



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

RAFAEL SANTANA REIS

**Estudo da Usinabilidade do Aço-Carbono
SAE AISI Ressulfurados com Base no Teste
de Composição Química**

SÃO LUÍS/MA
2017

RAFAEL SANTANA REIS

Estudo da Usinabilidade do Aço-Carbono SAE AISI Ressulfurados com Base no Teste de Composição Química

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.Msc.Jean Robert Pereira Rodrigues

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO
FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO
ALUNO RAFAEL SANTANA REIS, E ORIENTADO
PELO PROF. DR. JEAN ROBERT PEREIRA
RODRIGUES

ASSINATURA DO ORIENTADOR



SÃO LUÍS/MA

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL – UEMA

Reis, Rafael Santana.

Estudo da usinabilidade do aço-carbono SAE AISI resulfurados com base no teste de composição química / Rafael Santana Reis. – São Luís, 2017.

73 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.

1. Usinabilidade. 2. Teste de composição química. 3. Aços carbonos resulfurados. I. Título.

CDU 621.7.011

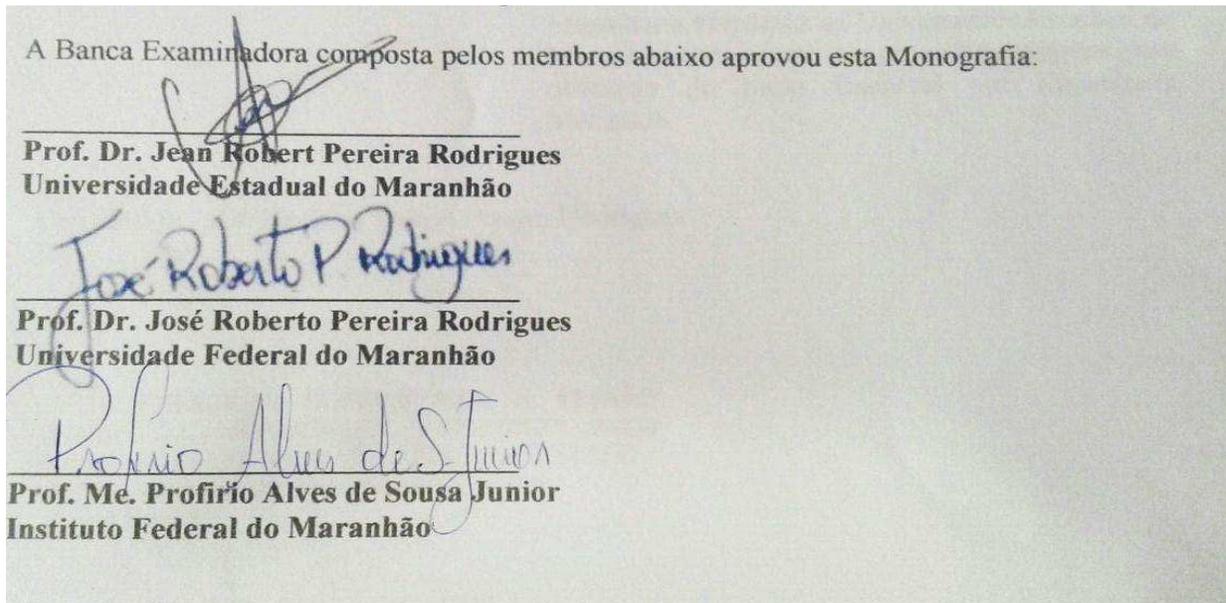
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Estudo da Usinabilidade do Aço-Carbono SAE
AISI Ressulfurados com Base no Teste de
Composição Química**

Autor: Rafael Santana Reis

Orientador: Jean Robert Pereira Rodrigues



A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 07 de Dezembro de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que passaram por minha vida contribuindo para o meu crescimento e a aqueles que hoje permanecem ao meu lado e me impulsionam a romper com as minhas limitações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus que antes da fundação do mundo tinha em seu coração o plano de me trazer em vida para cumprir o propósito da sua vontade, que me faz ir além de minhas próprias expectativas e me faz viver com muito mais do que mereço. Com tudo que sou e tenho a Ele seja a glória e honra para sempre.

Ao meu orientador, Prof.Dr.Jean Robert por me aceitar como aluno e me orientar nesse desafio da graduação com excelência e sabedoria.

Meus pais, incansáveis guerreiros ao meu lado, incentivadores e razão pelo qual tenho me dedicado a crescer.

Aos meus tios, tias, avô e minha avó (Rúbia), que sempre fez coisas por mim que me fizeram ser o que hoje sou.

Agradeço aos professores do Centro de Ciências e Tecnologia da UEMA por apresentarem o grandioso campo da engenharia mecânica.

Agradeço aos meus amigos Rodrigues Silva, na pessoa de Mirian, Isaac, Miquéias, Késinha, Jéssica e os demais que desde pequeno me receberam em sua casa e através de constantes discursões me ensinaram coisas que perduram até hoje. São como minha família.

A todos os funcionários da UEMA que nessa passagem de tempo me ensinaram valores que permanecerão comigo para sempre.

Sou grato a todos do Agir UEMA por sempre estarem juntos caminhando lado a lado.

Agradeço ao meu amigo Luiz Fernando que foi um parceiro durante esse tempo, me ajudando e abrindo minha visão diante de muitas dificuldades.

Agradeço a Isaac Pessoa, Lucas Soares, Denise silva (prima), Professora Terezinha Amaral (tia), Sarah Dalylla (prima). Pessoas singulares para que esse momento se tornasse real.

A todos aqueles que passaram por essa jornada incrível da UEMA e contribuíram para que isso tudo acontecesse.

“O amor nunca perece; mas as profecias desaparecerão, as línguas cessarão, o conhecimento passará”.

(1 Coríntios 13:18)

RESUMO

A usinabilidade é definida por diversos autores como sendo uma grandeza de facilidade ou dificuldade que um material possui para ser usinada. A importância de se conhecer cada vez mais a relação dos materiais com essa grandeza é relevante pelo fato de que, na produção dos produtos, os custos que envolvem a usinagem podem chegar a uma marca superior a 50%. O objetivo deste trabalho é de se conhecer a usinabilidade dos aços-carbono SAE AISI resulfurados com base no teste de composição química, desenvolvido por Czaplicki, conhecendo as composições químicas de cada material e os teores que os compõe, demonstrando suas influências nos índices de usinabilidade de cada material escolhido para este estudo. Com a definição dos materiais, conhecendo as faixas de adições e os teores percentuais presentes em cada aço, pode se montar um banco de dados para aplicação do teste de composição. Para aplicação dos dados na equação do teste de composição química foram utilizados softwares de processamentos de dados para obter resultados com maior precisão e ferramentas de planilha para geração de gráficos organizados e precisos, sendo possível perceber maiores adições de carbono e manganês, este em quantidade não proporcional aos teores de enxofre para melhor combinação do sulfeto de manganês tornam se prejudiciais aos índices de usinabilidade, sendo a inclusão controlada de fósforo benéfica a usinabilidade dos aços-carbonos resulfurados.

Palavras-chaves: Usinabilidade, Teste de Composição Química, Aços carbonos resulfurados.

ABSTRACT

The machinability is defined by several authors as being a greatness of ease or difficulty that a material possesses to be machined. The importance of knowing more about materials relationship with this greatness is relevant to the fact that in products production costs involving the machining can reach a superior mark to 50%. The aim of this work is to know the machinability of SAIS AISI carbon steels based on the chemical composition test developed by Czaplicki, knowing the chemical compositions of each material and the contents that compose them, demonstrating their influence on the indexes of machinability of each material chosen for this study. With the materials definition, knowing the additions ranges and the percentage contents present in each steel, a database can be assembled for application of the composition test. For application of the data in the test of chemical composition equation were used softwares, as instance, Matlab to obtain results with greater precision, and Excel for generation of organized and precise graphs, being possible to perceive larger additions of carbon and manganese, this in quantity not proportional to the contents of sulfur for a better combination of manganese sulfide become detrimental to machinability indices, with the controlled inclusion of beneficial phosphorus to the desulphurized carbon steels machinability.

Keywords: Machinability, Chemical Composition Test, Desulphurized Carbon Steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Diagrama da cunha cortante.....	25
Figura 3.2	Classificação detalhada da forma dos cavacos.....	27
Figura 3.3	Esquema das zonas de cisalhamento primária e secundária.....	28
Figura 3.4	Área de contato numa superfície com picos de irregularidades.....	29
Figura 3.5	Descrição das partes de uma ferramenta de corte.....	33
Figura 3.6	Representação do sistema de plano de Referência de uma ferramenta de corte.....	34
Figura 3.7	Ângulos vistos no plano de medida ortogonal.....	35
Figura 3.8	Lascamento da aresta de corte.	38
Figura 3.9	Trincas na aresta de corte.....	39
Figura 3.10	Desgaste de flanco na aresta de corte.....	39
Figura 3.11	Desgaste de flanco na aresta de corte (COLORIDO).....	40
Figura 3.12	Quebra da ferramenta.....	40
Figura 3.13	Desgaste de cratera na ferramenta de corte.....	41
Figura 3.14	Desgaste de cratera na ferramenta de corte (colorida).....	41
Figura 3.15	Diagrama da relação de desgaste em função da temperatura.....	42
Figura 3.16	Representação dos componentes de força de usinagem baseados na operação de torneamento.....	44
Figura 3.17	Regiões de calor que são geradas durante o processo de usinagem.....	48
Figura 3.18	Regiões da ação do fluido de corte na região cavaco-peça-ferramenta.....	53
Figura 3.19	Regiões de aplicação do fluido de corte.....	54
Figura 3.20	Aplicação do fluido de corte sob alta pressão.....	55
Figura 3.21	Dispositivos para mistura do fluido MQL.....	56
Figura 4.1	Relação da usinabilidade com os aços-carbonos resulfurados.....	66
Figura 4.2	Comparação entre usinabilidade e teor de carbono dos aços-carbonos resulfurados.....	67
Figura 4.3	Comparação entre usinabilidade e teor de fósforo dos aços-carbonos resulfurados.....	68
Figura 4.4	Comparação entre usinabilidade e teor de manganês dos aços-carbonos resulfurados.....	68

Figura 4.6 Comparação entre usinabilidade e teor de enxofre dos aços-carbonos resulfurados.....

70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Faixas de composição de aço-carbono Ressulfurados e Refosforados.....	05
Tabela 3.2	Classificação detalhada dos cavacos.....	09
Tabela 4.1	Faixa dos teores de composição dos aços-carbonos Ressulfurados.....	40
Tabela 4.2	Teores de composição usados no calculo de usinabilidade.....	41

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E LEGENDAS

Fu – Força de usinagem (N)

Fc – Força de corte (N)

Ff – Força de avanço (N)

Fp – Força passiva (N)

Vc – Velocidade de corte (mm/min)

FN – Força de compressão (N)

Fs - Projeção da força principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção tangencial

FNZ - Projeção principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção normal

Tc – Tempo de corte

Vb – Vibração mecânica

rn - Raio de ponta da ferramenta (grau)

ap - profundidade de corte (mm)

β - ângulo de cunha da ferramenta (grau)

α, α_0 - ângulo de folga da ferramenta (grau)

χ_r – ângulo de posição da ferramenta (grau)

ϵ_r – ângulo de ponta da ferramenta (grau)

χ_r – ângulo de posição da ferramenta (grau)

t - tempo (s)

γ_0 - ângulo de saída negativo (grau)

λ_s - ângulo de inclinação negativo (grau)

KT - Profundidade de cratera

Tc = Temperatura do cavaco (°C)

T_{ic} - Temperatura de usinagem medida na interface de corte (°C)

APC – Aresta Postiça de Corte

AR – Área real

AP – Área aparente

Ni - Níquel

Ti - Titânio

Al - Alumínio

Cu - Cobre

Mn – Manganês

FeS – Sulfeto de ferroso

Si - Silício

P - fósforo

S – enxofre

Fe – Ferro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SAE - Society of Automotive Engineers

AISI - American Iron and Steel Institute – Instituto Americano do Ferro e Aço)

HRC - Ensaio de dureza Rockwell

HSS - High Speed Steel – Aço rápido

PVD - Deposição Física por Vapor

CVD - Deposição Química por Vapor

mm - milímetros

mm/rot – milímetros por rotações

m/min – metros por minuto

°C - Grau celsius

LE – Limite de escoamento

LR – Limite de resistência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo Geral	19
1.2 Objetivos específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
2.1.1 Aços de Livre corte	21
2.2 TIPOS DE AÇO DE LIVRE CORTE	20
2.2.1 Aços Ressulfurados // Inclusões não metálica.....	20
2.2.2 Aços ressulfurados com introdução de chumbo	22
2.2.3 Outras Adições	22
2.3 DEFINIÇÃO DE CAVACO	23
2.4 FORMAÇÃO DE CAVACO	23
2.5 TIPOS DE CAVACO	25
2.5.1 Cavacos Contínuos	25
2.5.2 Cavaco de ruptura.....	25
2.5.3 Cavacos descontínuos.....	26
2.5.4 Cavaco de cisalhamento	26
2.6 INTERFACE CAVACO FERRAMENTA	27
2.6.1 Atrito no corte de metais	28
2.6.2 Zona de aderência.....	29
2.6.3 Zona de escorregamento.....	29
2.6.4 Aresta Postiça de corte (APC).....	30
2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A FERRAMENTA DE CORTE.....	31
2.7.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte.....	31
2.7.2 Geometria da ferramenta de corte	31

2.7.3 Conceito de vida da ferramenta	35
2.7.4 Desgaste das ferramentas de corte.....	36
2.7.5 Tipos de avarias.	37
2.7.6 Causas de desgastes da ferramenta.....	41
2.7.7 Tipos de Desgastes	42
2.8 FORÇAS DE USINAGEM	43
2.8.1 Fatores que influenciam a Força de Usinagem.....	45
2.9 RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	46
2.10 TEMPERATURA DE CORTE.	47
2.11 FLUIDOS DE CORTE.....	49
2.11.1 Funções do Fluido de Corte.....	49
2.11.2 O fluido de corte como refrigerante	50
2.11.3 O fluido de corte como lubrificante.....	51
2.11.4 Regiões de ação do fluido de corte	52
2.11.5 Métodos de aplicação dos fluidos de corte.....	53
2.12 EFEITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA USINABILIDADE.....	56
2.13 TESTES DE USINABILIDADE.....	58
2.13.1 Tipos de ensaio de usinabilidade.	58
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	61
3.1 METODOLOGIA.....	61
3.2 MATERIAL ENSAIADO	62
5. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	63
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIA.....	70

1 INTRODUÇÃO

O aço é um produto de extrema importância na dinâmica da atividade humana, assumindo papel determinante no funcionamento da economia, sobretudo por figurar como um elemento essencial para o perfeito encadeamento de diversas cadeias produtivas. São raros os produtos utilizados no dia-a-dia que não levam componentes feitos de aço ou que tenham sido produzidos por meio de máquinas e equipamentos intensivos em aço. Além de muito presente no cotidiano, o aço é um indicador bastante relevante para medir a modernidade de uma sociedade (IBS, 2007).

O aço é a mais versátil e mais importante das ligas metálicas e segundo Chiaverini (2005), recebe este título pelas suas propriedades inerentes que dependem basicamente de dois fatores: composição química e estrutura, este por sua vez influenciada também por tratamentos mecânicos e térmicos.

As diversas características assumidas pelas combinações de materiais surgem das necessidades de acompanhar os avanços tecnológicos e sua grande demanda de aplicações, que implicam em melhor facilidade de produção e redução de tempo.

De acordo com Diniz (2006), a usinabilidade de um material pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem de um material, em relação a outro tomado como padrão.

