

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO DA
MICROESTRUTURA DO AÇO CARBONO AISI 1040 PELA TÉCNICA
DE ADIÇÃO DE INCLUSÕES METÁLICAS DE BISMUTO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ELIENE OLIVEIRA LUCAS

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 1998.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO DA MICROESTRUTURA
DO AÇO CARBONO AISI 1040 PELA TÉCNICA DE ADIÇÃO DE
INCLUSÕES METÁLICAS DE BISMUTO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

Orientador



Prof. Pedro A. Nannetti Bernardinni, Dr. Eng.

Co-orientador

BANCA EXAMINADORA:



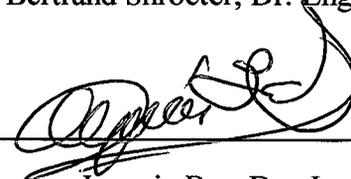
Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.



Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr. Sc.



Prof. Rolf Bertrand Shroeter, Dr. Eng.



Joaquin Bas, Dr. -Ing.

Com amor aos meus sobrinhos:

Aline, Cristiane
e Adriano Lucas

AGRADECIMENTOS

Dedico grande parte desta conquista aos meus pais, irmãs e irmãos que apesar da distância física se mantiveram próximos através do constante incentivo.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Departamento de Engenharia Mecânica pela grande oportunidade.

À Aços Finos Piratini (Grupo Gerdau) pelo fornecimento dos aços para execução dos ensaios, em especial ao Dr. -Ing Joaquin Bass pelas informações técnicas fornecidas.

Aos Professores. Walter Weingaertner e Pedro Bernardinni pela colaboração, estímulo e principalmente pela orientação prestada.

Não há como expressar em palavras o quanto sou grata, mas fica aqui registrado meu reconhecimento à estas pessoas especiais: Rosimar Franzoi, Mara Mendes, Lourdes e Carla Zanchet, Andreia Lima, Fátima Bassetti, Oneida Bezerra, Moacir Eckhardt, Rodrigo Stoeterau, Hélio Irineu , Margareth Laura, Rosimeire Jerônimo e Marley Magela.

Meus sinceros agradecimentos à grande equipe do LMP pela boa convivência diária e pela colaboração efetiva na execução deste trabalho: Prof. Rolf Schroeter, Cláudia Heusi, Christine Heinzen, Flávia Modesto, Gerusa Duarte, Silvia Zomer, Sérgio Macedo, Jefferson, Victor, Cleiton, Miltinho, Guilhermina, Gilva, Márcio Braghini, Oliver Odebrech, Luciano Sena, Thiago Lazzari, Stefan Biavatti, Sandro Veríssimo e Amilton Vieira.

A Deus pela persistência.

RESUMO

A necessidade dos fabricantes de peças em minimizar os custos de fabricação, geralmente altos por envolverem um ou mais processos de usinagem, tem estimulado as pesquisas no desenvolvimento de novas classes de aços com usinabilidade melhorada. A tentativa em se otimizar a microestrutura ao corte, através da técnica de adição de inclusões metálicas, é bastante difundida e tem apresentado resultados satisfatórios em baixas velocidades de corte ($v_c < 100$ m/min). Entretanto, a literatura não apresenta informações sobre o desempenho dos aços, com microestrutura modificada por inclusões metálicas, em altas velocidades de corte ($v_c > 100$ m/min).

O presente trabalho, tem como objetivo analisar a influência da modificação na microestrutura do aço carbono AISI 1040, pela técnica de adição de inclusões metálicas, através da avaliação comparativa da usinabilidade dos aços AISI 1040 R (de referência) em relação aos aços AISI 1040 Bi (com adição de bismuto), provenientes de corridas distintas sobre determinadas condições de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte).

Foram executados testes de torneamento externo longitudinal, normalizado pela ISO 3685/1977, em máquina-ferramenta convencional, com o uso de ferramentas de metal duro e aço rápido. Os critérios utilizados na avaliação comparativa da usinabilidade dos aços foram: vida de ferramenta, forças de usinagem, formação de cavaco e acabamento superficial.

Os resultados obtidos não permitiram constatar a melhoria da usinabilidade pela presença de inclusões metálicas em altas velocidades de corte. Além disto, revelaram que o efeito pronunciado das inclusões metálicas depende da condição de corte empregada e para que se obtenha resultados satisfatórios é necessário a execução de experimentos sob uma ampla faixa de condições de corte e sob condições microestruturais controladas.

ABSTRACT

The need of manufacturers metal parts, to minimize production costs, has led to the development of new groups of steel with improved machinability. One of the techniques successfully employed is the [addition of metallic inclusions], which optimizes the microstructure in terms of cutting. This technique, which is well explored for low cutting speeds ($v_c < 100$ m/min) leads to satisfactory results. On the hand there is no information for the performance of these steels with high cutting speeds ($v_c > 100$ m/min).

This work presents a comparative analysis of the AISI 1040 steels, where the influence of the addition of bismuth on the steel machinability is studied. Parts with and without bismuth were machined by turning, with hard-metal and high speed steel (HSS) tools, using a conventional lathe. The experiments were carried with defined steel under determined machining conditions (speed, feed rate and cutting depth).

The results showed that metallic inclusions don't improve the machinability for high cutting speeds. But they showed that the machinability depends strongly on the cutting conditions. As the number of conditions used in this work was limited , it is possible that machinability can be improved by investigating a wide field of cutting conditions, and under more defined microstructural conditions.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xv
SIMBOLOGIA.....	xvii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - USINABILIDADE DOS METAIS.....	4
2.1 - Critérios utilizados na avaliação da usinabilidade.....	6
2.1.1 - Vida da ferramenta.....	6
2.1.2 - Força de usinagem.....	17
2.1.3 - Qualidade superficial.....	24
2.1.4 - Formação do cavaco.....	28
2.2 - Fatores que afetam a usinabilidade.....	33
2.2.1 - Mecanismo de formação do cavaco.....	35
2.2.2 - Influência das propriedades mecânicas do material.....	40
2.2.3 - Influência da microestrutura da matriz.....	43
2.2.4 - Influência do tratamento térmico.....	58
2.2.5 - Influência da inclusões sobre a usinabilidade.....	60
2.2.6 - Influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade.....	78
2.3 - O papel do bismuto como inclusão metálica na melhoria da usinabilidade dos aços...84	
2.3.1 - Justificativas para utilização do bismuto.....	84
2.3.2 - Função e mecanismo de ação do bismuto no aço.....	86

2.3.3 - Forma de ocorrência do bismuto nos aços	95
2.3.4 - Resultados experimentais de ensaios de usinabilidade de aços com adição de bismuto	96
3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	99
3.1 - Planejamento dos ensaios	99
3.1.1- Grandezas envolvidas	109
3.2. - Equipamentos utilizados.....	109
3.2.1 - Máquina-ferramenta.....	109
3.2.2 - Sistema de medição das componentes da força de usinagem.....	110
3.2.3 - Medição do desgaste da ferramenta.....	112
3.2.4 - Sistema de medição da rugosidade	113
4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	114
4.1 - Ensaio de vida da ferramenta de corte.....	115
4.2 - Ensaio da força de usinagem.....	121
4.3 - Ensaio de acabamento	125
4.4 - Ensaio de formas e tipos de cavaco.....	126
5 - RESULTADOS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	132
5.1 - Conclusões.....	132
5.2 - Sugestões para futuros trabalhos.....	134
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
7 - ANEXOS.....	141

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Representação esquemática do comportamento da vida da ferramenta de corte em função da velocidade de corte.....	7
Figura 2 - Tipos de avarias e desgastes na ferramenta de corte.....	8
Figura 3 - Formas de desgastes e grandezas a serem medidas na cunha de corte.....	12
Figura 4 - Causas do desgaste na usinagem.....	13
Figura 5 - Mecanismos de desgaste na usinagem.....	14
Figura 6 - Componentes da força de usinagem no torneamento.....	18
Figura 7 - Dependência da componentes da força de usinagem em relação às condições de corte (avanço, velocidade e profundidade de corte).....	19
Figura 8 - Posição geométrica da quina em relação ao eixo de rotação da peça.....	20
Figura 9 - Influência da variação do ângulo de direção do gume sobre as componentes da força de usinagem.....	21
Figura 10 - Variação da força específica de corte k_{c11} com a espessura h para diferentes operações de usinagem.....	23
Figura 11 - Seções de corte com iguais espessuras de corte.....	23
Figura 12 - Fatores influentes sobre a qualidade superficial.....	25
Figura 13 - Influência do raio de quina e avanço sobre a rugosidade cinemática.....	26
Figura 14 - Dependência entre a rugosidade media R_a e o tempo de corte.....	27

Figura 15 - Formas de cavaco em dependência das propriedades dos materiais.....	29
Figura 16 - Formas de cavaco.....	32
Figura 17 - Etapas de formação do cavaco.....	36
Figura 18 - Esquema ilustrativo das zonas de cisalhamento primária e secundária no mecanismo de formação do cavaco.....	38
Figura 19 - Mecanismos de fratura na zona primária de cisalhamento em função da presença de inclusões.....	39
Figura 20 - Influência da dureza sobre a vida da ferramenta.....	41
Figura 21 - Influência dos elementos de liga sobre o teor de carbono e a temperatura eutetóide.....	47
Figura 22 - Micrografia de um aço recozido (0,12 % de carbono).....	52
Figura 23 - Influência da variação das quantidades dos microconstituintes perlita/ferrita sobre a usinabilidade dos aços segundo Boulger [31].....	54
Figura 24 - Influência da microestrutura sobre a vida da ferramenta na usinagem do aço AISI 4135.....	57
Figura 25 - Representação esquemática do índice de usinabilidade em função do tratamento térmico segundo König e Kreis [32].....	59
Figura 26 - Esquema ilustrativo do tratamento ao cálcio.....	63
Figura 27 - Usinabilidade relativa de diferentes tipos de aços em função da presença de diferentes de enxofre.....	65
Figura 28 - Influência das condições de usinagem sobre o desenvolvimento da película protetora segundo Grum, Leskovar [40].....	67

Figura 29 - Efeito da fração volumétrica do sulfeto de manganês sobre o desgaste de flanco.....	70
Figura 30 - Influência da forma das inclusões de sulfeto sobre o índice de usinabilidade.....	71
Figura 31 a - Inclusões de sulfeto do tipo 1.....	73
Figura 31 b - Inclusões de sulfeto do tipo 2.....	73
Figura 31 c - Inclusões de sulfeto do tipo 3.....	74
Figura 32 - Influência da presença do chumbo sobre a vida da ferramenta de corte no torneamento dos aços de corte fácil.....	77
Figura 33 - Influência da variação do teor de chumbo sobre a vida da ferramenta de corte.....	77
Figura 34 - Temperatura estimada na zona de cisalhamento primária em função da velocidade de corte.....	91
Figura 35 - Força de corte na zona de cisalhamento em função da velocidade de corte.....	93
Figura 36 - Forma de ocorrência do bismuto na matriz metálica.....	95
Figura 37 - Curvas de vida de ferramenta de aço rápido na usinagem do aço 1045.....	97
Figura 38 - Resultados de ensaios de vida em tornos automáticos.....	98

CAPITULO 3

Figura 39 - Pastilha de metal duro revestida SANDVIK.....	104
Figura 40 - Máquina-ferramenta Torno Romi I 45.....	109
Figura 41 - Esquema de montagem do sistema de medição de forças na usinagem.....	110
Figura 42 - Microscópio de ferramentaria - NIKON.....	112
Figura 43 - Sistema de medição da rugosidade (Rugosímetro modelo Perthometer M 3 A).....	113

CAPITULO 4

Figura 44 - Curvas de vida obtidas na usinagem do aço AISI 1040 (corridas A e B) com emprego de ferramentas de aço-rápido.....	118
Figura 45 - Curvas de vida obtidas na usinagem do aço AISI 1040 (corridas C e D) com emprego de ferramentas de metal-duro.....	119
Figura 46 - Desgaste de entalhe da ferramenta de metal duro na usinagem do aço AISI 1040 (corrida A) de Referência.....	120
Figura 47 - Desgaste de flanco médio da ferramenta de metal duro na usinagem do aço AISI 1040 (corrida B) modificado.....	120
Figura 48 - Variação do força de corte, em função do avanço, para a velocidade de 45 m/min.....	123
Figura 49 - Variação do força de avanço, em função do avanço, para a velocidade de 45m/min.....	123
Figura 50 - Variação da força de corte, em função do avanço para a velocidade de 200 m/min.....	124
Figura 51 - Variação da força de avanço, em função do avanço, para velocidade de 200 m/min.....	124
Figura 52 - Influência da variação do avanço sobre a rugosidade Ra na usinagem do aço AISI 1040 (corridas A e B).....	125
Figura 53 - Cavaco em espiral curto, aço AISI 1040 Modificado.....	128
Figura 54 - Cavaco em espiral cônico, aço AISI 1040 Modificado.....	128
Figura 55 - Cavaco em arco conectado, aço AISI 1040 Referência.....	129

Figura 56 - Cavaco em arco solto, aço AISI 1040 Modificado.....	129
Figura 57 - Cavaco em arco solto, aço AISI 1040.....	131
Figura 58 - Cavaco em arco conectado, aço AISI 1040.....	131

CAPITULO 7

Figura 59 - Amostra longitudinal do aço 1040 AISI Modificado estado normalizado (microscopia óptica, /1000 x) Corrida A	143
Figura 60 - Amostra longitudinal do aço 1040 AISI Referência estado normalizado (microscopia óptica/ 1000 x) corrida B.....	144
Figura 61 - Amostra longitudinal do aço 1040 AISI Referência estado normalizado (microscopia óptica/ 1000 x) corrida C.....	144
Figura 62 - Amostra longitudinal do aço 1040 AISI Referência estado normalizado (microscopia óptica/ 1000 x) corrida D.....	145
Figura 63 - Inclusão metálica de bismuto envolvendo uma inclusão não metálica.....	146
Figura 64 - Espectograma da fase clara (brilhante).....	146
Figura 65 - Espectograma da fase escura (núcleo).....	147
Figura 66 - Espectograma da intermediária.....	147

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Melhores condições de usinagem em função do teor de carbono dos aços segundo Chiaverini [28].....	48
Tabela 2 - Resultados obtidos na usinagem do aço UNI38 NiCrMo4, submetido a diversos tratamentos térmicos e apresentando diferentes microestruturas.....	55
Tabela 3 - Influência de um particular sobre a usinabilidade, com ênfase nos critérios de usinabilidade/König e Kreis [32].....	82
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do bismuto.....	85
Tabela 5 - Propriedades físicas do bismuto, chumbo e ferro.....	86
Tabela 6 - Resultados de testes de vida da ferramenta na usinagem de aços AISI 1045.....	97

CAPÍTULO 3

Tabela 7 - Grandezas de entrada e resultados obtidos no ensaio de torneamento.....	100
Tabela 8 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de vida da ferramenta.....	104
Tabela 9 - Condições de corte para os ensaios de força de usinagem.....	105

CAPÍTULO 4

Tabela 10 - Influência da variação do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem dos aços AISI 1040 Modificado e de Referência.....	122
Tabela 11 - Classificação dos cavaco, aço AISI 1040 Modificado.....	127
Tabela 12 - Classificação dos cavaco, aço AISI 1040 Referência.....	127
Tabela 13 - Classificação dos cavaco, aço AISI 1040 Modificado.....	130
Tabela 14 - Classificação dos cavaco, aço AISI 1040 Referência.....	130

CAPÍTULO 7

Tabela 15 - Composição química dos aços AISI 1040 Modificado corrida A.....	141
Tabela 16 - Composição química dos aços AISI 1040 de Referência corrida B.....	141
Tabela 17 - Composição química dos aços AISI 1040 Modificado corrida C.....	142
Tabela 18 - Composição química dos aços AISI 1040 Referência corrida D.....	142

SIMBOLOGIA

a_p	[mm]	Profundidade de usinagem
b	[mm]	Largura da usinagem
C_v	—	Vida da ferramenta para $v_c = 1$ m/min [constante]
E	[N/mm ²]	Módulo de Elasticidade
f	[mm]	Avanço
F	[N]	Força de usinagem
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
F_p	[N]	Força passiva
h	[mm]	Espessura de usinagem antes do corte
h_{ch}	[mm]	Espessura de usinagem após o corte
H	[HB]	Dureza Brinell
KM	[μ m]	Afastamento médio da cratera
KT	[μ m]	Profundidade de cratera
k	—	Coefficiente angular da vida
$k_{c1.1}$	—	Força específica de corte
r_ϵ	[mm]	Raio de quina da ferramenta
R_a	[μ m]	Desvio médio aritmético da rugosidade - Rugosidade R_a
R_t	[μ m]	Profundidade máxima da rugosidade - Rugosidade R_t
R_z	[μ m]	Profundidade média de rugosidade - Rugosidade média R_z

VB	[mm]	Largura média da marca de desgaste de flanco
VB _{máx}	[mm]	Largura máxima da marca de desgaste de flanco
T	[min]	Vida da ferramenta
v _c	[m/min]	Velocidade de corte
1 - m _c	—	Coefficiente angular
α	[°]	Ângulo de incidência
β	[°]	Ângulo de cunha
χ	[°]	Ângulo de direção do gume principal
χ'	[°]	Ângulo de direção do gume secundário
γ	[°]	Ângulo de saída
φ	[°]	Ângulo de cisalhamento

1 - INTRODUÇÃO

Os altos custos envolvidos na fabricação de peças requerem uma constante melhoria dos processos de conformação. Dentre os processos de conformação, a usinagem é um dos mais utilizados pela indústria de manufatura. Dados revelam que somente na indústria norte americana, no ano de 1989, foram gastos mais de 100 bilhões de dólares em operações de fabricação de peças envolvendo processos de usinagem [1, 2].

