO 513 (2004).

Existem no total 6 grupos: P, M, K, N, S e H, representados respectivamente pelas cores azul, amarelo, vermelho, verde, laranja e cinza, sendo separados de acordo com o tipo de material a ser usinado. Especificam-se apenas os três primeiros da tabela por serem referentes aos metais ferrosos, já que será estudado um metal proveniente dessa área.

Na usinagem do ferro fundido cinzento a ferramenta de corte não requer elevada estabilidade química, visto que os cavacos formados são pequenos e não atrimam com intensidade na superfície de saída da ferramenta. No processo, o principal desgaste é por difusão, devido a isso a ferramenta de metal duro utilizada possui apenas carbonetos de tungstênio junto ao cobalto na sua composição. De acordo as normas ISO, especificado na Tabela 2 a ferramenta pertence a classe K. (DINIZ e FERRER, 2007)

3.5 VIDA DA FERRAMENTA E DESGASTES

Existem métodos diretos e indiretos para avaliar o desgaste da ferramenta de corte. O método direto, utiliza-se equipamentos óticos para medir a geometria da ferramenta. Já o método indireto utiliza-se de dados obtidos das variáveis durante o processo de usinagem (sendo eles a força de corte, a temperatura, vibração e emissão

acústica) e os relacionando aos desgastes da ferramenta. Quando se trata a da vida da ferramenta, uma série de fatores são considerados: material da peça, condições de corte, aspectos da ferramenta (material, geometria e revestimento), tipo do fluido de corte, características dinâmicas da ferramenta, etc. (FERREIRA, 2011)

Usamos a equação (1) para expressar o percurso de corte obtido pela vida da ferramenta (t):

$$Lc = Vc \times \frac{t}{1000} \quad (1)$$

Vc = Velocidade de corte

Lc = Percurso de corte

Podemos expressar o percurso de avanço para a vida de uma ferramenta da seguinte maneira (DINIZ ET AL. 2003):

$$Lf = f \times n \times t \quad (2)$$

n = número de rotações em rpm

t = tempo

f = avanço em mm/rot.

Uns dos critérios de maior importância é a vida da ferramenta pois é o tempo durante o qual uma ferramenta, devido as condições de usinagem, resiste ao corte até atingir um certo critério de fim de vida (TEDESCO, 2007). O fim dessa vida da ferramenta é definido pelo seu nível de desgaste já pré-estabelecido. O desgaste é bastante prejudicial e deve ser bem analisado pois influencia diretamente no processo de usinagem, podendo afetá-lo de várias maneiras, como na precisão e no aumento, além da qualidade da força de corte. O desgaste das ferramentas se dá pelos altos níveis de temperatura em que ocorrem o processo de usinagem e também pela força de usinagem.

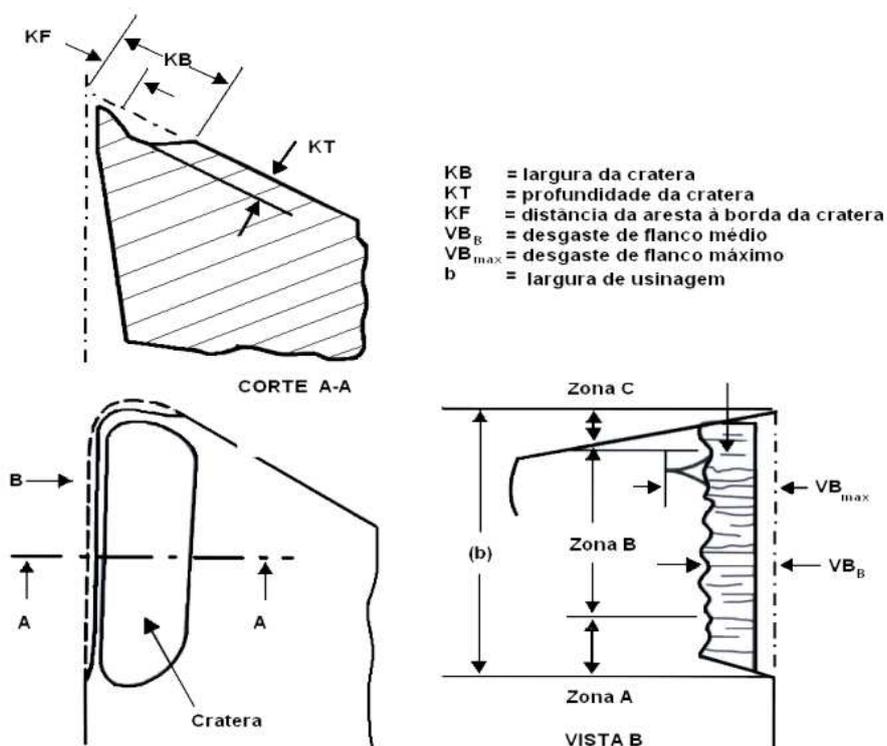
Podemos determinar a vida de uma ferramenta, na prática, empregando testes de longa duração, com velocidades de corte utilizados no processo usuais de fabricação, elevado tempo de ensaio e grande quantidade de material são exigidos (WEINGAERTNER, 2007)

3.5.1 TIPOS DE DESGASTES

A aresta de corte da ferramenta sofrerá mudanças tanto em sua geometria quanto em sua forma original, em consequência do contato físico da ferramenta com a peça e o contato cavaco-ferramenta em um determinado meio e nas condições dinâmicas de corte, ocasionando o desgaste progressivo. (SÁ, 2010).

Podemos verificar por meio da Figura 5, alguns exemplos de desgastes que ocorrem na ferramenta de corte.

Figura 5 – Alguns exemplos de desgastes da ferramenta no processo de usinagem



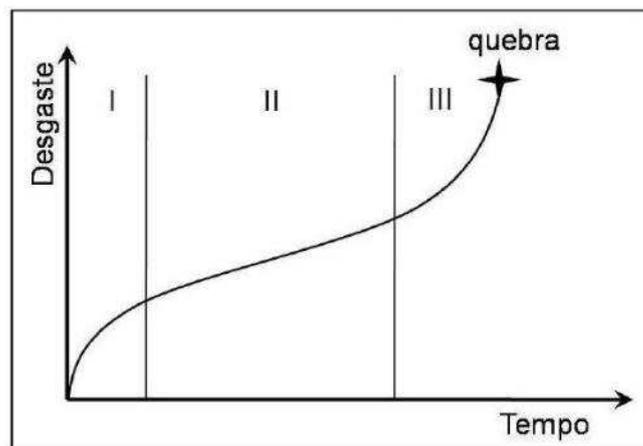
Fonte: (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 3585, 1998)

Existem variados tipos de avarias e desgastes que surgem na ferramenta de corte durante a usinagem. Os principais de acordo com DINIZ, MARCONDES E COPPINI (2003) são:

- A. Desgaste de flanco: o mais comum tipo de desgaste, gerado pelo aumento da velocidade de corte. Surge no flanco da ferramenta

devido ao contato entre ferramenta e peça, com o aumento do tempo de usinagem, a ferramenta tende a quebrar, conforme pode ser visto na Figura 6. Pode causar modificação na forma do gume de corte original, deterioração do acabamento da superfície da peça, e causa a saída da peça de sua faixa de tolerância.

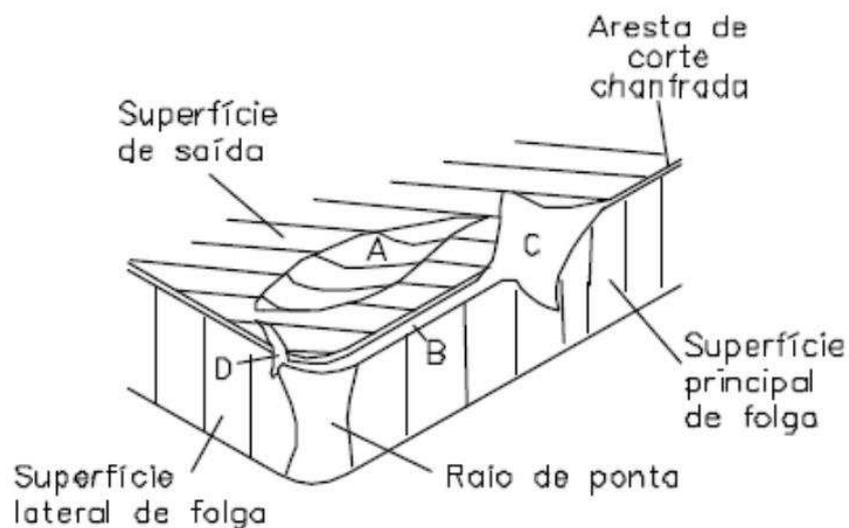
Figura 6 – Comportamento do desgaste de flanco de uma ferramenta



Fonte: Lenz et al (1978).

- B. Desgaste de cratera: é a concavidade que se forma na superfície de saída (face) da ferramenta, devido ao atrito da mesma com o cavaco. A cratera é caracterizada pela sua profundidade K_T e pela distância K_M do centro da cratera ao gume (Figura 5). Pela cratera, pelo desgaste de flanco ou por ambos combinados podemos ter a degradação da ferramenta (Figura 7).

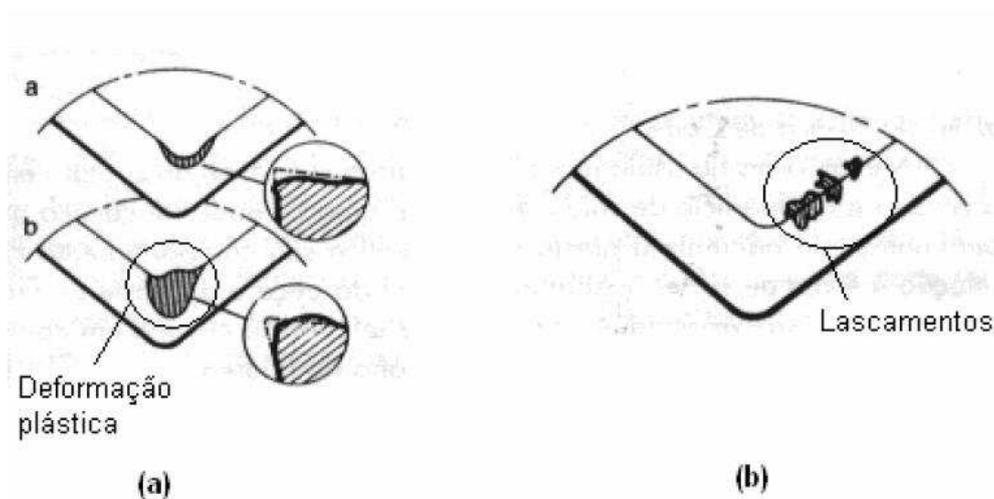
Figura 7 – Principais locais de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Dearnley; Trent e Wright (1982).

- C. Deformação plástica do gume de corte – Avaria decorrente da pressão aplicada a sua quina, adicionada às altas temperaturas, conforme Figura 8 (a). Falhas no controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça são consequências de tal deformação. O crescimento dessa deformação pode gerar a quebra do gume da ferramenta. O emprego de uma ferramenta de maior dureza a quente, maior resistência a deformação plástica ou mudando as condições de usinagem e/ou geometria da ferramenta, assim diminuindo esforços e temperaturas de corte, evita essa avaria.
- D. Lascamento – ocasionado pela retirada de partículas maiores de uma só vez. Surge com probabilidade maior em ferramentas com material frágil e/ou quando o gume de corte é pouco resistente Figura 8 (b). O lascamento prejudica o acabamento superficial da peça e, se continuar a expandir, gera a quebra da ferramenta.

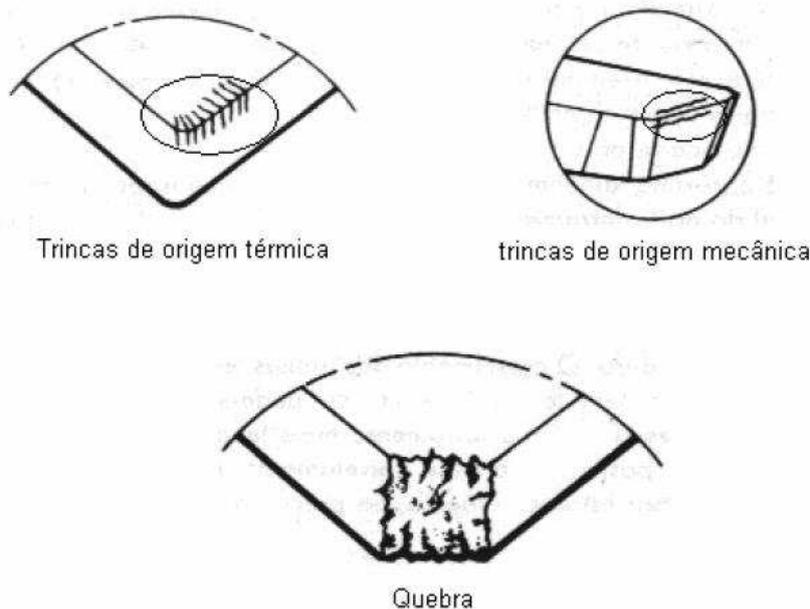
Figura 8 – (a) deformação plástica e (b) lascamentos



Fonte: Diniz et al (1999).

- E. Trincas – podem ser causadas por dois fatores específicos: variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. Quando as trincas têm origem térmica elas ocorrem perpendicularmente ao gume e, quando têm origem de esforços mecânicos são paralelas ao gume, de acordo com a Figura 9.
- F. Quebra – acontece diante do agravamento de todos os desgastes e avarias da ferramenta. Porém, de maneira inesperada, pode acontecer a quebra do material, devido: material da ferramenta muito duro e frágil, carga excessiva sobre a ferramenta, parada instantânea do movimento de corte, entupimento de canais de alojamento de cavacos, entre outros.

Figura 9 – Figuras ilustrativas de trincas de origem térmica e mecânica e quebra de ferramentas



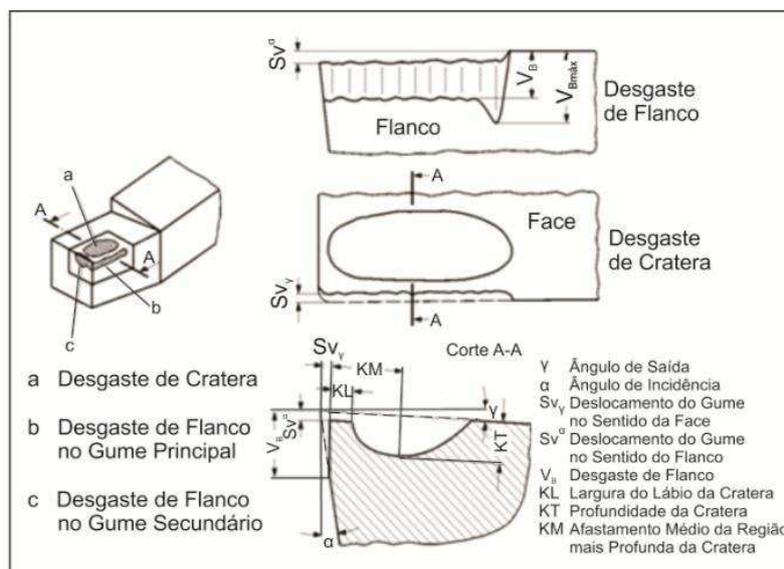
Fonte: Diniz; Marcondes e Coppini (1999).