Para Pimentel (2006), Em um material, a usinabilidade é uma resposta ao sistema de usinagem (ferramenta de corte, velocidade, avanço, lubrificação) e, além do desgaste da ferramenta, ela pode ser medida de outras maneiras, tais como: tipo de cavaco removido, acabamento superficial e esforços durante a usinagem. Os ensaios de usinabilidade não são apenas importantes para comparar esta característica em diversos materiais. Eles possibilitam a definição de condições ótimas de usinagem que resultarão em ganho de produtividade e redução de custos.

A usinabilidade tem uma grande influência na produtividade de uma empresa, razão pelo qual existe um enorme interesse em se estabelecer métodos ensaio, que permitem determinar a usinabilidade de um material, quer no controle de qualidade de uma Metalúrgica, quer na inspeção de recebimento pelo comprador, em um tempo não muito longo e com relativa precisão (FERRARESI apud CONCEIÇÃO, 2010).

A partir da definição do tema “Estudo da usinabilidade dos aços carbono SAE AISI resulfurados com base no teste de composição química”, foi feito um

levantamento de materiais para realização da revisão bibliográfica que engloba todos os assuntos, definições e referências a respeito do tema levantado, desenvolvendo sobre a usinabilidade dos materiais estudados relacionado ao teste de composição química proposto para ser realizado. A partir disso foi criado um banco de dados, definindo os dados necessários a serem aplicados na equação de composição, para levantamento de tabelas e gráficos em softwares para análise e comparação de resultados obtidos.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a usinabilidade dos aços-carbono SAE-AISI resulfurados e compara-los com base no teste de composição química.

1.2 Objetivos específicos

1. Expor sobre usinabilidade dos aços-carbono resulfurados.
2. Mostrar os tipos de composição química existentes nos aços resulfurados.
3. Analisar os índices de porcentagens de composição química que compõe os aços-carbono resulfurados.
4. Analisar os resultados encontrados de usinabilidade comparando com as faixas de composições química dos aços através de gráficos para indicar as principais influências das adições não metálicas nas variações de usinabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

2.1.1 Aços de Livre corte

Segundo Chiaverini (2005), os aços de usinagem fácil são aqueles em que se introduzem de modo controlado, inclusões não metálicas.

Esses materiais caracterizam-se por serem de baixo carbono e possuírem Enxofre e Manganês mais elevados que os aços-carbono comuns. Além disso, os perfis utilizados são geralmente terminados por laminação a frio para obtenção de um melhor acabamento superficial e uma resistência mecânica mais elevada. Os aços de usinagem fácil estão compreendidos na classificação SAE na classe 11XX abrangendo cerca de 27 tipos de aços com composição química e propriedades mecânicas diferentes (DINIZ et al, 2006).

A norma SAE J 403 (2004), diz que os aços de corte fácil podem ser classificados em duas séries:

1. Série 11XX (aço de corte fácil resulfurado): O teor de enxofre é de no mínimo 0,08%;
2. Série 12XX (aço de corte fácil resulfurado e refosforado): Os teores de enxofre e fósforo são, respectivamente, de no mínimo 0,16% e 0,04%.

2.2 TIPOS DE AÇO DE LIVRE CORTE

2.2.1 Aços Resulfurados // Inclusões não metálica

Os aços de corte fácil mais usuais podem ser classificados em baixo e médio carbono. O aço baixo-carbono apresenta teor nominal de carbono inferior ou igual a

0,30%. O aço médio-carbono apresenta teor nominal de carbono superior a 0,30% e igual ou inferior a 0,50% (ABNT, 1986).

As inclusões nesses tipos de aço segundo Diniz et al. (2006), são de sulfeto de manganês (MnS) e são obtidos pela inclusão de enxofre em quantidade suficiente para combinar-se com o manganês e com o ferro, formando uma série de sulfetos de manganês e de ferro (principalmente o primeiro), os quais são insolúveis no aço (este tipo de aço é chamado de resulfurado). As inclusões de MnS podem ser do tipo globular ou podem tornar-se alongadas durante a laminação do aço. De qualquer modo, elas favorecem a usinabilidade porque causam a formação de cavaco quebradiço e atuam como uma espécie de lubrificante, impedindo que o cavaco adira à ferramenta e destrua a sua aresta cortante (APC), além de melhorar a qualidade superficial da peça.

De acordo com Pimentel (2006), os aços resulfurados baixo-carbono que contêm variações entre 0,10, 0,20 e 0,30% de enxofre sejam comumente usados em aplicações de usinagem, os mais usuais são aqueles que contêm nominalmente 0,30% de enxofre. Este aditivo por sua vez foi o primeiro a ser usado para melhorar a característica de boa usinabilidade nos aços.

Sabe-se que a adição de fósforo nos aços aumenta a resistência mecânica e a dureza melhorando assim a usinabilidade. Segundo Chiaverini (2005), não se ultrapassa 0,12% de fósforo, pois do contrário disso os efeitos negativos dessa adição começam a aparecer. A tabela 2.1 mostra alguns exemplos desses aços e suas variações de composições químicas.

Tabela 2.1 - Faixas de composição de aço-carbono AISI-SAE Resulfurados e Refosforados

Designação AISI-SAE	C	Mn	P	S
1211	0,13	0,60 – 0,90	0,07 – 0,12	0,10 – 0,15
1212	0,13	0,70 – 1,00	0,07 – 0,12	0,16 – 0,23
1213	0,13	0,70 – 1,00	0,07 – 0,12	0,24 – 0,33
12L14	0,15	0,85 – 1,15	0,04 – 0,09	0,26 – 0,35
1215	0,09	0,75 – 1,05	0,04 – 0,09	0,26 – 0,35

Fonte: (Chiaverini, 2005)

2.2.2 Aços resulfurados com introdução de chumbo

A adição de chumbo constituiu outro meio de melhorar a usinabilidade dos aços-carbonos, além de melhorar seu acabamento. O chumbo é adicionado no aço líquido durante seu vazamento no molde; como este metal é insolúvel no aço fundido, forma-se uma fina dispersão de partículas de chumbo, tão pequenas que podem ser imperceptíveis ao microscópio (CHIAVERINI, 2005).

Para Trent (2000), O chumbo é usado como adições de cerca de 0,25% em aço de alto teor de enxofre e aço com teor normal de enxofre. O chumbo permite um corte ainda maiores velocidades. Dá um melhor acabamento superficial e um melhor controle de chips sem prejuízo sério às propriedades mecânicas do aço.

O teor de chumbo varia entre 0,15 e 0,35%, e a sua adição por si só não proporciona diminuição significativa das propriedades mecânicas à temperatura ambiente. Em temperaturas próximas as do seu ponto de fusão, o chumbo pode provocar a fragilização do aço (WARKER; BREYER apud PIMENTEL, 2006).

Embora teoricamente o chumbo ou o bismuto possa ser adicionado em qualquer tipo de aço, usualmente estas adições metálicas são limitadas aos aços de corte fácil das séries SAE 11XX e 12XX, pois a combinação de chumbo e sulfeto de manganês tem se mostrado como sendo a que proporciona a maior usinabilidade nos aços segundo Warke e Breyer (1971), conforme citado por Pimentel et al (2004). Aços com adição de chumbo são identificados pela inclusão da letra L entre o segundo e terceiro dígito na classificação SAE/AISI, como por exemplo, SAE 12L14 ou SAE 10L45.

2.2.3 Outras Adições

Diversos outros aditivos, tais como bismuto, selênio e telúrio, podem ser usado sem conjunto com chumbo e enxofre para melhorar a usinabilidade dos aços baixo-carbono. Estes aços são utilizados em aplicações, onde a taxa de remoção do metal é maior do que a obtida com aços resulfurados com apenas adição de chumbo. A quantidade destes elementos presente no aço é em torno de 0,10% e eles se apresentam

combinados com as inclusões de chumbo ou de sulfeto de manganês (ou ambas as inclusões) (PIMENTEL, 2006). Com tudo, aços com tais elementos não são disponíveis comercialmente (CHIAVERINI, 2005).

2.3 DEFINIÇÃO DE CAVACO

O Cavaco em termos gerais pode ser entendido como parte retirada de um material a partir do contato com uma ferramenta de corte no processo de usinagem. A fração de material retirada pode assumir formas variáveis de acordo com as condições de corte.

Stoeterau et al. (2004), define cavaco como sendo uma porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma irregular.

2.4 FORMAÇÃO DE CAVACO

Para Diniz et al. (2006), a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados a usinagem, tais como desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem e a penetração do fluido de corte, etc.

A formação do cavaco é um processo periódico, com cada ciclo dividido em quatro eventos distintos, sendo o último o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. As condições nas quais esse escorregamento acontece tem influências marcantes em todo processo, particularmente no mecanismo de formação de cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o corte e, conseqüentemente, na temperatura de corte e nos mecanismos e taxa de desgaste das ferramentas, afetando assim seu tempo de vida (MACHADO; ABRÃO et al, 2009).

O mecanismo de formação do cavaco, pode ser dividido em 4 etapas, são elas:

1. Recalque (deformação elástica).
2. Deformação Plástica.
3. Ruptura.

porção anterior) está se formando e passando pelos mesmos processos. Essa nova porção de material também escorregará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo mais uma vez o fenômeno (MACHADO; ABRÃO et al, 2009).

2.5 TIPOS DE CAVACO

O cavaco é extremamente variável em forma e tamanho em operações de usinagem industrial. A formação de todos os tipos de envolve um corte do trabalho material na região de um plano que se estende desde a borda da ferramenta até a posição em que a parte superior da superfície do cavaco (TRENT, 2000).

MACHADO et al. (2009), define os tipos de cavacos como sendo:

2.5.1 Cavacos Contínuos

Apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua. A distinção das lamelas não é nítida. Forma-se na usinagem de materiais dúcteis, onde o ângulo de saída deve assumir valores elevados.

2.5.2 Cavaco de ruptura

Apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. A superfície de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta é reduzida, assim como a ação do atrito; o ângulo de saída deve assumir valores baixos, nulos ou negativos.

2.5.3 Cavacos descontínuos

A formação contínua de aparas ocorre se a ductilidade plástica da peça de trabalho o material é muito baixo ou se os caminhos de deslizamento predefinidos são formados devido a altas não homogeneidades (por exemplo, se o ferro fundido com grafite lamelar for usinado). Partes do material da peça de trabalho são arrancadas do material composto sem deformação. A superfície da peça de trabalho é então produzida pelo rasgão processo na formação do chip que pelos traços da ferramenta.

2.5.4 Cavaco de cisalhamento

O material ao escorregar ao longo do plano de cisalhamento, fissura no ponto mais solicitado. Esta fissura não progride, então, até à ruptura parcial ou total do cavaco. Este se apresenta, entretanto, em geral, como uma fita contínua, pois os efeitos da pressão e da temperatura provocam a solda dos diversos segmentos.

A Tabela 2.2 mostra as diversas formas que o cavaco retirado durante o processo pode assumir durante o processo de usinagem.

Tabela 2.2 – Classificação detalhada da forma dos cavacos.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCADOS
desfavorável		médio			favorável		médio		

Fonte: (Oliveira, V.G. 2012)

2.6 INTERFACE CAVACO FERRAMENTA

Trent (2000), afirma que na interface cavaco-superfície de saída da ferramenta, existe uma zona de aderência, e logo após esta, uma zona de escorregamento entre cavaco e a ferramenta, quando da usinagem de vários metais com ferramentas de aço rápido e metal duro. O movimento do cavaco na zona de aderência ocorre por cisalhamento do material do cavaco. Bem próximo da interface é formado uma zona de cisalhamento intenso (chamado de zona de fluxo), como pode ser observado na Figura 2.3.

As condições na interface, de escorregamento ou de aderência, dependem do par ferramenta peça, do tempo de usinagem e da velocidade de corte. Quanto menor o ângulo de saída da ferramenta, maior o comprimento de contato cavaco-superfície de saída da ferramenta e, com isso, maior zona de aderência. Quanto maior a zona de aderência, maior a temperatura de corte e a força de usinagem (WRIGHT apud MACHADO et al., 2009). Outra situação é a existência da APC, fenômeno que pode ocorrer a baixas velocidades de corte. A presença da APC altera a geometria da cunha cortante, o que afeta todo o processo de usinagem (força, temperatura, desgaste das ferramentas e acabamento superficial) (MACHADO, 2009).

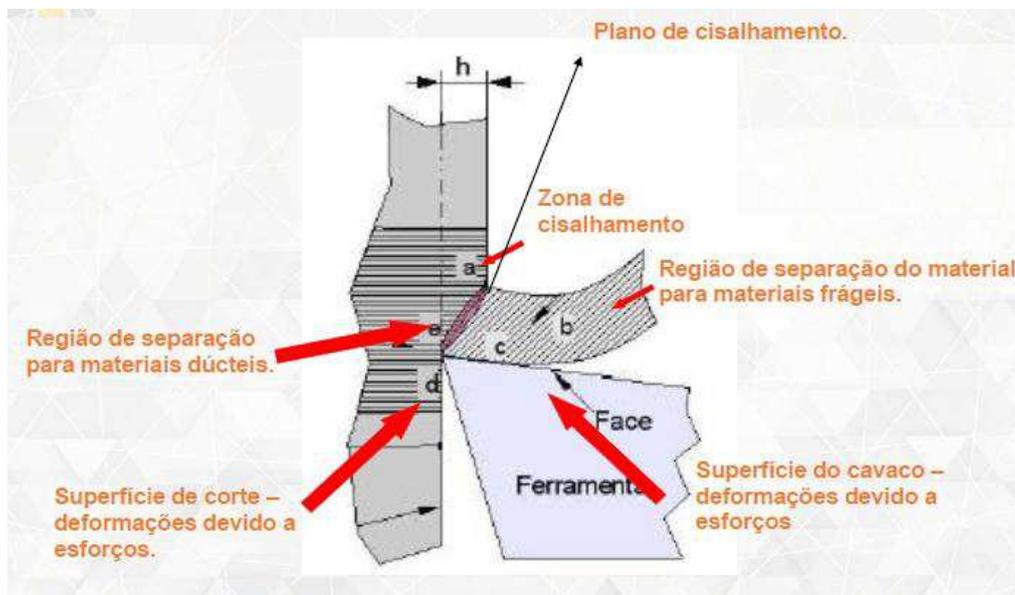


Figura 2.3 – Esquema das zonas de cisalhamento primária e secundária.

Fonte: (Stoeterau, 2004)

2.6.1 Atrito no corte de metais

De acordo com Machado et al, (2009), quando duas superfícies são colocadas justapostas e em eminente movimento relativo, a área de contato real (A) é muito menor que a área de contato aparente (A), devido às micro irregularidades presentes em qualquer superfície acabada. Os contatos são estabelecidos apenas em alguns picos das irregularidades, Figura 2.4.

Durante o corte dos metais, os regimes I e III ocorrem simultaneamente em pontos distintos ao longo do comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta. O modelo de distribuição de tensão na superfície de saída da ferramenta, ilustrado na Figura 2.4, mostra que o comprimento de contato pode ser dividido em duas regiões distintas: "a região de aderência" e "a região de escorregamento" (ZOREV apud MACHADO et al., 2009).

Segundo esse modelo, a: tensão normal é máxima na extremidade da aresta e decresce, exponencialmente, até zero, no ponto onde o cavaco perde contato com a superfície de saída. A tensão cisalhante é constante na zona de aderência (e assume o valor do limite de resistência ao cisalhamento do material da peça naquela região) e decresce, também exponencialmente, na zona de escorregamento até o valor zero, no ponto onde o cavaco perde contato com a ferramenta (MACHADO et al.,2009).