A melhoria do processo de usinagem é feita, principalmente, através da otimização das condições de corte. Estas condições, entretanto, devem ser correlacionadas com os demais fatores, os quais influenciam o processo de usinagem, de forma a caracterizar a usinabilidade dos materiais. Se este arranjo não for levantado com suficiente precisão, o desempenho de um dado material, com relação a um ótimo nível econômico de utilização de máquina, bem como de toda a infra-estrutura fabril, é afetado [2].

A importância de se compreender o comportamento dos fatores que afetam a usinabilidade tem estimulado uma quantidade razoável de pesquisas voltadas à verificação da melhoria da usinabilidade dos aços, principalmente em operações de torneamento, fresamento e furação. O foco atual das pesquisas, em relação aos fatores que influenciam a microestrutura do material, tem sido o controle das inclusões. Muitas tentativas de se otimizar a microestrutura do material ao corte, através do controle das inclusões presentes na microestrutura, envolvem uma ou mais combinações de técnicas, tais como: eliminação ou modificação de inclusões de natureza abrasiva, controle da morfologia das inclusões não-metálicas e adição de inclusões metálicas que favorecem a quebra do cavaco.

A modificação das inclusões é feita, lançando-se mão de técnicas como por exemplo, o tratamento ao cálcio, as quais incidem diretamente sobre a morfologia, tamanho e dureza das inclusões não-metálicas de natureza abrasiva, transformando-as em inclusões com características de deformação mais favoráveis à usinabilidade, sem com isto comprometer as propriedades mecânicas. Estas modificações são verificadas e avaliadas principalmente através de observações dos mecanismos de desgastes que predominam sobre ferramenta de corte e da fratura do cavaco durante o processo de usinagem.

Inúmeras pesquisas visando a melhoria da usinabilidade através do controle das inclusões presentes na microestrutura do material são reportadas na literatura. Em geral, existe um consenso entre os pesquisadores em declarar que o controle da composição química, distribuição, tamanho e fração volumétrica das inclusões não-metálicas são fatores definitivos na busca da melhoria da usinabilidade dos aços.

Outra técnica utilizada é a adição ao aço de inclusões metálicas de baixo ponto de fusão, tais como chumbo e/ou bismuto. Estas inclusões se apresentam na microestrutura na forma de partículas dispersas, finamente distribuídas. Teoricamente as inclusões metálicas melhoram a usinabilidade devido à possibilidade de reduzirem a resistência ao cisalhamento através da formação regiões de baixa tensão de cisalhamento resultantes da liquefação do metal e devido à possibilidade de formar um filme com características lubrificantes na interface cavaco/ferramenta.

O efeito benéfico da adição de inclusões metálicas de chumbo aos aços, tendo em vista a melhoria da usinabilidade, foi reconhecido há mais de quarenta anos. Entretanto, em virtude da natureza tóxica do metal (geração de vapores tóxicos na fabricação dos aços) há uma forte pressão dos órgãos ambientalistas internacionais em proibir a adição de chumbo aos aços, o que tem levado as indústrias siderúrgicas a eliminarem completamente o chumbo do espaço de fabricação.

O bismuto tem sido utilizado como inclusão metálica, de forma substitutiva ao chumbo, pelo fato de ser um metal comprovadamente atóxico. Resultados satisfatórios alcançados em ensaios de usinabilidade de algumas classes de aços, com microestrutura modificada pela adição de inclusões metálicas de bismuto, têm estimulado novas pesquisas as quais visam o desenvolvimento de novas classes de aços de usinabilidade melhorada.

O presente trabalho trata da análise da influência da modificação na microestrutura do aço carbono AISI 1040, pela técnica de inclusões metálicas de bismuto. Os aços foram convencionados AISI 1040 R (de referência) e AISI 1040 Bi (com adição de bismuto) sendo estes provenientes de duas corridas distintas (recozidos e normalizados) e analisados de forma comparativa através dos critérios usuais de avaliação da usinabilidade. Foi utilizado o teste de torneamento externo longitudinal normalizado pela ISO 3685/1977.

2 - USINABILIDADE DOS METAIS

Segundo Ferraresi [3], a usinabilidade de um metal pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa por meio de um valor numérico comparativo um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão. Entende-se como propriedades de usinagem de um metal aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como vida da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial da peça, temperatura de corte, produtividade e características do cavaco, entre outras.

O significado do termo usinabilidade, entretanto, é vago e qualitativo, sendo dependente do interesse do usuário em obter: aumento na vida da ferramenta, diminuição da força de corte, melhor acabamento do produto, melhor formação de cavaco, etc. Cada um destes interesses (necessidades) podem ser utilizados para avaliar a usinabilidade. As respostas obtidas na usinagem de um determinado material não dependem somente de suas propriedades específicas, mas do tipo de operação de usinagem, da ferramenta e dos parâmetros de corte. Portanto, a usinabilidade pode ser considerada uma propriedade tecnológica que controla a capacidade de usinagem do material em relação ao tamanho, forma e acabamento de superfícies requeridas comercialmente [1].

Do ponto de vista da engenharia, a usinabilidade pode ser interpretada como medida da facilidade ou dificuldade com a qual o material pode ser satisfatoriamente usinado [2]. Entretanto, esta facilidade de trabalho pode ser medida por diferentes métodos, que muitas vezes conduzem a resultados contraditórios. Desta forma, uma definição precisa da usinabilidade se torna cientificamente impossível [1].

Na engenharia, medir é mais simples do que definir. Muitos laboratórios de pesquisa e indústrias no mundo têm voltado sua atenção para o problema de medir a usinabilidade, particularmente para fornecer a cada material um índice de usinabilidade a ser usado de forma a alcançar ótimas condições de corte e avaliar a qualidade dos materiais [2].

A usinabilidade não é uma propriedade específica dos materiais, porque depende das condições de corte e muitos outros parâmetros. Para obter um índice de usinabilidade é necessário utilizar métodos baseados na comparação dos resultados obtidos na usinagem de diferentes materiais [2].

As pesquisas para selecionar as grandezas a serem medidas foram desenvolvidas de forma a obter, com boa precisão e repetibilidade, os índices de usinabilidade. Muitos autores, seguindo diferentes caminhos, no entanto, chegaram à conclusão que dados com boa repetibilidade dificilmente são obtidos com procedimentos simples de ensaio [2].

A usinabilidade de um material não pode ser medida ou definida em termos de unidade absoluta. Desta forma, grandezas características do processo de usinagem são consideradas como critérios de avaliação da usinabilidade. Vida da ferramenta, acabamento superficial, força de corte e formação de cavaco podem ser considerados, independentes ou combinados, como medida da usinabilidade de um sistema. A avaliação da usinabilidade, em termos de tais parâmetros, requer uma razoável repetibilidade dos dados, de forma a alcançar resultados significativos [4].

2.1 - Critérios utilizados na avaliação da usinabilidade

Na avaliação da usinabilidade geralmente são utilizados quatro critérios [3]:

- ⇒ Vida da ferramenta.
- ⇒ Força de usinagem.
- ⇒ Qualidade superficial da peça.
- ⇒ Formação de cavacos.

2.1.1 - Vida da ferramenta

A vida da ferramenta é o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material, visto a sua influência direta sobre a economia do processo. A vida “T” é o tempo mínimo que uma ferramenta resiste do início do corte até sua utilização total, relacionada a um certo critério de fim de vida, sendo definida através da equação de Taylor [5].

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad (1)$$

Onde:

- ⇒ T = vida da ferramenta (min);
- ⇒ v_c = velocidade de corte (m/min);
- ⇒ C_v = vida para $v_c = 1$ m/min (constante);
- ⇒ k = coeficiente angular da curva de vida.

A figura 1 mostra que a dependência entre a vida “T” e a velocidade de corte “ v_c ” é exponencial, e num sistema bi-logarítmico é representada por uma reta.

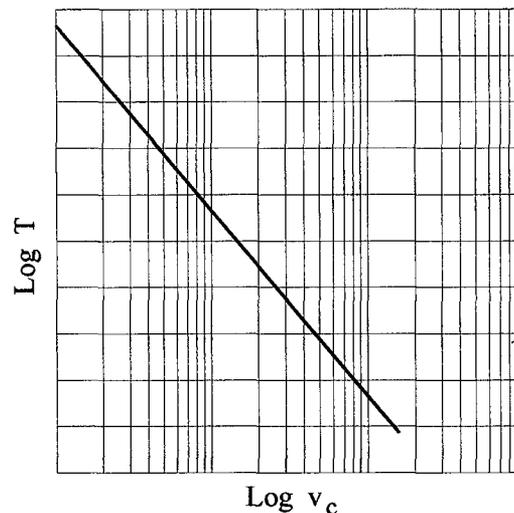


Figura 1 - Representação esquemática do comportamento da vida da ferramenta de corte em função da velocidade de corte [3].

As grandezas avaliadas para definir a vida da ferramenta podem ser: o tempo de corte, o volume do material cortado ou número de peças fabricadas. O fim da vida é detectável quando ocorre mudança em uma ou mais características do processo. Estas podem estar correlacionadas com mudanças no ruído, no acabamento superficial e na forma de cavaco, vibrações entre a peça e ferramenta, dentre outros [6].

Quando se deseja determinar as curvas de vida de uma ferramenta, para um determinado material, com uma precisão razoável, deve-se recorrer aos ensaios de usinagem de longa duração. Nestes ensaios o gume da ferramenta trabalha em condições constantes de corte, sendo utilizado um critério de fim de vida de desgaste previamente fixado. A definição deste critério de desgaste exige que se conheça a sua forma e os mecanismos que regem seu surgimento [3].

a - Avarias e desgastes na ferramenta de corte

A ferramenta de corte é solicitada térmica e mecanicamente durante a usinagem. Como nem o material da peça, nem o material da ferramenta são homogêneos, uma série de avarias e desgastes de natureza distintas podem ser observados na ferramenta de corte ao longo de sua utilização. Tanto as avarias randômicas como os desgastes de natureza regulares (previsíveis) podem levar ao colapso total de uma ferramenta de corte. Para evitar que ocorra o colapso total da ferramenta é fundamental que sejam estipulados limites para as avarias e para os desgastes de flanco e cratera [5].

Durante a usinagem, a cunha é submetida a um desgaste que depende da forma de solicitação e duração de utilização da ferramenta [5]. A figura 2 mostra, de forma esquemática, as formas de desgastes e avarias mais freqüentes na ferramenta de corte [7].

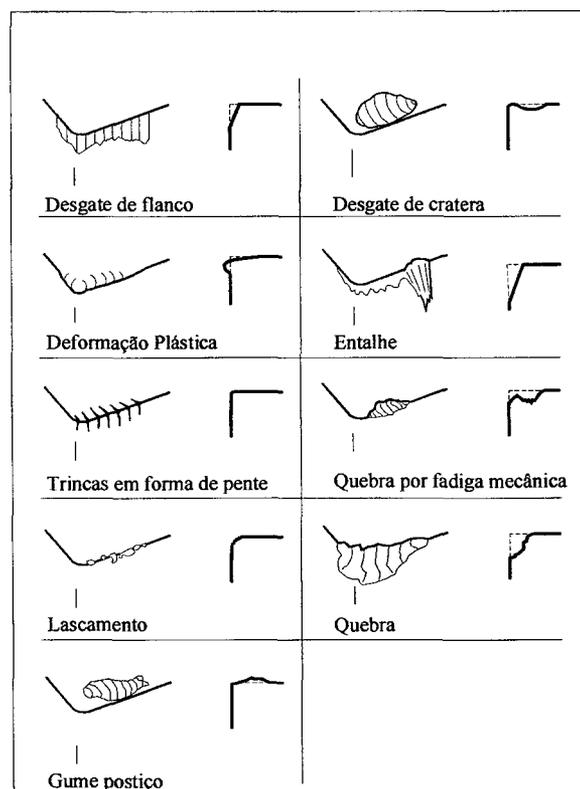


Figura 2 - Tipos de avarias e formas desgastes na ferramenta de corte [7]

➔ Lascamento

O lascamento é resultante da quebra de pequenos fragmentos do gume durante a operação de corte. São causas do lascamento: limite de resistência do material da ferramenta excedido em áreas localizadas devido a vibrações, variações microestruturais na peça ou devido à quebra do gume postiço [7, 8].

Forças de corte excessivas muitas vezes levam a micro e macrolascamentos do gume ou da quina, principalmente quando os ângulos de cunha ou de quina da ferramenta são muito pequenos. Microlascamentos ocorrem, com maior frequência, quando o material a ser usinado é duro e contém inclusões não-metálicas abrasivas (óxidos e carbonetos). As ferramentas mais susceptíveis a este tipo de solicitações localizadas são as ferramentas cerâmicas e os metais-duros, principalmente nos processos de fabricação em que se trabalha com seções de usinagem muito pequenas (por exemplo: operações de acabamento, alargamento, brochamento e rasqueteamento) [5].

➔ Fissuras transversais, longitudinais ou em forma de pente

Em cortes interrompidos (por exemplo em operações de fresamento) o gume da ferramenta é submetido a solicitações térmicas e mecânicas alternadas. Estas solicitações alternadas em conjunto com as tensões de tração residuais na superfície da ferramenta, durante o ciclo de resfriamento (fora do corte), podem levar ao surgimento de fissuras transversais e longitudinais ao gume, principalmente em materiais de ferramenta com pouca tenacidade [5].

Tanto as fissuras longitudinais e transversais, típicas em ferramentas de metal-duro das primeiras gerações (meados do século XX), são cada vez menos freqüentes em decorrência da melhora significativa das matérias-primas empregadas (diminuição do tamanho dos elementos constituintes) e da condução do processo de sinterização (adição de inibidores de crescimento dos grãos) [9].

⇒ Deformação plástica do gume

Um efeito secundário do aumento da velocidade de corte é o aumento da temperatura, o que favorece a deformação plástica do gume. Nestas condições o ligante das ferramentas de metal-duro pode amolecer ou se deformar causando um efeito de abaulamento. Tal efeito pode gerar, além da quebra, um maior desgaste de flanco e lascamento do revestimento [8].

⇒ Desgaste de entalhe

O entalhe ocorre na região de interface entre o contato ferramenta/cavaco/peça, no lado exposto da superfície de corte. A formação do entalhe é resultado da ação das rebarbas produzidas nas bordas do cavaco, as quais apresentam uma taxa de encruamento maior que na parte central do cavaco, tornando-se uma região com dureza mais elevada, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento. Outros fatores podem ser responsáveis pela formação do desgaste de entalhe, tais como:

-
- Presença de uma camada superficial previamente encruada do material.
 - Concentração de tensão devido ao gradiente de tensão no flanco da ferramenta de corte.
 - Presença de rebarbas na borda da superfície já usinada.
 - Formação de trincas térmicas devido ao elevado gradiente de temperatura na face da ferramenta.
 - Presença de óxido abrasivo na superfície de corte.
 - Fadiga do material da ferramenta devido à flutuação de força na face da ferramenta, acompanhada de pequeno movimento lateral da borda do cavaco [10].

Na região de formação do entalhe a ferramenta de corte também é submetida à ação oxidante da atmosfera (principalmente crítica para os metais-duros tenazes à base de WC e Cr). O aumento progressivo do entalhe pode levar à quebra da ferramenta de corte bem como a um pior acabamento superficial [5].

➤ Desgaste de flanco e de cratera

As formas de desgaste mais regulares e previsíveis são o desgaste de flanco e o de cratera. Em decorrência disto procura-se estabelecer condições de corte, para usinagem de metais, onde estas formas de desgastes, principalmente o desgaste de flanco, são dominantes sobre o critério de fim de vida da ferramenta de corte.

As grandezas de desgaste avaliadas são representadas esquematicamente na figura 3 [11].

Na face da ferramenta, onde ocorre o desgaste de cratera, é medida a profundidade e o afastamento médio da cratera. A profundidade de cratera K_T e o afastamento médio K_M podem ser usados como critério de desgaste. Entretanto, freqüentemente é utilizada a relação de desgaste $K = K_T/K_M$ como critério de fim de vida [5].

No flanco da ferramenta, onde ocorre o desgaste de flanco, são medidas a largura média do desgaste VB e a largura máxima da marca de desgaste VB máximo. Nem sempre a marca de desgaste é muito nítida, devido a mudanças de cor ou oxidações que ocorrem no flanco, nas regiões limites de contato. Além disto, a presença eventual de entalhes dificulta a interpretação precisa da marca de desgaste de flanco [5,9].

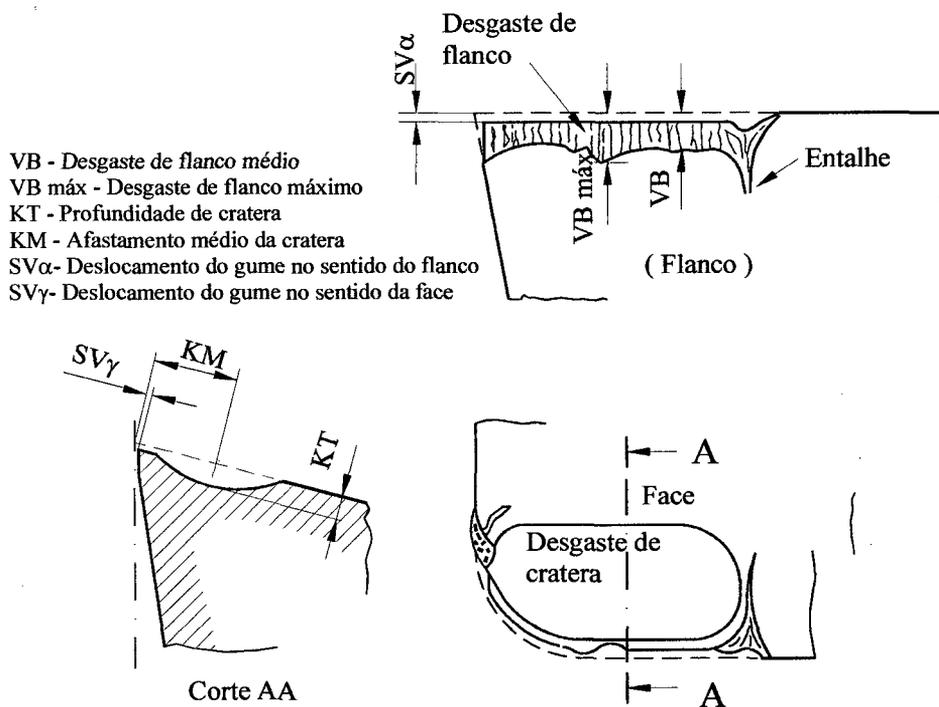


Figura 3 - Formas de desgastes e grandezas a serem medidas na cunha de corte [11]

b - Mecanismos de desgaste

O desgaste da ferramenta, de uma forma geral, é relativamente rápido em decorrência das solicitações térmicas e mecânicas elevadas. Diversos mecanismos de desgaste em geral agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa quanto seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si [5].