3.5.2 MEDIÇÃO DOS DESGASTES DA FERRAMENTA

O desgaste de flanco pode chegar ao máximo na periferia da zona de contato da ferramenta com a superfície momentânea da peça dependendo das solicitações de corte e do conjunto “material a ser usinado/material da ferramenta de corte. Esse desgaste é decorrente de solicitações térmicas e mecânicas, ou seja, da abrasividade e contato direto com o ar (atmosfera). Quando as condições do processo de usinagem são extremas, maior serão as solicitações térmicas e mecânicas, causando um desgaste na ferramenta relativamente mais rápido. (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

Segundo Pereira (2012), podemos medir o desgaste no plano ortogonal da ferramenta. Na superfície de saída têm-se os desgastes de acordo com a Figura 10: profundidade de cratera (KT), largura de cratera (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). A largura do desgaste de flanco (VB), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco ($VB_{máx}$), é medido na superfície de folga.

Figura 10 – Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha



Fonte: Weingaertner e Schroeter (2002).

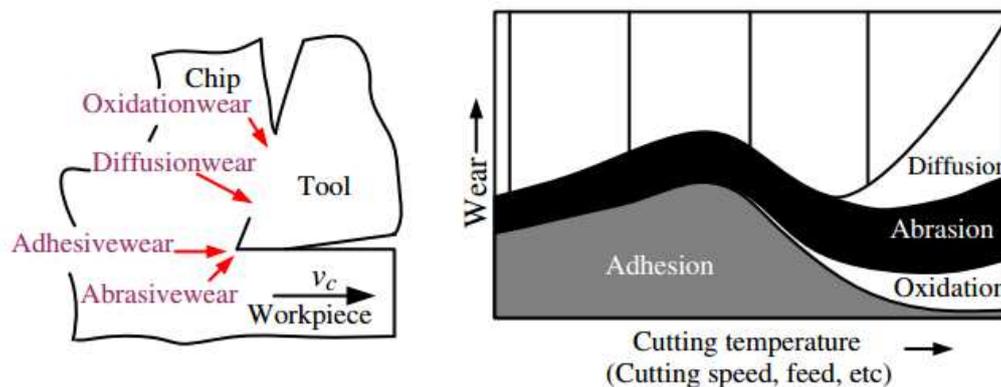
3.5.3 MECANISMOS DE DESGASTE

O desgaste da ferramenta de corte é definido como uma perda gradual do material do corpo por meio do contato físico que ocorre entre a peça e a ferramenta e o próprio cavaco, tanto num meio úmido quanto seco, onde existe vários fenômenos que levam aos desgastes (KÖNIG, W E KLOCKE.1997). Os quatro principais mecanismos de desgaste são:

- Desgaste por oxidação
- Desgaste por abrasão
- Desgaste por adesão
- Desgaste por difusão

Durante o processo de usinagem, os desgastes podem prevalecer uns sobre os outros, isso se deve a alguns fatores como material da peça, as condições de corte e a geometria da ferramenta, que afetam tanto a temperatura quanto a pressão na região de corte (König, W e Klocke.1997). Na Figura 11 podemos observar os desgastes em função da temperatura de corte e outros fatores correlacionados como: velocidade de corte, avanço e outros.

Figura 11 – Mecanismos de desgaste nos metais



Fonte: LI, B. (2012).

1) Desgaste por Oxidação

Uma leve oxidação na face da ferramenta é útil para reduzir o desgaste da ferramenta. Ele reduz a adesão, a difusão e a corrente por meio do isolamento ferramenta e a peça de trabalho. Mas em camadas de óxido macio de alta temperatura, são formadas rapidamente, e, em seguida, levado pelo cavaco e a peça. Quanto maior a afinidade do material da ferramenta pelo oxigênio, maior será a taxa de oxidação do material.

2) Desgaste por adesão

Esse mecanismo predomina em baixas velocidades de corte, em geral, na área de saída de cavacos, o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez, promovem o fluxo irregular de cavaco, causando micro-caldeamento do cavaco a superfície de saída da ferramenta.

3) Desgaste Difusão

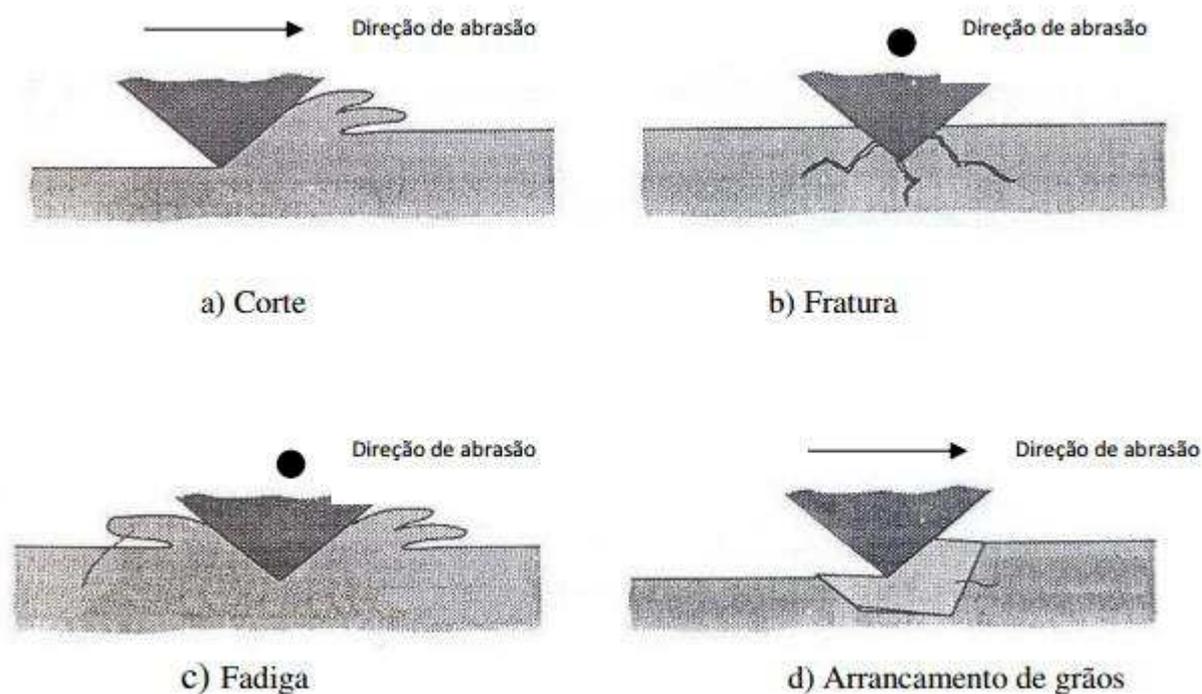
Desgaste difusão tem lugar quando os átomos se movem a partir do material da ferramenta para o material da peça de trabalho devido à diferença de concentração. A velocidade de difusão aumenta exponencialmente com o aumento de temperatura. A difusão é responsável pelo desgaste de cratera de altas velocidades de corte, pois na superfície de saída da ferramenta são geradas condições necessárias para difusão dos materiais.

4) Desgaste por abrasão

Ocorre pela ação de partículas duras pressionadas e deslizando sobre as superfícies, penetrando na superfície e removendo partículas alongadas ou lascas de material. O desgaste por abrasão é denominado de dois corpos quando uma das

superfícies tem partículas duras e protuberantes, e são transportadas pela superfície com pequena redução do tamanho. Já o desgaste por abrasão de três corpos é denominado pelas partículas duras estarem livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies, resultando em altas tensões quando as partículas são reduzidas de tamanho, e a taxa de desgaste é normalmente menor nesse último caso. (MUÑOZ, 2011). Na Figura 12 podemos observar bem os mecanismos de desgastes abrasivos.

Figura 12 – Mecanismo de desgaste abrasivo: (a) microcorte, (b) fratura, (c) fadiga e (d) arrancamento de grãos



Fonte: (Adaptado de: STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Em todos os casos, uma pequena quantidade de partículas abrasivas pode causar o desgaste devido a variações no ângulo de ataque. Partículas deslizantes causam pequeno desgaste, já altas taxas de desgaste, são causadas por partículas com ângulo de ataque de 80-120°. Em alguns casos um processo de 3 corpos pode-se transformar em um de 2, se a partícula dura penetrar e ficar impregnada numa das superfícies (usualmente a mais mole).

3.5.4 MECANISMOS DE DESGASTES NO FERRO FUNDIDO CINZENTO

Os principais mecanismos de desgaste na usinagem do ferro fundido cinzento são: abrasão, a adesão e a difusão. No caso deste ferro fundido, os carbonetos de ferro encontram-se entre os principais responsáveis pelo desgaste por abrasão. Já o desgaste por difusão se dá devido à transição de elementos entre a interface cavaco-ferramenta e ocorre sobretudo em altas velocidades de corte e temperatura. Durante as baixas velocidades de corte na usinagem, as ferramentas estão mais sujeitas à formação de gume postiço e mais propensas ao desgaste de flanco (SRIVASTAVA, 2003).

Na visão tribológica, é desejável a presença de grafita no ferro fundido cinzento, pois melhora a resistência ao desgaste. A grafita age como lubrificante sólido, tanto, tanto no sistema a seco quanto no lubrificado. Os ferros fundidos cinzentos podem apresentar uma melhor resistência ao desgaste e melhorar a condutividade térmica, a medida que os núcleos de grafita em flakes, possuem menores espaços interdendríticos e estão aleatoriamente distribuídos. (TAKEUCHI, 1968)

Segundo os estudos de Angus e Lamb (1967) observou-se a superfície dos ferros fundidos cinzentos ensaiados à seco, concluindo que a estrutura perlítica confere boa resistência ao desgaste, ao contrário da ferrita, que é uma fase mais mole e que diminui a resistência ao desgaste. A influência da ferrita e do fósforo em ferros fundidos cinzentos foi estudado por EYRE E WILLIAMS (1973), e notaram que a presença de ferrita aumenta o desgaste e que a presença de fósforo é positiva, pois o fósforo é um elemento comum nesse material.

3.6 FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte têm influência direta na usinabilidade dos metais, visto que melhora as características tribológicas durante o processo, além de dissipar o calor gerado. Pode-se compreender a utilização dos fluidos de corte analisando suas funções e seus benefícios de acordo com SUAREZ (2012):

- Prolongamento da vida útil da ferramenta pela lubrificação e refrigeração (diminuição da temperatura);
- Reduz as forças de corte devido com seu efeito lubrificante e, conseqüentemente, reduzindo a potência;
- Melhoria do acabamento superficial;
- Facilita a remoção do cavaco da zona de corte;

- Menor distorção da peça pela ação da ferramenta (controle dimensional da peça).

Quanto a um fluido de corte a base de água, este possui um poder de refrigeração mais efetivo em relação a lubrificação. O aumento da velocidade de corte e a profundidade de corte reduzem a eficiência desse tipo de fluido em reduzir a temperatura (Machado et al 2011). A refrigeração se torna relativamente sem importância durante as baixas velocidades de corte, por outro lado a lubrificação se torna importante para reduzir atrito e evitar o surgimento de APC (aresta postiça de corte). O mais indicado seria então um fluido de corte a base de óleo. (SUAREZ, 2012)

Durante as altas velocidades de corte, a penetração do fluido na interface cavaco-ferramenta não encontra condições favoráveis e assim não consegue exercer seu efeito lubrificante. Isto acontece em decorrência das altas tensões que se surgem na interface cavaco-ferramenta e o maior fluxo de cavaco no sentido oposto a direção do fluido, impedindo a penetração do mesmo. (SUAREZ, 2012).

3.6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE

Existem lubrificantes sólidos, líquidos e gasosos. Sendo os fluidos de corte líquidos o mais globalmente empregado e considerado o mais importante, devido as suas propriedades refrigerantes e lubrificantes. Já entre os gasosos, os de maior destaque são o oxigênio e o vapor de água encontrado na atmosfera (SHAW, 1986). Os gasosos possuem função quase que exclusiva de refrigeração, por outro lado os sólidos somente lubrificam.

Podemos subdividir os grupos dos fluidos de corte em três:

- I. Óleos integrais: composto por óleos minerais que podem ser puros ou conter aditivos. Vem perdendo espaço para os solúveis em água, devido as suas características nas quais podemos citar: elevado custo, inflamável, baixo poder de refrigeração, risco a saúde do operador, baixa eficiência em elevadas velocidades de corte, além da formação de fumos.
- II. Óleos emulsionáveis ou solúveis: são compostos por uma mistura de óleos minerais com água nas proporções de 1:10 a 1:100, além de agentes emulgadores que garantem a miscibilidade destes com água. Contendo

óleo mineral na faixa de 5% a 50%, aditivos e compostos químicos dissolvíveis na água, os fluidos semi-sintéticos também são formadores de emulsões.