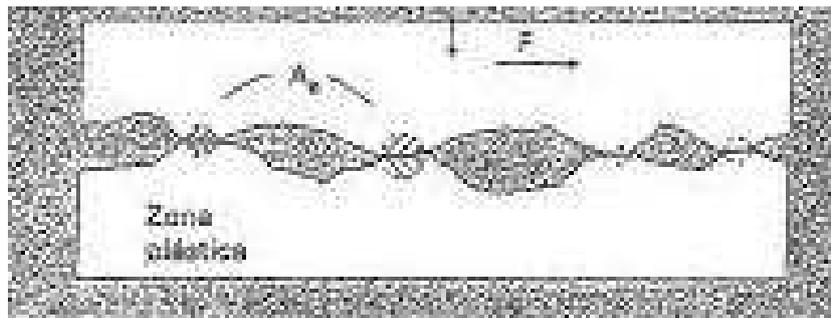


Figura 2.4 – Área de contato numa superfície com picos de irregularidades.

Fonte: (Machado et al. 1999)

2.6.2 Zona de aderência

Essa região foi denominada "zona de aderência" (seizure zone), que na realidade é a confirmação da presença do regime m na interface. Sob tais condições, o movimento na interface ocorre por cisalhamento dentro do material do cavaco. Uma zona de cisalhamento intenso é formada bem próximo, mas não necessariamente na interface, que foi denominada "zona de fluxo" (flow zone) (TRENT apud MACHADO et al., 2009).

As "condições de aderência" devem ser assumidas como inevitáveis para a usinagem de, praticamente, todos os materiais (exceto alguns de corte fácil), e utilizando-se qualquer tipo de ferramenta de corte. Altas tensões de compressão, grandes quantidades e altas taxas de deformação, que provocam altas temperaturas na interface ferramenta/cavaco, bem como a pureza do material da peça em contato com a ferramenta, promovem ligações atômicas nessa interface, causando aderência (TRENT apud MACHADO et al., 2009).

Diniz et al. (2006) afirma que o mecanismo de deformação plástica na interface ferramenta/cavaco ocorre de dois modos diferentes: a baixas velocidades de corte e avanço, com formação de APC, ocorre por movimentos de discordâncias, o que acarreta, portanto, encruamentos; a altas taxas de remoção de material na zona de aderência, as deformações cisalhantes estão confinadas a estreitas bandas de cisalhamento termoplástico (flow zone).

Na zona de fluxo, observa-se que, à medida que se aproximam da interface com a superfície de saída da ferramenta, as deformações do material dentro da zona de fluxo vão aumentando rapidamente. Chegam a aumentar tanto que, mais próximos da interface não se distinguem mais os microconstituintes (ferrita e perlita) por falta de resolução, consequência da ampliação usada nessa micrografia. (DINIZ et al. 2006).

2.6.3 Zona de escorregamento

Condições de escorregamento também são observadas na periferia da área de contato entre o cavaco e a ferramenta (TRENT apud MACHADO et al., 2009). Nessas

condições, a área real (AR) é muito menor que a área aparente (A), constatando que há a presença do regime I (SHAW et al. Apud apud MACHADO et al., 2009), bem como que a zona de intenso fluxo de material está ausente, porque as ligações que se formam são mais fracas que as ligações internas dos materiais da peça e da ferramenta. O movimento relativo acontece justamente na interface, por meio de um processo conhecido como stick-slip, no qual há um início de aderência seguido por escorregamento na interface. A presença de condições de escorregamento na periferia da área de contato ferramenta/cavaco se deve às baixas tensões de compressão atuando nessas regiões, o que não favorece a presença do regime III. Outro fator que dificulta a presença desse regime é a possibilidade do acesso do oxigênio, formando óxidos que dificultam ligações metálicas fortes entre o cavaco e a ferramenta.

2.6.4 Aresta Postiça de corte (APC)

Quando se usina a baixas velocidades de corte, um fenômeno conhecido como APC pode ocorrer na interface ferramenta/cavaco. Existem evidências de que a APC é contínua com o material da peça e do cavaco, em vez de ser um corpo separado de material encruado sobre o qual o cavaco se escoa (TRENT apud MACHADO et al., 2009).

Segundo Machado (2009), durante o corte sob altas tensões de compressão, as ligações são fortes o suficiente para evitar o escorregamento do material na superfície de saída da ferramenta. Na interface, a primeira camada do material da peça que se a ferramenta, por meio de ligações atômicas é endurecido a frio, aumentando, assim, seu limite de escoamento e por conseguinte, a tensão de cisalhamento torna-se insuficiente para romper tais ligações. As deformações, então, continuam nas camadas superiores adjacentes mais afastadas da interface, até que estejam encruadas suficientes. Pela repetição desse processo, uma sucessão de camadas forma a APC, cujo tamanho não pode aumentar indefinidamente, portanto, quando o seu tamanho atinge um valor no qual a tensão de cisalhamento é suficiente para mudar a zona primária de cisalhamento (que até então acontecia acima da APC), partes de sua estrutura são cisalhadas e arrastadas entre a superfície da peça e a superfície de folgada ferramenta. Essa ruptura e

arrastamento também podem ocorrer entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta.

2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A FERRAMENTA DE CORTE

2.7.1 Requisitos desejados em uma ferramenta de corte.

Stoeterau et al (2004) , sequência alguns dos principais Requisitos desejados em uma ferramentas de corte, são eles:

- Resistencia a compressão
- Dureza
- Resistencia a flexão e tenacidade
- Resistencia do gume
- Resistencia interna de ligação
- Resistencia a quente
- Resistencia a oxidação
- Pequena tendência a fusão e caldeamento
- Resistencia a abrasão
- Condutibilidade térmica, calor específico e expansão térmica adequada.

2.7.2 Geometria da ferramenta de corte

A geometria da ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. Por melhor que seja o material da ferramenta, se a sua geometria não for preparada adequadamente, não haverá êxito na operação. Tamanha é a sua importância que se faz necessário normalizar, da maneira mais conveniente possível, os ângulos da

cunha cortante para uniformizar a nomenclatura entre os profissionais e a literatura especializada (MACHADO et al, 2009). Descrição das partes construtivas da ferramenta, conforme a Figura 2.5:

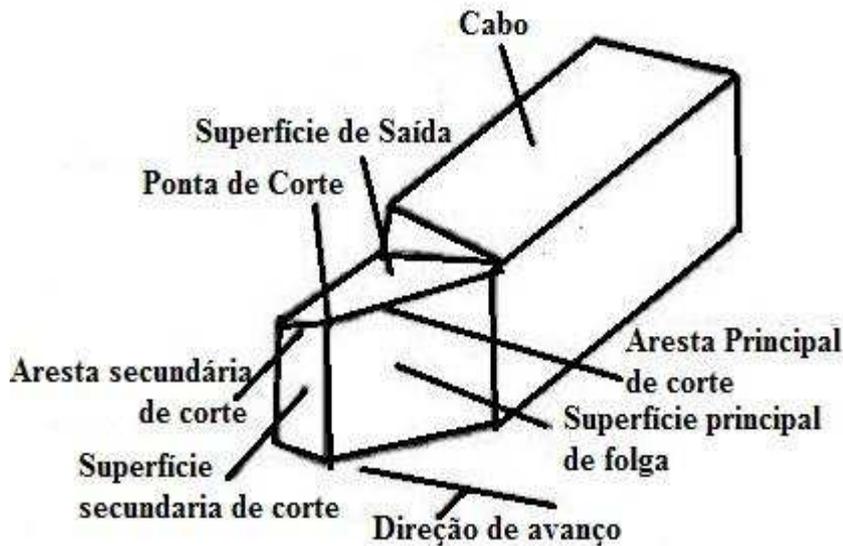


Figura 2.5 – Descrição das partes de uma ferramenta de corte.

Fonte: (Machado et al. 1999)

- **Superfície de saída:** é a superfície sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoava durante a sua saída da região de trabalho de usinagem.

- **Superfícies de folga (principal e lateral/secundária):** são as superfícies da que se defrontam com as superfícies em usinagem (peça).

- **Aresta principal de corte:** é a aresta formada pela intersecção das superfícies e saída e de folga principal e voltada à direção de avanço no plano de trabalho.

- **Aresta lateral/secundária de corte:** é a aresta formada pela intersecção das superfícies e saída e de folga lateral.

-**Ponta de corte:** é a parte da ferramenta onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas mediante um arredondamento ou chanfro.

Para a definição dos ângulos da parte de corte são necessários um sistema de referência da ferramenta e um sistema de referência efetivo. Cada um destes sistemas será constituído de três planos ortogonais entre si.

O sistema de referência da ferramenta tem aplicação na determinação da geometria da parte de corte da ferramenta, durante o projeto, execução, afiação, reparo e controle da mesma, como estão representados na Figura 2.6.

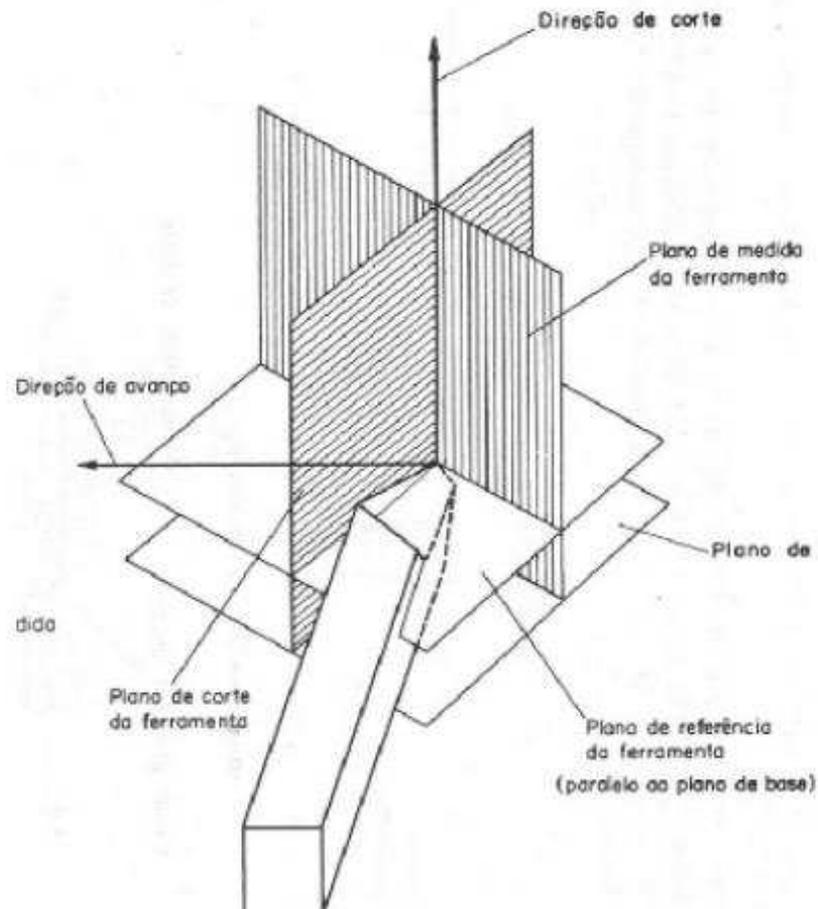


Figura 2.6 – Representação do sistema de plano de Referência de uma ferramenta de corte.

Fonte: (Universidade de Araraquara, 2015)

- **Plano de referência:** é o plano que, passando pelo ponto de referência, é perpendicular à direção de corte.

- **Plano de corte:** é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é o plano tangente ou que contém a aresta de corte e é perpendicular ao plano de referência.

- **Plano de medida (ou ortogonal):** é o plano perpendicular ao plano de referência e ao plano de corte.

Ângulos da Cunha de Corte Servem para determinar a posição e a forma da cunha de corte.

A Figura 2.7 traz a representação na vista ortogonal dos principais ângulos da cunha de corte.

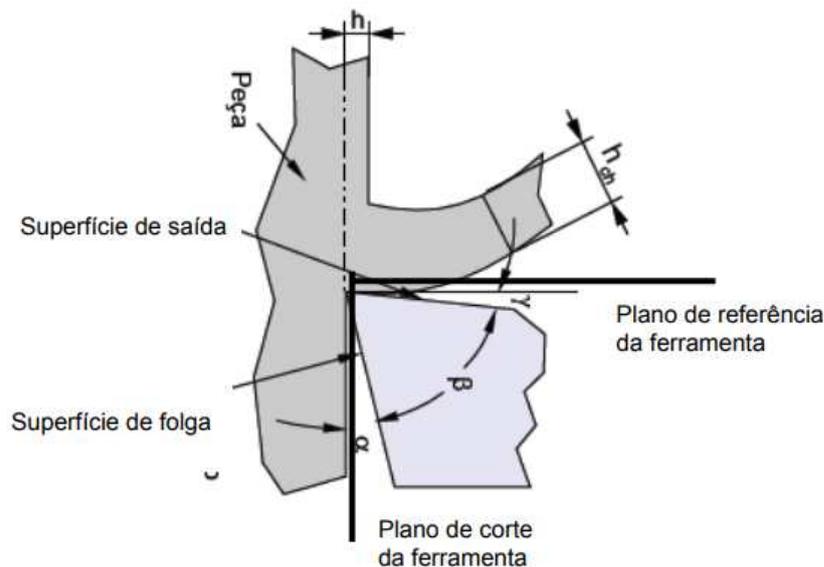


Figura 2.7 - Ângulos vistos no plano de medida ortogonal.

Fonte: (Universidade de Araraquara, 2015)

- **Ângulo de posição (χ):** é o ângulo entre o plano de corte e o plano de trabalho, medido no plano de referência. O ângulo de posição é sempre positivo e situa-se forma da cunha de corte, de forma que seu vértice indica a ponta de corte.

- **Ângulo de posição da aresta lateral/secundária (χ'):** é o ângulo entre o plano de corte lateral/secundário e o plano de trabalho.

- **Ângulo de ponta (ϵ):** é o ângulo entre os planos de corte correspondentes (plano principal e lateral/secundário), medido no plano de referência.

- **Ângulo de inclinação (λ):** é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta, medido no plano de corte. O ângulo de inclinação situa-se sempre de forma que o seu vértice indica a ponta de corte. É positivo quando o plano de referência da ferramenta ficar fora da cunha de corte.

- **Ângulo de folga (α):** é o ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte, medido no plano de medida/ortogonal. O ângulo de folga é positivo quando o plano de corte da ferramenta ficar fora da cunha de corte.

- **Ângulo de cunha (β):** é o ângulo entre a superfície de saída e a superfície de folga, medido no plano de medida/ortogonal.

- **Ângulo de saída (γ):** é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de medida/ortogonal. O ângulo de saída é positivo quando o plano de medida/ortogonal ficar fora da cunha de corte.

2.7.3 Conceito de vida da ferramenta

De acordo com Diniz et al. (2006), a vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo esse tempo, a ferramenta deve ser afiada ou substituída.

Ferraresi (1977) define vida da ferramenta de corte como sendo o tempo em que a ferramenta de corte trabalha, efetivamente, sem perder o corte ou até que atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim de vida de uma ferramenta de corte será definido pelo grau de desgaste pré-estabelecido. A grandeza deste desgaste, ou a fixação de um nível e desgaste permitido irá depender de inúmeros fatores, tais como:

- Acabamento superficial não satisfatório;
- Tolerâncias dimensionais não são mais possíveis de se obter;
- Aumento excessivo da força de corte;
- Temperatura excessiva atingida pela ferramenta;
- Receio de quebra da aresta de corte devido ao desgaste;

Através do controle de um destes fatores, e adotando-se um critério de fim de vida, pode-se saber o momento adequado para a substituição da ferramenta de corte.

Para Machado (2009), inúmeros fatores influenciam nos mecanismos e formas de desgastes de uma ferramenta. A sequência abaixo é uma lista alguns dos principais fatores de influência na vida de uma ferramenta.

Quanto à peça:

- Composição química;
- Tamanho de grão e microestrutura;
- Fusão e processo de fundição;
- Ao tipo de fabricação: fundido, forjado, laminado, trefilado.

- Ao tipo de tratamento térmico: recozimento, normalização, têmpera, revenimento.
- As propriedades mecânicas: resistência à tração, ductilidade, dureza, encruabilidade.
- Dimensões e forma;

Quanto à ferramenta de corte:

- Composição química da ferramenta;
- Tratamento térmico;
- Dureza e resistência ao desgaste;
- Geometria;
- Tenacidade.