Basicamente quatro mecanismos de desgaste são descritos na literatura. O mecanismo de abrasão ocorre em toda a faixa de temperatura a qual é submetida uma ferramenta de corte. A adesão se limita a velocidades de corte baixas, ao passo que mecanismos de difusão e oxidação só ocorrem de forma acentuada para velocidades de corte elevadas, conforme mostra a figura 4 [5].

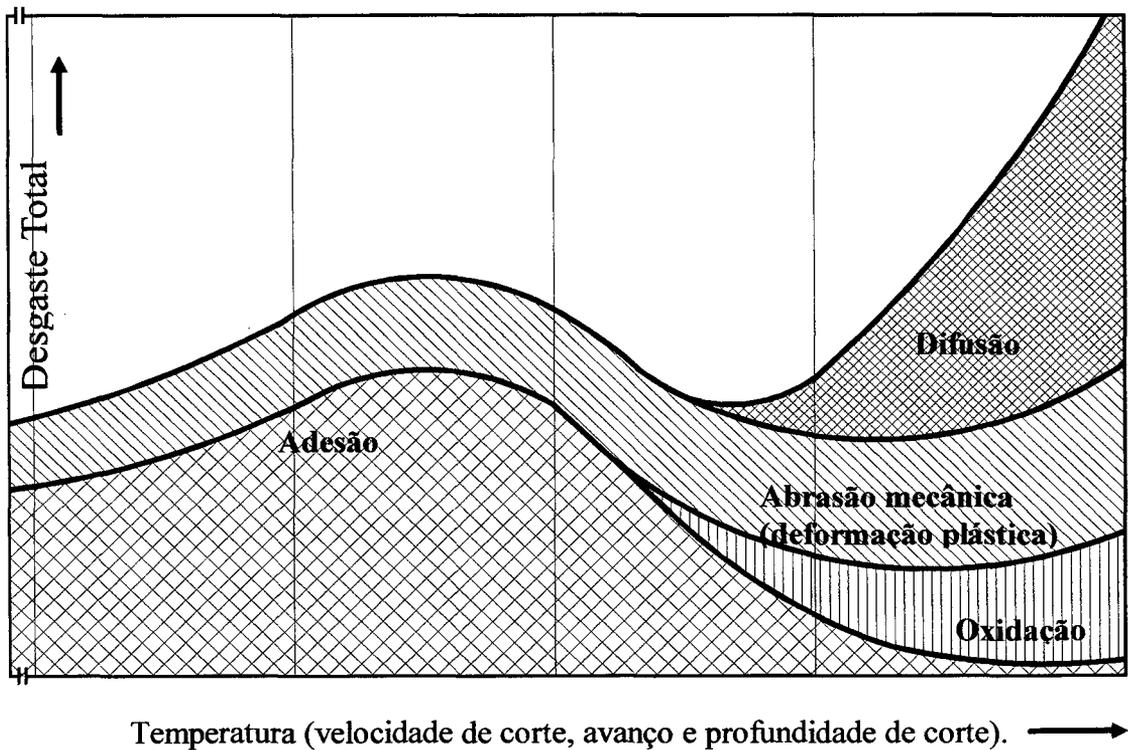


Figura 4 - Causas do desgaste na usinagem [5]

➔ Adesão

Para ocorrer a adesão é necessário que haja afinidade entre o material da peça e o material da ferramenta. Além disto a temperatura, o tempo e a pressão de contato devem estar situados em uma faixa de valores adequados. Em decorrência disto, um aumento inicial da velocidade de corte (que leva a um aumento da temperatura e uma diminuição do tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta) leva a um aumento da frequência de adesões entre a ferramenta e o cavaco. Um subsequente aumento da velocidade de corte leva a uma diminuição das adesões devido à redução do tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta, embora se verifique um aumento da temperatura de contato. Para materiais que apresentam um encruamento acentuado a adesão leva à formação do gume postiço. A formação cíclica deste, ocorre principalmente em baixas temperaturas de corte na interface cavaco/face da ferramenta (figura 5a) [9].

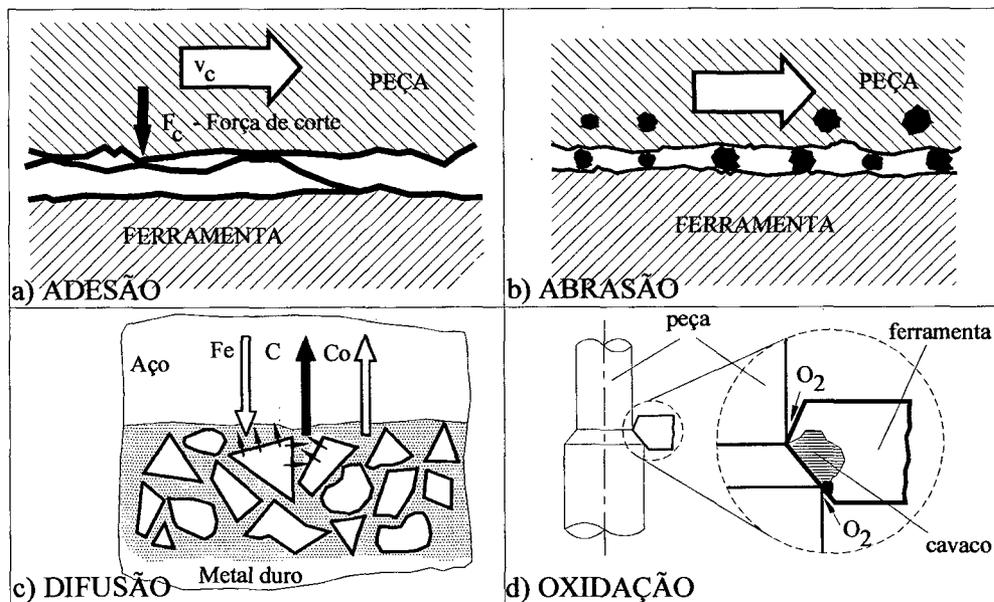


Figura 5 - Mecanismos de desgaste na usinagem [5,7]

⇒ Abrasão mecânica

A abrasão mecânica ocorre devido à presença de partículas duras no material da peça. O cisalhamento de partes do gume postiço e sua extrusão pela interface superfície de corte/flanco levam a um desgaste de flanco mais acentuado. Quanto menor for a deformabilidade da matriz metálica e quanto mais duras forem as inclusões presentes maior será o desgaste abrasivo da ferramenta de corte (figura 5b) [5].

⇒ Difusão

A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro material, constituídos de elementos que apresentam afinidade entre si. Quanto maior for a afinidade, a temperatura de contato, o tempo de contato e o nível de agitação atômica, maior será a atividade de difusão entre a ferramenta e o cavaco [6].

Nos aços-rápido e nos aços-ferramenta o amolecimento do material da ferramenta ocorre em temperaturas inferiores (600 °C para o aço-rápido) às temperaturas necessárias para que ocorra o processo de difusão, de tal forma que nestes materiais o mecanismo de difusão não pode ser considerado causa dominante de desgaste [5].

Na usinagem do aço com ferramenta de metal-duro, para temperaturas de corte acima de 800 °C, o mecanismo de difusão ocorre de forma mais intensa [5].

Na usinagem do aço com ferramentas de metal-duro ocorrem os seguintes mecanismos de difusão:

- ⇒ Difusão do ferro para o ligante cobalto do metal duro.
- ⇒ Difusão do cobalto para o aço, onde o ferro e o cobalto podem mutuamente dissolver-se integralmente, formando cristais mistos.

Para metais duros à base de cobalto e carboneto de tungstênio, nos quais o cobalto mantém dissolvida uma certa quantidade de carbonetos de tungstênio, a presença do ferro altera a solubilidade do carbono na matriz de cobalto [5].

A máxima solubilidade do carbono no cobalto a 1200°C é da ordem de 0,7 %. Na presença do ferro a solubilidade aumenta até valores na ordem de 1,5 a 2 %. Além disto, o ferro que difunde para o cobalto induz reações que aceleram a dissolução de carbonetos. O ferro forma carbonetos mistos de ferro-tungstênio na forma de $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $(\text{FeW})\text{C}_6$, $(\text{FeW})_{23}\text{C}_6$ e libera o carbono no cobalto, que por sua vez é uma condição para solubilização do carboneto de tungstênio. Os carbonetos mistos formados apresentam uma menor resistência ao desgaste e conseqüentemente são removidos por abrasão com maior facilidade, figura 5c [5].

Como o mecanismo descrito ocorre com maior incidência na região de maior temperatura, o desgaste de cratera apresenta uma forte semelhança com as curvas isotermas da região de corte [5].

⇒ Oxidação

Após o corte do material, muitas vezes são observadas cores de revenimento na região de contato entre o cavaco e a ferramenta, que são provocadas pela oxidação da ferramenta. Esta só ocorre se a temperatura for suficientemente elevada e se houver a presença de oxigênio na região aquecida [5].

A oxidação depende do material da ferramenta. O metal-duro inicia sua oxidação na faixa de temperatura de 700 a 800 °C. Os metais-duros compostos apenas de carbonetos de tungstênio e cobalto oxidam mais facilmente do que metais-duros com adição de carbonetos de titânio, tântalo e vanádio [5].

A ação destrutiva da oxidação sobre a estrutura do metal-duro pode ser observada de modo dominante no gume secundário. Nesta região ocorre a formação de um óxido complexo de tungstênio, cobalto e ferro, que em decorrência do seu maior volume em relação ao carboneto de tungstênio, forma “verrugas” na superfície da ferramenta, levando ao lascamento e quebra do gume (figura 5d) [5].

2.1.2 - Força de usinagem

A força que atua sobre a cunha de corte durante a usinagem é denominada força de usinagem (F). A força de usinagem representa a resistência oferecida pelo material da peça à penetração do gume da ferramenta [3, 5, 12].

O estudo da força de usinagem ou de suas componentes se deve aos seguintes fatores:

- Verificação das características dos diversos materiais a serem usinados, das ferramentas e das condições de corte. A usinagem de materiais de difícil usinabilidade normalmente resulta em forças de usinagem maiores [6, 12].
- Conhecimento das solicitações aplicadas aos diversos componentes de máquinas-ferramenta (de forma que se possa efetuar o dimensionamento no projeto e avaliar eventuais deformações incidentes sobre a precisão das máquinas) [6, 12].
- Conhecimento da potência de usinagem e do rendimento das máquinas-ferramentas para diferentes cargas de trabalho [12].

Grande parte das pesquisas correlacionadas com ensaios de força de usinagem são executadas através do processo de torneamento [13].

A força de usinagem pode ser decomposta nas componentes: força de corte, força de avanço e força passiva, conforme mostra a figura 6.

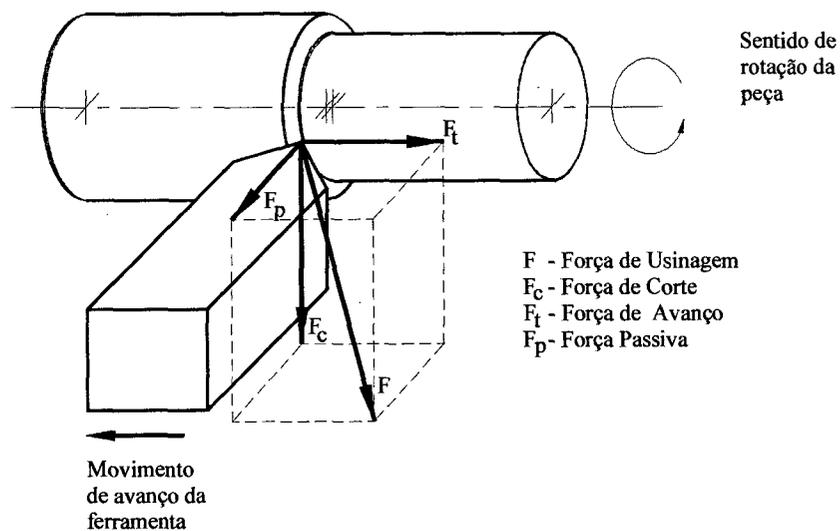


Figura 6 - Componentes da força de usinagem no torneamento [3]

A força de usinagem é influenciada por uma série de fatores tais como: material da peça, material da ferramenta, condições de corte, geometria da ferramenta e do processo de usinagem [5, 6].

Quanto ao material da peça, tanto aços carbono como aços baixa liga permitem estabelecer uma dependência linear entre o aumento da força de usinagem e o aumento do teor de carbono. O tipo de material da ferramenta atua principalmente no coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta, em decorrência disto sobre a força de avanço e sobre a força passiva [5].

Dependendo do tipo de desgaste da ferramenta de corte, pode ser verificada uma influência variável sobre as componentes da força de usinagem. Se predomina o desgaste de flanco as componentes da força geralmente aumentam, uma vez que a superfície de atrito entre a peça e a superfície de incidência aumenta [5].

A figura 7 mostra qualitativamente as componentes F_c , F_f e F_p , da força de usinagem estática, em função da variação das condições de corte (avanço, velocidade e profundidade de corte). Os valores máximos das componentes da força de usinagem ao longo da velocidade de corte, conforme pode ser observado através do comportamento das curvas, são decorrentes da formação do gume postiço. As componentes da força de usinagem aumentam, de forma linear, com o aumento da profundidade de corte. Entretanto, esta condição só é válida se a profundidade de corte for maior que o raio de quina da ferramenta [5].

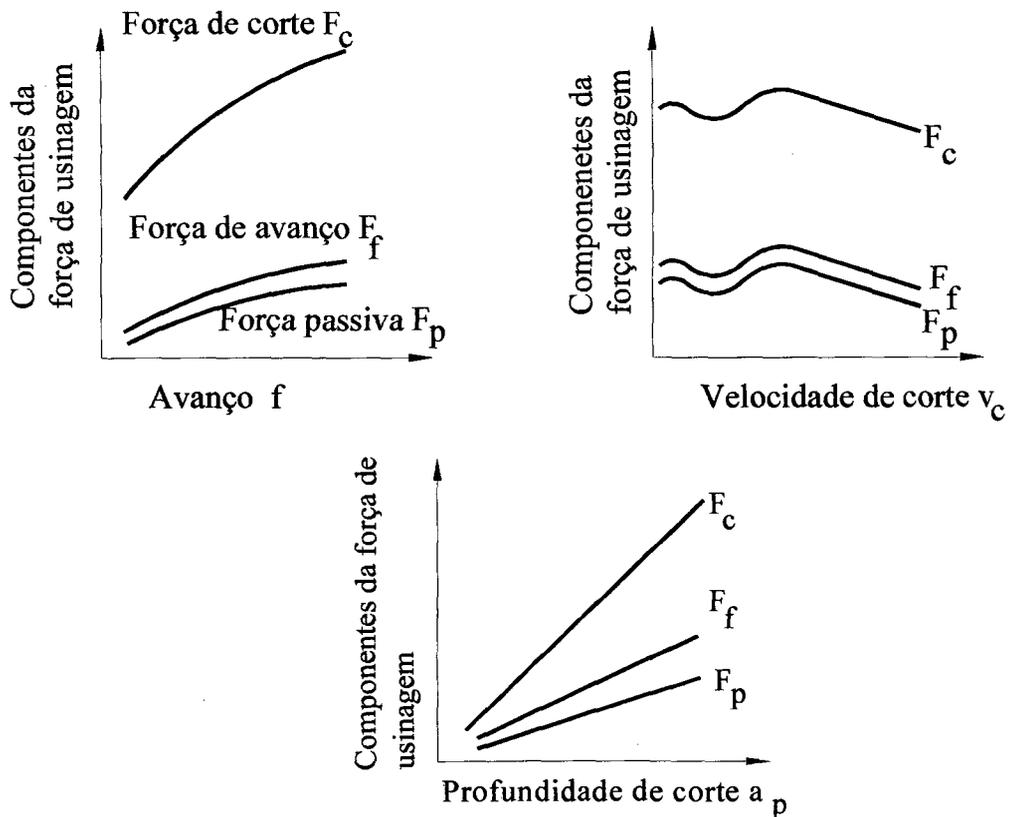


Figura 7 - Dependência das componentes da força de usinagem em relação às condições de corte (avanço, velocidade e profundidade de corte) [5]

O comportamento da força de corte em relação à variação do ângulo de direção do gume é decorrente da posição geométrica da quina da ferramenta em relação ao eixo de rotação da peça, conforme mostra a figura 8. Com o aumento do ângulo de direção do gume, em consequência do aumento da espessura de usinagem, a força de corte alcança seu valor mínimo em $\chi = 90^\circ$ [3].