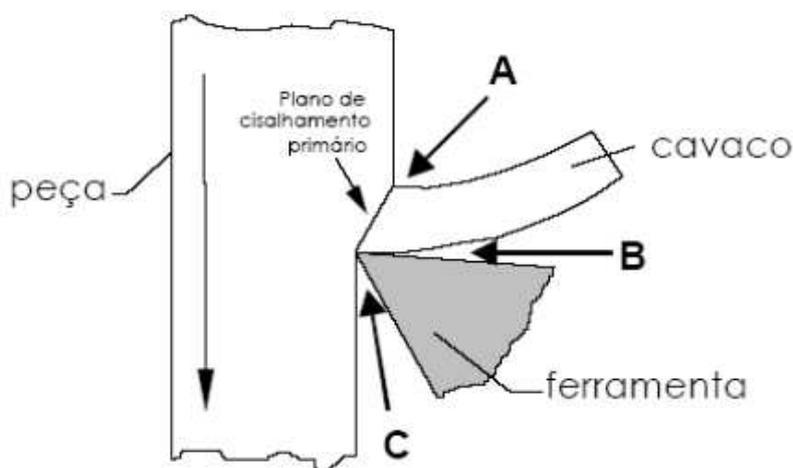
- III. Fluidos químicos ou sintéticos: Não possuem óleo mineral, baseando-se então em substâncias químicas, que formam solução com a água. São os mais comuns e garantem uma boa refrigeração, além de uma boa proteção anti-corrosiva. Os mais complexos são de uso geral, e possuem boas propriedades lubrificantes e refrigerantes. (SANTOS, SALES, 2007)

3.5.2 APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE

É de grande importância a aplicação correta dos fluidos na região correta de corte, pois gera o aumento de suas capacidades lubrificantes e refrigerantes, além de aumentar a efetividade na remoção do cavaco. É necessário levar em consideração o tipo e o posicionamento do local de aplicação do fluido de corte, para promover menores dispersões na região do corte, o que influencia bastante no processo de usinagem. (EBBRELL ET AL., 1999)

Tem-se na Figura 13 as três principais e possíveis aplicações do fluido de corte: (a) aplicação na superfície superior do cavaco na forma de jorro a baixa pressão; (b) aplicação de fluido entre a superfície de saída da ferramenta e a parte inferior do cavaco e (c) aplicação do fluido entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

Figura 13 – Sentidos práticos da aplicação do fluido de corte



Fonte: Machado et al (1999)

O sistema mais utilizado devido ao seu fácil manuseio e aplicabilidade é o A (Figura 13). No processo o fluido é jorrado a baixa pressão ou por gravidade contra a superfície de saída da ferramenta e a superfície do cavaco. Quando o fluido vai a seu encontro, o cavaco é arrastado para fora da interface. (SANTOS et. al., 2003).

Segundo KAMINSKI E ALVELID (2000) a aplicação do fluido de corte na interface cavaco-ferramenta não é muito eficaz quando for aplicado a baixa pressão, o que leva a elevadas temperaturas na zona de corte. O aumento da pressão, além de reduzir a quantidade de fluido injetada, permite a utilização de fluido refrigerante ecológico. O que é reiterado por EZUGWU E BONEY (2004) e analisado por DINIZ E MICARONI (2007) ao avaliarem o torneamento do material Inconel 718 em operação de desbaste. Sendo o material de baixa condutividade térmica e reduzida usinabilidade devido as altas temperaturas e tensões de compressão na aresta de corte. O fluido então desempenhou papel fundamental ao aumentar a lubrificação e reduzir a temperatura na interface cavaco-ferramenta.

Algumas propriedades especiais podem ser adquiridas pelos fluidos de corte por meio de aditivos, que são produtos químicos ou orgânicos, que são:

- Antiespumantes: agem evitando a formação de espuma, que compromete a visão na região de corte, além de comprometer o efeito refrigerante do fluido;
- Anticorrosivos: são produtos a base de nitrito de sódio que evitam que a peça, a ferramenta e a máquina-ferramenta sofram corrosão;
- Antioxidantes: impede a deterioração do óleo quando em contato com o oxigênio do ar;
- Detergentes: diminuem a deposição de lodo, lamas e borras (composto de magnésio, bário, cálcio, etc.);
- Emulgadores: formadores de emulsões de óleo na água;
- Biocidas: responsáveis pela inibição do crescimento de microrganismos;
- Agentes EP (extrema pressão): usado em operações mais severas de corte, acrescentam lubricidade melhorada aos fluidos de corte para suportarem elevadas temperaturas e pressões de corte, reduzindo o contato da ferramenta com o material. Os principais agentes EP são à base de enxofre, cloro e fósforo.

Os óleos minerais e graxos usados juntos ou separados, puros ou contendo aditivos especiais, são usados quando a lubrificação for o fator mais determinante.

COSTA (2004), dá algumas dicas do uso de fluidos de corte, para diferentes materiais,

- Para algumas ligas de alumínio é necessário o uso de uma emulsão com mistura de óleo mineral e graxo ou a maioria das emulsões. No uso de fluidos de origem vegetal uma boa adesividade é obtida entre o fluido e a superfície de saída da ferramenta, devido a ionização do mesmo.
- Os ferros fundidos cinzentos são normalmente usinados a seco, principalmente no torneamento, porém um óleo emulsionável pode ser útil na furação para ajudar a remover o cavaco, que é descontínuo;
- O magnésio e suas ligas normalmente são usinados a seco e a altíssimas velocidades de corte, o que acarreta em altas temperaturas, o que abre possibilidade para um fluido refrigerante apenas.
- Cobre e suas ligas geralmente usam óleos emulsionáveis. O enxofre causa descoloração das peças;
- Em ferramentas cerâmicas, devido a sua alta fragilidade, deve-se tomar precauções ao aplicar fluido refrigerante, porque os choques podem causar trincas superficiais.

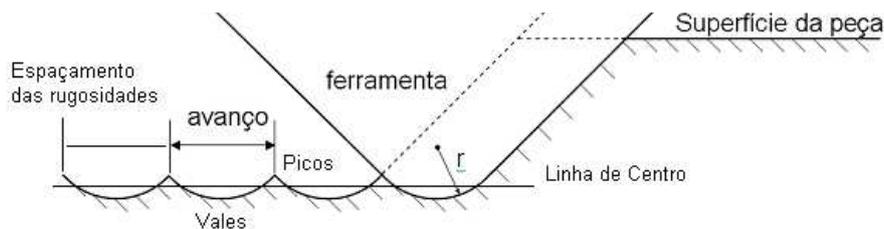
3.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL

O acabamento superficial adquirido no processo de usinagem é um fator importante na análise da usinabilidade, sendo a rugosidade o principal critério analisado. GRANDO (2012) define rugosidade superficial como um conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências e protuberâncias, sendo possível avaliá-las com um aparelho eletrônico chamado rugosímetro.

A rugosidade, ocasionada na superfície usinada, trata-se de finas irregularidades e micro erros geométricos, que surgem devido fenômenos consequentes do processo de corte, tais como: marcas de avanço, aresta postiça de corte e desgaste da ferramenta. Durante um suposto processo sob condições ideais e com o uso de uma ferramenta nova, onde desconsideramos o atrito entre as superfícies, no ocorrendo vibrações e sem formação de APC, a suposta rugosidade será originada pelo avanço em

relação ao raio da ferramenta na peça. A Figura 14 demonstra as marcas decorrentes de uma operação de torneamento cilíndrico externo, com a ferramenta possuindo raio de ponta r , sendo que, para o suposto caso, coincidem as marcas de avanço com os espaçamentos entre as rugosidades. (MACHADO et al.; 2009).

Figura 14 – Suposta rugosidade superficial ocasionada pelas marcas de avanço



Fonte: Adaptado de Machado et al (2009)

MEDEIROS (2011) cita algumas das situações onde a rugosidade em geral é menor:

- As deflexões resultantes dos esforços de usinagem ou das vibrações geradas, são pequenas;
- Ferramenta e peça estão alinhadas;
- O material é caracterizado mediante sua microestrutura com tendência a pequenos valores de rugosidade;
- A máquina ferramenta possui alinhamento, ausência de desgaste e folgas em excesso nas guias e partes rotatórias;
- Boa integridade da aresta de; e durante o corte não ocorra o surgimento da aresta postiça de corte.

A aresta postiça de corte pode surgir mediante baixas velocidades de corte, o que leva a um acabamento com elevada rugosidade. Combinada com um alto avanço essa condição resulta numa piora da qualidade superficial da peça usinada. O acabamento tende a melhorar com o aumento da velocidade de corte, pois com o aumento da temperatura temos como consequência a eliminação da aresta postiça, evitando assim as porções de material da peça cisalhadas durante o processo permaneçam aderidas a superfície em usinagem. Com o aumento do avanço tende a aumentar também a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço.

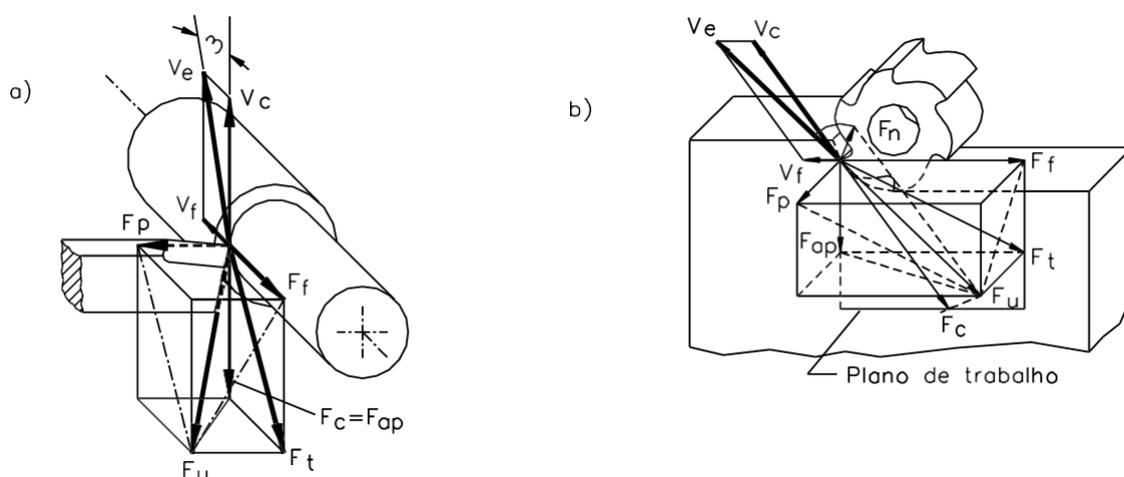
Além disso, a profundidade de corte eleva as componentes das forças de usinagem, logo aumentando as deflexões, assim como as alturas de ondulações (MACHADO et al.; 2009).

3.7 FORÇAS DE USINAGEM

Quando se conhece a força de usinagem, pode-se estimar a potência do equipamento necessária para desenvolver o processo, além de ser um fator importante na determinação da usinabilidade de um material, pois apresenta relação com o desgaste das ferramentas de corte. Quando as condições de corte possuem uma maior força de usinagem, conseqüentemente temos uma maior dificuldade de usinagem do material. Logo, para se ter uma melhor usinabilidade, os esforços cortantes devem apresentar um valor menor. (CAVALCANTE, 2010).

Para GRANDO (2012) as componentes das forças de usinagem (Figura 15), em geral, sofrem variação com as condições de trabalho a quais são submetidas, como o material da peça e a geometria da ferramenta de corte. O tipo de material usado na ferramenta serve como coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta, e em consequência disso, especialmente sobre a força passiva e na força de avanço.

Figura 15 – Componentes da força de usinagem. a) no torneamento; b) no fresamento



Fonte: Ferraresi (1988)

O desgaste de cratera tem influência sobre a face da ferramenta, gerando a formação de um ângulo de saída mais positivo, em regra, leva a diminuição das

componentes de força de usinagem. Já o desgaste do flanco da ferramenta elevada as componentes de força de usinagem em decorrência ao aumento da superfície de atrito entre a superfície de incidência e a peça. GRANDO (2012).

É de fundamental importância conhecer o comportamento e a ordem de grandeza dos esforços de corte, já que eles afetam a potência necessária para o corte, a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta e a capacidade de aquisição de pequenas tolerâncias. (DINIZ et al.; 2003).

A equação fundamental da força de corte, chamada de Kienzle (Eq.3), possibilita relacionar constates do processo de usinagem, a exemplo o material a ser trabalhado, independente do processo de usinagem adotado. GRANDO (2012).

$$F_c = k_s \times A \quad (3)$$

$$A = b \times h = a_p \times f \quad (4)$$

Onde, de acordo com FERRARESI (1977):

- ✓ k_s (N/mm) é a pressão específica de corte;
- ✓ A representa a área da seção de corte;
- ✓ b é o comprimento de corte;
- ✓ h a espessura de corte;
- ✓ a_p a profundidade do corte e;
- ✓ f o avanço.

3.7.1 COMPORTAMENTO DA FORÇA DE USINAGEM

Alguns fatores influenciam no comportamento das forças de usinagem, esses fatores estão envolvidos com as condições de corte durante o processo realizado, tendo maior ou menor relação com as componentes destas forças.

Alguns trabalhos experimentais demonstram a interferência dos principais parâmetros de corte sobre as componentes da força de usinagem, tais como: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, material da peça, material da ferramenta,

geometria da ferramenta, estado de afiação da ferramenta e utilização de fluido de corte. (MACHADO et al.,1987).

a) Velocidade de corte

Para uma melhor análise das implicações da velocidade de corte na força de usinagem, (MEDEIROS, 2011) dividiu em dois casos particulares, com comportamentos distintos: os materiais que possuem segunda fase e aqueles que não a têm.

No primeiro caso (materiais com segunda fase), a força de usinagem será reduzida, devido a formação da APC nas baixas velocidades de corte, esse fenômeno produz uma afiação mais aguda na ferramenta, facilitando o cisalhamento do cavaco. TRENT E WRIGHT (2000) atribuem às baixas forças de usinagem na presença da APC, devido à diminuição da área de contato, que neste caso ocorre entre o cavaco e a APC. Com velocidade de corte maior, a temperatura elevada tende a extinguir esta cunha postiça. Com a redução da APC, a força de corte tende a aumentar até um ponto máximo, depois tende a cair novamente, devido ao aumento da temperatura, que facilita o corte.

No segundo caso (materiais sem segunda face) não há formação da APC e a queda na força de corte com o aumento da velocidade se torna mais evidente, tendendo a ficar constante, após certo ponto.

b) Avanço e profundidade de corte

Causam um aumento da força de usinagem, numa proporção praticamente linear, visto que ambos os fatores, quando elevados, elevam diretamente as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário. Em testes experimentais SUAREZ (2008), o avanço mostrou maior influência sobre a força de usinagem, comparado com o efeito da profundidade de corte. Entretanto, o efeito foi maior da profundidade de corte em testes realizados no LEPU/FEMEC/UFU.

c) Material da peça

Anteriormente foi mencionado que a maior resistência ao cisalhamento implica numa maior força de corte, porém, existem casos particulares onde o material com menor resistência mecânica apresenta maiores forças de corte, devido ao incentivo da natureza dúctil do material sobre as maiores áreas de contato.

d) Material da ferramenta

Na área de contato cavaco-ferramenta, principalmente, ocorre a afinidade química do material da ferramenta com o material da peça. A força de usinagem será elevada, caso haja uma tendência de promover uma zona de aderência estável e forte. Caso contrário, se existir a tendência de diminuir o atrito na interface, a área da seção de corte poderá diminuir, reduzindo a força de usinagem.

e) Geometria da ferramenta

O ângulo de saída da ferramenta é o mais influente na variação da força de corte. A redução deste ângulo tende a aumentar a força de usinagem, em consequência do também aumento da área de contato cavaco-ferramenta. Apenas em casos extremos, a força de usinagem é afetada por pequenas influências dos ângulos de posição e folga.

f) Estado de afiação da ferramenta

O desgaste da ferramenta de corte pode aumentar a área de contato cavaco-ferramenta, devido a sua influência sobre o acabamento e as tolerâncias dimensionais da peça, o que altera também a geometria da ferramenta. Desgastes de cratera e de flanco aumentam o contato entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça respectivamente, aumentando assim a força de usinagem.

g) Uso de fluidos de corte

Quando o fluido de corte possui ação lubrificante, há benefícios no seu uso para diminuição das forças de atrito. Já quando sua ação maior é a refrigeração, possíveis aumentos na força de corte podem ocorrer, devido a elevação da resistência ao cisalhamento do material, com a redução da temperatura.