Quanto ao fluido de corte:

- Propriedades refrigerantes;
- Propriedades lubrificantes;
- Forma de aplicação.

Quanto à máquina ferramenta:

- Velocidade de corte;
- Avanço;
- Profundidade de corte;
- Tipo de máquina;
- Rigidez da máquina;

2.7.4 Desgaste das ferramentas de corte

O desgaste que ocorre em ferramentas de corte é atualmente um problema para a indústria metal/mecânica. Esses desgastes, muitas vezes excessivos, causam um elevado custo para a empresa fabricante de um componente, pois podem ocorrer alterações dimensionais e de acabamento, além de diminuir a vida útil da ferramenta de corte, ocasionando uma parada de produção indesejável. (Zaisov et al, 2015).

O desgaste é denominado como uma perda contínua de partículas que fazem parte da composição da ferramenta de corte, em medidas microscópicas. Ela geralmente se dá devido a ação de corte. Num âmbito geral, os desgastes são conhecidos como: Desgaste de Flanco, Desgaste de Entalhe, Desgaste de Cratera, Lascamento, Trincas e Quebra (Zaisov et al, 2015).

3.7.5 Tipos de avarias

Segundo Diniz et. al (2006), define-se assim as principais áreas de desgastes:

- **Lascamento:** é um tipo de avaria da ferramenta. Partículas grandes de material são retiradas de uma só vez. Ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Prejudicam o acabamento superficial da peça e pode levar até a quebra da ferramenta se continuar a crescer (Figura 2.8). Para evitar o lascamento, pode-se trabalhar com uma ferramenta mais tenaz, aumentar o raio de ponta e/ou o ângulo de cunha, suavizar o primeiro contato de ferramenta com a peça;

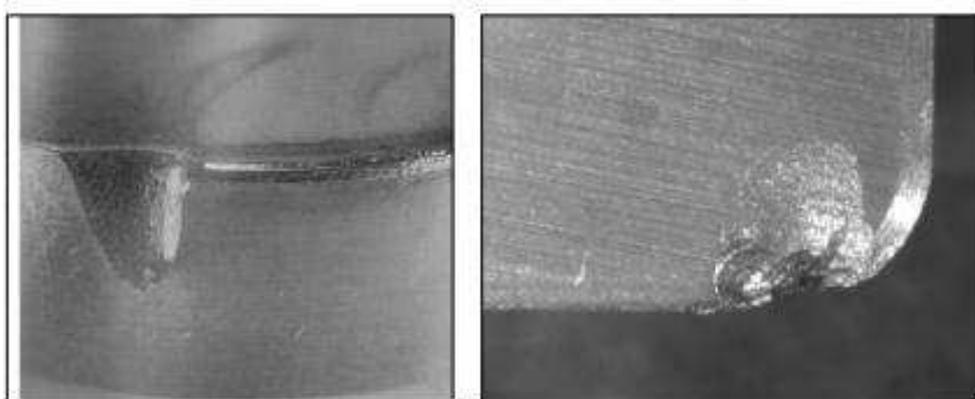


Figura 2.8 – Lascamento da aresta de corte

Fonte: (Universidade de Araraquara)

- **Trincas:** outro tipo de avaria da ferramenta. São causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. As trincas que ocorrem perpendicularmente à aresta de corte são de origens térmicas e quando ocorrem paralelas à aresta de corte são de origens mecânicas. O crescimento da trinca leva a

quebra da ferramenta. Para se evitar a formação das trincas de origem mecânica pode-se escolher uma ferramenta mais tenaz, reduzir o avanço, aumentar a estabilidade da usinagem; para se evitar trincas de origens térmicas não utilizar fluido de corte e escolher também uma ferramenta mais tenaz (Figura 2.9).

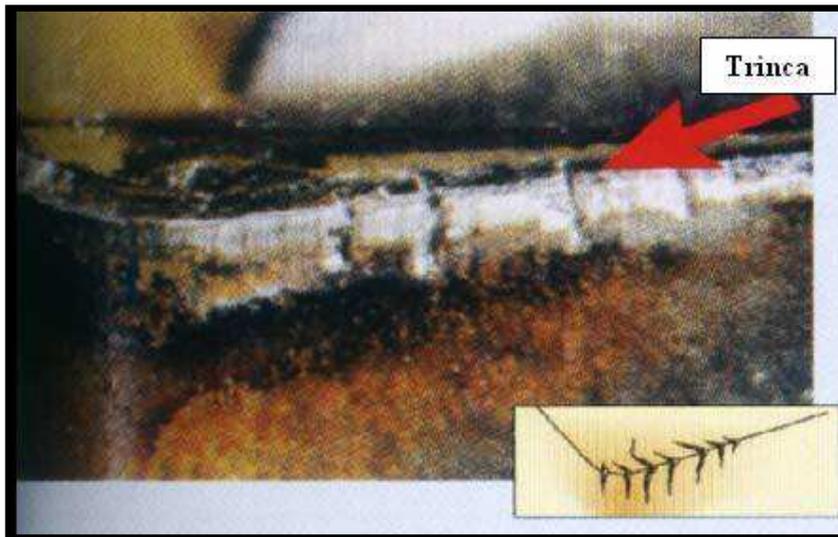


Figura 2.9 – Trincas na aresta de corte.

Fonte: (Pimentel, Marcelo F. 2006)

- **Desgaste de flanco:** ocorre na superfície de folga da ferramenta de corte, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça (Figura 2.10). Esse tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância. O desgaste é acelerado com velocidade de corte muito alta ou muito baixa na presença da aresta postiça de corte (APC), com resistência insuficiente da ferramenta com o fenômeno da abrasão. Para minimizar o desgaste deve-se trabalhar com velocidades adequadas e selecionar uma ferramenta que resista mais ao desgaste, observe a formação de flanco na Figura 2.11.

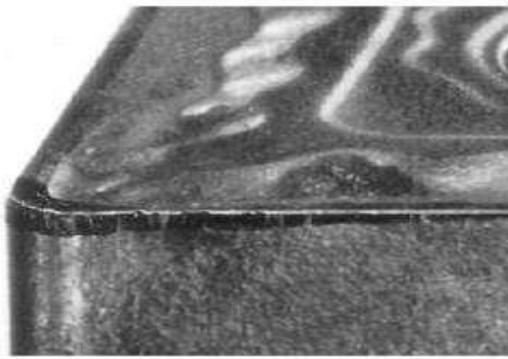


Figura 2.10 – Desgaste de flanco na aresta de corte.

Fonte: (Universidade de Araraquara)



Figura 2.11 - Desgaste de flanco na aresta de corte (COLORIDO).

Fonte: (Pimentel, Marcelo F. 2006)

- **Quebra:** é o resultado final da continuação das avarias e desgaste ou da soma dos dois. A quebra da ferramenta ocasiona não somente dano na ferramenta, mas também no porta-ferramenta e na própria peça (Figura 2.12). A quebra da ferramenta também pode ser resultante de uma má especificação da ferramenta ou das condições de trabalho.



Figura 2.12 – Quebra da ferramenta

Fonte: (Pimentel, Marcelo F. 2006)

- **Desgaste de cratera:** é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco, principalmente através do fenômeno da difusão. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste de flanco (Figura 2.13); (Figura 2.14). Para evitar esse tipo de desgaste recomenda-se utilizar ferramentas de metal duro revestido ou ferramentas cerâmicas.

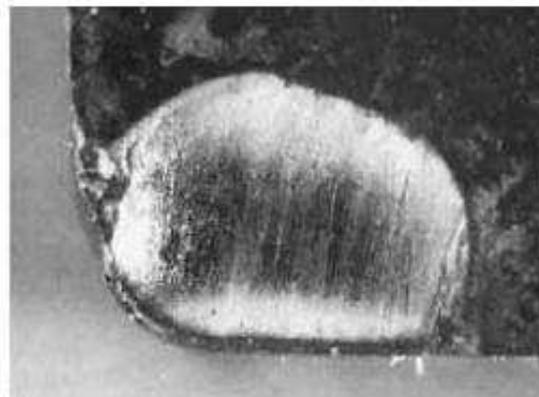


Figura 2.13 – Desgaste de cratera na ferramenta de corte.

Fonte: (Universidade de Araraquara)

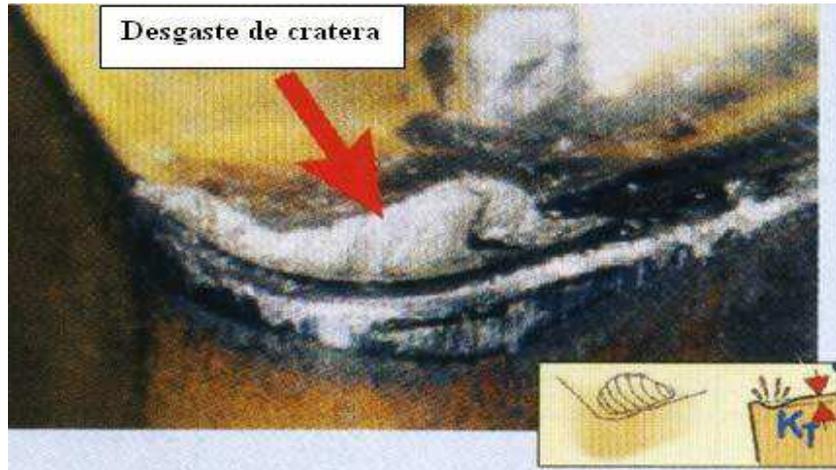


Figura 2.14 – Desgaste de cratera na ferramenta de corte (colorida).

Fonte: (Pimentel, Marcelo F. 2006)

2.7.6 Causas de desgastes da ferramenta

A Figura 2.15 apresenta um diagrama clássico com os diversos mecanismos de desgaste em função da temperatura (VIBREGGE, 1970, apud KONIG & KLOCKE, 1997).

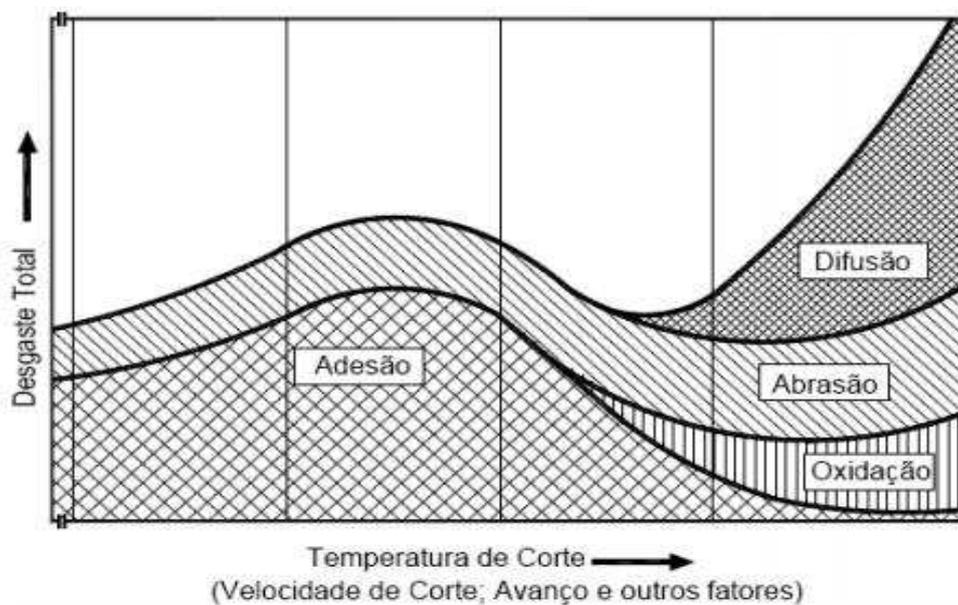


Figura 2.15 – Diagrama da relação de desgaste em função da temperatura.

Fonte: (Universidade de Araraquara)

Segundo Diniz (2006), os mecanismos de abrasão, adesão, difusão e oxidação são apresentados em função da temperatura de corte ou de qualquer parâmetro que a influencie, principalmente a velocidade de corte. Em baixas temperaturas, apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e a adesão é predominante, enquanto em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar para os novos mecanismos de difusão e oxidação. Observa-se que esses dois mecanismos vão crescendo em participação com o aumento da temperatura, e que a difusão cresce em uma escala exponencial. Esse diagrama também salienta que o desgaste total cresce muito com o aumento da temperatura de corte.

2.7.7 Tipos de Desgastes

- Desgaste Abrasivo

Em sistemas tribológicos de um modo geral, o desgaste abrasivo ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície por: partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, ou que pertencem a uma das superfícies. No caso de as partículas estarem soltas, a abrasão é considerada de "três corpos", na qual as partículas duras são livres para rolar e escorregar entre as duas superfícies. No caso de as partículas emergirem de uma das superfícies, a abrasão é considerada de "dois corpos" (HUTCHINGS apud MACHADO et al., 2009).

- Desgaste Difusivo

Esse mecanismo envolve a transferência de material, no nível atômico, e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (zona secundária de cisalhamento) (MACHADO, 1991).

Nos processos de usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta e peça ou entre ferramenta e cavaco são altas e o tempo de contato entre esses materiais é muito curto. Isso praticamente levaria o mecanismo de difusão a ser desprezível, não fosse a existência de uma zona de aderência (zona morta ou zona de fluxo) na interface ferramenta-cavaco (TRENT & WRIGHT, 2000).

- Desgaste de Adesão e arrastamento: attrition.

De acordo com Machado et al. (2009), este mecanismo ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta de torna irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer, e se ela for instável o contato com a ferramenta se torna menos contínuo. Sob essas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados juntos ao fluxo de material adjacente à interface. Como este mecanismo se processa a nível de grãos, no microscópio, as áreas desgastadas por attrition tem uma aparência áspera.

- Oxidação

As altas temperaturas e a presença de ar e água, contida nos fluidos de corte, geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito causando o desgaste. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (DINIZ, 2006).

2.8 FORÇAS DE USINAGEM

A força de usinagem é um dos parâmetros de muita importância no estudo da usinabilidade dos materiais. Machado (1999), afirma que ela pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica da aresta, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgastes.

Para Diniz (2006), as forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta. A força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem é chamada de força de usinagem (F_u). A princípio nem a direção, nem o sentido da força de usinagem são conhecidos, tornando-se impossível medi-la e conhecer melhor as influências de diversos parâmetros no seu valor. Por isso não se trabalha com a força de usinagem propriamente, mas com suas componentes segundo diversas direções conhecidas.

Os três componentes de força de usinagem (F_u), baseadas na operação de torneamento com base na norma DIN 6584, exemplificados na Figura 2.16:

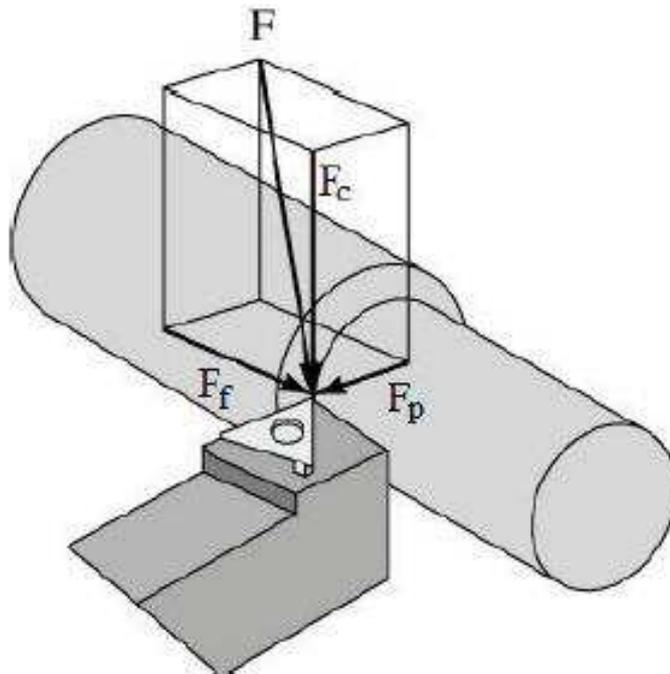


Figura 2.16 – Representação dos componentes de força de usinagem baseados na operação de torneamento.