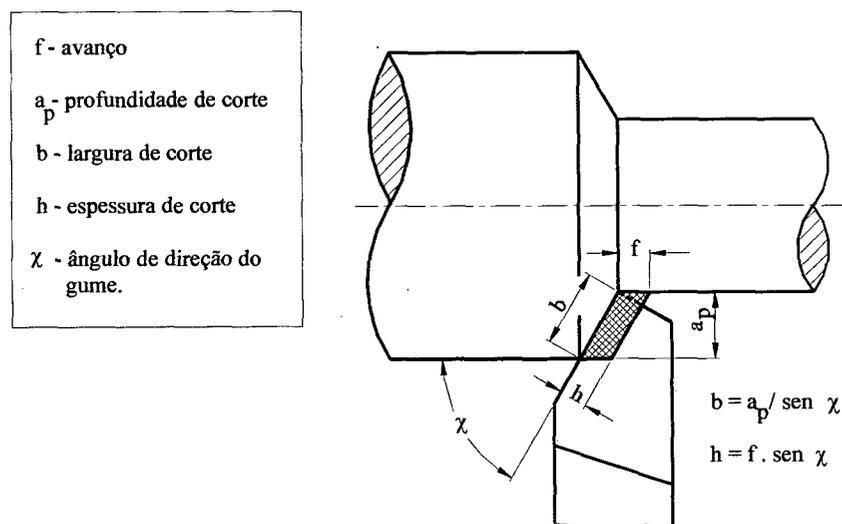


Figura 8 - Posição geométrica da quina em relação ao eixo de rotação da peça [3]

A força de corte e a força passiva apresentam uma redução, ao passo que a força de avanço apresenta um aumento para uma variação do ângulo de direção do gume de 30° a 90° , conforme mostra a figura 9. Para um aumento sucessivo do ângulo de direção do gume a força de corte tende a aumentar novamente, a força de avanço diminui e a força passiva se torna inclusive negativa [3, 9].

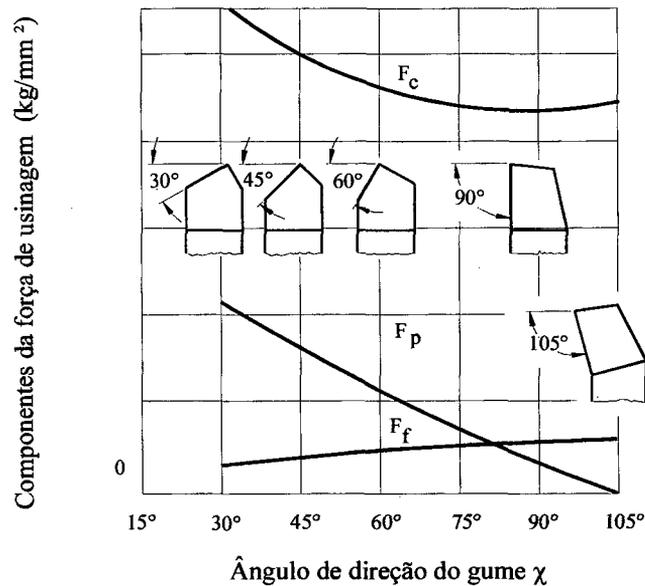


Figura 9 - Influência da variação do ângulo de direção do gume sobre a força de usinagem [3, 9]

a - Força Específica

Vários pesquisadores, já em meados do século XX, verificaram uma dependência entre as condições de corte e a força de usinagem. Esta dependência é melhor descrita pela força específica de corte, determinada por Kienzle [3].

As componentes da força de usinagem obedecem satisfatoriamente à equação de Kienzle, que relaciona as características do material, a seção de corte e a componente da força de usinagem correspondente [3, 5]. Para a força de corte F_c , tem-se:

$$F_c/b = (k_{c1.1}) \cdot h^{(1-m_c)} \quad (2)$$

Onde:

F_c = Força de corte [N].

b = Largura de usinagem [mm].

h = Espessura de corte [mm].

$(1 - m_c)$ = coeficiente angular

A força específica de corte $k_{c 1,1}$ indica a força de corte necessária para usinar uma seção de cavaco com largura de usinagem $b = 1$ mm e espessura de usinagem $h = 1$ mm. O expoente $(1 - m_c)$ indica a inclinação da reta $F/b = f(h)$, no sistema bilogarítimo. Os valores característicos de $k_{c 1,1}$ e $(1 - m_c)$ determinam a influência do material da peça sobre a força de corte [3, 5].

A equação de Kienzle, apesar de ser bastante simples, é suficientemente precisa para os cálculos práticos da força de corte. Na fórmula, $k_{c 1,1}$ figura como função da espessura de corte h e não como função do avanço. Esta propriedade permite aplicar facilmente a equação de Kienzle a todas as operações de usinagem [3, 5].

Para determinação de $k_{c 1,1}$ e $(1 - m_c)$, na avaliação da usinabilidade de um material, são executados ensaios de usinagem com diversos avanços, sendo determinada a força de corte numa dada condição de usinagem (velocidade, geometria da ferramenta e profundidade de corte constantes) [5].

O aumento da força específica de corte $k_{c 1,1}$ com a diminuição da espessura de usinagem h é uma propriedade geral, que vale para todas as operações de usinagem, conforme mostra a figura 10 [3].

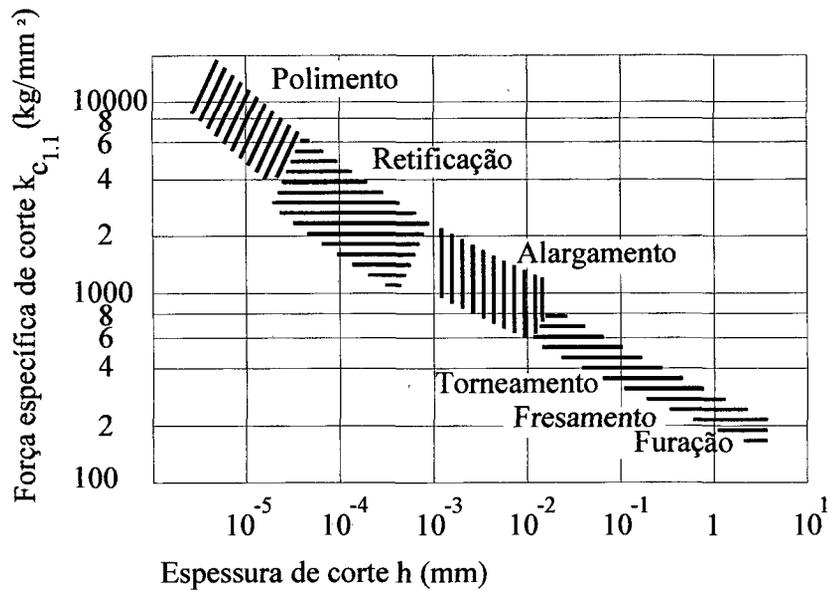


Figura 10 - Variação da força específica de corte $k_{c1,1}$ com a espessura h para diferentes operações de usinagem [3]

Na equação de Kienzle, verifica-se através dos ensaios que para χ compreendido entre 30 e 75°, e para uma relação $a_p / f > 4$, que a força específica de corte $k_{c1,1}$ permanece praticamente constante, independentemente do ângulo de direção do gume. Para $\chi > 75^\circ$, tem-se uma influência do gume secundário da ferramenta sobre o valor de F_c . O valor da força específica de corte $k_{c1,1}$ das seções de corte de igual espessura, h , representadas na figura 11 é praticamente o mesmo [3].

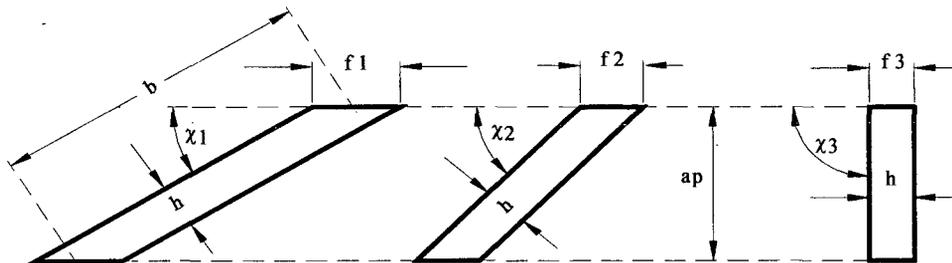


Figura 11 - Seções de corte com iguais espessuras de corte h [3]

2.1.3 - Qualidade superficial da peça

A qualidade superficial de uma peça usinada é determinada em função da precisão dimensional, rugosidade e integridade da superfície, que são baseadas na tolerância pré-fixada da peça. Um material de maior resistência mecânica associado a uma maior velocidade de corte, permite normalmente a obtenção de peças com melhor acabamento superficial [14, 15].

A rugosidade de processo é influenciada pelas condições de corte, pelo mecanismo de formação do cavaco e pelas características do material que está sendo usinado. Se o material é de pequena resistência ou a velocidade de corte muito baixa, devido à instabilidade no mecanismo de formação do cavaco, bem como à flutuação da força de usinagem durante o cisalhamento das lamelas, a espessura de usinagem sofrerá flutuações e a rugosidade cinemática será fortemente influenciada por uma parcela de rugosidade dependente do processo. Na região de formação do gume postiço, partículas do gume embutidas na superfície da peça conferem um aspecto áspero à superfície [9].

A qualidade das superfícies obtidas na usinagem é limitada pelos parâmetros de entrada avanço e raio de quina da ferramenta. Os fatores que exercem influência sobre a qualidade superficial são relacionados na figura 12, e são divididos em dependência da cinemática, do processo e de outros fatores [5].

A rugosidade cinemática (teórica) é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta. As equações 3 e 4 permitem determinar a profundidade teórica da rugosidade cinemática [5].

$$R_t = r_e - (r_e^2 - f^2/4)^{1/2} \quad (3)$$

ou

$$R_t = f^2 / 8r_e \quad (4)$$

Condições de validade:

$$2.r_e.\cos\chi \geq f$$

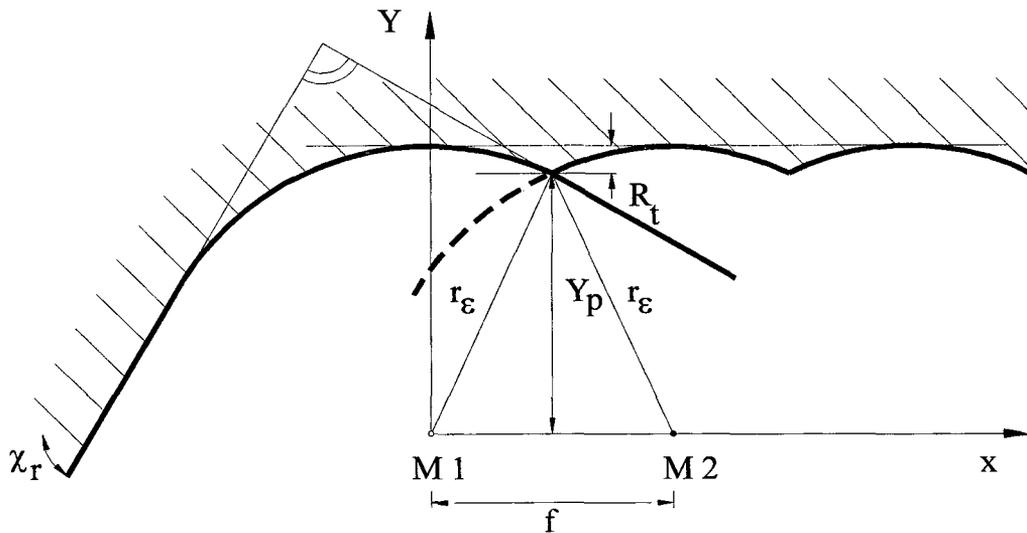


Figura 13 - Influência do raio de quina e avanço sobre a rugosidade cinemática [5]

A profundidade de corte exerce pouca influência sobre a rugosidade no processo de desbaste. A profundidade de corte praticamente não exerce influência sobre a qualidade superficial, quando a profundidade for superior a um valor mínimo. Este valor mínimo situa-se normalmente entre 4 e 10 micrometros [15].

Dos ângulos da ferramenta, o ângulo de saída exerce maior influência sobre a qualidade superficial. Com o aumento do ângulo de saída a rugosidade diminui, em consequência da diminuição da força de corte [5,15].

O desgaste da ferramenta exerce influência sobre a qualidade superficial da peça [5]. Um aumento do desgaste leva normalmente a um aumento da rugosidade. Para ferramentas novas, os instantes iniciais de usinagem podem apresentar uma rugosidade pior que nos momentos subsequentes. Este fato decorre da estabilização do gume para uma certa condição de trabalho, conforme mostra a figura 14 [5, 15].

Os ângulos de direção do gume principal χ e secundário χ' , para valores próximos a zero, assim como ferramentas de raio de quina extremamente grandes, permitem a obtenção de rugosidades muito baixas. No entanto, a diminuição do ângulo de direção do gume principal aumenta a componente passiva da força de usinagem, podendo ocorrer vibrações regenerativas [9]. A função do ângulo de direção do gume secundário é de permitir que apenas uma pequena parte deste entre em contato com a superfície usinada, evitando assim vibrações regenerativas. Em ferramentas de acabamento executa-se às vezes um pequeno achatamento rigorosamente paralelo à superfície usinada e de comprimento entre 1,5 a 2,5 vezes o avanço, melhorando desta forma o acabamento. O plano achatado porém não deve ser maior do que o especificado, podendo ocorrer vibrações regenerativas [16].

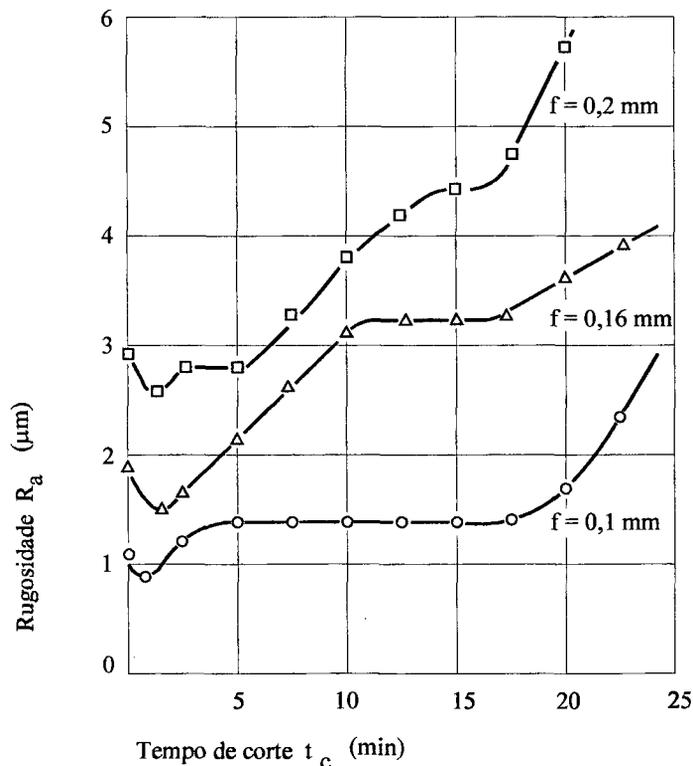


Figura 14 - Dependência entre a rugosidade média R_a e o tempo de corte [5]

2.1.4 - Formação do cavaco

Na usinagem, uma camada de material é removida das peças e transformada em cavaco por ação mecânica da ferramenta. A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente para os processos de usinagem (furação, fresamento, etc.) ou em máquinas-ferramentas onde há pouco espaço para os cavacos ou estes tenham que ser removidos automaticamente (tornos automáticos e de comando numérico) [17].

Os principais fatores que exercem influência sobre a formação do cavaco são as condições de corte e a geometria da ferramenta. A quebra adequada do cavaco pode ser obtida pela diminuição da deformabilidade do material da peça e pelo aumento da deformação do cavaco [5].

O aumento do grau de deformação, por uma curvatura maior do cavaco, é obtido através do uso de quebra cavaco ou da diminuição do ângulo de saída da ferramenta [5].

A formação do cavaco é influenciada também pela deformabilidade, tenacidade e resistência ou estado metalúrgico do material. Um aumento da resistência ou a redução da tenacidade geralmente levam a uma quebra melhor do cavaco. Elementos presentes ou adicionados intencionalmente nos aços tais como fósforo, enxofre e chumbo exercem uma forte influência sobre o mecanismo de formação do cavaco, favorecendo a formação de um cavaco mais quebradiço [5].

Como a capacidade de deformação do material é dependente da temperatura na região de corte, uma redução da velocidade de corte ou a refrigeração na região de corte levam à formação de cavacos mais quebradiços [5].

Na usinagem de materiais que possuem pouca ductidade, e por isto não permitem grandes deformações, modificações em parâmetros tais como uma diminuição da velocidade de corte ou do ângulo de saída, melhoram a quebra dos cavacos, devido a uma maior deformação do cavaco. De maior importância é a influência do avanço e do ângulo de direção do gume. Um aumento do avanço leva a cavacos mais espessos e a maiores tensões na região de cisalhamento. Em decorrência, os cavacos quebram com maior facilidade [15, 16].

Com um aumento da profundidade de corte deve-se escolher valores maiores de avanço para uma quebra mais favorável do cavaco. Utiliza-se normalmente a relação “profundidade x avanço” como critério de formação de cavaco [16].

Com relação aos tipos de cavacos formados, os mesmos podem ser classificados em quatro tipos básicos: cavaco contínuo, lamelar, cisalhado e arrancado, conforme mostra a figura 15.