3.8 POTÊNCIA DE USINAGEM

A potência de usinagem é um resultado da energia requisitada para cisalhar o material da peça. Esta energia utilizada está relacionada essencialmente aos parâmetros de corte utilizados, sendo os principalmente, a maior remoção do volume e o

aumento da velocidade da qual é retirado são as principais causas de aumento do consumo de energia e potência. (SUAREZ, 2012).

A Potência de Corte (N_c), dada em cv (cavalo vapor), representada pela equação (5). (MACHADO et al., 2011):

$$N_c = \frac{F_c \times V_c}{60 \times 75} \quad (5)$$

Onde F_c é a força de corte em Kgf e V_c é a velocidade de corte em m/min.

A Potência de Avanço (N_f), também em cv, é representada pela equação (6) (MACHADO et al., 2011):

$$N_f = \frac{F_f \times V_f}{1000 \times 60 \times 75} \quad (6)$$

Onde F_f é a força de avanço em Kgf e V_f é a velocidade de avanço dada em mm/min.

A Potência Efetiva de Corte (N_e) é representada pela equação (7) (MACHADO ET AL., 2011):

$$N_e = N_c + N_f \quad (7)$$

De acordo com BONFÁ (2013) a potência consumida na operação de usinagem logo é mensurada por meio do motor elétrico da máquina operatriz. Ainda acrescenta que nas máquinas ferramentas que apresentam um único motor de acionamento, o movimento de corte e o movimento de avanço, a potência fornecida pelo motor é dada por:

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (8)$$

Onde η é o rendimento da máquina-ferramenta, que gira geralmente em torno de 60% a 80%.

Caso haja um motor para cada tipo de acionamento, ou seja, um para movimento de avanço e outro para o do corte, o cálculo de N_m (Eq.8) é separado, e o rendimento será superior. (BONFÁ, 2013)

3.9 FORMAÇÃO DO CAVACO

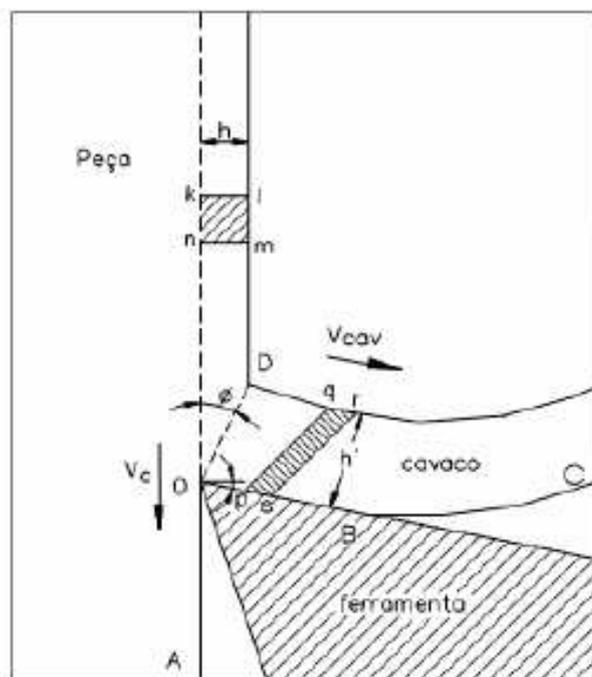
Encontra-se na literatura uma descrição precisa do fenômeno de formação do cavaco no corte de um material com ferramenta de geometria definida que divide o fenômeno em várias etapas bem delimitadas. A variação das tensões na região de deformação constitui o caráter cíclico da formação do cavaco (ASTAKHOV; SHVETS, 1998)

O cavaco, em condições normais de usinagem, utilizando metal duro ou aço rápido, é formado e processado da seguinte forma, de acordo com a Figura 16 (TRENT, E. M., WRIGHT, 2000):

- 1) Parte do material é reprimida contra a superfície de saída da ferramenta durante a usinagem, causada pela penetração da ferramenta de corte;
- 2) O material reprimido sofre deformação plástica que aumenta constantemente, até que as tensões causem o deslizamento entre a porção do material reprimido e a peça. Tal deslizamento ocorre de acordo com os planos de cisalhamento dos cristais da porção do material reprimido. Estes planos súbitos definem a chamada região de cisalhamento primário (entre peça e cavaco), que é incorporada a um plano de cisalhamento, definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ ;
- 3) Seguindo a penetração, ocorrerá uma ruptura parcial ou total na região de cisalhamento, dependendo das condições do processo e da ductilidade do material. A ruptura em materiais altamente deformáveis se dá nas proximidades da aresta de corte, o cavaco nesse caso recebe o nome de cavaco contínuo. Materiais frágeis como o ferro fundido cinzento originam cavaco de cisalhamento ou de ruptura.

- 4) O relativo movimento entre a ferramenta e a peça causa um deslizamento da porção do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, outra porção de cavaco irá se formar e também deslizar, repetindo o movimento.

Figura 16 – Diagrama da cunha cortante



Fonte: Evangelista (2007).

Na interface-cavaco ferramenta, chamada de zona de cisalhamento, está localizada a segunda região de cisalhamento, como ilustra a Figura 16. Nesta região ocorrem desgaste por transferência de átomos entre a ferramenta e o cavaco e fenômenos com elevadíssimas temperaturas. (EVANGELISTA, 2007).

3.9.1 TIPOS DE CAVACOS

Os tipos de cavacos de acordo com suas características são (FERRARESI, 1977):

- ✓ Cavaco contínuo – constituído por lamelas sobrepostas de forma contínua. É originado de matérias dúcteis e homogêneas, com pequeno avanço.

- ✓ Cavaco de cisalhamento – comum em materiais pouco dúcteis, o cavaco de justapostos cisalhamento é constituído de grupos lamelares. Surgem na medida que diminui a resistência do material no plano de cisalhamento, em decorrência do aumento da temperatura. A desuniforme microestrutura do material, ou vibrações externas interferem na espessura do cavaco. Grandes avanços, velocidades de corte menores que 100 m/min e ângulo de saída pequeno, também formam cavacos de cisalhamento.
- ✓ Cavaco de ruptura – Comum em materiais frágeis ou de estrutura desuniforme como o ferro fundido. É constituído de fragmentos arrancados da peça arrancada. Ocorre a completa ruptura do material na zona de cisalhamento primário, onde os grupos lamelares ficam separados.

Os cavados também podem ser classificados quanto a forma, encontrando-se na literatura quatro formas principais:

- ✓ Cavaco em fita
- ✓ Cavaco helicoidal
- ✓ Cavaco espiral
- ✓ Cavaco em lascas ou pedaços

A forma do cavaco é um aspecto importante da usinagem. Cavacos longos, em fita, são geralmente indesejáveis nos processos de usinagem por apresentarem desvantagens como:

- ✓ Enroscar na peça oferecendo riscos ao operador;
- ✓ Provocar quebras e avarias na ferramenta de usinagem;
- ✓ Dificuldade de transporte e remoção.

A definição do coeficiente volumétrico de cavaco C_v conforme equação (9) (FERRARESI, 1977).

$$C_v = \frac{4000 \times V_{cavaco}}{\pi \times (d^2 - (d - 2 \times a_p)^2) \times l} \quad (9)$$

Sendo:

V_{cavaco} = volume do cavaco medido (ml)

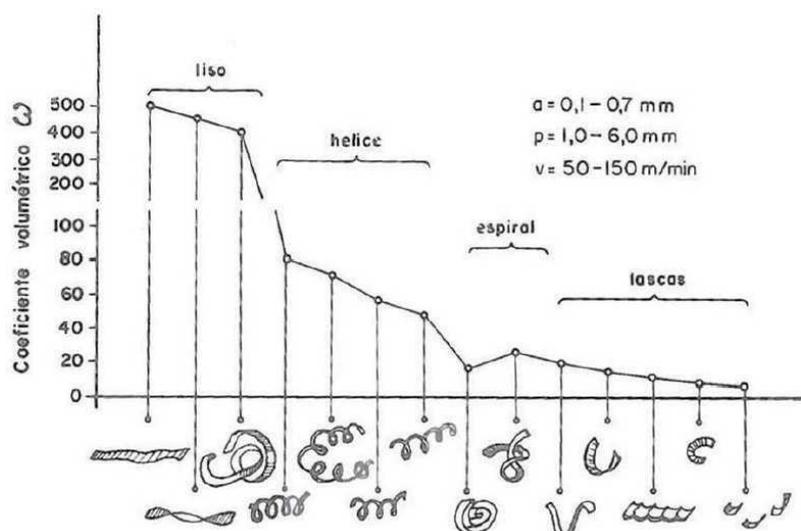
d = diâmetro da seção (mm)

a_p = profundidade de corte, (mm)

l = comprimento usinado (mm)

O valor fornecido por esse coeficiente, é incerto, visto que depende da maneira como o cavaco é armazenado. A Figura 17 fornece os valores de C_v para diferentes formas de cavaco (FERRARESI 1977). Para a determinação de V_{cavaco} foi considerado o armazenamento manual de cavaco.

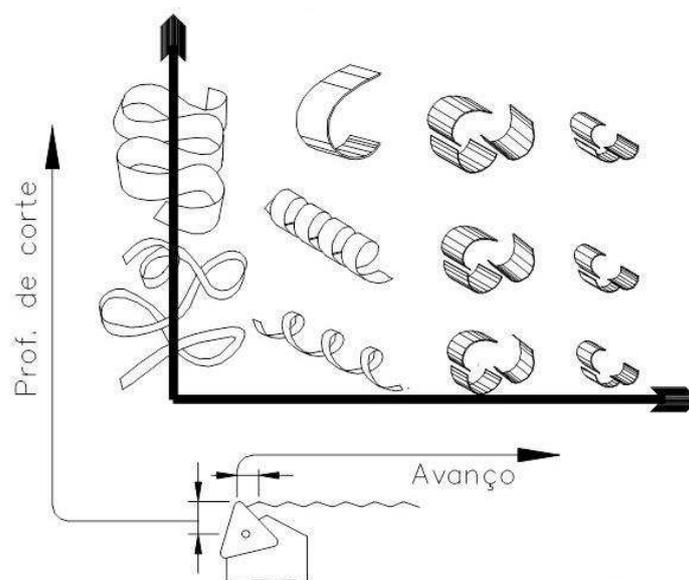
Figura 17 – Influência da forma de cavaco no valor do coeficiente volumétrico



Fonte: Ferrresi (1977).

A Figura 18 mostra como a forma do cavaco é afetada pelo avanço e pela profundidade de corte. A redução do avanço e o aumento da velocidade de corte, tendem a formar cavacos em fitas, visto que movem a forma do cavaco para a esquerda. O avanço é o parâmetro que mais influencia a forma do cavaco (EVANGELISTA, 2007).

Figura 18 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos



Fonte: Smith (1989).

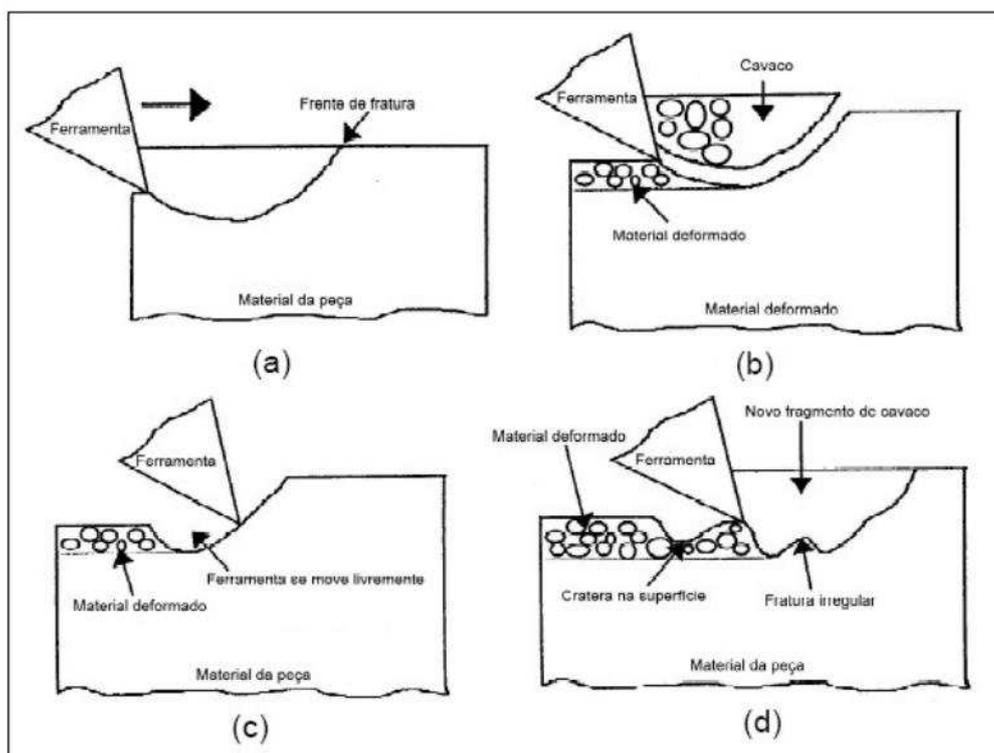
A desaceleração alternada do avanço por intermédio de uma máquina de controle numérico, tem sido utilizada com sucesso para controlar o cavaco, (TAKATSUTO, 1988), ou a convergência de um jato em alta pressão entre a superfície de saída e o cavaco (MACHADO, 1990). Mas, a alteração do formato da superfície de saída da ferramenta, sem dúvida, o método mais utilizado, com a finalidade de dobrar o cavaco ou fragilizá-lo, e fazer com que quebre ao impactar contra a peça, suporte da ferramenta ou qualquer outra parte da máquina. (SUAREZ, 2012)

3.9.2 FORMAÇÃO DE CAVACO EM FERRO FUNDIDO CINZENTO

A importância da diversidade no corte de metais é acentuada quando as características de diferentes ferros fundidos são comparadas. No caso dos ferros fundidos cinzento e vermicular, a grafita em suas microestruturas devem ser consideradas. Alguns pesquisadores afirmam que a grafita aumenta as tensões durante a formação do cavaco, que facilita assim a usinagem, enquanto outros, por outro lado, afirmam que a grafita facilita a formação de cavaco por meio de fragilização da liga. Foi proposta uma lubrificação interna pela gráfica, facilitando o cisalhamento, mas ainda não houve um consenso. (MARWANGA ET AL., 2000).