FONTE: Vinícius Rodrigues Borba, 2016.

- **Força de corte ou força principal de corte (F_c):** é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte.
- **Força de avanço (F_f):** é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.
- **Força passiva ou-força de profundidade (F_p):** é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

De acordo com Silva (2014), aplicando relações trigonométricas as forças demonstradas na FIGURA 2.16, chega-se a Equação 2.1 para o cálculo da força de usinagem:

$$F_u = F_c^2 + F_p^2 + F_f \quad (3.1)$$

2.8.6 Fatores que influenciam a Força de Usinagem

A força de usinagem é alterada sob diferentes condições da interface cavaco-ferramenta. Sua dependência está na maneira com que o cavaco se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta. De uma maneira simples, é possível afirmar que todos os fatores que contribuem para a movimentação livre do cavaco sob a superfície de saída, atuam no sentido de diminuir a força de usinagem e vice-versa (MACHADO 2000).

Para TRENT citado por MACHADO et al., 2009, a força de usinagem pode ser considerada dependente de dois fatores principais: área dos planos de cisalhamento primário e secundário e a resistência ao cisalhamento do material da peça nos planos de cisalhamento primário e secundário.

Conforme (MACHADO et al, 1996), baseando-se nesses dois fatores é possível descobrir as principais variáveis, como:

- Velocidade de corte

Inicialmente, para velocidades bem pequenas, a APC anda está ausente e a tendência é a redução da força com o aumento da velocidade de corte devido ao aumento da geração de calor. Com o aparecimento da APC, a força de corte diminui imediatamente porque o ângulo de saída efetivo é considerado aumentado e a área do plano de cisalhamento secundário é reduzida. Na medida em que a velocidade de corte aumenta as dimensões de APC também aumentam, até um valor máximo.

- Avanço e profundidade de corte

O aumento destes dois fatores. Por aumentar diretamente as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, causam aumento da força de usinagem, numa proporção direta, quase que linear.

- Material da peça

Quanto maior a resistência do material a usinar, maior a resistência ao cisalhamento nos planos de cisalhamento, sendo assim, maior a força de usinagem.

- Material da ferramenta

A afinidade química do material da ferramenta com o seu material da peça pode atuar principalmente, na área da seção de corte. Se a tendência for promover uma zona

de aderência estável e forte, a força de usinagem poderá ser aumentada. Se a tendência for diminuir o atrito na interface, evitando as fortes ligações de aderência, a área da seção de corte poderá ser reduzida, diminuindo a força de usinagem.

- Geometria da ferramenta

O ângulo mais influente é o de saída. Uma redução deste ângulo, tende a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta e impor uma maior restrição ao escoramento do cavaco por superfície de saída, aumentando a força de usinagem.

O ângulo de folga ou incidência só terá influência, se utilizado valores bem pequenos ($<3^\circ$). Neste caso o atrito nesta região irá aumentar e, portanto afetar a força de usinagem proporcionalmente.

- Estado de afiação da ferramenta

O desgaste da ferramenta de corte pode alterar a geometria da ferramenta, porém o efeito maior é dividido ao aumento da área de contato com o cavaco e com a peça, com crescimento do desgaste de cratera e de flanco, respectivamente. Isto faz aumentar a força de usinagem.

- Uso do Fluido do corte

O uso de fluido de corte com ação lubrificante, reduz a área de contato cavaco ferramenta e diminui a força de usinagem. Entretanto quando prevalece uma ação refrigerante, o fluido de corte pode aumentar a força de usinagem, por promover o aumento da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento, pela redução da temperatura.

2.9 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade superficial é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície (REBRAC).

De acordo com Sanchez (2002), os parâmetros que mais influem na rugosidade superficial são: vibrações da máquina ferramenta, vibrações inerentes ao processo de corte (formação do cavaco), condições de corte (avanço, profundidade e velocidade de corte) e material da peça segundo.

ABNT NBRISO 4287 (2002), define como sendo rugosidade superficial a função do tipo de acabamento, da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado.

Erros macro geométricos ou erros de forma: são erros de formas, verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil etc.

Erros micro geométricos: São erros ocasionados pela direção do trabalho da ferramenta de corte e acabamentos geralmente imperceptíveis para o olho humano, também conhecido como rugosidade, necessitam de equipamentos especiais para sua verificação precisa.

2.10 TEMPERATURA DE CORTE

No processo de usinagem a energia mecânica é convertida em calor através da deformação plástica envolvida no cavaco e através do atrito entre a ferramenta e a peça. Este calor é um parâmetro que permite medir o desempenho da ferramenta durante o processo de usinagem. A contínua necessidade de aumento das velocidades de corte em processos de usinagem de alto desempenho tem impulsionado pesquisas de novos materiais resistentes a altas temperaturas, assim como estudos de maximização da taxa de remoção de material (D'ERRICO, G.E; apud CARVALHO et al, 2004).

Em cada um dos processos de corte as temperaturas máximas situam-se em regiões específicas, bem próximas à aresta de corte, onde as tensões atuantes (normais e cisalhantes) são extremamente elevadas (TRENT e WRIGTH, apud Sousa et al, 2010).

Durante o corte dos metais existem três regiões de geração de calor, definidas como zona de cisalhamento primário, zona de cisalhamento secundário e zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (MACHADO; apud SOUSA, 2010). As regiões de calor que são geradas durante o processo de usinagem podem ser observadas na figura 2.17:

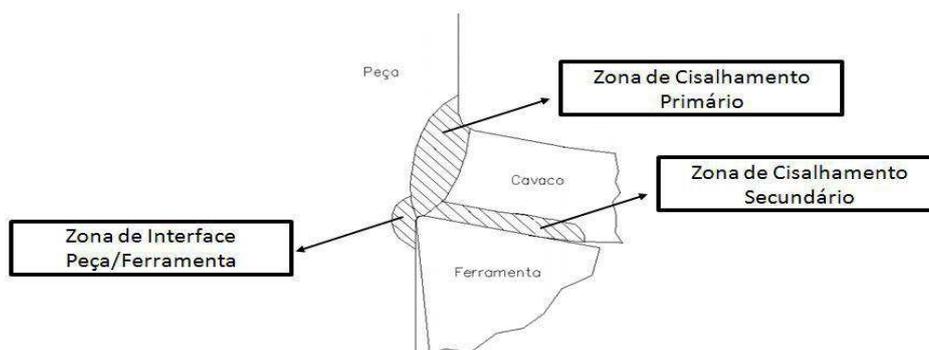


Figura 2.17 - Regiões de calor que são geradas durante o processo de usinagem.

Fonte: (MACHADO et al., 2009).

Diniz et al. (2006), afirmam que as porcentagens de calor total devido à cada uma das fontes de calor já mencionadas anteriormente variam de acordo com o tipo de usinagem, o material da peça e da ferramenta, as condições de usinagem e a forma da ferramenta. Porém numa primeira aproximação, pode se dizer que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são a principal fonte geradora de calor, seguindo pelo atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e depois pelo atrito peça-superfície de folga da ferramenta.

Este calor é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e do fluido de corte. O percentual do calor gerado que é dissipado por cada um dos meios citados também varia com os diversos parâmetros de usinagem. O calor que vai para a peça pode resultar em dilatação térmica da mesma, e portanto, correr os risco de danificação as estrutura superficial do material (DINIZ et al. 2006).

Diniz et al. (2006), também afirmam que a quantidade de calor gerada na usinagem aumenta com a velocidade de corte, avanço e profundidade da usinagem. Este aumento da geração de calor e conseqüentemente da temperatura, acelera e é acelerado pelo desgaste da ferramenta, o qual aumenta o valor do coeficiente de atrito e conseqüentemente a força de corte. A temperatura da zona de corte também é influenciada pelo comprimento de contato entre cavaco e ferramenta e pelos esforços de corte. Por outro lado deseja-se aumentar a produtividade do processo e para isso é necessário aumentar a velocidade de corte, a profundidade e o avanço. Para que haja um equilíbrio entre as questões mencionadas, existem alguns meios estudados que ajudam nesse equilíbrio:

- Desenvolvimento de ferramentas com maior resistência ao calor (maior dureza e quente).

- Utilização de fluidos de corte que além do efeito refrigerante, possuem também efeito lubrificante, ou seja, além de retirar calor da região de corte (efeito lubrificante), também consegue reduzir o calor gerado (efeito lubrificante).
- Desenvolvimento de materiais de usinabilidade melhorada (ou de corte livre) que possuem menor coeficiente de atrito com a ferramenta

2.11 FLUIDOS DE CORTE

A utilização dos fluidos de corte na usinagem na usinagem dos materiais foi introduzida por Frederick Winslow Taylor em 1890. Inicialmente Taylor utilizou água para resfriar a ferramenta, depois uma solução de água e soda, ou água e sabão para evitar alguma oxidação (DINIZ et al., 2006).

Em 1894, segundo Ruffino (1977), Frederick Winslow Taylor observou que aplicando grande quantidade de água na região de corte, era possível aumentar a velocidade de corte em 33%, sem prejuízo para a vida da ferramenta.

Essas descobertas desencadearam uma série de estudos e inovações tecnológicas para aplicação de novas misturas que pudessem ajudar nos processos de corte em usinagem.

O sucesso dos fluidos de corte nos dias atuais é também devido aos avanços conseguidos nos processos de fabricação dos fluidos, mas muito mais pelo desenvolvimento de novos aditivos (MACHADO et al., 2000).

2.11.6 Funções do Fluido de Corte

As principais funções de acordo com MACHADO (2000) são:

- Lubrificação à baixas velocidades de corte;
- Refrigeração à altas velocidades de corte;

Para Stoeterau (2004), suas funções vão além, também são:

- Redução do atrito entre ferramenta e cavaco

- Refrigeração da ferramenta
- Refrigeração da peça
- Expulsão dos cavacos gerados
- Melhoria no acabamento superficial
- Refrigeração da máquina-ferramenta
- Melhorias de caráter econômico

Sob baixas velocidades de corte, caso em que as temperaturas são mais baixas, a refrigeração é relativamente sem importância, enquanto a lubrificação é fundamental para reduzir o atrito e evitar a formação da aresta postiça de corte. Sob altas velocidades de corte, a temperatura de usinagem é mais elevada; além disso, as condições não são favoráveis para a penetração do fluido de corte na interface para que ele exerça suas funções (MACHADO et al., 2000).

Agindo como lubrificante, o fluido de corte contribui para reduzir o atrito e a área de contato ferramenta/cavaco, e sua eficiência vai depender da habilidade de penetrar na interface ferramenta/cavaco no curto período de tempo disponível e de formar um filme (seja por ataque químico, seja por absorção física) com resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da peça. Porém, como refrigerante, o fluido de corte favorece a transferência de calor da região de corte, reduzindo assim a temperatura da ferramenta e da peça, ainda que a temperatura na interface ferramenta/cavaco não seja significativamente alterada. Além disso, mesmo que a concentração de óleo seja mínima, haverá redução do coeficiente de atrito e, portanto, da temperatura. Demonstrou-se, de maneira experimental, que a eficiência do fluido de corte em reduzir a temperatura diminui com o aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte (SHAW apud MACHADO et al., 2009).

O fluido de corte está presente num processo de usinagem principalmente para lubrificação e refrigeração. Por isso Diniz et al (2006), faz algumas considerações a respeito dessas funções:

2.11.7 O fluido de corte como refrigerante

Os requisitos que um fluido de corte deve possuir para retirar eficientemente o calor da região de corte, da peça e das ferramentas são:

- Baixa viscosidade afim de que flua facilmente;
- Capacidade de “molhar” bem o metal para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica.

Algumas vezes o material da ferramenta é extremamente resistente ao desgaste e não necessita de fluido de corte para resfria-lo. Ainda assim, em alguns casos o, o refrigerante é usado para que nenhum dano seja causado à peça.

Alguns materiais de ferramentas, como por exemplo, os cerâmicos a base de óxido de alumínio, por serem muito duros e frágeis, não suportam a variação de temperatura, que os leva a trincarem ou ao mesmo tempo quebrarem. A utilização de fluidos de corte nestes casos é evitada, pois em geral, devido ao fato de que muitas vezes que o fluxo permaneça com vazão constante e também que a direção dele seja constante (muitas vezes o cavaco modifica a posição da mangueira de fluido de corte), não se consegue manter a temperatura de corte constante.

2.11.8 O fluido de corte como lubrificante

A lubrificação permite uma redução do coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta (principalmente, pois é na superfície de saída da ferramenta que se desenvolve as maiores temperaturas, devido a zona de aderência) e ferramenta e peça, que facilita o fluxo de cavaco, reduzindo a força e a potência de corte, bem como a temperatura.

O fluido penetra entre as superfícies em contato através do fenômeno da capilaridade, ajudada pela vibração entre a ferramenta, peça e cavaco. Se o fluido não conseguir chegar à região de corte é ele não vai conseguir ter efeito lubrificante.

Então para que um fluido seja um bom lubrificante é necessário que ele tenha as seguintes características:

- Resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Boas propriedades anti-fricção e anti-solantes;
- Viscosidade adequada – a viscosidade deve ser suficientemente baixa para:

- Permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta.

Além destas propriedades necessárias para refrigeração e lubrificação, outras propriedades são exigidas de um fluido de corte, quais sejam:

- Ausência de odores desagradáveis;
- Não corroer, mas, pelo contrário, ter a capacidade de proteger a peça e a máquina dos efeitos da corrosão;
- Não causar dano à pele humano e nenhum outro risco à saúde.

2.11.9 Regiões de ação do fluido de corte

A Figura 2.18 mostra detalhadamente as principais regiões da ação dos fluidos de corte na região cavaco-peça-ferramenta e a diminuição do calor gerado nessas regiões.

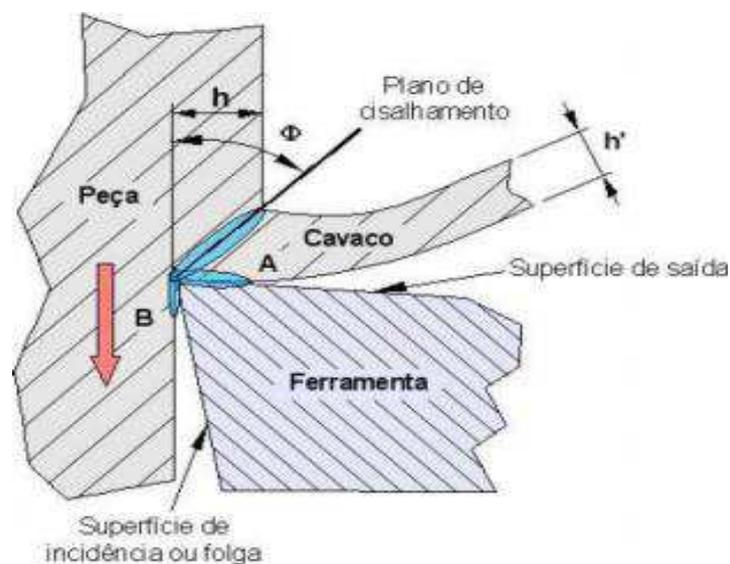


Figura 2.18 – Regiões da ação do fluido de corte na região cavaco-peça-ferramenta.

Fonte: (Stoeterau, 2004)

- Zona A: diminuição do atrito na interface ferramenta-cavaco (diminuição do calor gerado);
- Zona B: diminuição do atrito na interface peça-ferramenta (diminuição do calor gerado);

- Zona C: diminuição do atrito entre a ferramenta e o cavaco (aumento do ângulo de cisalhamento f e a diminuição na taxa de deformação).