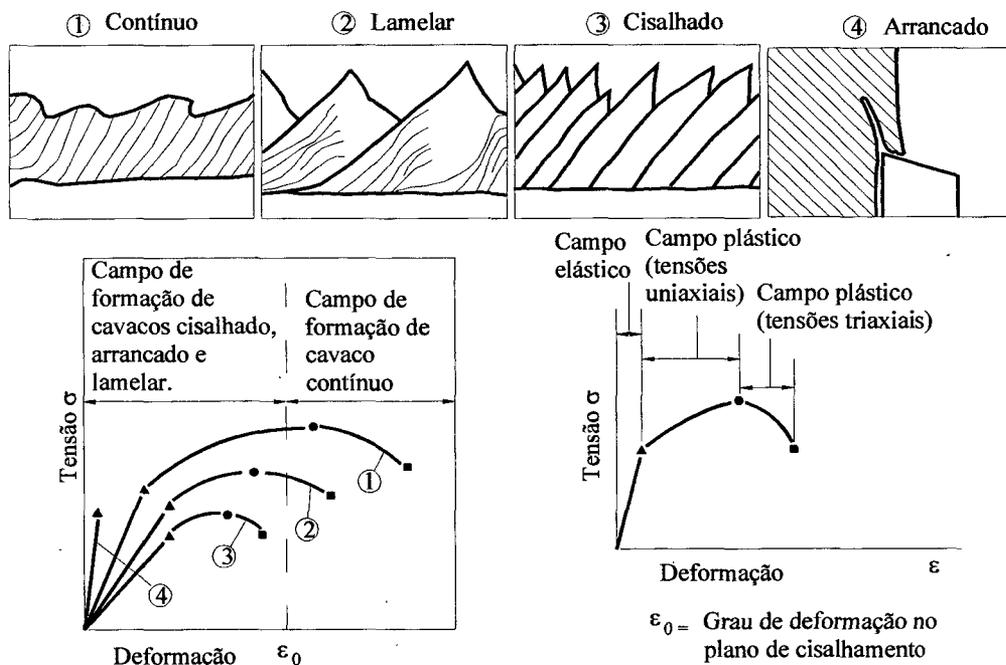


Figura 15 - Tipos de cavaco em dependência das propriedades dos materiais [5]

⇒ Cavaco contínuo:

É aquele formado na usinagem de um material dúctil. Em geral a separação na superfície de corte ocorre antes de ter sido esgotada a capacidade de deformação plástica do material [5].

⇒ Cavaco lamelar:

É formado na usinagem de materiais dúcteis com um pequeno encruamento devido à deformação plástica. A separação na superfície de corte ocorre na faixa de pleno esgotamento da deformação plástica do material. Para deformações plásticas (aparentes) maiores, as lamelas se separam totalmente entre si e os cavacos passam a ser denominados cisalhados [5].

⇒ Cavaco cisalhado

Cavacos cisalhados em parte caldeiam entre si na superfície inferior do cavaco, onde as temperaturas e as deformações são maiores [5].

⇒ Cavaco arrancado

É formado na usinagem de materiais frágeis e com estrutura heterogênea, como o ferro fundido ou as rochas. Os cavacos não são cisalhados e sim arrancados da superfície, de forma que a superfície da peça muitas vezes é danificada por microlascamentos [5].

Além dos quatro tipos mencionados, pode-se diferenciá-lo quanto a sua forma em: cavaco em fita, helicoidal, espiral e em lascas ou pedaços [18]. Certas formas dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e influenciam no desgaste da ferramenta. A forma do cavaco depende do material da peça, das condições de corte e da geometria da ferramenta (ângulo de saída e quebra cavaco) [3].

A NORMA ISO 3685-1977 fornece a classificação de cavacos baseada nos tamanhos e formas obtidos na usinagem de metais. Esta classificação consiste na descrição em forma de grupos, com subgrupos definindo o tamanho (normal, largo, curto, etc.) e condições físicas (emaranhado, conectado, livre, etc.). Este sistema de classificação também inclui um terceiro dígito de identificação numérica para certas formas de cavaco, para descrever seu fluxo e seu modo de quebra.

A figura 16 mostra várias formas de cavacos e suas respectivas denominações. As quatro formas superiores apresentam um transporte de cavaco difícil. Cavacos helicoidais planos preferencialmente apresentam a sua saída tangenciando o flanco da ferramenta, e em decorrência disto danificam o suporte e a quina da ferramenta. Cavacos em fita, cavacos emaranhados e cavacos fragmentados apresentam um perigo para o operador da máquina-ferramenta [15].

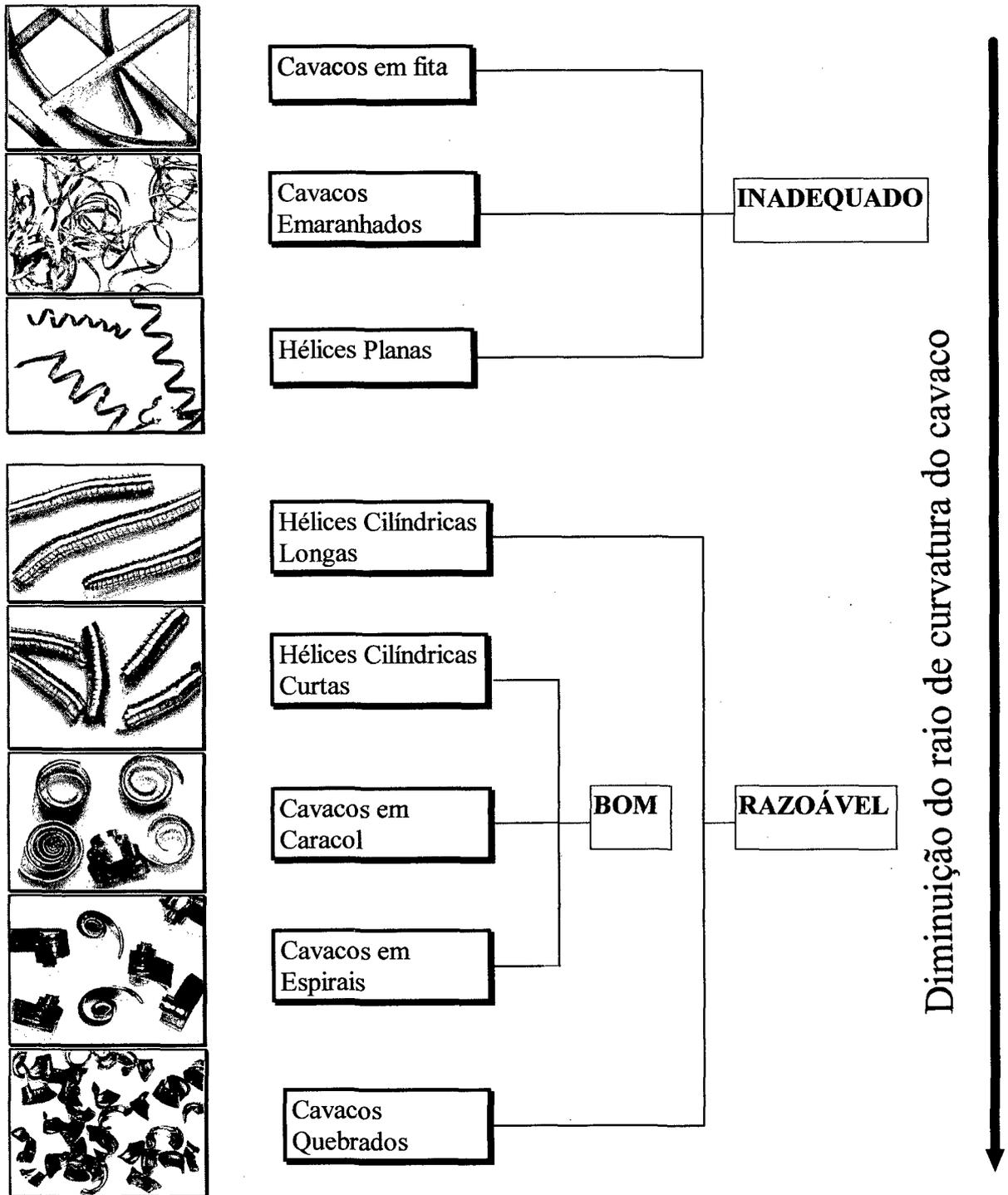


Figura 16 - Formas de cavaco [5, 15]

2.2 - Fatores que afetam a usinabilidade

As pesquisas realizadas até os dias atuais confirmam que a usinabilidade depende em grande parte dos seguintes fatores relativos ao material da peça: microestrutura, propriedades mecânicas, composição química, processos de conformação a quente e/ou a frio e tratamento térmico. Tais fatores são considerados pelos metalurgistas que buscam estabelecer uma relação entre a estrutura cristalina dos aços e os critérios de avaliação da usinabilidade [6]. O desgaste da ferramenta e a formação do cavaco são dois critérios distintos considerados pela metalurgia voltada à otimização da usinagem. O desgaste de ferramenta depende em grande parte das condições de atrito desenvolvidas entre as inclusões presentes no material da peça e a ferramenta durante o processo de corte [19].

Entretanto, a usinabilidade não depende somente das características intrínsecas do material da peça, já que as condições de corte e as características da ferramenta de corte levam a variações significativas na usinabilidade dos materiais [6].

Com relação à influência da velocidade de corte sobre a usinabilidade, sabe-se que em baixas velocidades de corte (< 15 m/min) a fragilidade dos cavacos de materiais não muito dúcteis aumenta, devido à maior deformação do cavaco. [15]. Os cavacos formados são descontínuos, a área de contato entre a ferramenta e o cavaco aumenta e o ângulo de cisalhamento diminui. A espessura do cavaco aumenta e o acabamento da superfície gerada não é satisfatório.

À medida que se aumenta a velocidade de corte, o cavaco formado tende a ser contínuo, o ângulo de cisalhamento é elevado e o fator de recalque do cavaco diminui. Isto mostra que a usinabilidade não pode ser considerada como uma propriedade intrínseca do material, pelo fato de ser afetada pelas condições de corte. Portanto, a usinabilidade não é associada apenas a um fator individualmente, e sim a muitos, que exercem diferentes influências e muitas vezes opostas [2].

Dentre as características da ferramenta de corte que exercem influência sobre a usinabilidade, podem ser citadas:

- A forma.
- Os ângulos característicos.
- A composição química.
- Os tratamentos térmicos utilizados na fabricação.
- A dureza.
- O acabamento superficial.
- O estado de afiação [6].

O mecanismo de corte também exerce influência sobre usinabilidade, como por exemplo: corte contínuo ou intermitente e rigidez da máquina-ferramenta (dependente das deformações e vibrações entre a peça e a ferramenta) [6].

A usinabilidade é fortemente influenciada uma série de fatores, principalmente pelo mecanismo de formação de cavaco. Este por sua vez é influenciado pela presença de inclusões na microestrutura do material a ser usinado. A compreensão do processo de fratura, associado à formação do cavaco no corte dos metais, é fundamental para melhorar a usinabilidade de uma determinada classe de aços.

2.2.1 - Mecanismo de formação do cavaco

Em geral, a formação de cavaco, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal-duro, aço-rápido ou cerâmica, se processa da seguinte forma:

- a) Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalcada contra a face da ferramenta de corte.
- b) O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento. Para facilitar o entendimento da formação do cavaco, esta região é considerada um plano, dito simplesmente plano de cisalhamento, conforme mostra a figura 17.
- c) Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem.
- d) Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a face da ferramenta. Enquanto tal ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também deslizar sobre a face da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

Do exposto conclui-se que a formação do cavaco, nas condições normais de trabalho, é um fenômeno periódico, inclusive na formação do cavaco contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de deslizamento, para cada porção de material removido [3].

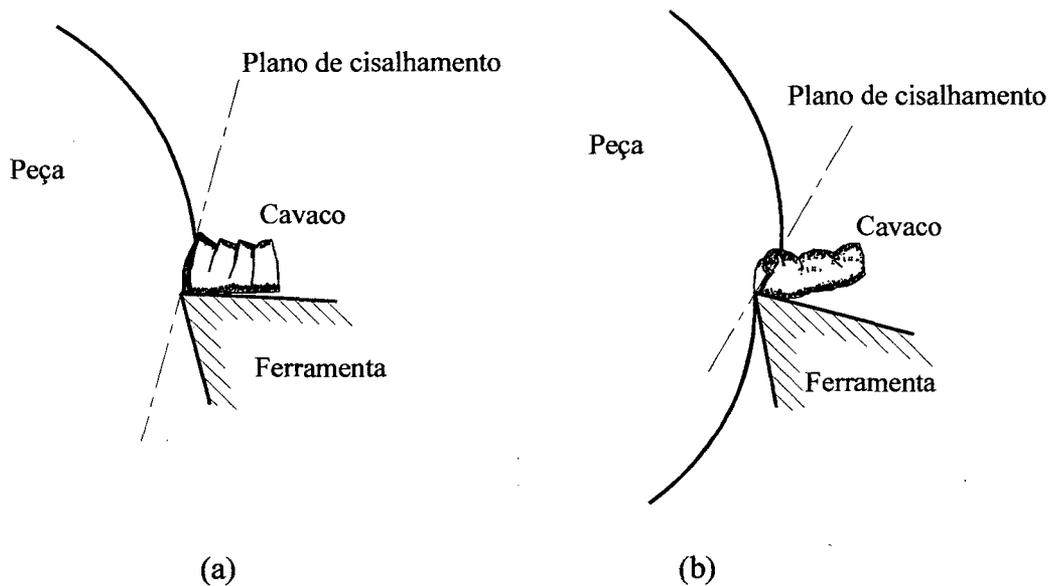


Figura 17 - Etapas de formação do cavaco: a) Cavaco de cisalhamento
b) Cavaco contínuo [3].

O processo de deformação associado com a formação de cavaco é heterogêneo, envolvendo altas taxas de deformação ($10^4 - 10^6/s$) e grandes deformações (> 1), em uma região extremamente localizada, a partir da interface ferramenta/peça. Os cavacos formados durante a usinagem de aços baixo e médio carbono, dentro de uma grande faixa de velocidades de corte, exibem características de fratura dúctil [20].

Tradicionalmente, aditivos de corte fácil, tais como enxofre, chumbo ou bismuto, são adicionados aos aços (combinados ou isoladamente) formando inclusões, que favorecem o processo de fratura do cavaco em baixas e moderadas velocidades de corte ($v_c < 100$ m/min). A função principal dos aditivos de corte fácil nos aços é a geração de partículas de segunda fase, de distribuição controlada, que facilitam a formação do cavaco durante o processo de usinagem, através do processo de formação, crescimento e coalescimento de microtrincas [20].

Durante o processo de formação do cavaco podem ser descritos três estágios principais básicos, até a separação final do material:

- a) Como o material é continuamente deformado, as partículas de segunda fase (tais como inclusões e precipitados), começam a atuar como centros de formação das microtrincas. A formação das microtrincas ocorre devido à incompatibilidade de deformação existente entre as partículas de segunda fase e a matriz. No caso dos óxidos, que são mais frágeis, a nucleação das microtrincas inicia pela ruptura interna da partícula. Por outro lado, quando as inclusões são mais macias que a matriz, como no caso de sulfetos, que apresentam baixa energia de interface com a matriz, a separação ocorre na interface inclusão-matriz metálica, mesmo em baixas deformações.
- b) Com o aumento da deformação plástica ocorre crescimento das microtrincas.
- c) Com a progressiva deformação, os danos alcançam um valor crítico no qual a instabilidade microestrutural ocorre, resultando no coalescimento das microtrincas e formação de fendas [19, 20].

Para compreender o papel da morfologia das inclusões no mecanismo de formação do cavaco, um modelo de corte ortogonal é apresentado na figura 18. Embora, o torneamento seja uma operação de corte tridimensional, considera-se um processo de corte ortogonal de forma a facilitar a compreensão [17].

ϕ = Ângulo de cisalhamento

h_{ch} = espessura de corte

h = espessura do cavaco

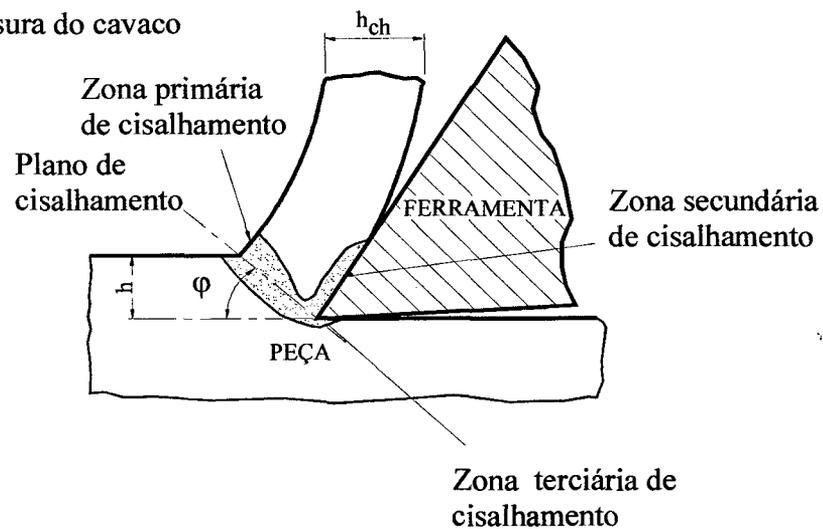


Figura 18 - Esquema ilustrativo das zonas de cisalhamento primária e secundária no mecanismo de formação do cavaco [6]

Durante a formação do cavaco ocorre uma interação das zonas primária e secundária de cisalhamento. O sulfeto de manganês aparece para promover a redução na tensão de cisalhamento e formar sítios de iniciação da fratura na zona primária de cisalhamento. Na zona secundária de cisalhamento os sulfetos promovem o aparecimento de regiões de baixa resistência ao cisalhamento [21].

Tipinis e Cook [22] desenvolveram modelos mostrando que inclusões macias podem “rodar” durante o cisalhamento de forma a criar uma zona mais fraca para a fratura. Já as inclusões duras requerem um mecanismo mais difícil de formação da microtrinca para provocar a fratura, conforme mostra a figura 19.