No caso do ferro fundido cinzento, durante a usinagem, o material primeiro é comprimido pela ferramenta, e devido as suas grafitas possuírem lamelas afiadas em forma de veios, as tensões são concentradas nas suas extremidades, e como não são interconectadas, surge um plano de propagação de trincas a frente da aresta de corte, como podemos observar na (Figura 19 – a). O material é removido com menor força de corte, a medida do avanço da ferramenta (Figura 19 – b). Devido as crateras geradas (Figura 19 - c) durante o processo de usinagem, a ferramenta de corte não permanece sempre em contato com o material. A grafita liberada pelo arrancamento do material, age como lubrificante e prejudica a superfície usinada, piorando a rugosidade. (Figura 19 - d) (COHEN ET AL., 2000; GEORGIU, 2002).

Figura 19 – Formação do cavaco no ferro fundido



Fonte: Cohen et al (2000).

O ferro fundido cinzento, devido a sua fragilidade, forma cavacos de ruptura, como efeito dos veios de grafita que compõe o material, junto as concentrações de tensão, levando a rupturas em um curto espaço de tempo. Segundo, ANDRADE (2005), em seu estudo, o ferro fundido cinzento e o vermicular tem suas formações de cavaco comparadas nos processos de furação e torneamento. Na furação apresentam

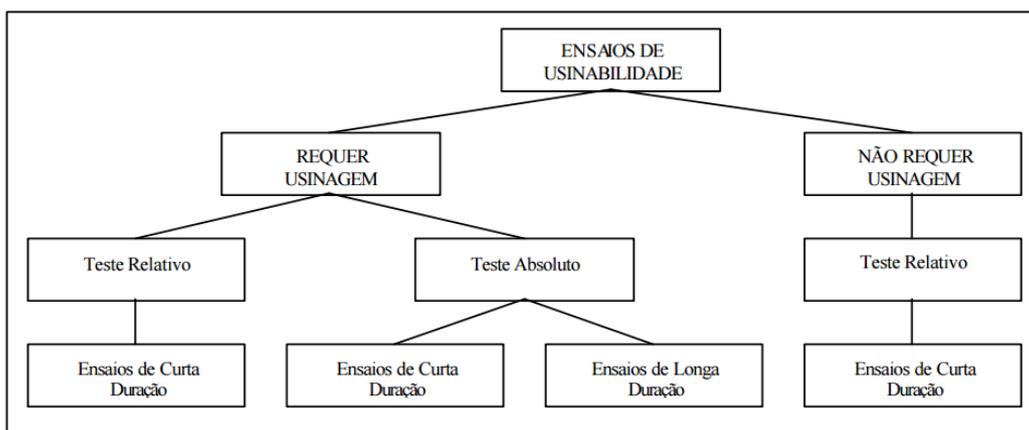
formas e tipo aproximados, o cavaco é arrancado. Já no torneamento a diferenças são mais acentuadas, revelando maior ductilidade do vermicular.

3.10 ENSAIO DE USINABILIDADE

Os ensaios podem ser divididos em ensaios que requerem usinagem e os ensaios que não requerem usinagem, com subdivisões entre essas categorias. A primeira destas faz distinção entre os rankings testes (testes relativos), que comparam a usinabilidade relativa entre dois ou mais pares de ferramenta-peça para condições específicas de corte, e os testes absolutos, que indicam numa determinada faixa de condições de corte, os méritos de dois ou mais pares de ferramenta-peça. Além desses podemos adicionar os testes de curta e longa duração, que é uma outra distinção feita entre os ensaios de usinabilidade. (AMORIM, 2003).

Os ensaios que não requerem usinagem são sempre testes relativos e de curta duração, enquanto os que requerem usinagem podem ser tanto absolutos quanto imprecisos, além de necessitarem, na maioria das vezes, de longa duração. Desse modo, a classificação dos ensaios de usinagem é dada de acordo com a Figura 20.

Figura 20 - Classificação dos ensaios de usinabilidade



Fonte: Mills e Redford (1983).

Os testes relativos, são muito utilizados na indústria, visto a necessidade de tomada de decisões rápidas. Entretanto, estes testes apresentam duas grandes desvantagens: primeiro, podemos verificar por meio dos ensaios, que um material “X” é

melhor que o material “Y”. Porém não há como saber precisamente o quão grande é essa vantagem, pois a medida de usinabilidade não foi relacionada com alguma escala previsível. A outra desvantagem é que, os testes relativos têm objetivos de fazer comparação de usinabilidade dos materiais em uma determinada condição de corte e se caso alguma condição de corte for alterada, não há garantia da classificação permanecer igual. (AMORIM, 2003),

3.11.1 ENSAIOS DE USINABILIDADE SEM USINAGEM

Os ensaios que não requerem usinagem são sempre relativos e de curta duração, sendo mais fáceis de executar do que os que requerem usinagem, sendo esses relativos ou não. Como promovem uma rápida resposta a necessidade dos engenheiros, estes ensaios são bastante úteis.

No trabalho apresentado abordar-se-á o ensaio desenvolvido por Henkin e Datsko, que é o teste de propriedades físicas

Teste de propriedades físicas: a técnica desenvolvida por HENKIN E DATSKO (1963), citados por MILLS E REDFORD (1983), associa propriedades como condutividade térmica (B), dureza Brinell (HB) do material e comprimento característico (L) e redução percentual de área obtidos em ensaio de tração convencional (A_r) com a V_{60} de um material (eq. 10). Esta correlação funciona para os aços utilizados na determinação do método e outros de composição similar, mas, por não levar em consideração o material da ferramenta, está sujeita a significativas imprecisões.

$$V_c = \frac{B}{L \cdot HB} \times \sqrt{\left(1 - \frac{A_r}{100}\right)} \quad (10)$$

Outro trabalho relacionando propriedades físicas com a V_{60} com bons resultados é o desenvolvido por JANITZKG (1944), também citado por MILLS E REDFORD (1983).

$$V_{60} = \frac{D}{H_B \cdot A_r} \quad (11)$$

Onde D é uma constante dependente das dimensões de corte.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGIA

Após a escolha do tema para este trabalho, foi feita uma pesquisa descritiva, onde as buscas foram feitas em sites de universidades de todo o mundo que contribuem para discussão desse tema bastante atual na engenharia mecânica, principalmente no processo de usinagem. Faremos uso de teste que não requer usinagem, o teste de propriedades físicas, onde serão analisados mediante o cálculo da V_{c60} do material a ser estudado. Esse trabalho teve precisamente a utilização a técnica desenvolvida por HENKIN E DATSKO (1963) que é:

$$V_{c60} = \frac{B}{L \cdot HB} \times \sqrt{\left(1 - \frac{A_r}{100}\right)}$$

Onde as incógnitas são: condutividade térmica (B), dureza Brinell (HB) do material e comprimento característico (L) e redução percentual de área obtidos em ensaio de tração convencional (A_r), representadas com suas unidades de acordo com o Quadro 7.

Quadro 7 – Variáveis da equação do teste de propriedades físicas com suas respectivas unidades

Variáveis	Propriedades	Unidades
B	Condutividade térmica do material	Btu/h.ft°F
L	Um comprimento característico	ft
HB	Dureza Brinell do material	Kgf/mm ²
Ar	Redução de área obtida em ensaio de tração convencional	-

Fonte: Adaptado, Oliveira (2014).

Com as propriedades e unidades definidas, montou-se um banco de dados para comparar valores das propriedades físicas dos metais selecionados, buscando garantir a veracidade e integridade das informações coletadas. Para isso, analisaram-se

diversos relatórios de ensaios de tração, monografias, dissertações, teses e livros. Assim, conseguiu-se realizar os ensaios de acordo com a proposta de (HENKIN, 1962).

4.2 MATERIAL ENSAIADO

Buscou-se dados de alguns ferros fundidos cinzentos, suficientes para executar o teste de propriedades físicas. Foi utilizado como referência para obtenção dos dados as normas da *EN-European Standard. European Committee for Standardization* (DIN EN 1561) de 1997, de onde retiramos os dados de três ferros fundidos cinzentos (FC 150, FC 200 e FC 250), no Quadro 8 foram apresentados os materiais, seguidos de suas temperaturas e suas respectivas condutividades térmicas.

Quadro 8 – Condutividades térmicas dos ferros fundidos cinzentos

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)	FC 150	FC 200	FC 250
a 100 °C	52,5	50,0	48,5
a 200 °C	51,0	49,0	47,5
a 300 °C	50,0	48,0	46,5
a 400 °C	49,0	47,0	45,5
a 500 °C	48,5	46,0	44,5

Fonte: Norma DIN EN 1561 (1997).

Os valores foram obtidos em graus Celsius (°C), então para deixarmos de acordo com o que se pede na fórmula de Henkin, substituímos apenas os valores de temperaturas. Podemos observar, agora em Fahrenheit (°F), no Quadro 9, as temperaturas.

Quadro 9 – Temperaturas em fahrenheit

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (W/m.K)	FC 150	FC 200	FC 250
a 212 °F	52,5	50,0	48,5
a 392 °F	51,0	49,0	47,5
a 572 °F	50,0	48,0	46,5
a 752 °F	49,0	47,0	45,5
a 932 °F	48,5	46,0	44,5

Fonte: Norma DIN EN 1561 (1997).

Após obter os valores de temperaturas necessários para realização do ensaio, construiu-se um quadro com os valores de propriedades físicas e mecânicas dentro de sua condutividade térmica específica. Foram elaborados três quadros, uma para cada material, visto que devido as várias temperaturas, algumas de suas propriedades sofreram mudança. Os Quadros 10, 11 e 12 mostram esses valores estimados, no alongamento, na dureza Brinell e na resistência a tração, todos dentro da média de acordo com a ABNT. Como a dureza e a resistência a tração são diretamente proporcionais tendem a crescer ou reduzir proporcionalmente.

Quadro 10 – Propriedades físicas do FC 150

Material	Redução de área (%)	Alongamento em 30 mm (%)	Dureza (HB)	Resist. à tração (Mpa)	Condutividade de Térmica (W/m.K)
FC 150	2,3	0,4	160	150	52,5
	2,3	0,4	155,5	146	51,0
	2,3	0,4	162	154	50,0
	2,32	0,44	161,5	150,5	49,0
	2,36	0,47	140,5	134,5	48,5

Fonte: Norma DIN EN 1561, 1997.

Quadro 11 – Propriedades mecânicas do FC 200

Material	Redução de área (%)	Alongamento em 30 mm (%)	Dureza (HB)	Resist. à tração (Mpa)	Condutividade de Térmica (W/m.K)
FC 200	2,5	0,4	180	200	50
	2,5	0,4	175	195	49
	2,5	0,4	182,5	202	48
	2,52	0,44	181,5	199,5	47
	2,55	0,47	161,5	179,87	46

Fonte: Norma DIN EN 1561 (1997).

Quadro 12 – Propriedades mecânicas do FC 250

Material	Redução de área (%)	Alongamento em 30 mm (%)	Dureza (HB)	Resist. à tração (Mpa)	Condutividade de Térmica (W/m.K)
FC 250	2,7	0,4	210	250	48,5
	2,7	0,4	215	250	47,5
	2,7	0,4	212,5	250	46,5
	2,72	0,44	211,5	249,94	45,5
	2,75	0,47	195,5	249,87	44,5

Fonte: Norma DIN EN 1561 (1997).

Como objetivo final para alcançar todos os pré-requisitos do teste, precisou-se encontrar o valor do comprimento característico, o Quadro 13 mostra as propriedades e unidades para realização do cálculo. Dada pela equação (12), que segundo (Henkin, 1962) é:

$$q = w^{1-a} \cdot t^a \quad (12)$$

Quadro 13 – Propriedades e unidades da equação do comprimento característico

Símbolo	Propriedades	Unidades
q	comprimento característico – L;	ft
w	largura de corte;	in
t	profundidade de corte	in
a	Constante;	-

Fonte: Adaptado, Henkin (1962).

Observação: como o valor de área é desprezível, “q” é dado em uma só dimensão.

O valor de “a” é alcançado analisando o Quadro 14, onde estão os parâmetros de corte adotados no experimento de Henkin.

Quadro 14 – Relação entre geometria de corte e comprimento característico

$\frac{t}{w}$	a	q (unid. Comp)
0	1	t
0,15	2/3	$t^{\frac{2}{3}} \cdot w^{\frac{1}{3}}$
1	1/2	$t^{\frac{1}{2}} \cdot w^{\frac{1}{2}}$

Fonte: Henkin (1962).

No trabalho de Henkin, a equação geral de usinabilidade trabalha com os valores adotados por ele para o trabalho com aço específicos, sendo esses valores: $w = 0,004167$ ft e $t = 0,000475$ ft, porém como trabalhamos com o ferro fundido cinzento, os valores mudam. Henkin não realizou o teste de propriedades físicas utilizando este material, porém, ele estabeleceu os valores dos parâmetros: $w = 0,100$ ft e $t = 0,006$ ft. A equação (13) indica a relação de geometria de corte.

$$\frac{t}{w} \quad (13)$$

Assim, substituímos os valores estabelecidos por Henkin.

$$\frac{t}{w} = \frac{0,006}{0,1} = 0,06$$

Baseado nos estudos feitos por (Henkin, 1962) e (Oliveira, 2014) e no Quadro 14, apresentado o intervalo de $0 \leq t/w \leq 0,1$, $a = 1$.

Logo o valor do comprimento característico foi representado pela equação (14).

$$\begin{aligned} q &= t \\ q &= 0,006 ft \end{aligned} \tag{14}$$

De acordo com Henkin, esses parâmetros de corte foram usados para todos os materiais utilizados nesse ensaio, logo, foi utilizado o mesmo comprimento característico para todas as equações.

4.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Foi utilizado como método de cálculo e plotagem de quadros e gráficos, a ferramenta Excel 2010, visto a necessidade para repetir cálculos, mudando apenas os valores das equações, além da sua capacidade de gerar gráficos e planilhas para a organização do trabalho.

4.4 DADOS DE ENTRADA

Conforme as propriedades necessárias para realização do cálculo, montou-se os Quadros 15, 16 e 17 com os dados em suas unidades já necessárias para realização do ensaio.

Quadro 15 – Dados de entrada para o ferro fundido cinzento 150 (FC 150)

Material	Redução de área (%)	Comprimento característico (ft)	Dureza (HB)	Condutividade de Térmica (Btu/ft.h°F)
FC 150	2,3	0,006	160	30,3
	2,3	0,006	155,5	29,5
	2,3	0,006	162	28,9
	2,32	0,006	161,5	28,3
	2,36	0,006	140,5	28,0

Fonte: Norma DIN EN 1561 (1997).