2.11.10 Métodos de aplicação dos fluidos de corte

De acordo com Monici et al. (2001), os benefícios obtidos com a utilização do fluido de corte são a capacidade de refrigeração, lubrificação e remoção do cavaco gerado, porém a sua utilização é feita de forma inadequada. Um exemplo dessa má utilização é a dispersão de fluido no momento da usinagem, resultando em grandes perdas. A lubrificação e a refrigeração dependem da efetiva entrada de fluido na região de corte, não havendo a necessidade de volumes elevados de fluido, mesmo que parte deste não esteja penetrando na região de corte efetivamente. Porém, o tipo e o posicionamento do bocal exercem grande influência no processo de corte.

Segundo Iceri et al. (2012), os fluidos de corte são aplicados na forma de inundações, jato ou neblina, que são as práticas mais comuns para redução da temperatura da zona de corte. Assim, suas funções básicas são de resfriar a peça, retirar os cavacos formados e lubrificar a região de corte. E graças a tais efeitos, há uma redução na força de atrito de fricção entre as faces de apuramentos dos grãos abrasivos e da peça. Dessa forma, a potência de entrada é reduzida e a geração de calor é limitada.

Um jato de fluido incidindo de forma direta sobre a região de corte é capaz de reduzir de forma significativa a temperatura na região de corte, porém altas velocidades do jato de fluido são necessárias (WEBSTER; apud MONICI, 2001).

De acordo com Soares (2016), existem três formas de aplicação de fluidos de corte líquidos, estão são descritas assim:

- Jorro de fluido de corte

Para cada tipo de fluido de corte existem formas e técnicas diferenciadas para aplicação. Para os fluidos de corte líquidos, a técnica mais empregada é o jorro; a ação aqui é por gravidade ou baixa pressão. Ele consiste na aplicação do fluido de corte líquido em um ou mais dos três pontos mostrados na Figura 2.19:

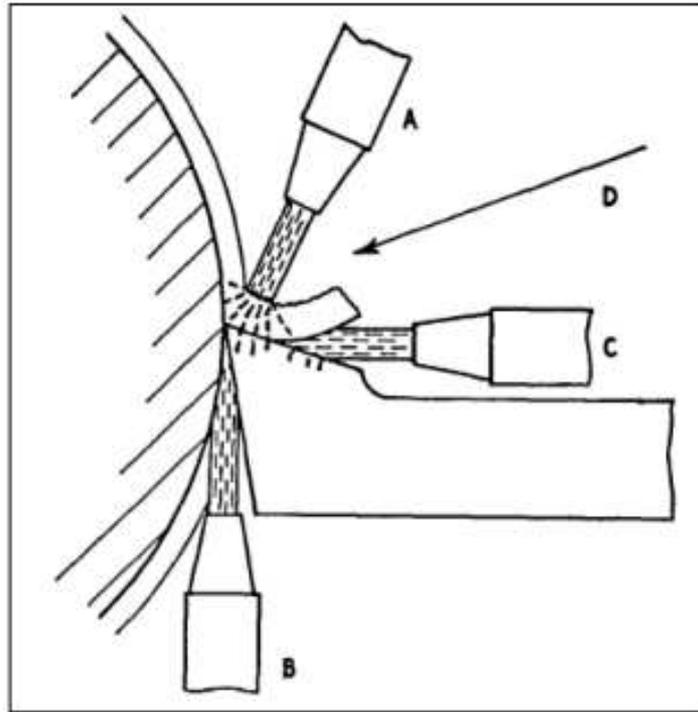


Figura 2.19 – Regiões de aplicação do fluido de corte

Fonte: Soares, C. L. (2016)

- Fluido de corte sob alta pressão

Jatos sob alta pressão se tornaram uma técnica poderosa para auxiliar o fluido de corte a atingir regiões muito próximas à aresta de corte (NAVES, et al., 2013). A Figura 2.20 traz a representação da aplicação do fluido de corte sob altas pressões:

(KRAMAR, et al; apud SOARES,2016) afirma que aplicação do fluido com jato sob alta pressão poderá ser:

- a) utilizando bico externo, em que o fluido é aplicado entre a superfície de saída e o cavaco;
- b) utilizando bico externo, em que o fluido é aplicado entre a superfície de folga e a peça ou
- c) utilizando pequenos furos na própria ferramenta.

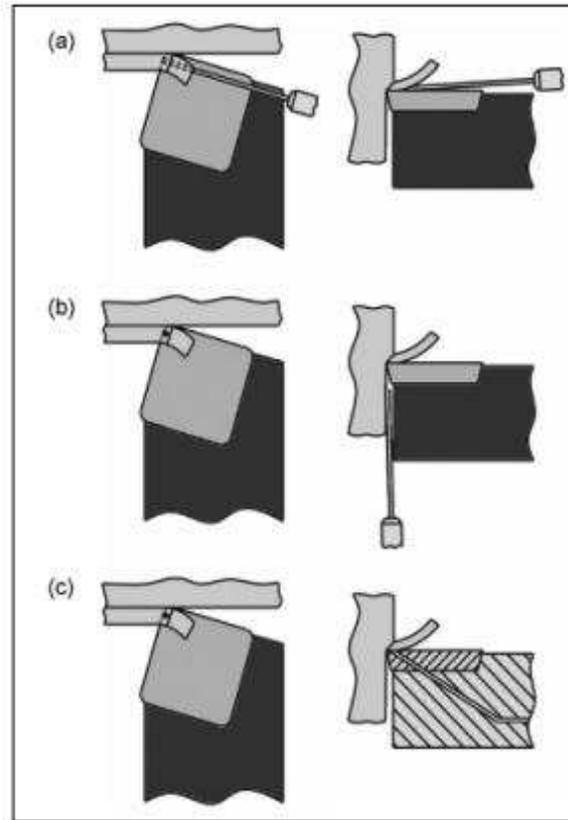


Figura 2.20 – Aplicação do fluido de corte sob alta pressão.

Fonte: Soares, C. L. (2016)

- Mínima quantidade de lubrificação

A Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), destaca-se atualmente como uma tendência dentre os métodos de lubri-refrigeração empregados nos processos de usinagem em geral, já que esse método reduz de forma significativa o volume de fluido utilizado. Tal técnica é responsável por trazer benefícios para as indústrias aumentando sua competitividade no mercado, além de trazer ótimos benefícios em aspectos ecológicos e econômicos, dispensando toda a salubridade e onerosidade envolvida com o descarte de fluidos convencionais (TASDELEN et al; apud Destro et al (2010).

Nesse método de acordo com (ATTANASIO et al., 2006 apud SOARES,2016) , uma baixa vazão de fluido (mililitros/hora em vez de litros/minuto) é aplicada diretamente na região de corte. A remoção de cavacos é realizada pelo fluxo de ar usado para conduzir o lubrificante. A aplicação de MQL pode ser realizada de duas formas:

(a) Misturando o fluido e o ar pressurizado dentro do bico por um dispositivo misturado. A mistura é realizada no bico e a lubrificação é conferida pelo fluido

lubrificante, enquanto uma ação refrigerante mínima é obtida pelo ar pressurizado que atinge a superfície.

(b) Misturando o fluido externamente ao bico em um dispositivo misturador posicionado em um tanque específico. A lubrificação entre a peça e a ferramenta também pode ser obtida; todavia, eles não deixam claro as vantagens e as desvantagens da utilização deste último sistema. Esses dois tipos de sistema de MQL são representados na Figura 2.21:

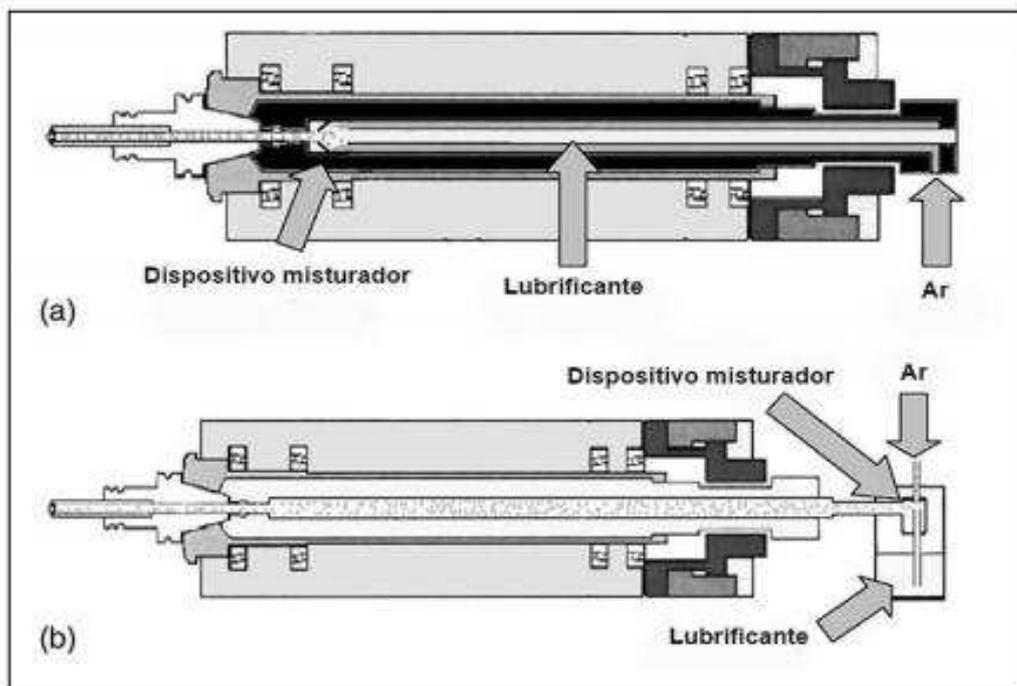


Figura 2.21 – Dispositivos para mistura do fluido MQL.

Fonte: Soares, C. L. (2016)

2.12 EFEITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA NA USINABILIDADE

Os aços de corte-livre também conhecido como aços resulfurados de corte fácil foram idealizados para melhor resultado nas operações de usinagem. Segundo Troiani (2004), são ligas ferro-carbono (com baixo ou médio teor de carbono) às quais se adicionam, basicamente, enxofre (S) e manganês (Mn) e outros elementos para melhorar sua usinabilidade, ou seja, aumentar a vida das ferramentas, diminuir o esforço de corte, aumentar as velocidades de trabalho e melhorar o acabamento (rugosidade) das superfícies usinadas.

Para Chiaverini (2005), os aços comuns, além do carbono que é o seu principal elemento de liga, apresentam manganês, silício, fosforo e enxofre como elementos sempre presentes, em função das matérias-primas que foram utilizadas na fabricação do ferro gusa e do aço. Por essa razão, esses elementos são normalmente especificados.

- **Carbono** – é o responsável pela dureza do material no estado recozido e normalizado e pela sua temperabilidade. O carbono é quem determina a estrutura e, em consequência, as propriedades mecânicas do aço no estado recozido e normalizado.

- **O Manganês** – em teores dentre 0,30 e 0,60%, atua como desoxidante do mesmo modo que o silício e como dessulfurante, ao combinar-se com o enxofre de preferência ao ferro, formando um sulfeto de Mn, eliminando o problema da fragilidade a quente que pode ocorrer na presença do FeS.

Segundo Pimentel (2006), embora os aços resulfurados baixo-carbono que contêm 0,10, 0,20 e 0,30% de enxofre sejam comumente usados em aplicações de usinagem, os mais usuais são aqueles que contêm nominalmente 0,30% de enxofre.

- **O enxofre** foi o primeiro aditivo a ser usado para melhorar a característica de boa usinabilidade nos aços. Devido a sua eficiência e baixo custo, o enxofre continua a ser fortemente utilizado até hoje como aditivo que proporciona bom desempenho de usinagem. Assim, o enxofre age como um agente “calmante” e reduz a tendência de formação de bolhas conhecidas como “blowholes”, que se formam durante a solidificação dos aços de corte fácil baixo-carbono. Felizmente, os aços que são utilizados em aplicações que exigem um elevado nível de usinabilidade são elaborados com níveis de enxofre e manganês suficientemente altos. Assim, estes aços já são inerentemente semi-acalmados, não havendo a necessidade de adição de desoxidantes, tais como silício e alumínio, extremamente prejudiciais à usinabilidade.

- **Fósforo** – em alguns tipos de baixo carbono, pode-se introduzir fósforo além dos teores normais; esse elemento, como se sabe, dissolve-se na ferrita cuja dureza e resistência mecânica ficam aumentadas, o que melhora a usinabilidade, pois promove a ruptura dos cavacos na usinagem. Não se ultrapassa, entretanto 0,12% de P, pois do contrário, os seus efeitos negativos poderiam prevalecer (CHIAVERINI, 2005).

2.13 TESTES DE USINABILIDADE

O índice de usinabilidade dos materiais depende de inúmeros parâmetros como vida da ferramenta, força de corte, velocidade de corte, desgaste, temperatura de corte, acabamento superficial e controle de cavaco para formar o ranking de comparativo entre os materiais.

Para Trent apud MACHADO et al., 2009 usinabilidade pode ser definida como sendo uma grandeza que indica uma facilidade ou dificuldade de se usinar um material.

Machado (2000) afirma que usinabilidade não se limita apenas a quantificação da facilidade ou dificuldade de se usinar matérias. Seu índice pode ser usado também para indicar as performances de ferramenta de corte, fluido de corte e geometria da ferramenta de corte. Já que as dificuldades podem ser encontradas nos casos anteriormente citados.

A maneira de definir a usinabilidade dos materiais é por base dos ensaios de usinabilidade que através de conceitos e testes já definidos pode quantificar a facilidade ou não dos materiais. De acordo com Machado (2000), a grande contribuição dos ensaios de usinabilidade é a geração dos de banco de dados de usinagem, que apesar de ser uma tarefa árdua é de grande contribuição. Por meio dos ensaios de usinabilidade pode-se catalogar resultados e gerar informações práticas preciosas do ponto de vista de chão de fábrica.

2.13.6 Tipos de ensaio de usinabilidade

De acordo com Mills e Redford citados por MACHADO et al., 2009, os testes de usinabilidade podem ser classificados em ensaios que requerem usinagem, também conhecidos como testes absolutos que são aqueles que indicam os méritos relativos de duas ou mais combinações de pares de ferramentas para cada faixa e condição de corte e ensaios que não requerem usinagem conhecidos como ranking testes, que são aqueles que meramente indicam a usinabilidade relativa de duas ou mais combinações de pares de ferramenta-peça, para uma dada condição de corte.

Os testes que não requerem usinagem (ranking testes) são sempre de curta

duração. Os testes que requerem usinagem (ranking ou testes absolutos) são sempre de longa duração.

Segundo Diniz (2006), os ensaios de curta duração são assim chamados, porque são utilizados em condições forçadas de usinagem ou os materiais de ferramenta são pouco resistentes aos desgastes, a fim de que a vida da ferramenta termine rapidamente e o ensaio possa ser realizado em curto espaço de tempo. A partir de disso, os testes que não requerem usinagem são:

- Teste de composição química

CZAPLICKI (1962), citado por MILLS E REDFORD (1983), diz que ao se conhecer a composição química do material, pode-se relacioná-la a uma medida de usinabilidade. Este encontrou a seguinte relação para a velocidade de corte para uma vida de 60 min, de acordo com a fórmula a seguir:

$$V_{c60} = 161.5 - 141.4 \times \%C - 42.4 \times \%Si - 39.2 \times \%Mn - 179.4 \times \%P + 121.4 \times \%S \quad (3.2)$$

- Teste de microestrutura

Segundo o trabalho desenvolvido por ZLATIN e FIELDS (1950), citado por MILLS e REDFORD (1983), uma das maneiras de classificar a usinabilidade dos materiais é por meio da microestrutura relacionado a dureza do mesmo.

- Teste de propriedades físicas - R

HENKIN E DATSKO (1963), citado por MILLS E REDFORD (1983), relacionam a medida da usinabilidade de materiais metálicos e suas propriedades como condutividade térmica do material, comprimento do material ensaio, dureza e redução de área obtida em ensaio de tração.