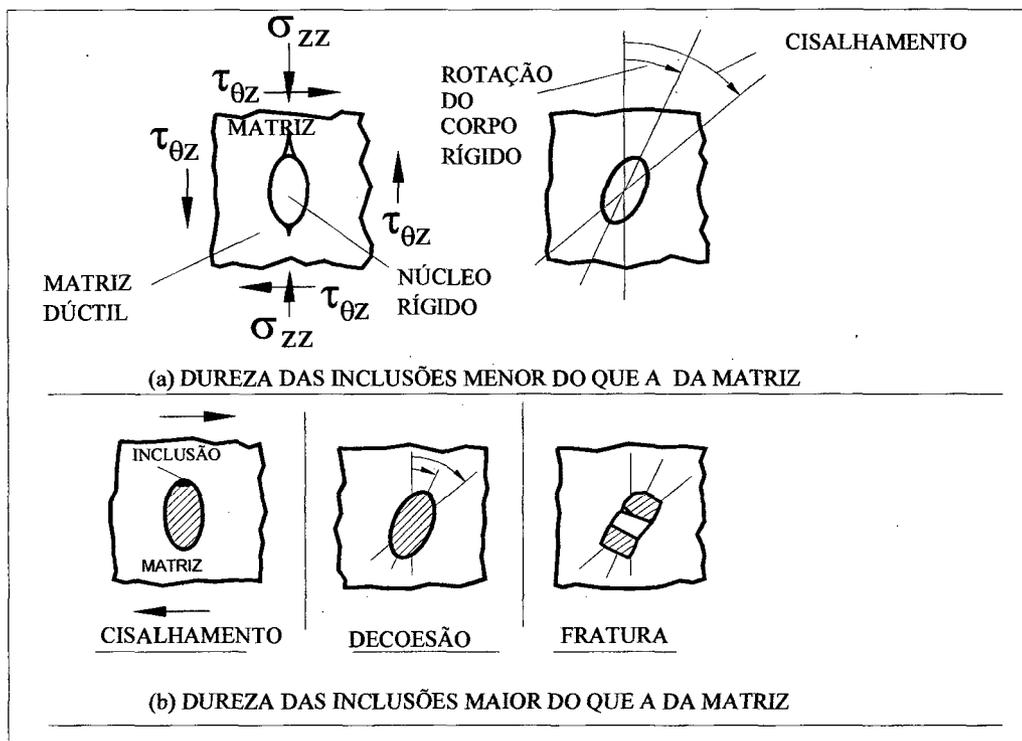


Figura 19 - Mecanismos de fratura na zona primária de cisalhamento em função da presença de inclusões: (a) moles e (b) duras [22].

2.2.2 - Influência das propriedades mecânicas do material

Inúmeras tentativas foram feitas de forma a se obter uma relação entre um parâmetro básico do material (por exemplo.: resistência, ductilidade, tenacidade e dureza), passível de ser medido em laboratório, e a usinabilidade [6].

Conforme visto em capítulos anteriores, o mecanismo de formação de cavaco envolve cisalhamento, sendo razoável se esperar que a ductilidade seja o parâmetro controlador da usinabilidade. Por outro lado as solicitações durante a usinagem de um material se caracterizam por:

- Elevada taxa de cisalhamento (tipicamente da ordem de $10^5/s$).
- Elevada quantidade de cisalhamento (de 200 a 400 %) [23].
- Cisalhamento em uma região (volume) extremamente localizada (“plano” de cisalhamento).
- Temperaturas elevadas.

Os ensaios de laboratório utilizados para avaliação da ductilidade (ou fragilidade) dos materiais, tais como tração, impacto (desde “charpy” até por explosão) situam-se sob condições de solicitação distintas daquelas existentes na usinagem e, por isso, não geram correlações válidas entre as propriedades (mecânicas) e desempenho na usinabilidade [6, 23].

A velocidades de deformação na usinagem são muito superiores àquelas normalmente alcançadas em ensaios convencionais de tração e impacto:

- Na usinagem com formação de cavaco $\dot{\gamma} = 10^2$ a 10^6 /s;
- Em ensaios de tração estática $\dot{\gamma} = 0,01$ / s;
- Nos ensaios de impacto $\dot{\gamma} = 10^2$ a 10^3 /s [6].

Devido a estas considerações é possível compreender as dificuldades encontradas em se correlacionar as características do material, através de dados obtidos em ensaios convencionais, com as condições reais que o material apresenta quando sujeito ao processo de usinagem com formação de cavaco [6].

A dureza é uma propriedade comumente utilizada pelos fabricantes de peças como um indicador de usinabilidade, de forma que um material com maior dureza é considerado como de pior usinabilidade. Mas tem sido demonstrado que a correlação entre dureza e usinabilidade é muito fraca, no sentido de que aços de mesma dureza e mesma composição química, porém com microestruturas diferentes, podem apresentar usinabilidades diferentes [2].

Blank e colaboradores [24] estabeleceram uma curva de influência da dureza sobre a usinabilidade para um aço baixo carbono com adição de enxofre, conforme mostrado na figura 20. Para os valores extremos de dureza a velocidade de corte para uma vida preestabelecida de 20 minutos é reduzida, enquanto que para uma dureza em torno de 110 Vickers observa-se um valor máximo na velocidade v_{c20} . Estes resultados mostram que durezas extremas (baixas e altas) afetam de forma desfavorável a usinabilidade, sob o ponto de vista do critério de vida da ferramenta.

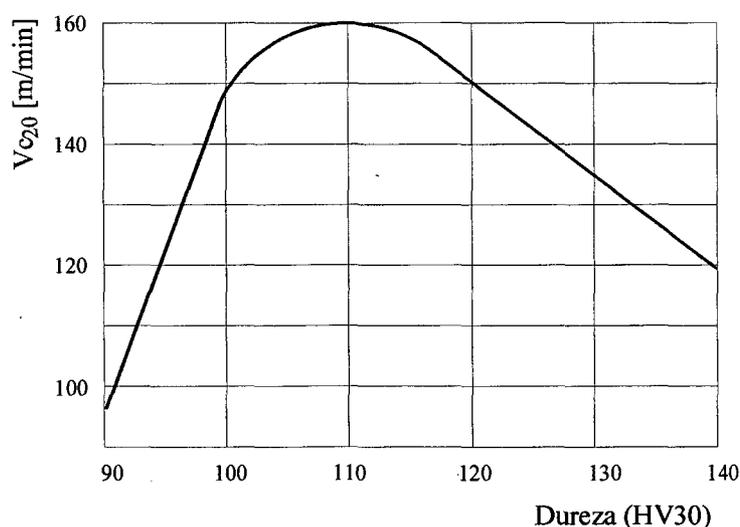


Figura 20 - Influência da dureza sobre a vida da ferramenta [24]

Embora não se possa generalizar os resultados quantitativos apresentados na curva anterior, esta serve para ilustrar uma tendência qualitativa.

Para os materiais moles (aços ferríticos e ferríticos-perlíticos de baixo carbono) um aumento da dureza se reflete na melhoria da usinabilidade, ao passo que para os aços duros um aumento complementar na dureza piora a usinabilidade.

Esta inversão de tendência se deve ao fato de que materiais moles, por possuírem excesso de ductilidade, geram fenômenos de gume postiço ou formação de cavacos contínuos (portanto, um aumento na dureza tende a melhorar a usinabilidade) enquanto materiais duros geram excessivo desgaste da ferramenta, elevados esforços de corte bem como temperaturas de corte elevadas (portanto, uma redução na dureza tende a aumentar a usinabilidade) [2].

O limite máximo de dureza recomendado para um aço, em operações de usinagem, com ferramentas de geometria definida, encontra-se em torno de 62 a 65 HRC [25]. Isto não significa que aços de maior dureza não possam ser usinados, entretanto devido aos altos valores de dureza as velocidades de corte são reduzidas a tal ponto que os custos de usinagem se tornam anti-econômicos [26].

Embora não se disponha de um método laboratorial de avaliação de uma propriedade mecânica fundamental que se correlaciona satisfatoriamente com usinabilidade, a propriedade de um material é determinada pela microestrutura e, neste sentido, o controle microestrutural tem conseqüências imediatas na usinabilidade, como será abordado no próximo capítulo.

2.2.3 - Influência da microestrutura da matriz

A microestrutura (caracterizada pela natureza, forma, quantidade e distribuição das fases presentes no material) determina as propriedades mecânicas e, portanto, a usinabilidade do material. Uma dada microestrutura é resultante da composição química e do processamento (fusão, tratamentos termo-mecânicos e etc) sofrido pelo aço. Por outro lado, esta microestrutura pode se alterar mediante tratamentos térmicos ou termo-mecânicos posteriores [23].

Assim, no âmbito industrial (usinas siderúrgicas), a obtenção de uma microestrutura com melhor usinabilidade tem por estratégia a manipulação de variáveis de processo nas etapas de:

- 1) Elaboração do aço (composição química base do material, técnicas de desoxidação);
- 2) Tratamento termo-mecânico (seqüência de passes e respectivas temperaturas na laminação);
- 3) Tratamentos térmicos (por exemplo recozimento, normalização) anteriores à usinagem [23].

Embora existam diversas técnicas para melhorar a usinabilidade da microestrutura, não se deve utilizá-las indiscriminadamente pois, dependendo do contexto específico do produto, algumas se revelam estrategicamente inviáveis. Favorecer a formação de sulfeto de manganês é amplamente utilizado em aços de baixo carbono de corte fácil (“Free-Cutting”) enquanto em aços ferramentas (alto carbono) costuma-se utilizar outras técnicas como o coalescimento. No caso dos “aços de usinabilidade melhorada” a usinabilidade é uma propriedade secundária em relação às propriedades exigidas pelo tipo de aplicação do produto final.

Outro aspecto importante resultante da inversão de comportamento de usinabilidade, quando do aumento da dureza (figura 20), o mesmo parâmetro microestrutural pode gerar efeitos contrários, se utilizado em diferentes contextos. Por exemplo, aços de baixo carbono (de 0,2 a 0,3 %) tem melhor usinabilidade na presença de perlita refinada (normalizada) enquanto aços de carbono mais elevado (0,6% C) tem melhor usinabilidade quando constituídos de cementita esferoidizada (recozimento de esferoidização ou coalescimento).

Do exposto depreende-se ser fundamental associar a discussão da influência da microestrutura ao contexto específico do material em estudo, tal como abordado a seguir.

A - Fases presentes nos aços

- **Ferrita:** é uma fase mole, podendo ser endurecida por solução sólida pelos elementos P, Mn, Si. Quanto à morfologia, em aços hipoeutetóides a ferrita é diferenciada em termos de ferrita pró-eutetóide e aquela presente na perlita. A ferrita pró-eutetóide pode se apresentar na forma massiva (típica de resfriamentos lentos) ou acicular, também chamada de estrutura de Widmanstätten (típica de resfriamentos mais rápidos, tal como normalização). Em aços eutetóides ou hiper-eutetóides a ferrita encontra-se presente apenas na perlita [27].

-
- Carbonetos: o carboneto mais comum nos aços é o carboneto de ferro (cementita - Fe_3C). Os carbonetos, por serem materiais cerâmicos, apresentam elevada dureza. A cementita pode ser endurecida mediante dissolução de alguns elementos, tais como Mn e Cr (em baixa quantidade), formando carbonetos mistos. Outros elementos, tais como W, V, Ti, Mo, Nb ou Cr (em elevada quantidade) formam carbonetos ligados, com dureza maior do que a cementita. Quanto à morfologia, os carbonetos podem ser lamelares (típico da cementita que constitui a perlita), esferoidizados (cementita em aços submetidos ao tratamento de coalescimento), poligonais (típicos de aços altamente ligados, como os aços ferramentas) e ainda finamente dispersos (carbonetos de revenimento, cuja morfologia não pode ser resolvida na escala da microscopia ótica) [27].

 - Austenita: tal como a ferrita, também é uma fase mole, porém com maior capacidade de encruamento e maior ductilidade. Encontra-se presente, por exemplo, nos aços inoxidáveis austeníticos [27].

 - Martensita: Em dependência do teor de carbono pode se apresentar como uma estrutura dura e frágil, formada quando as ligas são resfriadas rapidamente do campo austenítico (tratamento de têmpera) até uma temperatura M_f (final de transformação martensítica). A transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é alta o suficiente para evitar a difusão do carbono. Quando presente nos aços, encontra-se na condição revenida, possuindo carbonetos (de revenimento) precipitados [27].

 - Inclusões: partículas ou fases presentes na matriz metálica não oriundas do sistema Fe-C. Estas partículas são usualmente compostas de substâncias tais como óxidos, sulfetos ou silicatos, embora possam também ser consideradas outras substâncias metálicas e insolúveis na matriz [9, 28, 29].

B - Microestruturas típicas dos aços.

Do ponto de vista microestrutural, os aços podem ser divididos em três grupos:

- Aços predominantemente ferríticos: é o caso de aços abaixo de 0,1 % C, que contém acima de 90 % de ferrita (sendo a parte remanescente composta de perlita). Neste caso, a usinabilidade do aço pode ser melhorada na condição laminado com alívio de tensões, introdução de sulfeto de manganês ou ainda mediante endurecimento da ferrita por fósforo (caso de aços refosforados) ou por encruamento (material trefilado e submetido ao recozimento para alívio de tensões) [27].

- Aços ferríticos - perlíticos: é o caso de aços com teores entre 0,1 e cerca de 0,8 % C. O teor de carbono no ponto eutetóide é dependente da presença de elementos de liga, conforme ilustra a figura 21. Pode-se constatar que a presença de 2% de molibdênio é suficiente para gerar uma estrutura totalmente perlítica para um teor de carbono de apenas 0,25% [27].

Nestes aços, a quantidade (em termos de fração volumétrica) de perlita, o tamanho da colônia perlítica (espessura das lamelas), presença de inclusões e distribuição das fases são os fatores relevantes para a usinabilidade.

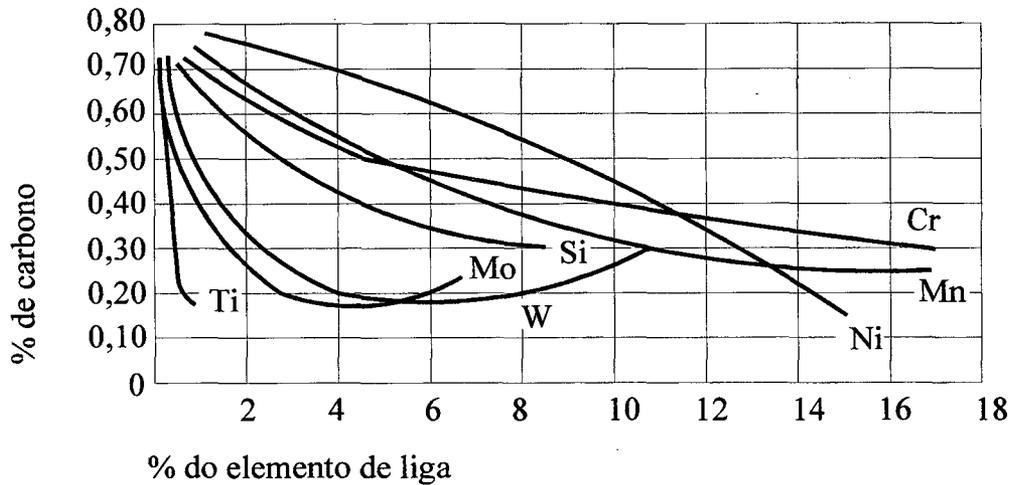


Figura.21 - Influência dos elementos de liga sobre o teor de carbono e a temperatura eutetóide [27]

A literatura indica os seguintes procedimentos em termos de estratégias para melhoria de usinabilidade:

Para baixos teores de carbono (até 0,2 %), a condição recomendável, inclusive por fatores de economia, é a de simplesmente laminado. Entretanto, melhores resultados são obtidos se um alívio de tensões for aplicado. Aços com teor de carbono em torno de 0,25 % geralmente apresentam uma boa usinabilidade. Aços com teor de carbono entre 0,4 e 0,8 apresentam uma boa usinabilidade principalmente em função dos critérios de formação de cavaco e acabamento superficial [5].

À medida em que o teor de carbono é elevado, são necessários tratamentos térmicos de recozimento ou coalescimento de forma a se minimizar o desgaste abrasivo sobre a ferramenta de corte [5].

Segundo Chiaverini [30] podemos avaliar o efeito da microestrutura dos aços, com base no teor de carbono, conforme mostra a tabela 1.

Teor de Carbono %	Melhor Condição	Tratamento Térmico
até 0,2	Perlita - Ferrita/laminado	Alívio de tensões - mais econômico
0,2 a 0,3	Perlita - Ferrita/laminado	Normalização melhora
0,3 a 0,4	Perlita - Ferrita/grossa	Recozimento melhora
0,4 a 0,6	Perlita ou esferoidizado	Recozimento pleno
Acima de 0,6	Esferoidizado (carbonetos esféricos em matriz ferrítica)	Coalescimento

Tabela 1 - Melhores condições de usinagem em função do teor de carbono dos aços segundo Chiaverini [30]

- ➔ Aços esferoidizados: Aços com teores acima de 0,6 %C são utilizados em produtos cuja aplicação exige elevada resistência mecânica e/ou elevada resistência ao desgaste. Exemplo típico de tais aços são os aços ferramentas (cujo teor de carbono varia entre 1 e 2 %C, além de elevadas quantidades de elementos de liga) e que são utilizados no estado temperado e revenido. Neste caso, em termos de estratégias de melhoria da usinabilidade, não cabe o uso de inclusões (devido ao efeito fragilizante no produto final), nem o emprego de recozimento ou normalização (pois a dureza ainda resultaria elevada para fins de usinabilidade) [27].

Assim, costuma-se adquirir o material no estado coaléscido (matriz ferrítica com carbonetos esferoidizados) visando obter a menor dureza possível, executar a usinagem e posteriormente tratar termicamente (têmpera e revenimento) para que o produto final adquira as propriedades desejadas. Ressaltando, os aços esferoidizados já se encontram (microestruturalmente) no estado de máxima usinabilidade [27].