Quadro 16 – Dados de entrada para o ferro fundido cinzento 200 (FC 200)

Material	Redução de área (%)	Comprimento característico (ft)	Dureza (HB)	Condutividade de Térmica (Btu/ft.h°F)
FC 200	2,5	0,006	180	28,9
	2,5	0,006	175	28,3
	2,5	0,006	182,5	27,7
	2,52	0,006	181,5	27,2
	2,55	0,006	161,5	26,6

Fonte: Norma DIN EN 1561 (1997).

Quadro 17 – Dados de entrada para o ferro fundido cinzento 250 (FC 150)

Material	Redução de área (%)	Comprimento característico (ft)	Dureza (HB)	Condutividade de Térmica (Btu/ft.h°F)
FC 250	2,7	0,006	210	28,02
	2,7	0,006	205	27,44
	2,7	0,006	212,5	26,86
	2,72	0,006	211,5	26,28
	2,75	0,006	195,5	25,71

Fonte: Norma DIN EN 1561 (1997).

4.4 DESENVOLVIMENTO DAS UNIDADES

A equação desenvolvida por (Henkin, 1962) permite estudar uma gama de materiais. Como não existe teste comparativos com o trabalho realizado com o material especificado, iremos abordar a unidade dos valores em m/min para uma velocidade V_{60} , visto que a equação (10) resulta em valor de velocidade de usinagem. No trabalho realizado por (Oliveira, 2014) foram feitos estudos em ambas unidades, devido ao material utilizado ser o mesmo do Henkin, porém em diferentes temperaturas.

Assim, temos:

$$V_c = \frac{B}{L.HB} \times \sqrt{\left(1 - \frac{A_r}{100}\right)}$$

A_r é adimensional, pois é uma razão entre áreas, podemos desconsiderar todo os valores dentro da raiz, visto que não apresentam unidade.

Segue,

$$V_c = \frac{B}{L.HB} \tag{15}$$

Substituindo as unidades, temos:

$$V_c = \frac{\left(\frac{Btu}{h.ft.^{\circ}F}\right)}{(ft) \cdot \left(\frac{Kgf}{mm^2}\right)}$$

$$V_c = \frac{Btu.mm^2}{h.ft^2.^{\circ}F.kgf} \tag{16}$$

Utilizou-se o Quadro 18 para realização da conversão das unidades

Quadro 18 – Dados para conversão de unidades

Btu	= 107,6687 Kgf.m
ft	= 0,3048 m
mm²	= 0,00001076 ft ²
m	= 3,2808 ft
ft/min	= 0,3048 m/min

Fonte: ASM (2001).

Substituindo os valores:

$$V_c = \frac{107,6678 \text{ Kgf.m} \cdot 0,00001076 \text{ ft}^2}{h \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{Kgf}}$$

Resultado aproximado da simplificação:

$$V_c = \frac{0,001076 \cdot \text{Kgf.m.ft}^2}{h \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{Kgf}}$$

$$V_c = \frac{0,001076 \cdot m}{h \cdot ^\circ\text{F}} \quad (17)$$

Alterando o valor de da unidade na equação (17):

$$V_c = \frac{0,001076 \cdot 3,2808 \text{ ft}}{h \cdot ^\circ\text{F}}$$

Obtemos aproximadamente:

$$V_c = \frac{0,003529 \text{ ft}}{h.^\circ F} \quad (18)$$

Como o ensaio estabelecido ocorre por 60 min, a equação (18) fica:

$$V_{c_{60}} = \frac{0,003529 \text{ ft}}{\text{min.}^\circ F} \quad (19)$$

Foi necessário também, fazer uma multiplicação entre a equação (19) pela temperatura mínima de trabalho. Como as propriedades adquiridas foram numa faixa entre 100°C e 500°C, adotamos o menor valor para realizar a multiplicação, porém, antes foi feita a conversão de unidade do mesmo para °F, ficando:

$$V_{c_{60}} = 212^\circ F \cdot \frac{0,003529 \text{ ft}}{\text{min.}^\circ F}$$

$$V_{c_{60}} = \frac{0,748148 \text{ ft}}{\text{min.}} \quad (20)$$

Portanto, todos os metais ensaiados na equação geral de usinabilidade proposta por (HENKIN, 1962) foram multiplicados por 0,748148 para serem expressos numa velocidade, $V_{c_{60}}$, em ft/min. Podemos fazer uma observação que explica a diferença de valores de unidade em relação aos trabalhos de (Henkin, 1962) e (Oliveira, 2014): ambos compartilharam materiais em comum e numa faixa de temperatura próxima, porém, neste trabalho realizado, a temperatura abriu espaço para mudanças em alguns valores, principalmente de 400 °C para 500°, faixa na qual o material sofre as primeiras mudanças na sua estrutura mecânica.

Para que se possa expressar o resultado em m/min como desejado nesse trabalho é imprescindível que se multiplique o valor encontrado na equação (20) pelo fator de conversão 0,3048 encontrado no Quadro 18.

$$V_{c_{60}} = \frac{0,748148 \cdot 0,3048m}{min.}$$

$$V_{c_{60}} = \frac{0,22803m}{min.} \quad (21)$$

Logo, todos os materiais ensaiados na equação geral de usinabilidade foram multiplicados por 0,22803 para ter sua unidade em m/min.

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

Após coletar todos os dados, propriedades físicas e mecânicas dos materiais, além de estabelecer as temperaturas necessárias (de 212° F a 932°F) para atender os pré-requisitos do ensaio estabelecido, utilizou-se um software de processamento de dados para montar quadros com os resultados para cada material.

Os valores são de acordo com o teste teórico de (HENKIN,1962), ou seja, indicam a velocidade de usinabilidade do material. Onde o primeiro material é o FC 150, o segundo é o FC 200 e o terceiro e último é o FC 250. Realizou-se mediante o proposto no tema desta pesquisa: avaliação a partir da variação de temperatura. Então, a primeira coluna evidencia os valores das temperaturas as quais os materiais foram trabalhados, seguido dos valores obtidos nos testes sem uma correlação com unidades, em seguida, obtêm-se os valores nas unidades ft/min e m/min, que foram convertidos, utilizando as equações (20) e (21).

Pode-se observar os resultados nos Quadros 19, 20 e 21.

Quadro 19– Resultado do ensaio de usinabilidade com base no teste de propriedades físicas do ferro fundido cinzento 150

FC 150	RESULTADO DO TESTE	FT/MIN	M/MIN
212 °F	31,1837	23,3300	7,1108
392 °F	31,2390	23,3713	7,1234
572 °F	29,3757	21,9751	6,6978
752 °F	28,8636	21,5942	6,5817
932 °F	32,8194	24,5537	7,4838

Fonte: Dados da Pesquisa.

Ao analisar-se a equação geral de usinabilidade proposta por (HENKIN, 1962) pode-se estabelecer matematicamente que a condutividade térmica é diretamente proporcional a velocidade de usinabilidade, ou seja, quanto maior a condutividade, maior será a velocidade de usinabilidade. O contrário ocorre com a dureza, que quanto maior for, menor será a velocidade de usinabilidade. E ambas variáveis irão sofrer diferentes mudanças com o aumento da temperatura.

Quadro 20 - Resultado do ensaio de usinabilidade com base no teste de propriedades físicas do ferro fundido cinzento 200

FC 200	RESULTADO DO TESTE	FT/MIN	M/MIN
212 °F	26,4220	19,7675	6,0250
392 °F	26,6127	19,9102	6,0684
572 °F	24,9780	18,6872	5,6957
752 °F	24,6573	18,4473	5,6226
932 °F	27,0941	20,2703	6,1782

Fonte: Dados da Pesquisa.

Quadro 21 - Resultado do ensaio de usinabilidade com base no teste de propriedades físicas do ferro fundido cinzento 250

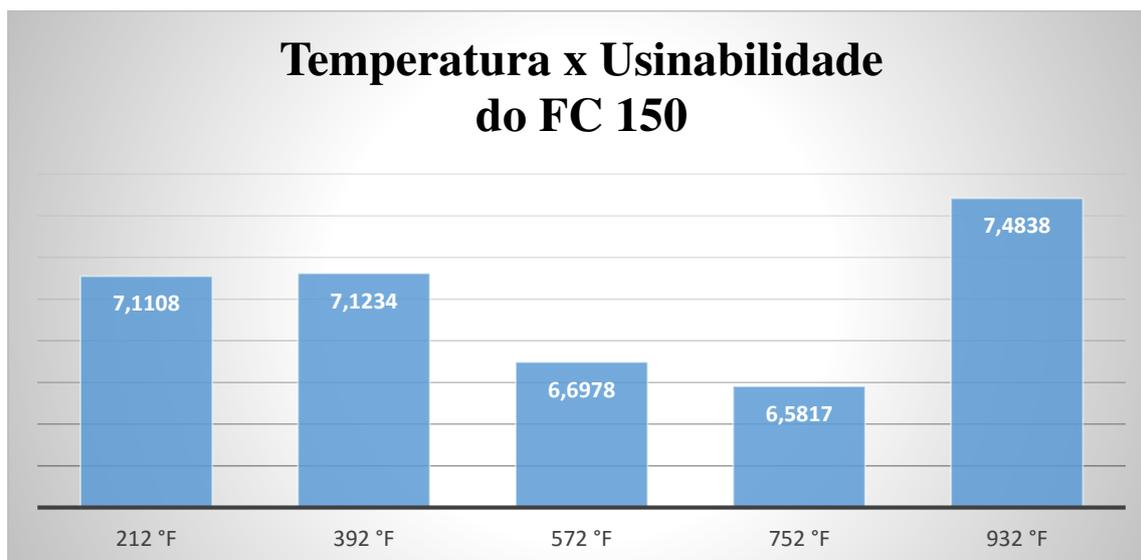
FC 250	RESULTADO DO TESTE	FT/MIN	M/MIN
212 °F	21,8378	16,3379	4,9796
392 °F	22,0055	16,4633	5,0179
572 °F	20,7801	15,5465	4,7384
752 °F	20,4234	15,2797	4,6571
932 °F	21,6113	16,1684	4,9280

Fonte: Dados da Pesquisa.

É possível ver uma certa variação nos resultados de velocidade, porém ambos os três materiais se comportaram de maneira parecida. Pode-se também comparar rapidamente os materiais, e ver que o FC 150 é o material com maior velocidade de usinabilidade em cada temperatura, seguido do FC 200.

Para melhor compreensão dos resultados, plotamos gráficos comparando a velocidade de usinabilidade do material obtida com suas respectivas temperaturas trabalhadas, nos gráficos 1, 2 e 3 apresenta-se os valores para cada material.

Gráfico 1 – Relação entre temperatura x usinabilidade do ferro fundido cinzento 150



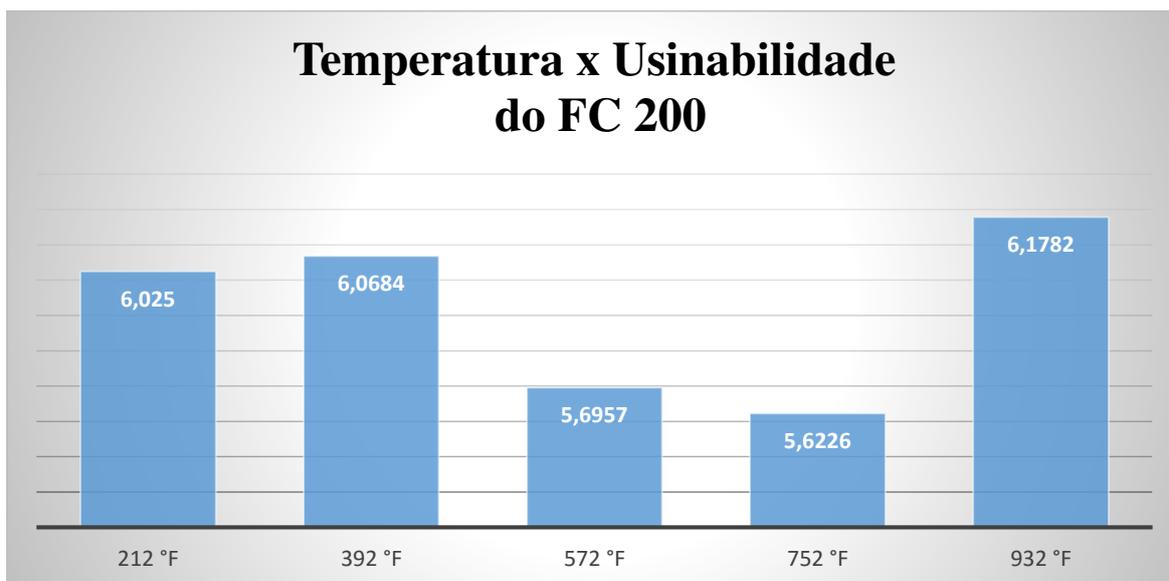
Fonte: Dados da Pesquisa.

Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade em m/min e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

No gráfico 1 é perceptível a oscilação na velocidade de usinabilidade, isso se deve principalmente, as mudanças na dureza do material, que apesar de pequenas (nas temperaturas iniciais) foram significativas. A condutividade não teve um destaque no teste, visto que ele permanece em queda constante.

O FC 100 não foi estudado nesse trabalho, mas levando em consideração suas propriedades mecânicas, podemos deduzir que este seria o material com maior velocidade de usinabilidade dentre todos aqui presente, isso devido a sua matriz ferrítica, que aumenta sua condutividade térmica. Além de ser o material com menor dureza, visto que seus níveis de carbono são os mais elevados.

Gráfico 2 – Relação entre temperatura x usinabilidade do ferro fundido cinzento 200

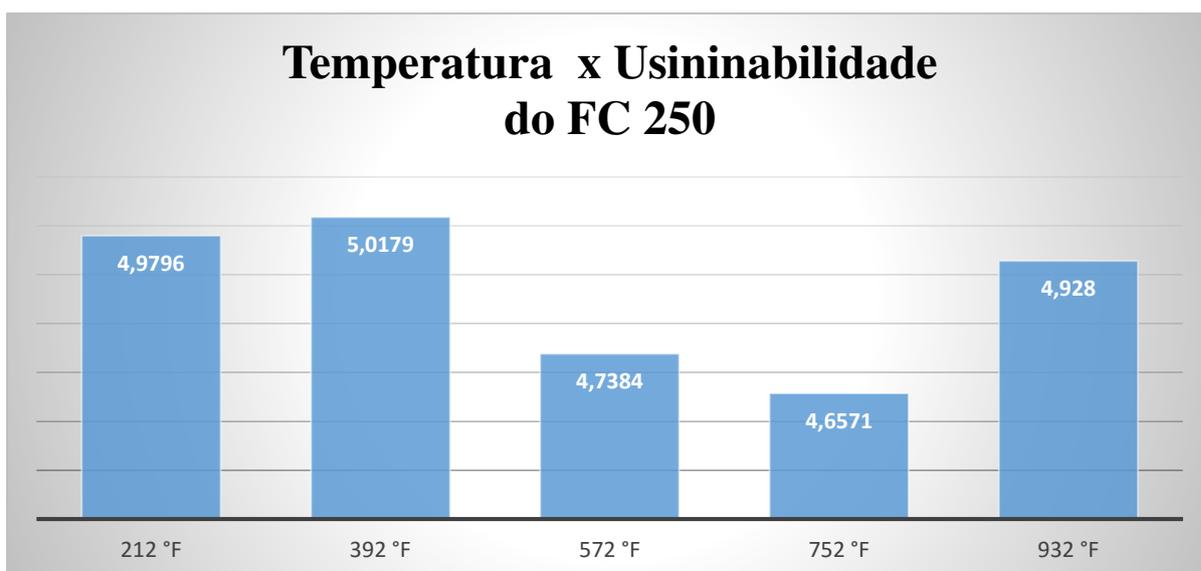


Fonte: Dados da Pesquisa.

Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

Analisando o gráfico 2, percebe-se uma grande semelhança com o gráfico 1, pode-se notar que a 932 °F ambos apresentam o melhor desempenho na velocidade de usinabilidade.

Gráfico 3 – Relação entre temperatura x usinabilidade do ferro fundido cinzento 250



Fonte: Dados da Pesquisa.

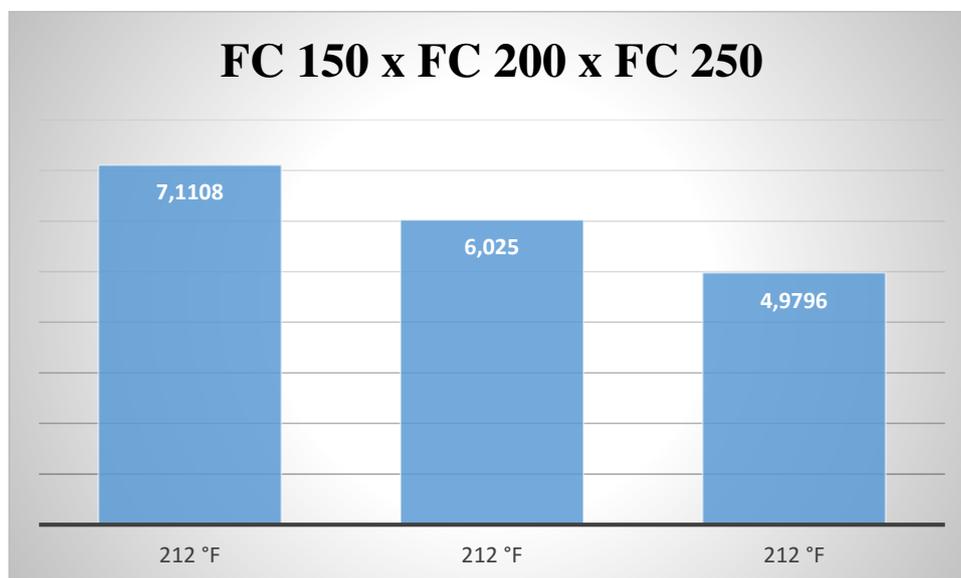
Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

Nota-se um comportamento irregular no FC 250, na temperatura 392 °F, o material apresenta maior velocidade de usinabilidade, sendo a dureza menor em comparação a 212 °F. Podemos justificar tal reação por meio da condutividade térmica, que não teve a queda proporcional a dureza, como nos outros materiais. Fato explicado pela quantidade de carbono, que é menor no FC 250, fazendo com que a proporção de queda da condutividade térmica seja menor.

O FC 250 é o que mais se diferencia dos demais, começando pela sua matriz metálica (perlítica), ao contrário do FC 150 e FC 200 (ambas ferrítico-perlítica). Constata-se que a 932 °F ele não possui sua melhor velocidade de usinabilidade, sendo essa adquirida em 392 °F. Percebe-se, também, que é o material com menor velocidade de usinabilidade, ou seja, mais difícil de ser usinado. Foram montados gráficos comparando os três materiais nas mesmas faixas de temperatura.

Os gráficos 4, 5, 6, 7 e 8 são claros quanto as diferenças.

Gráfico 4 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregados a 212 °F

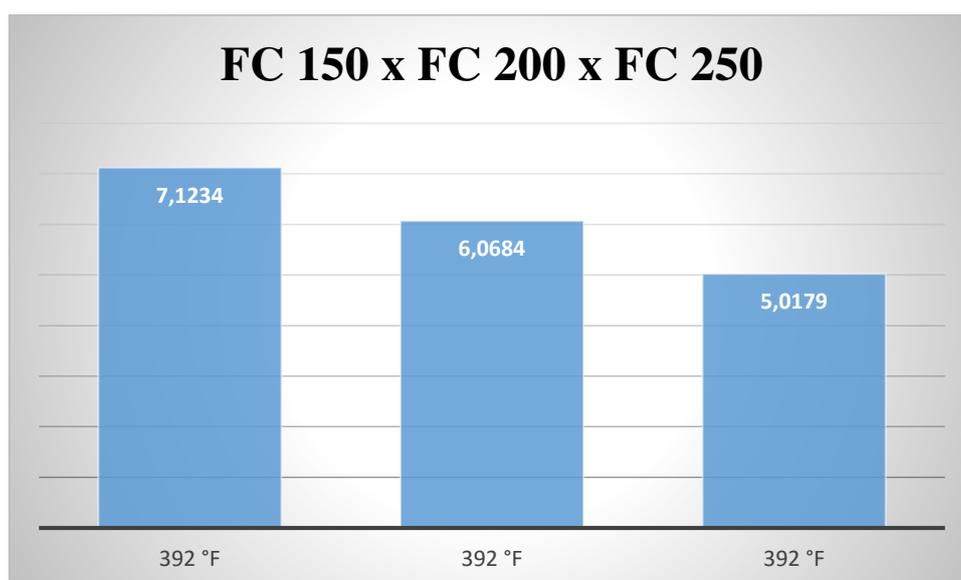


Fonte: Dados da Pesquisa.

Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

Pode-se perceber que no gráfico 4, a superioridade do FC 150 sobre ambos os outros materiais. As normas sobre o ferro fundido cinzento, deixam claras que a usinabilidade do FC 150 é superior as do FC 200 e FC 250. Analisando o gráfico podemos garantir que a velocidade de usinabilidade demonstra qual material tem maior usinabilidade.

Gráfico 5 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 392 °F

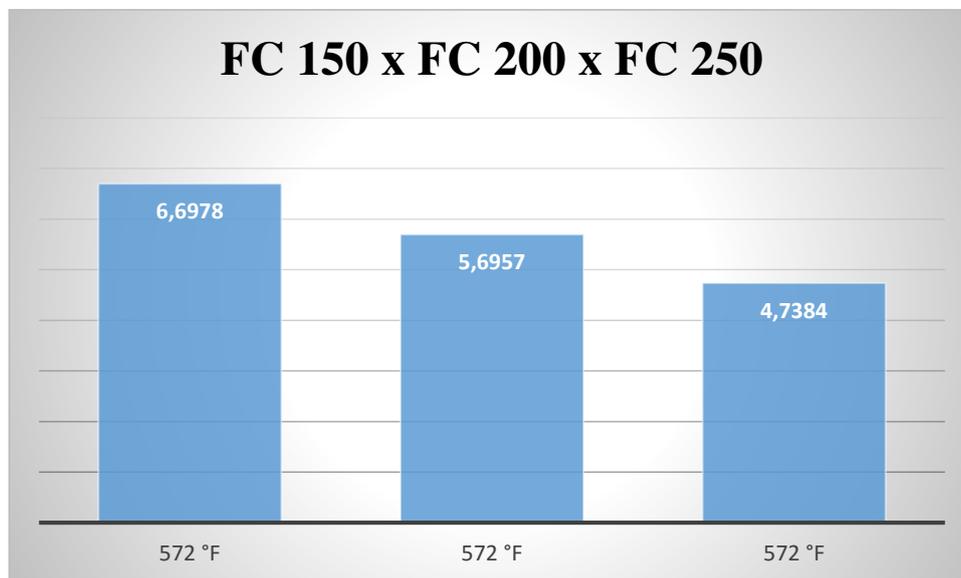


Fonte: Dados da Pesquisa.

Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

Não é viável usar como método comparativo principal a redução de área, pois esta também influencia no material. Porém os relativos valores não foram suficientes para serem decisivos no ensaio. Admitiram-se os valores com base no teste de Henkin, onde o mesmo já havia estipulado uma faixa na qual os ferros fundidos cinzentos se encontravam. Foram estipuladas as variações com base no alongamento do material, no qual iria aumentar de acordo com o aumento da temperatura.

Gráfico 6 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 752 °F

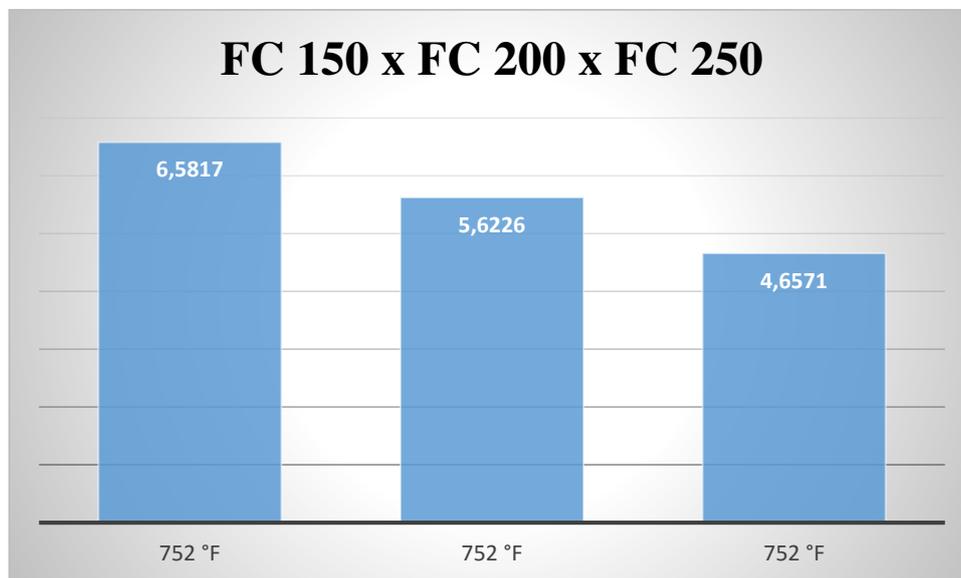


Fonte: Dados da Pesquisa

Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

Ao longo das análises é notório que a diferença permanece a mesma, fato já esperado, visto que as variáveis impostas para dureza do material foram estimadas igualmente entre os materiais, tendo em vista que não existe nenhum estudo que comprove dados específicos da queda da dureza com o aumento da temperatura. As estimativas dos valores foram feitas levando em consideração a correlação existem entre resistência a tração e dureza Brinell. Ambas são diretamente proporcionais até dureza de 380 HB, o que nesse trabalho é bastante inferior (212 °F), a cima desse valor há uma grande diferença entre ambos.

Gráfico 7 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 752 °F

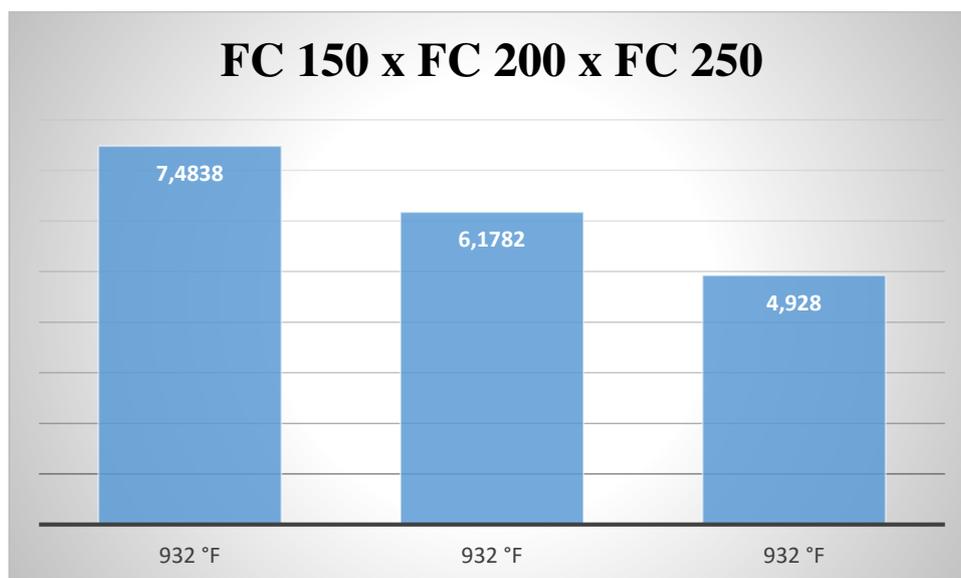


Fonte: Dados da Pesquisa.

Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

Outro efeito que influencia principalmente no FC 250 é a quantidade de carbono no material. Dentre os materiais analisado, o FC 250 é o material com menor quantidade de carbono em sua estrutura. Os valores de carbono equivalente são responsáveis pelo tamanho e pela quantidade de grafita. Aumentando o teor de carbono tem uma redução no limite de resistência do material.

Gráfico 8 – Comparação das velocidades de usinabilidade dos materiais empregos a 932 °F



Fonte: Dados da Pesquisa.

Os valores acima das colunas representam as velocidades de usinabilidade e embaixo aparece a temperatura na qual as velocidades foram obtidas.

Como os valores de dureza foram admitidos da mesma forma para ambos materiais, o fator de destaque ficou pela condutividade térmica dos materiais em questão. Os estudos comprovam que a condutividade térmica é afetada pela ferrita, que em maiores quantidades melhoram a condutividade térmica, porém não é apenas isso, quando as temperaturas chegam a valores muito altos, a grafita tende a crescer dentro das matrizes perlíticas (FC 250). A grafita por sinal, devido a sua forma, facilita o escoamento do calor, porém quando ela aumenta, os ramos ficam irregulares e dificultam assim a passagem do calor.

O FC 300 não foi estudo nesse trabalho, porém ele obteria resultado parecidos com o do FC 250, pois ambos compartilham mesma matriz perlíticas e valores de carbono na mesma faixa.

O presente teste de Henkin poderia ser um teste absoluto, se os dados de propriedades fossem mais precisos. O que implica dizer que ele serve apenas como um método rápido para a escolha de um material que atenda as necessidades. Porém seu rápido emprego a custo praticamente zero, faz-se útil para engenheiros, principalmente, projetista.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho focou-se em fazer um estudo sobre a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos, com base no teste de propriedades físicas desenvolvido por (HENKIN, 1962), que envolve algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais envolvidos.