Exemplo de testes que requerem usinagem:

- Teste de pressão constante

Proposto por BOULGER (1951), citado por MILLS e REDFORD (1983), o teste de pressão constante de curta duração consiste em aplicar uma força de avanço constante e medir o tempo para se furar uma chapa de espessura fixa, ou fixar um determinado tempo e medir o percurso de avanço.

- Teste de faceamento rápido

Este teste foi proposto POR KRAUS E WEDDELL (1937) e LORENZ (1970), citados por MILLS e REDFORD (1983), é outro teste prático e de curta duração,

que consiste em facear um disco do centro para a periferia, normalmente com ferramenta de aço-rápido. A medida de usinabilidade pode ser o tempo para a falha da ferramenta, ou o percurso de avanço até atingir a falha.

- Teste de torneamento cônico

Este teste foi proposto por HEIGINBOTHAM e PANDEY (1966), citado por MILLS E REDFORD (1983), é classificado como absoluto, porém considerado de curta duração.

- Teste da taxa de desgaste - A (Taylor)

O melhor exemplo de teste absoluto de longa duração é o teste de vida da ferramenta. Os resultados são geralmente apresentados usando a equação de Taylor.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 METODOLOGIA

O levantamento do tema “Estudo da Usinabilidade do Aço-Carbono SAE AISI Ressulfurados com Base no Teste de Composição Química”, baseado nos estudos de CZAPLICKI (1962), foi o principal responsável para levantamento das informações e dados necessários para a conclusão deste trabalho.

A ideia principal para aplicação do teste de composição química é de que para indicar uma medida de usinabilidade de um material é necessário apenas conhecer os elementos de composição química do mesmo. Segundo os estudos de CZAPLICKI (1962), citado por MILLS et al. (1983), ele definiu uma relação em que conhecendo faixas de composição de um aço em uma velocidade de corte para uma vida de 60 minutos no torneamento destes, com ferramentas de metal duro para se ter uma medida de usinabilidade. De acordo com esses estudos a aplicação desse método reivindica uma precisão de mais ou menos 8% nos resultados encontrada com a aplicação da equação a seguir:

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

Esta relação permite que seja investigada a influência de faixas de composição química nos aços como enxofre, fósforo, manganês, silício e o próprio carbono na usinabilidade. Acredita-se que apesar de estarem em faixas especificadas para serem usados, a variação dessas adições são as principais responsáveis pelo desempenho durante o processo de usinagem e sua usinabilidade.

A partir disso, foram escolhidos valores que se aproximavam de faixas médias dos intervalos dos componentes de composição dos aços carbonos ressulfurados encontrados para este estudo.

Para que se pudesse conhecer a usinabilidade dos aços carbonos ressulfurados com base na equação do teste de composição química conhecida através dos estudos de CZAPLICKI (1962), foram utilizados softwares de processamentos de dados para geração de resultados com base nos dados estabelecidos como médias das faixas de

cada aço carbono resulfurado utilizados neste estudo, além do uso de ferramentas de planilha para geração de gráficos de barras e de linha para comparar os resultados obtidos.

Com o uso de software de processamento de dados, foi criada uma rotina de programação para que os dados escolhidos conforme a Tabela 3.1 fossem adicionados à equação, para que as respostas obtidas tivessem maior exatidão e precisão. Ao se conhecer os valores de usinabilidade, foi utilizado um desenvolvedor de planilhas para criação dos gráficos de barras e linhas para a comparação dos resultados obtidos, melhorando a exatidão e compressão das comparações entre os resultados e teores de composições químicas dos aços-carbonos resulfurados.

3.2 MATERIAL ENSAIADO

Os materiais utilizados neste trabalho foram encontrados em “*Informet*” e “*Classificação dos Aços por Professor Adriano Scheid*”, a partir de disso com a Tabela 3.1 construiu-se um banco de dados para aplicação do teste de usinabilidade com base no teste de composição química.

Os aços carbonos resulfurados analisados possuem os dados que correspondem à equação, viabilizando a aplicação do teste de composição química.

Tabela 3.1 – Faixa dos teores de composição dos aços-carbonos resulfurados.

SAE/AISI	% CARBONO	% MANGANÊS	% FOSFÓRO	% ENXOFRE
1117	0.14-0.20	1.00-1.30	0.030	0.08-0.13
1118	0.14-0.20	1.30-1.60	0.030	0.08-0.13
1137	0.32-0.39	1.35-1.65	0.030	0.08-0.13
1140	0.37-0.44	0.70-1.00	0.030	0.08-0.13
1141	0.37-0.45	1.35-1.65	0.030	0.08-0.13
1144	0.40-0.48	1.35-1.65	0.030	0.24-0.33
1146	0.42-0.49	0.70-1.00	0.030	0.08-0.13

Fonte: (INFOMET, 2017; SCHEID, A. 2016)

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

A aplicação da relação de composição química para faixas de materiais aditivos dos aços-carbonos resulfurados, para uma velocidade de corte num parâmetro de vida de 60 minutos no torneamento dos mesmos, com ferramenta de metal duro, resultou na obtenção de índices de usinabilidade com precisão de mais ou menos 8% conforme os estudos de CZAPLICKI (1962). Os valores obtidos através desta equação para os sete aços resulfurados utilizados como base para estudo deste trabalho, podem ser observados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Teores de composição usados no calculo de usinabilidade.

SAE/AISI	% C	% Mn	%P	%S	USINABILIDADE[m/min]
1117	0.16	1.25	0.029	0.09	95.6
1118	0.17	1.55	0.028	0.10	83.81
1137	0.36	1.60	0.027	0.11	56.38
1140	0.41	0.95	0.026	0.10	73.76
1141	0.42	1.60	0.025	0.09	45.83
1144	0.45	1.60	0.024	0.29	66.05
1146	0.46	0.97	0.023	0.09	65.23

Fonte: (INFOMET, 2017; SCHEID, A. 2016)

Os aços-carbonos resulfurados não possuem adição de silício em sua composição, por isso ao ser calculado o índice de usinabilidade de cada material o monômio referente à adição de silício ($42.4 \times \%Si$) no teste de composição química tem valor igual à zero, e os resultados encontrados não possuem nenhuma influência deste.

Os índices de usinabilidade encontrados conforme a Tabela 4.2, possuem faixas distintas em seus teores de composição se comparados, explicando assim as diferenças entre resultados de cada material no teste de composição química.

Observando a Figura 4.1 construído para melhor entender as diferenças de usinabilidade encontrada entre os materiais estudados, é possível perceber a influência

das adições das substâncias químicas e a diferença das faixas de seus teores percentuais de composição no desempenho dos aços-carbonos resulfurados no processo de usinagem.

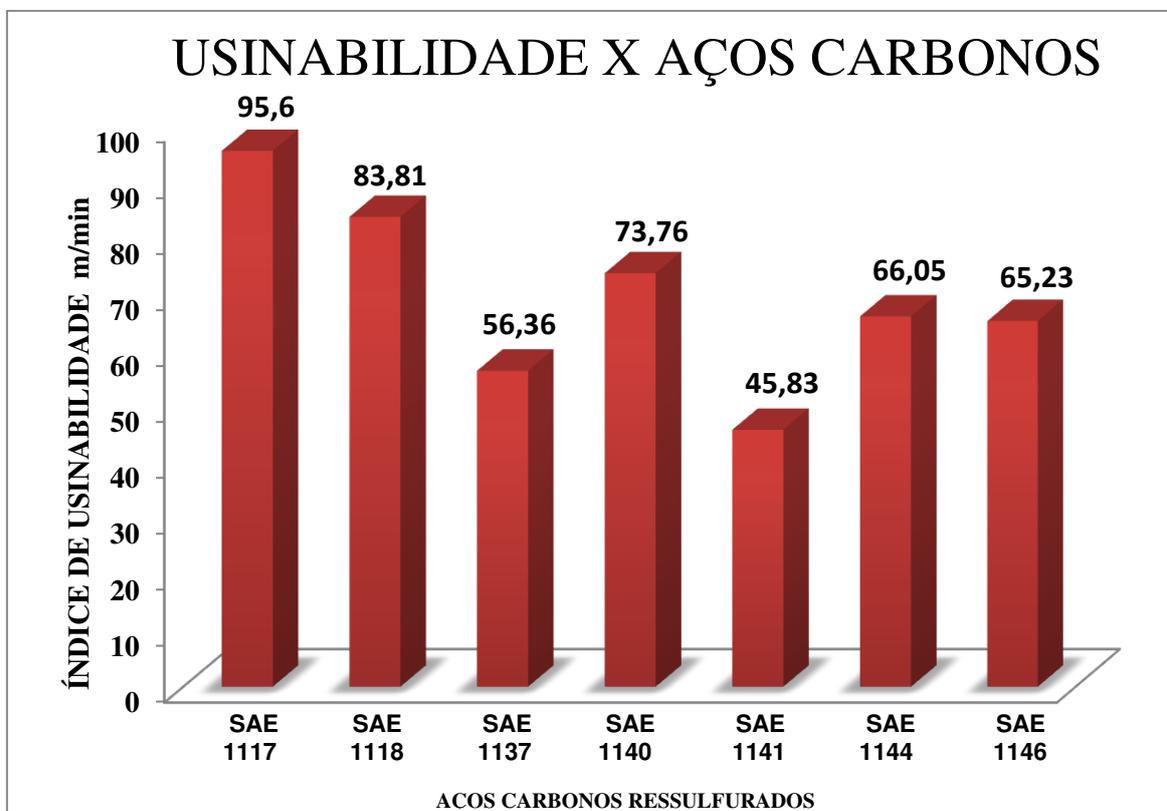


Figura 4.1 – Relação da usinabilidade com os aços-carbonos resulfurados.

(Fonte: Autor)

Os teores de carbono nos aços de classificação 11XX, os mesmos estudados neste trabalho podem chegar até 0,55% por conta de suas aplicações, além de ótimos índices de usinabilidade e propriedades mecânicas, segundo Diniz (2006).

Observando a Figura 4.2, é possível perceber que na maioria dos materiais da classe dos resulfurados quanto maior o teor de carbono, menor o índice de usinabilidade, com exceção do aço-carbono resulfurado SAE AISI 1140, pois possui maior diferença na faixa de adição dos outros teores de composição. De acordo com Chiaverini (2005), os aços com adições de carbono em até 20% são utilizados em processo de laminação. A introdução controlada de inclusões não metálicas melhora a usinabilidade dos aços. É o caso dos aços com baixo teor de carbono, podendo introduzir teores de fósforos. A adição dessa substância tende a aumentar a dureza e a resistência mecânica, melhorando a usinabilidade. Muitos autores apontam que adição

de fósforo nunca deve ultrapassar 0,12%, pois acima disso os efeitos negativos dessa adição passam a prevalecer.

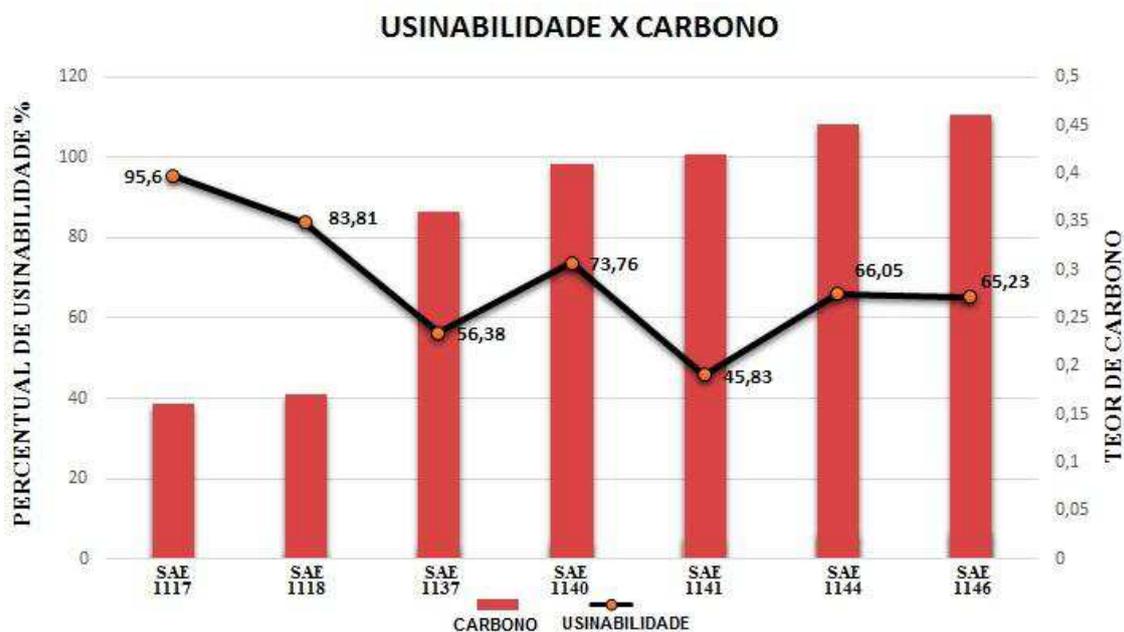


Figura 4.2 – Comparação entre usinabilidade e teor de carbono dos aços-carbonos resulfurados.

(Fonte: Autor)

Observando a Figura 4.3 de relação de usinabilidade e teor de fósforo, é possível entender que na maioria dos casos, quanto menos a adição de fósforo, menor será a usinabilidade dos materiais. Observando o comportamento do aço SAE AISI 1140, a redução de fósforo pouco influencia na redução da usinabilidade do mesmo, isso acontece porque as faixas de inclusões de fósforo dos aços estudados são muito próximas, pouco influenciado no índice de usinabilidade se comparado com outros teores de composição, como o manganês.

A Figura 4.4 mostra que quanto maior a adição de manganês menor é a sua usinabilidade, isso não quer dizer a adição de sulfeto de manganês (MnS) desfavoreça parâmetros como resistência e dureza, mas sim que favorecem a formação de cavacos quebradiços, atuando também como lubrificante, diminuindo as chances do cavaco aderir na superfície da ferramenta de corte.

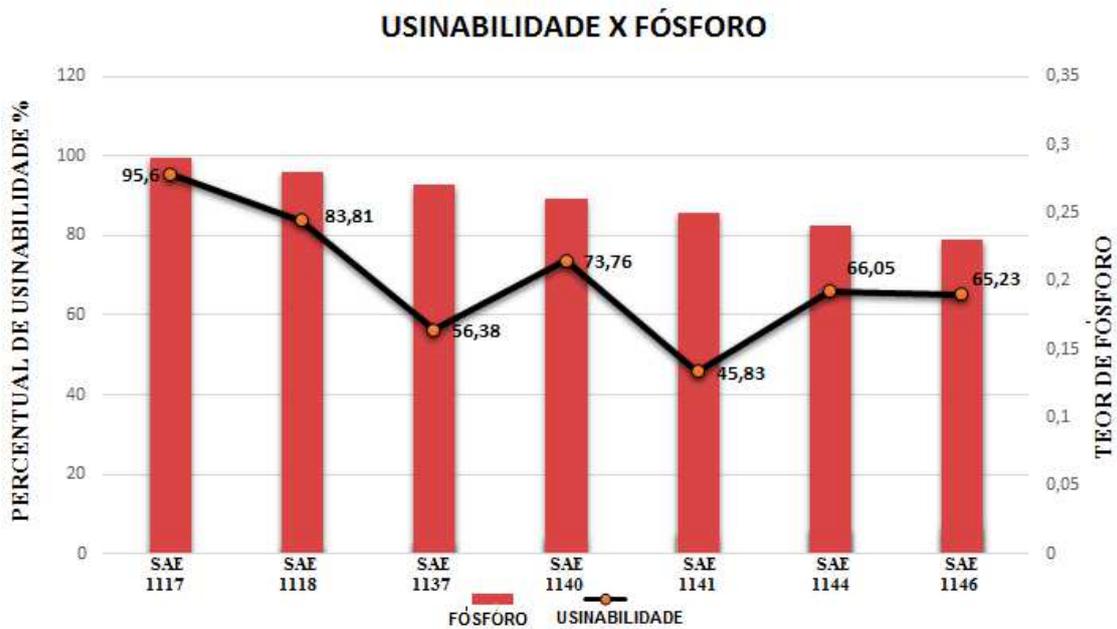


Figura 4.3 – Comparação entre usinabilidade e teor de fósforo dos aços-carbonos resulfurados.