☞ Aços martensíticos revenidos: Existem dois casos de microestrutura martensítica em aços, a saber:

i) Aços baixa liga, onde a martensita revenida propicia dureza nas faixas (dependendo da temperatura de revenimento) de 35 a 55 HRc (baixa usinabilidade). Estes materiais apresentam baixa usinabilidade e por isso são fornecidos no estado recozido (ferrítico-perlítico), esferoidizado (cementita esferoidizada em matriz ferrítica) ou mesmo na condição de revenimento em alta temperatura (martensita parcialmente decomposta em ferrita e carbonetos parcialmente esferoidizados), com dureza entre de 300 a 350 HB [2]. Após a usinagem, é realizado o tratamento de têmpera a fim de se atingir a microestrutura e propriedades no produto final [2, 26].

ii) O segundo caso consiste de aços martensíticos com carbonetos primários, típico de aços ferramentas (dureza entre 45 e 60 HRc). Estes materiais são fornecidos no estado coaléscido (esferoidizado), conforme mencionado anteriormente e, após usinagem, são submetidos à têmpera e revenimento [27].

- ⇒ Aços austeníticos: É o caso típico de alguns aços inoxidáveis. A melhoria de usinabilidade pode ser feita mediante refino de grão ou mediante formação de inclusões (geralmente à base de cálcio) [14, 27].

Existem ainda os aços bainíticos e austeno-ferríticos. Nos aços bainíticos a usinabilidade é importante porém existem poucas referências na literatura. Os aços austeno-ferríticos tem pouco interesse quanto à usinabilidade pois são utilizados na forma de chapas.

C - Técnicas microestruturais de melhoria da usinabilidade.

- ⇒ Refino de grão (ou colônia perlítica)

Aços com alta ductilidade (austeníticos, e ferríticos-perlítico com carbono abaixo de 0,2 a 0,3%C) podem ter sua usinabilidade melhorada mediante refino de grão (da ferrita ou austenita) ou da colônia perlítica [23, 30].

O refino de grão pode ser obtido mediante modificações no esquema de passes da etapa de conformação mecânica, introdução de inclusões, tratamento de recristalização ou mediante normalização [27].

Uma estrutura de grãos grosseira fornece uma maior taxa de remoção de material, embora uma estrutura de grãos finos gera um melhor acabamento superficial, para uma mesma vida da ferramenta. Do ponto de vista favorável à usinabilidade, uma estrutura de grãos grosseira pode ser mais adequada numa operação de desbaste e uma estrutura de grãos finos pode ser usada em operações de acabamento. Entretanto, aços que apresentam uma estrutura de grãos refinada, produzida por exemplo pela adição de alumínio, podem apresentar uma significativa queda na vida da ferramenta devido à formação de partículas abrasivas de alumina [4].

⇒ Encruamento

Para os mesmos materiais do caso anterior (alta ductibilidade) a usinabilidade no estado encruado tende a ser melhor do que no estado recozido.

Encruamento de microestrutura dúctil, através do processos de conformação mecânica, é usualmente indicada para promover uma melhoria da usinabilidade. Com o encruamento ocorre uma queda da ductilidade do material, de forma que o ângulo de cisalhamento é elevado, o que favorece o processo de formação do cavaco, além de se evitar a formação de gume posição [2, 6, 21].

⇒ Homogeneização da microestrutura.

A presença de determinados elementos químicos (Si e Mn, por exemplo), associado a procedimentos específicos da etapa de laminação, pode gerar heterogeneidades na distribuição dos elementos e das fases ao longo da microestrutura, gerando o fenômeno de bandejamento [27]. O bandejamento é um fenômeno comum na conformação mecânica e se trata de alinhamento da ferrita e da perlita na direção de escoamento durante a deformação, representado pelas linhas alongadas na figura 22 [31].

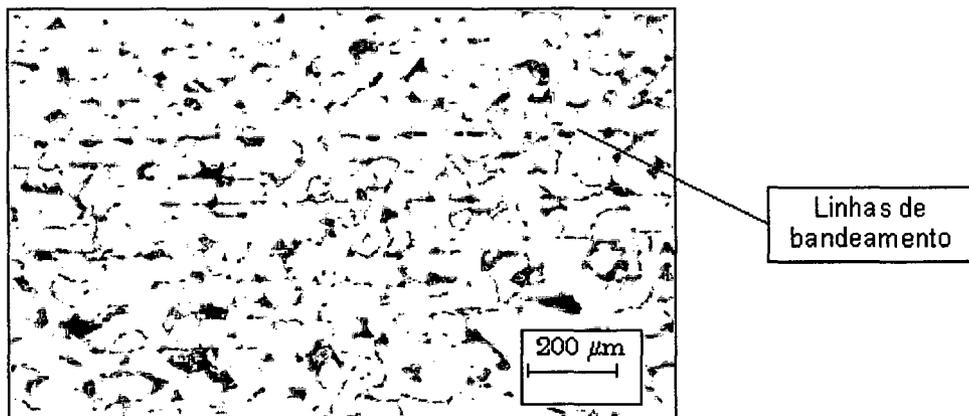


Figura 22 - Micrografia de um aço recozido (0,12% de carbono) [31]

Estruturas bandeadas e estruturas compostas de grãos ferríticos de granulação heterogênea são desfavoráveis à usinabilidade, pois resultam em um acabamento superficial insatisfatório e menor vida da ferramenta de corte [26].

Estruturas não-homogêneas e com alto grau de bandeamento resultam em problemas na usinagem. O grau de dificuldade encontrado na usinagem irá depender do tipo de operação e se o corte é paralelo ou transversal ao eixo da peça. O grau de bandeamento pode ser minimizado por uma modificação nas temperaturas da etapa de laminação, através do controle das taxas de resfriamento ou através da diminuição da temperatura de transformação isotérmica [4].

➤ Alteração da quantidade relativa das fases

É possível modificar a relação entre a quantidade de ferrita e a perlita dos aços estruturais através do tratamento térmico. Efeito similar pode ser alcançado pela variação do conteúdo de carbono, embora seja mais conveniente utilizar o tratamento térmico. O tratamento térmico possibilita, além da melhoria da usinabilidade, obter propriedades mecânicas mais favoráveis, por exemplo a dureza adequada à necessidade do componente usinado [32].

De forma a verificar a influência da variação da quantidade relativa dos microconstituintes (ferrita e perlita) sobre a usinabilidade do aços, Boulger [33] utilizou um aço com a quantidade de perlita variando de 10 a 100 %, conforme mostra a figura 23. Para uma marca de desgaste de flanco $VB = 0,76$ mm e uma vida $T = 60$ min e variando a velocidade de corte, os resultados mostram que o aço apresentando 10 % de perlita, alcançou uma velocidade $v_{c60} = 260$ m/min, enquanto o aço que apresentava 100 % de perlita alcançou a velocidade $v_{c60} = 120$ m/min.

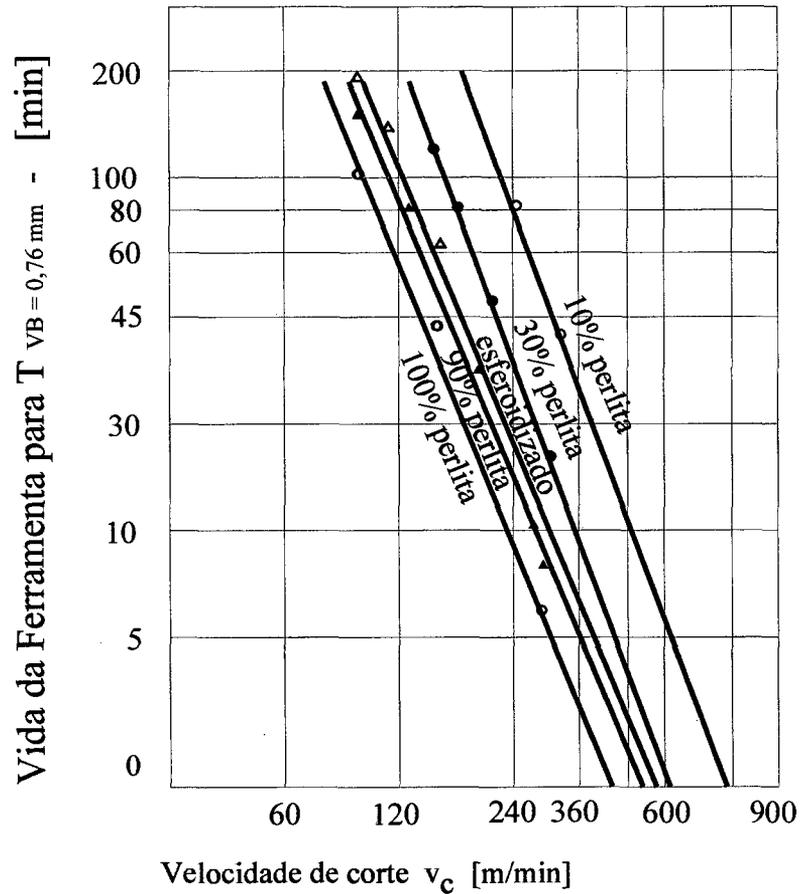


Figura 23 - Influência da variação das quantidades dos microconstituintes perlita/ferrita sobre a usinabilidade dos aços segundo Boulger [33]

➤ Alteração da morfologia da cementita

Nos aços em que predomina a perlita (dureza geralmente elevada para fins de usinabilidade), a esfereoidização da cementita tende a melhorar a usinabilidade por diminuir a dureza.

A figura 23 ilustra o efeito benéfico da cementita esferoidizada em relação às frações elevadas de perlita. A esferoidização das lamelas de cementita é obtida mediante tratamento de coalescimento

A alteração da morfologia da cementita é particularmente importante em aços de elevado carbono, a ponto destes aços (por exemplo, aços ferramentas) serem fornecidos no estado coalescido justamente para viabilizar a usinagem, sendo posteriormente endurecidos por têmpera [23].

Um exemplo do efeito que as alterações microestruturais introduzem na usinabilidade de um dado aço (portanto composição fixa) pode ser ilustrado na tabela 2, onde são apresentados os resultados obtidos na usinagem do aço UNI 38 NiCrMo4, submetido a diferentes tratamentos térmicos e apresentando diferentes microestruturas. A usinabilidade é indicada como v_{c30} (quanto maior a velocidade de corte, para uma determinado tempo vida de ferramenta, maior a usinabilidade) [2].

Caso	Microestrutura	Dureza Brinell	v_{c30} m/min
a	Martensita	400	25
b	Martensita; Sulfetos	300	35
c	Estrutura Widmanstaetten (1)	250	33
d	75% perlita; 25% ferrita	190	35
e	50 % perlita; 50% ferrita (2)	170	45
f	65% Perlita; 35% Ferrita; sulfetos	185	48
g	Cementita esferoidizada	180	57
(1) provavelmente resultante de normalização			
(2) provavelmente estrutura obtida com recozimento pleno			

Tabela 2 - Resultados obtidos na usinagem do aço UNI 38 NiCrMo4 (de construção mecânica), submetido a diferentes tipos tratamentos térmicos e apresentando diferentes microestruturas [2].

A tabela 2 mostra que a dureza não se correlaciona diretamente com usinabilidade, pois os casos “g” e “e” indicam queda de usinabilidade com queda de dureza, enquanto os casos “d” e “e” indicam uma tendência oposta. Além disso constata-se que a faixa de durezas entre 190 a 300 HB não apresenta variação significativa de usinabilidade enquanto a faixa entre 170 e 190 HB indica sensível variação da usinabilidade.

Por outro lado, a tabela 2 ilustra que a influência da microestrutura segue os princípios anunciados anteriormente:

- A presença de sulfetos melhora a usinabilidade (casos “a” e “b”).
- O aumento da fração perlítica prejudica a usinabilidade (casos “d” e “e”);
- Refino da estrutura (casos “e” e “c”) prejudica (para o teor de carbono em questão) e coalescimento (casos “g” e “e”) melhora a usinabilidade (para este aço).

As modificações microestruturais da tabela anterior foram obtidas mediante tratamento térmico, sendo que a influência deste é discutido no item 2.2.5

A figura 24 mostra de forma complementar a influência do tratamento térmico sobre o critério de vida da ferramenta de corte (metal-duro) para um aço de construção de baixa liga submetido a diversos tratamentos térmicos.

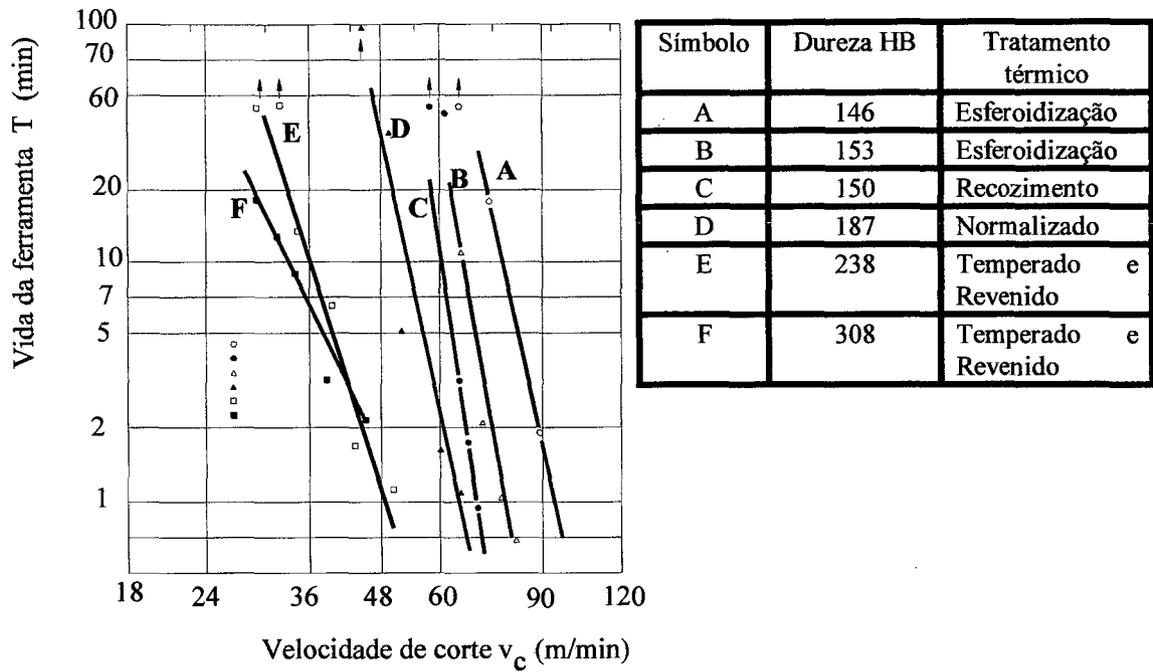


Figura 24 - Influência da microestrutura sobre a vida da ferramenta na usinagem do aço AISI 4135 [1].

➤ Formação de inclusões

Em aços com ductilidade elevada, costuma-se favorecer a formação de inclusões visando melhoria da usinabilidade. Entretanto, o emprego das diversas técnicas, tendo em vista a melhoria da usinabilidade, sofre algumas restrições devido à possibilidade de se comprometer as características de utilização do componente usinado.

As pesquisas atuais sugerem a combinação de técnicas, ajustando à necessidade dos fabricantes de peça, melhorando desta forma a usinabilidade sem comprometer as características de emprego do material. Em baixas velocidades de corte ($v_c < 100$ m/min) é conveniente favorecer a formação de inclusões metálicas (chumbo ou bismuto) ou aumentar o teor de enxofre (formando sulfetos de manganês) de forma a promover a melhoria da usinabilidade. Em altas velocidades de corte ($v_c > 100$ m/min) tem sido utilizado reduzir ou eliminar completamente as partículas duras e abrasivas da matriz. Isto pode ser alcançado, por exemplo, através da obtenção de aços com baixo teor de oxigênio, ou através do tratamento ao cálcio para modificar as inclusões abrasivas. Entretanto não há referência na literatura sobre a usinabilidade de aços com inclusões metálicas, em operações de torneamento, com o uso de altas velocidades de corte.

2.2.4 - Influência do tratamento térmico

A finalidade do tratamento térmico, na maioria dos casos, é reduzir a resistência mecânica dos aços a níveis satisfatórios. A forma na qual isto é alcançado depende da composição da liga, e para grande parte dos aços baixa liga a esferoidização é suficiente. Se uma estrutura de grãos finos é requerida, é feita a normalização antes da esferoidização [4].

A influência dos diversos tratamentos térmicos já foi indicada nos itens anteriores, entretanto, a sistematização de sua influência é apresentada a seguir.

König e Kreis [34] descreveram a influência de diferentes tratamentos térmicos sobre a usinabilidade relativa, utilizando aços não-ligados e baixa liga, comparando a usinabilidade destes aos aços de baixo carbono de corte fácil, conforme mostra a figura 25. A concentração de carbono variou de 0 a 1% e a pesquisa envolveu aços estruturais sendo as microestruturas obtidas através de diferentes tipos de tratamentos térmicos. Os resultados mostram uma forte dependência do tratamento térmico, como também dos efeitos produzidos pelo conteúdo de carbono. Os melhores resultados foram obtidos em aços esferoidizados, seguidos pelos aços submetidos ao recozimento, e na seqüência aços com estrutura de grãos finos (devido à normalização) ou mista. Os piores resultados foram obtidos nos aços temperados e revenidos e nos aços apenas temperados.