Como o teste foi realizado utilizando variadas temperaturas (de 212 °F a 932 °F). Pôde-se observar as mudanças nas propriedades dos três materiais utilizados, assim foi realizada análise dos fatores que aumentam e diminuem a velocidade de usinabilidade do FC 150, FC 200 e FC 250.

Os materiais apresentaram similares reações, porém o que teve maior índice de usinabilidade foi o FC 150, o que já era esperado, visto que a norma da ABNT sobre as propriedades do ferro fundido cinzento evidenciava tal resultado. O FC 200 foi o segundo material com maior índice, devida a sua semelhança estrutural ao FC 150, onde ambos são constituídos por matrizes metálicas ferrítica-perlíticas.

Observou-se também que a dureza possui maior influência no teste, devido a suas oscilações durante a variação de temperatura. Em 932 °F observou-se que as durezas de todos os materiais diminuíram drasticamente, o que levou ao aumento no índice de usinabilidade em todos eles.

O FC 250 foi o material com menor índice de usinabilidade, devido a sua estrutura perlíticas, que eleva sua dureza. Além de possui a pior condutividade térmica, consequência da pouca quantidade de ferrita. Além também da baixa variação na queda de sua condutividade térmica, fator esse ligado a quantidade de carbono (menor nesse material), entretanto não há estudos ainda que comprovem tal correlação.

Com isso nota-se a necessidade de pesquisar e submeter um material tão útil, a diversos ensaios para obter dados mais precisos. Apesar desses problemas, podemos destacar a validade do teste para facilitar o entendimento de quem busca conhecimento sobre o assunto e também para demonstrar sem precisar de testes práticos, a usinabilidade do material, viabilizando redução de custo e de tempo, que faz toda a diferença.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

É importante ressaltar algumas sugestões para trabalhos futuro, afim de melhorar e ampliar os conhecimentos de todos aqueles envolvidos na usinabilidade de materiais.

- ✓ Construir banco de dados com testes de durezas envolvendo os ferros fundidos cinzentos, em diferentes temperaturas;
- ✓ Realizar estudos sobre a resistência termomecânica dos ferros fundidos cinzentos em geral ;
- ✓ Fazer ensaios de usinabilidade práticos envolvendo os mesmos materiais, e fazer um comparativo com o teórico, para assim poder gerar confiança em outros ensaios futuros sem custos;
- ✓ Estudar a influência da temperatura em elementos de liga do ferro fundido cinzento, assim com novas propriedades físicas e mecânicas;
- ✓ Fazer teste com variação de temperatura em outros materiais, tantos nos ferrosos quanto os não-ferrosos.

REFERÊNCIAS

AMORIM, H. J. **Apostila de processos de fabricação por usinagem**. Porto Alegre 2003 (Apostila).

ANDRADE, CÁSSIO LUIZ FRANCISCO DE. "**Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAIN.**" (2005), Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

ANGUS, H.T; LAMB, A.D; SCHOLE, J.P. **Conditions leading to Failure of cast iron**

ASM Handbook Committee. **Metals Handbook**. v1. Properties and Selection of Metals. 9th. Ed. Metals Park Ohio: American Society for Metals, 1989, p. 648-665.

ASM. **The Machinability of Engineering Materials**. Influence of Metallurgy on the Machinability of Engineering Materials 1st. Ed. Ohio: American Society for Metals, 1982.

ASTAKHOV, V.P., SHVETS, S.V., **A system concept in metal cutting**, *Journal of Materials Processing Technology*, 79 (1998), 189–199.

BAGETTI, J. H. **Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento**. 2009. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BAPTISTA, André Luís de Brito. **Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 55, n. 2, p. 103-109, 2002.

BONFÁ, M. M., **TORNEAMENTO DO AÇO ENDURECIDO AISI D6 UTILIZANDO MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE**. 2013, 122 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

BONNIER, Hoppenstedt. **Güsseisen mit Lamellengraphit**. Revista GussProdukte, Jahreshandbuch der Giessenrei, Zulieferer, Ausstatter. 2001.
brakes. Metals & Materials, p.18-28, 1967.

CAVALCANTE, F. J. N. **Análise de Utilização de Broca Escalonada de Canal Reto no Processo de Furação em uma Liga de Alumínio Utilizada na Indústria Automotiva**. 2010, 117 p. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
CHIAVERINI, 1986. "**Tecnologia Mecânica**" Vol. 2. Editora McGraw-Hill LTDA, São Paulo.

CHIAVERINI, V. - **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, 6ª edição, São Paulo, 1988.

- COELHO, R.T.; BRAGHINI, A.JR.; SUDO, T.T. **O desgaste de ferramentas na usinagem de FoFo cinzento a alta velocidade**. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC – USP), São Carlos, SP, 2001.
- COHEN, P. H.; VOGT, R. C. e MARWANGA, R. O., 2000, **“Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons”**. In: AFS Casting Congress, Pittsburg. American Foundrymen’s Society apud MOCELLIN, 2002.
- COSTA, E. S. 2004, **“Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte-MQF”**. Tese Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia-MG, 2004, 311p.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 4º edição, janeiro de 2003, ARTLIBER EDITORA LTDA.
- DINIZ, A.E.; FERRER, J.A.G. **A comparison between silicon nitride based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces**. Faculdade de Engenharia Mecânica de Campinas, Universidade Estadual de Campinas. 2007
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MICARONI, Ricardo. **Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel**. International journal of machine tools and manufacture, v. 47, n. 2, p. 247-254, 2007.
- DINIZ, ANSELMO, 1999. **“Tecnologia da usinagem dos materiais”**, MM editora, São Paulo.
- DORE, C.; BOEHS. L.; GUESSER. W.L. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular com diferentes microestruturas**. 8º Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecânica – CIBIM – 8. 2007.
- DRONYUK, N.; EKSANOV, V. **Low Temperature-Resistant Ferrite High-Strength Cast Iron With Spheroidal Graphite**. Vestoik Mash Nostroenya, Allerton Press, v. 69, n. 6, p. 36-39, 1989.
- EBBRELL, S. et al. **The effects of cutting fluid application methods on the grinding process**. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, School of Engineering, Liverpool John Moores University, Liverpool, junho 1999. ed. Butterworth Heinemann, Boston, p. 504-570; 872, 2001.
- EN-European Standard. **European Committee for Standardization**, DIN EN 1561,
- EVANGELISTA LUIZ, N. **Usinabilidade do Aço de Corte-Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14 com Diferentes Níveis de Elementos Químicos Residuais (Cromo, Níquel e Cobre)**. 2007, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- EYRE, T.S.; WILLIAMS, P. **Effect of phosphorus on the friction and wear characteristics of grey cast iron**. Wear, v.24, p.337-349, 1973.

- EZUGWU, E. O.; BONNEY, J. **Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools.** Journal of Materials Processing Technology, v. 153, p. 1045-1050, 2004.
- FERRARESI, D., 1970. **“Fundamentos da usinagem dos metais”**, Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- FERREIRA, MARCELO. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com Tin no fresamento do aço ABNT4140 a seco e com fluido sintético 8% em água.** 2011, 92f, Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, **FOUNDRY INDUSTRY - CAST IRON WITH LAMELLAR GRAPHITE**, English version, 1997.
- GASPARIN, HELOÍZA DÖERING. **PROPRIEDADES MECÂNICAS A ALTAS TEMPERATURAS DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS APLICADOS A CABEÇOTES DE MOTOR A DIESEL.** 2015, 104 p. Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville.
- GEORGE SCHNEIDER, 2009. **Cutting Tool Applications.** CMfgE.
- GEORGIU, G., **“CGI high speed machine tool solutions”**. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5, 2002. Darmstadt. Anais...Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools.
- GILBERT, G. N. J. **The growth and scaling characteristics of cast irons in air steam.** BCIRA Journal of Research and Development, v. 7, pgs. 478 – 566, 1959.
- GONÇALVES, H. C., GUESSER, W. L. **Aplicação de Ferros Fundidos Cinzentos em Elevadas Temperaturas.** Joinville, 2005. TCC (Pós-Graduação em Engenharia de Fundição) – SOCIESC, Instituto Superior de Tecnologia.
- GRANDO, Graziela Cestari da Silva. **Estudo da influência do bismuto sobre a usinabilidade de aços DIN-20MnCr5.** 2012. 86 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre.
- GUESSER, W. L.; MASIERO, I.; MELLERAS, E.; CABEZAS, C.S. **Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads.** Revista Matéria, v. 10, n. 2, p. 265-272, Jun. 2005.
- GUNDLACH, R. B. **The effects of alloying elements on the elevated temperature properties of gray irons.** AFS Transactions, vol 91, p. 389-422, 1983.
- HENKIN A. e DATSKO J. **Machinability [Entrevista].** - [s.l.]; Journal of Engineering for Industry, November de 1963

- I.F.S.I. **Gray and ductile Iron Castings Handbook**. Cleveland: Ed. Charles F. Walton, 1971, pág. 51/519.
- JANITZKI E. J. **Machinability of Plain Carbon Alloy and Austenitic Steels and its Relation to Yield Stress Ratios when Tensile Strengths**. - [s.l.]; Trans. A.S.M.E., 1944.
- KAMINSKI, J.; ALVELID, B. **Temperature reduction in the cutting zone in water-jet assisted turning**. Journal of Materials Processing Technology, v. 106, n. 1, p. 68-73, 2000.
- KÖNIG, W., KLOCKE, F., 1997, **Fertigungsverfahren - 3: Abtragen und Generieren**, Springer, Berlin.
- LENZ, E., MAYER, J.E., LEE, D.G. **Investigation in drilling**. -Annals of the CIRP, 1978, 27, p.49-53.
- LI, B. **A Review of Tool Wear Estimation Using Theoretical Analysis and Numerical Simulation Technologies**. Int. J. Refract. Hard Met. 2012, 35, 143–151
- LOPES, J. T. de B. **Materiais de Construção Mecânica**. 2008
- MACHADO, A. R.: SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais – LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem –UFU – Uberlândia**, 8a versão, 2004.
- MACHADO, ÁLISSON, 2009. **“Teoria da usinagem dos materiais” 1º edição**. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo.
- MARWANGA, R. O., VOGT, R. C., COHEN, P. H., 2000, **“Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons”**. AFS Transactions, p. 651-661.
- MEDEIROS, Mauro Araújo. **Influência dos carbonitreto de titânio na usinabilidade do aço VP100 utilizado em moldes de injeção de plástico**. 2011. 126 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Minas Gerais.
- MILLS, B. REDFORD, A. H., 1983. **“Machinability of Engineering Materials”**, Applied Science Publishers, London.
- MOCELIN, ET AL. Estudo da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação. In: SULMAT. **Anais...2002**.
- MUÑOZ DIAS, LUIZ ROBERTO, **A Influência do teor relativo perlita/ferrita na usinabilidade do ferro fundido cinzento**. 2011, 130 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas.
- P. A. DEARNLEY AND E. M. TRENT, **"Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools,"** Metals Technology 9 (1982) 60-7

OLIVEIRA, Hércules Araújo. **Estudo da usinabilidade dos materiais metálicos: uma avaliação com base no teste de propriedades físicas**. 2014, 105 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual do Maranhão. São Luís.

PALMER, K. B. **Desing with cast irons at high temperatures – 1: growth and scaling**. BCIRA Journal, Report 1248, p. 589 – 609, 1976.

PALMER, K. B. **Desing with cast irons at high temperatures – 2: tensile, creep and rupture properties**. BCIRA Journal, v. 25, Report 1251, p. 31 – 50, 1977.

PEREIRA, A. A. **Análise do desgaste da ferramenta à base de β -Si₃N₄ na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando técnicas avançadas e de alta resolução**. 2010, 226 p. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis.

PEREIRA, Fernando de Souza. **Torneamento em alta velocidade do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramenta de nitreto de silício**. 2012, 147 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal De Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica. Florianópolis.

PIESKE, A.; CHAVES FILHO, L. M.; REIMER, J. F. **Ferros Fundidos de Alta Qualidade**. Sociedade Educacional Tupy, Joinville, 1974.

PIESKE, A; CHAVES FILHO, L. M. & REIMER, J. F. – **Ferros Fundidos de Alta Qualidade**. Publicação da Sociedade Educacional Tupy, 1974.

PIRES, AMANDIO DA CRUZ. **Desenvolvimento de ligas de ferro fundido cinzento para a fabricação de cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de papel**. Itatiba, SP, 2006. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade São Francisco, 2006.

SÁ, VINÍCIUS MAIA DE. **AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA COM TIN NO FRESAMENTO DO AÇO ABNT 4140 TEMPERADO E REVENIDO, UTILIZANDO DUAS FRESAS DE DIÂMETROS DIFERENTES**. 2010, 81 f. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.

SANTOS, S. C., SALES, W. F. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. Apostila, PUC Minas, Belo Horizonte, MG. 2003.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. ArtLiber, São Paulo, 250p, 2007.

SHAW, M. C., 1986, “**Metal Cutting Principles**”. 2.ed. New York: Oxford University Press. 594p.

SILVA, J. S. R. **COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE CERÂMICA NO FACEAMENTO DE FERRO FUNDIDO NODULAR NO**

ESTADO ENDURECIDO. São João Del Rei, 2012. Universidade Federal de São João Del-Rei.

SMITH, G. T. **Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology.** IFS Publications, 1989.

SRIVASTAVA, A. K., FINN, M. E. **Machinability of Cast Iron.** Techsolve – The Manufacturing Solutions Center, Cincinnati, Ohio, 2003.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering tribology: Tribologia.** 2a

STEFANESCU, D., “**Physical Properties of Cast Iron**”, In: GOODRICH, G.M., Iron Castings Engineering Handbook, AFS, 2003

SUAREZ, Mauro Paipa. **Fresamento De Canais Da Liga De Alumínio Aeronáutico 7075-T7.** 2008, 111 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SUAREZ, Mauro Paipa. **Influência da texturização a laser em ferramentas de metal duro revestidas na usinagem do aço ABNT 1050.** 2012. 168 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TAKEUCHI, E. **The mechanisms of wear of cast iron in dry sliding.** Wear, Tokyo, v.2, 1968.

TEDESCO, M.E. **Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul, p.69, 2007.

TRENT, M. C.; 1984, “Metal Cutting Principles”, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, USA,

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte I.** Tradução do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen” de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.

XAVIER, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN.** 2003, 146 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis.

XAVIER, F. A. **Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas no torneamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento.** 2009, 267 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis.

XAVIER, F. A.; SCHRAMM, B. **Materiais cerâmicos de corte – Revista máquinas e metais,** nº 493, fevereiro de 2007.