(Fonte: Autor)

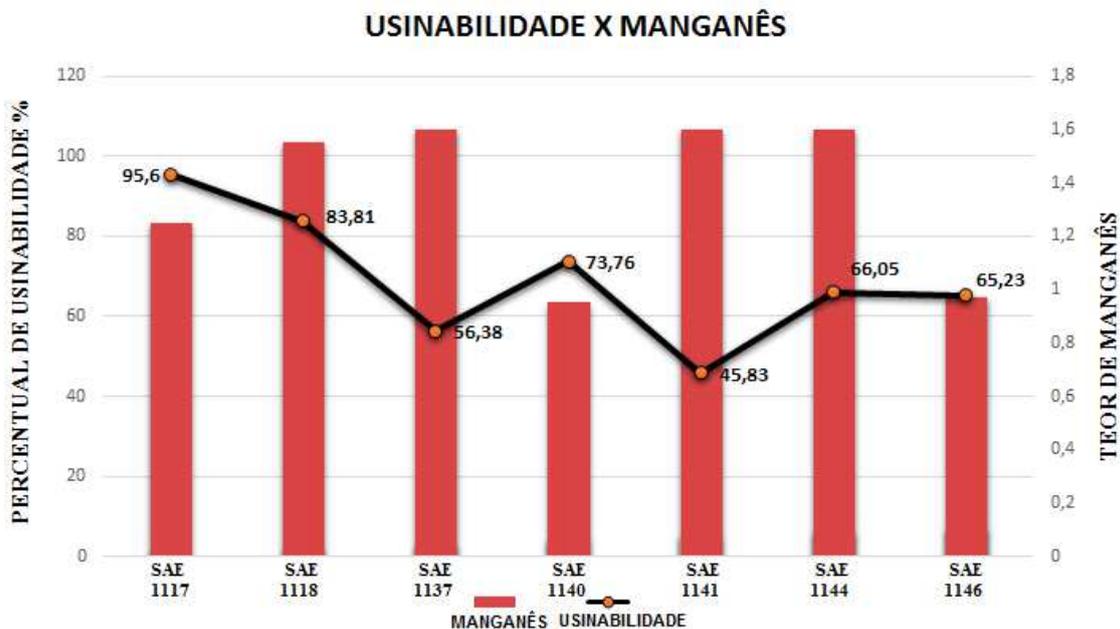


Figura 4.4 – Comparação entre usinabilidade e teor de manganês dos aços-carbonos resulfurados.

(Fonte: Autor)

Outro ponto importante a se analisar na figura é de que o aço SAE AISI 1140 tem um aumento de usinabilidade se comparado aos três aços que o antecedem que estavam em decréscimo com o aumento da adição de manganês, isso ocorre porque a

faixa de teor de manganês está muito abaixo se comparado aos outros aços, tendo um comportamento inverso aos demais, possuindo assim um aumento na sua usinabilidade.

O mesmo pode ser observado com o aço-carbono SAE AISI 1144 na Figura 4.4, que apesar de ter um alto teor de manganês, este possui um aumento na sua usinabilidade. A explicação para isto está na inclusão de sulfeto de manganês, obtido através da combinação com o enxofre, onde as faixas de combinação desses teores são mais elevadas que os demais aços.

A Figura 4.5 de relação da usinabilidade com teores de enxofre confirma essa explicação de que quanto maior a adição de enxofre, menor a usinabilidade dos materiais estudados, com exceção do SAI AISI 1144 que possui maior teor de enxofre aumentado assim a sua usinabilidade do aço ao se combinar com manganês.

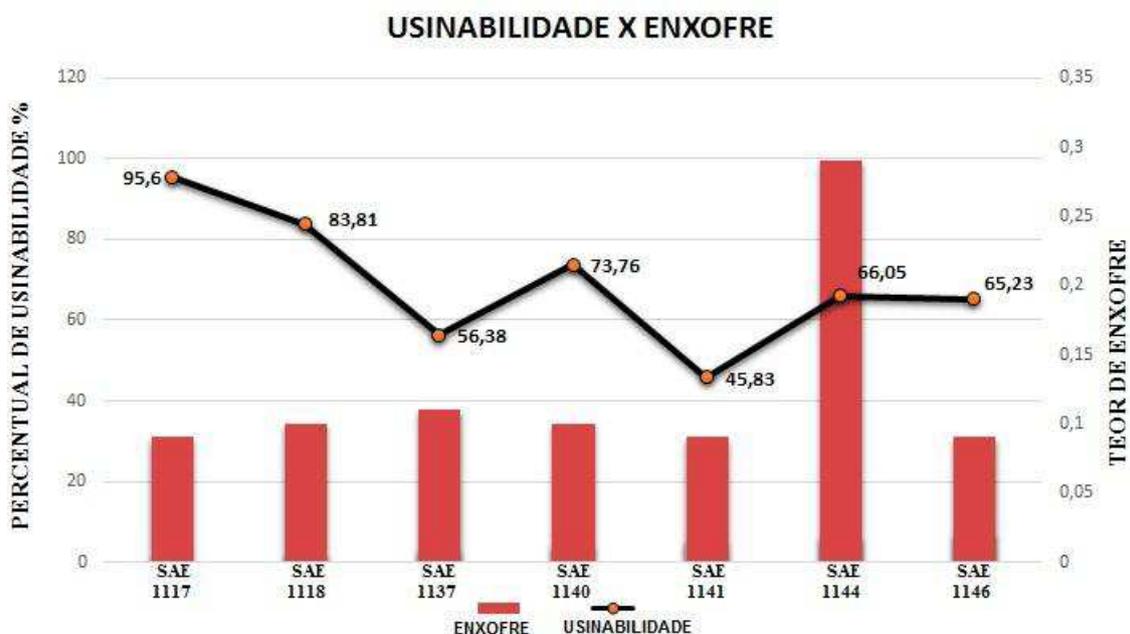


Figura 4.5 – Comparação entre usinabilidade e teor de enxofre dos aços-carbonos resulfurados.

(Fonte: Autor)

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados encontrados através estudos Czaplicki (1962), permitiu que fossem investigados teores que compõem parte da classificação dos aços-carbonos SAE AISI resulfurados. A partir dos resultados obtidos, foram possíveis as seguintes conclusões:

- A influência na usinabilidade a partir das inclusões não metálicas nos aços, como o sulfeto de manganês, obtido através da adição de enxofre combinado com manganês;
- A mistura enxofre manganês é uma das principais influências nos índices de usinabilidade dos materiais;
- Quanto maiores às faixas de teores de enxofre e manganês, menor será a usinabilidade do material;
- A adição o sulfeto de manganês (MnS) favorece a usinabilidade do aço, a formação do cavaco quebradiço e a dificuldade em permitir que este adira à superfície da ferramenta, agindo como lubrificante, tornando a usinagem mais rápida, com menor potência e melhor acabamento superficial;
- O SAE AISI 1144 possui maiores faixas de enxofre, pois este aço é projetado para formação em produtos forjados, em que oferecem melhor resposta à tratamentos térmicos;
- A Tabela 4.3 revelou que quanto menor as faixas de adição de fósforo, menor tende ser a usinabilidade, isso ocorre devido ao aumento das faixas de adição de carbono, já que ambos são caracterizados por não serem muito compatíveis;
- Apesar desta incompatibilidade entre os componentes, o fósforo melhora a resistência à corrosão, além de aumentar à dureza do aço que por si aumenta a resistência à tração;
- O aproveitamento do fósforo é perceptível principalmente quando são menores as inclusões de carbono nos aços;
- No SAE AISI 1117 onde o teor de fósforo é maior e possui menor teor de carbono, percebe-se que este possui à melhor usinabilidade comparado este aos demais materiais;

Como sugestão para futuros trabalhos nesta linha de pesquisa recomenda-se:

- Estudo o custo de usinabilidade dos aços-carbonos resulfurados com base nos índices de usinabilidade com base no teste de composição química;
- Estudo da usinabilidade dos aços-carbonos resulfurados com base no teste de propriedades físicas;
- Estudo dos aços-carbonos refosforados com base no teste de composição química;

REFERÊNCIA

APPLE, C. A. **The relationship between inclusions and the machinability of steel:** Mechanical Work And Steel Processing Conference. Chicago, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRISO 4287:** Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18p.

BORBA, Vinicius R. **Análise da força de usinagem e da rugosidade no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de pcbn e de metal-duro.** 2016. 169p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal, Santa Catarina.

CARVALHO, S. L.; SILVA, S. M. M. L.; MACHADO, À. R.; GUIMARÃES, G. Determinação da temperatura na interface cavaco ferramenta a partir da modelagem 3d do conjunto ferramenta e porta-ferramenta. 14º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Disponível: < <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/14/TRB/TRB1441.pdf> >. Acesso em: 02 nov. 2017.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 7ª Edição, São Luís: ABM (Associação Brasileira de metais), 2005.

CZAPLICKI, L. **L'usinabilite et al Coupe de Metaux,** Res. Soc. Roy. Belge Ingeniere, 12, p 708-736. 1962.

DESTRO, R. S.; ICERI, D. M.; SOUSA R. M.; OIKAWA, M. H.; BIANCHI E. C.; AGUIAR, P. R.; FORTULAN, C. A. **Mínima Quantidade De Lubrificação (Mql) – Uma Alternativa À Retificação Plana De Cerâmicas Para Uma Melhoria Socioeconômica E Ambiental.** Disponível em: < [http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2010/PDF/CON10-0449 .pdf](http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2010/PDF/CON10-0449.pdf) > Acesso em: 20 out.2017.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da usinagem dos materiais.** São Paulo: Artibler, 2006.

FERRARESI, DINO. **Fundamentos da Usinagem dos metais**. v. 1. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

FILHO, R. **O aço na sociedade Atual**. Disponível em: <<https://qualidadeonline.wordpress.com/2012/04/12/o-aco-na-sociedade-atual/>> Acesso em: 15 de setembro de 2017.

HUTCHINGS, L M. **Tribology: friction and uiear of engineering materiais**. Londres: EdwardArnold, 1992.

ICERI, D. M.; SOUSA R. M.; DESTRO, R. S.; OIKAWA, M. H.; BIANCHI E. C.; AGUIAR, P. R.; FORTULAN, C. A. **Comparação entre os métodos de aplicação de fluido de corte convencional e otimizado na retificação plana de cerâmicas**. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v58n345/14.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2017.

INTITITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **2007 – Siderurgia Brasileira: Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2007.

KONIG, W; KLOCKE, F, **Fertigungsverjahren: Drehen, Frâseri und Bohren**. Berlim, Heidelberg, 1997.

KRAMAR, D.; KRAJNIK, P.; KOPAC, J. Capability of high pressure cooling in the turning of surface hardened piston rods. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 2, p. 212–218, jan. 2010.

MACHADO, A.R. **Condições da interface cavaco-ferramenta. Parte 1: Generalidades**. XI COBEM, 11-13 dezembro 1991.

MACHADO, A.R. **Condições da interface cavaco-ferramenta. Parte 1: Generalidades**. XI COBEM 11 a 12 de dezembro de 1992, São Paulo.

MACHADO, Á. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica da UFU, 4º versão, 1999.

MACHADO, À. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. Apostila didática, 7ª versão. UFU, Uberlândia, 2009.

MILLS, B.; REDFORD, A.H. **Machinability of Engineering Materials**. Applied Science Publishers, London, 1983.

MONICI, R. D.; BIANCHI, E.C.; FREITAS, J. R. Estudo Do Método De Aplicação De Fluidos De Corte No Processo De Retificação. **1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Disponível em: < <http://abcm.org.br/anais/cobef/2001/tcob051.pdf>> Acesso em: 15 out. 2017.

NAVES, V. T. G.; DA SILVA, M. B.; DA SILVA, F. J. **Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel**. Wear, v. 302, n. 1-2, p. 1201–1208, abr. 2013.

PIMENTEL, Marcelo F. **Influencia da Composição Química e da Microestrutura na Usinabilidade do Aço de Corte Fácil com Adição de Chumbo SAE 12L14**. Guaratinguetá – SP, 2006.

PIMENTEL, M. F.; PRADO, E. L.; MIYADA, K. Avaliação da usinabilidade dos aços de corte fácil através da elaboração de curvas de usinabilidade (Curvas de Taylor) com uso de ferramentas de corte de aço rápido. In: Congresso Anual da ABM, 60., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004. p. 3928-3936.

RUFFINO, R. T. **Fluidos de corte. In Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1977.

REBRAC, I. D. Rugosidade conceitos. **DEMEC/UFPR**. Disponível em: < <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM314/Nova%20pasta/RUGOSIDADE%20-conceitos-.pdf>. Acesso em: 21 out. 2017.

SAMPAIO, A. B.; SILVA, R. B.; MACHADO, À. R.; SOUZA, M. N.; LUIZ, N. E. **Influência Do Teor De Carbono Na Usinabilidade Do Aço De Corte-Fácil Abnt 12114**.

V Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/011071261.pdf>> Acesso em: 20 out. 2017.

SILVA, Francisco V. P. **Força de corte gerada por torneamento – um estudo de caso das ligas Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-Nb-Ni passíveis do efeito memória de forma.** 2014. 124p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

SOARES, Christianne L. **Influência Do Modo De Aplicação Do Fluido De Corte Sobre A Usinabilidade Do Aço Abnt 4340 No Torneamento.** 2016. 111p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J 403 – 2001:** Chemical compositions of SAE carbon steels. SAE Handbook, v. 1, p. 13-17, 2004.

SOUSA, J. A. G.; SOUSA, M. N. Análise da Temperatura de Usinagem no Corte Ortogonal de Alumínio. **20º Simpósio Do Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica.** Disponível em:<<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/20/pdf/alissonposmec20joseaeciogomesdesousa.pdf>> Acesso em: 20 out. 2017.

SÁNCHEZ CARRILERO, Manuel. Estudo da rugosidade da usinagem da liga Al-Cu AA 2024. p. 283- 288, 2002.

SHAW, M. C. **Friction characteristics of sliding surfaces undergoing subsurface plastic flow.** Treme of ASME. J Basic, 1960.

STOETERAU, R. L.; SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Processo de Usinagem: Fabricação e remoção de material.** Florianópolis, 2004.

TRENT, E. M. **Cutting steel and iron with cemented carbide tools. Part II: conditions of seizure at the tool/work interface.** Journal of the Iron and Steel Institute, 1963. p. 42-49.

TRENT, E. M. **Metal cutting and the tribology of seizure: I - Seizure in metal cutting,** *Wear*, 1988.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. EUA: Butterworth–Heinemann, 2000.

TROIANI, Fábio. Alstom Dez Toneladas de Cavacos de Uma Única Peça. **O mundo da Usinagem**, São Paulo, v.1, 2004.

WRIGHT, P. K.; HOME, J. G.; **Boudary Conditions at the chip- tool interface in Machining**: Comparisons between Seizure and Sliding Friction, wear, vol, 54 p. 37 – 399.

ZAIISOV, E.; BORGES, E. R.; WIEDENHOFT, A. G. Análise sobre desgastes de ferramentas de corte e seus principais tipos. **VII Salão Internacional de Ensino**. Disponível em: < <http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/download/16958/6006>> . Acesso em 01 out. 2017.

ZOREV, N. M. **Interrelationship between shear processes occurring along tool face and on shear plane- in metal cutting**.1963. p. 42-49