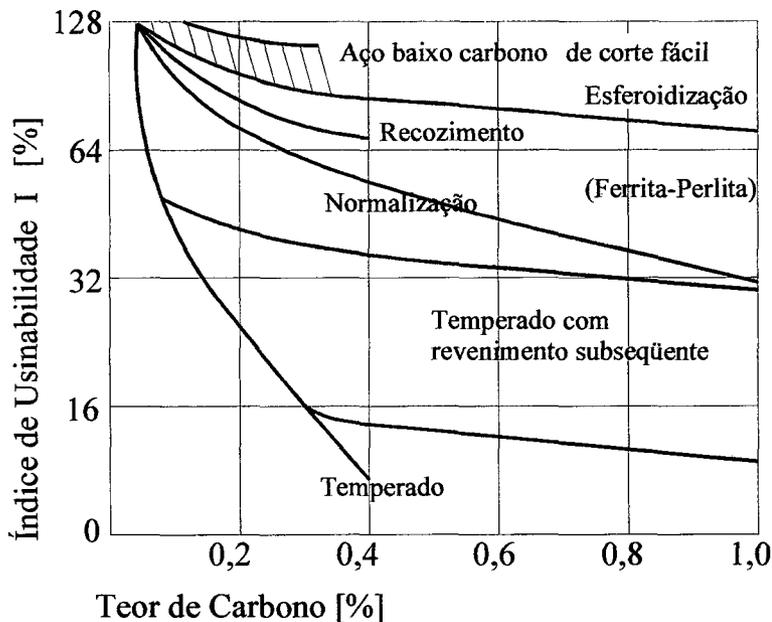


Figura 25 - Representação esquemática do índice de usinabilidade em função do tratamento térmico segundo König e Kreis [34].

2.2.5 - Influência das inclusões sobre a usinabilidade

O estudo das inclusões, principalmente quanto à sua característica de deformação, é um fator de suma importância não só por comprometer o desempenho dos componentes de máquinas em serviço (risco de falha por fratura), mas principalmente devido à influência que exerce no comportamento do material quando submetido a processos de conformação a quente ou a frio (tais como: laminação, forjamento, trefilação) e usinagem.

Os custos relativamente elevados dos processos de usinagem tais como torneamento, furação e fresamento têm atraído a atenção de forma a melhorar a produtividade. O aumento da produtividade no processo de usinagem do aço, entretanto, só pode ser alcançado através de um estreito controle dos fatores que afetam a usinabilidade. A metalurgia voltada à usinabilidade tem como seu principal foco a melhoria da usinabilidade de uma determinada classe de aços, através de modificações na microestrutura, particularmente atuando sobre as inclusões, sem entretanto comprometer a característica de aplicação do componente usinado. Os resultados obtidos durante a usinagem de um material, são basicamente relacionados com as condições de atrito entre o par ferramenta/peça (o que incide diretamente no mecanismo de desgaste por abrasão) e no aumento da fragmentabilidade do cavaco, que por sua vez favorece a automatização dos processos reduzindo os custos.

A tentativa em se promover a melhoria da usinabilidade de uma determinada classe de aços, atuando na microestrutura, recorrendo-se à utilização da técnica de adição de elementos químicos, deve ser feita através de um estreito e rigoroso controle dos demais fatores influentes, de forma que se possa verificar, avaliar e justificar os custos decorrentes do emprego de tal técnica.

A - Origem das inclusões

Sims [35] classificou as inclusões não-metálicas de acordo com sua origem, baseadas em endógenas e exógenas. As inclusões endógenas formam-se através de reações no metal líquido, e sua formação é imposta por adições ou mudança na solubilidade durante o processo de solidificação. Óxidos e sulfetos são exemplos de inclusões endógenas presentes nos aços e são controladas pela quantidade de oxigênio e enxofre em solução no metal fundido. As inclusões exógenas, por outro lado, são provenientes do desgaste de materiais refratários ou das escórias. Algumas das características destas inclusões nos aços observadas por Kiessling [36] são: maiores se comparadas com as inclusões endógenas, de ocorrência esporádica, formas irregulares e estruturas complexas.

B - Tipos de inclusões

As inclusões podem ser classificadas de acordo com sua natureza química e/ou sua capacidade de deformação:

☞ Alumina (Al_2O_3) e cálcio aluminatos

Formam-se durante a prática de desoxidação do aço embora possam ser oriundas dos refratários ou da escória. São frágeis e indeformáveis mesmo em elevadas temperaturas. Apresentam alta resistência ao cisalhamento [37].

⇒ Silicatos de cálcio e manganês

São frágeis à temperatura ambiente, mas aumentam sua capacidade de deformação em elevadas temperaturas. A capacidade de deformação aumenta com o aumento do ponto de fusão destes silicatos (por exemplo do silicato de ferro para o silicato de manganês) [37].

⇒ Sulfeto de manganês - MnS

Apresenta maior capacidade de deformação que as inclusões anteriores.

⇒ Chumbo e bismuto

São inclusões metálicas insolúveis na matriz do aço. São deformáveis e se liquefazem nas temperaturas alcançadas no processo de usinagem [37].

a - Influência das inclusões de alumina e cálcio aluminatos sobre a usinabilidade

Alumínio, silício e cálcio são comumente usados como desoxidantes e afetam a usinabilidade. Especialmente o alumínio que tende a formar Al_2O_3 (inclusão dura e angular) que aumenta o desgaste da ferramenta de corte [2].

As inclusões de alumina são de natureza abrasiva e contribuem de forma significativa para a progressão do desgaste de flanco na ferramenta de corte. Um dos procedimentos metalúrgicos utilizados é o tratamento ao cálcio. Esta técnica possibilita a modificação morfológica e composição destas inclusões de forma a minimizar seus efeitos nocivos. O tratamento ao cálcio produz dispersão das cadeias de alumina, possibilitando a formação de óxidos globulares, através da formação de uma capa protetora de S (Mn, Ca) ao redor das inclusões de óxidos diminuindo o caráter abrasivo das inclusões, conforme mostra a figura 26 [38].

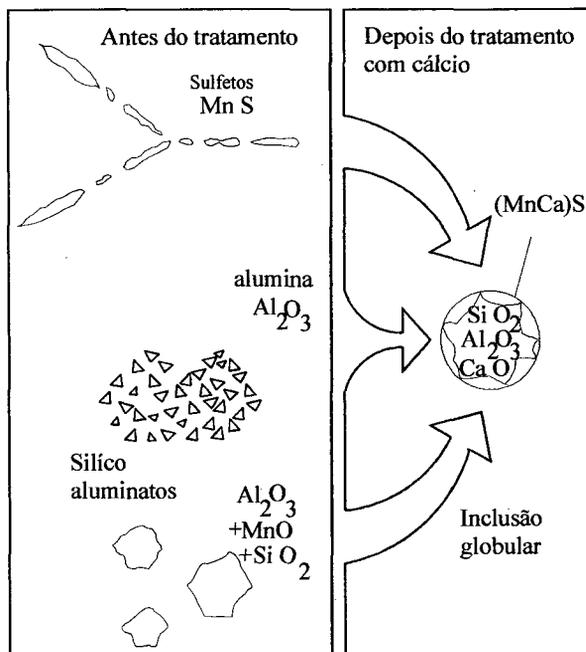


Figura 26 - Esquema ilustrativo do tratamento ao cálcio [38]

b - Influência das inclusões de silicatos sobre a usinabilidade

Silicatos duros (SiO_2) resultantes da prática da desoxidação são relativamente duros e indeformáveis em temperaturas elevadas exercendo desta forma um forte efeito abrasivo sobre a ferramenta de corte [37].

No caso particular dos aços inoxidáveis, estes são tratados com silício e devido ao alto conteúdo de manganês dos mesmos, as inclusões presentes são silicatos básicos tais como o de manganês ($MnSiO_3$). Este tipo de inclusão exerce um forte influência sobre a vida da ferramenta, principalmente quando são utilizadas ferramentas de metal-duro contendo carboneto de titânio. Estas inclusões são deformáveis em altas temperaturas e tendem a formar uma película protetora sobre a face da ferramenta, atuando como uma barreira contra o desgaste por difusão [37].

c - Influência das inclusões de sulfeto sobre a usinabilidade

As inclusões de sulfeto, principalmente sulfeto de manganês, são favoráveis à usinabilidade. O efeito das inclusões de sulfeto de manganês sobre a usinabilidade pode ser otimizado, atuando na morfologia, tamanho e fração volumétrica [37].

Efeitos gerais:

- Forte influência na formação do gume postiço, conduzindo à formação de gumes menores e mais estáveis em direção a altas velocidades de corte, aumento da vida da ferramenta, diminuição da resistência ao corte e melhor acabamento em baixas velocidades de corte (mas pior em altas velocidades devido à tendência em fazer persistir a formação do gume) [37].
- Auxilia na micro e macro-ruptura de cisalhamento na formação do cavaco, na região primária de cisalhamento; diminui a resistência ao corte e promove uma melhor quebra do cavaco [37].
- Apresentam-se alongadas na região secundária de cisalhamento, sendo também extrudadas como um filme fino na região de interface entre o cavaco e a face da ferramenta, acarretando redução no atrito e um aumento no ângulo de cisalhamento associado com baixa resistência ao corte [37].

O enxofre atua benéficamente sobre a usinabilidade quando forma sulfetos mais plásticos que o sulfeto de ferro, tal como o sulfeto de manganês, sendo que a maioria dos aços comuns ao carbono possuem de 0,035 a 0,06 % de enxofre [32].

Nos aços de corte fácil, a quantidade de enxofre pode atingir até 0,35 %. O conteúdo de manganês é suficientemente alto (0,9 a 1,5%) para que a maior parte do enxofre se combina na forma de inclusões de sulfeto de manganês. Em tais quantidades o enxofre provoca fragilização na zona de cisalhamento [32].

Se comparados com os aços contendo 0,1 % de enxofre (baixo carbono e baixo enxofre), a adição de 0,3% de enxofre nos aços (baixo carbono e alto enxofre) melhora a usinabilidade, pois conforme dito anteriormente, o aumento da quantidade de sulfetos de manganês facilita a quebra do cavaco, interrompe a continuidade da matriz, reveste a face da ferramenta com um filme lubrificante sólido, reduzindo a tendência a formação do gume postiço e o desgaste por difusão [32].

Segundo Kovash [39], a influência do enxofre tem sido mais notável no aumento da velocidade de corte, para uma dada vida da ferramenta. Quanto maior o teor de enxofre, melhor é a usinabilidade para todos os tipos de aços, conforme mostra a figura 27. Entretanto, vale ressaltar que nos aços inoxidáveis o aumento do teor de enxofre prejudica a resistência à corrosão.

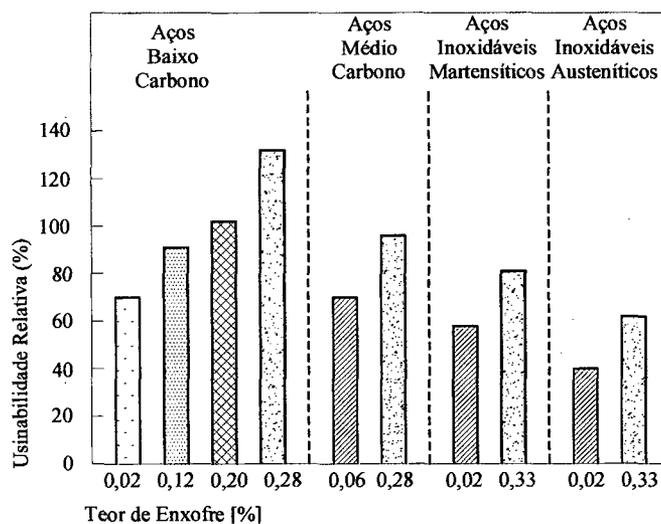


Figura 27 - Usinabilidade relativa de diferentes tipos de aços em função da presença de diferentes teores de enxofre [39]

Efeitos específicos:

Na prática industrial utiliza-se uma relação de 0,030% S / 0,6 % Mn [40] de forma a favorecer a formação de MnS, ao invés de FeS, resultando numa melhor quebra do cavaco. As inclusões de sulfeto de manganês interrompem a continuidade da ferrita e revestem a face da ferramenta de corte com um filme lubrificante sólido, reduzindo a tendência à formação do gume postiço e atuando como uma barreira ao desgaste por difusão.

Inclusões não-metálicas apresentando boa característica de ductilidade (tais como as de sulfeto de manganês), numa condição favorável de usinagem, podem depositar na interface cavaco/ferramenta, formando uma película protetora que atua de forma a evitar o desgaste por abrasão e difusão na ferramenta de corte. A formação da película protetora é esperada em função das condições de corte, composição e concentração dos elementos formadores da inclusão [37].

Wicher [41] descreveu as condições sobre o gume da ferramenta, em dependência da velocidade de corte, para uma operação de torneamento. Entretanto, sua descrição não foi satisfatória devido ao fato de não considerar a seção transversal do cavaco, a qual exerce forte influência nas condições térmicas sobre o gume da ferramenta.

Trent [42] complementou a pesquisa levando em consideração a dependência em relação à velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Desta forma, obteve uma dependência linear entre as áreas onde as aderências surgem e desaparecem da face da ferramenta. Para uma dada condição de corte (avanço e profundidade de corte) em combinação com uma baixa velocidade de corte, as aderências são freqüentes na face da ferramenta. Com o aumento da velocidade de corte, a quantidade destas aderências aumenta continuamente, devido à sua alta plasticidade. Aumentando ainda mais a velocidade de corte, inicia-se a extrusão das aderências. A velocidade de corte na qual as substâncias são extrudadas, no sentido da saída do cavaco, da face da ferramenta é então convencionalmente denominada velocidade de corte superior, e a velocidade de corte na qual se inicia a formação de aderências é denominada velocidade de corte inferior.

Dentro destes limites de velocidades, para um avanço e profundidade de corte pré-estabelecidos, temos uma condição de corte com menor desgaste na face da ferramenta e conseqüente aumento na vida da ferramenta [42].

A faixa restrita da velocidade de corte, na qual surge a película protetora na face da ferramenta, é afetada pelo material da ferramenta. Desta forma, as descobertas quanto ao surgimento da película protetora em baixas velocidades de corte, não é o mesmo no caso de ferramentas de aço-rápido e metal-duro [42].

Grum e Leskovar [43] chegaram a conclusões similares quando analisaram os efeitos dos elementos de liga, nos aços de corte fácil, sobre a evolução do desgaste em ferramentas de metal-duro. A figura 28 mostra a dependência das condições de corte e o desenvolvimento da película protetora (composta de inclusões não-metálicas) na face de uma ferramenta de metal-duro.

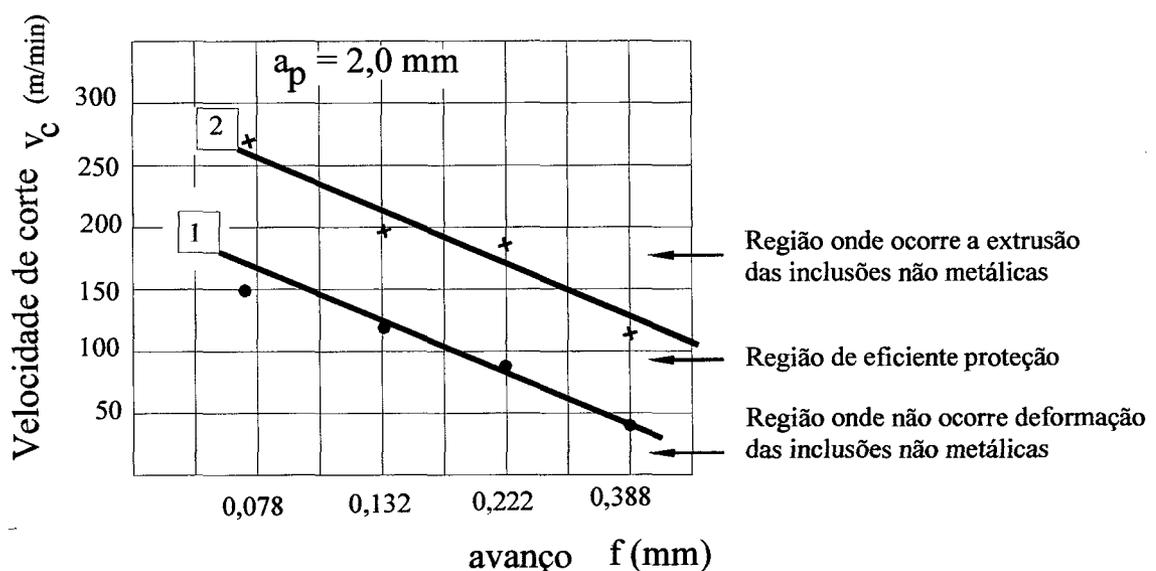


Figura 28 - Influência das condições de usinagem sobre o desenvolvimento da película protetora, segundo Grum e Leskovar [43]

Na região abaixo da curva 1, as condições de usinagem não favorecem o amaciamento das inclusões não-metálicas, inibindo a formação da película protetora, tornando-se uma região de intenso desgaste. As condições de usinagem acima da curva 2 asseguram um intenso amaciamento das inclusões não-metálicas, entretanto devido às condições de temperatura e alta pressão as substâncias são extrudadas da face da ferramenta. A região entre as curvas 1 e 2 favorece o desenvolvimento da película protetora composta de inclusões não-metálicas.

⇒ Efeito do tipo de sulfeto

Na ausência de outros elementos, o enxofre combina-se com o ferro formando o sulfeto de ferro, que apresenta característica de baixo ponto de fusão (1389°C) e baixa ductilidade. Tais propriedades prejudicam o processamento subsequente do aço (laminação), por gerar trincas no material quando o mesmo é processado a quente (fenômeno de fragilização a quente) [23, 26].

Tendo em vista contornar a fragilidade a quente, utiliza-se, durante a elaboração do aço, adição de manganês que, além de ser preferencial ao ferro na formação de sulfetos, propicia a formação de um tipo de sulfeto (MnS) com maior plasticidade e ponto de fusão maior que o sulfeto de ferro (FeS) [23, 26].

Embora de forma geral, o sulfeto de manganês seja benéfico para fins de conformação a quente, se comparado com o sulfeto de ferro, pode-se ainda obter melhorias de desempenho do material em termos de tenacidade (principalmente transversal), ductilidade e soldabilidade (decoação lamelar) mediante o controle da morfologia do sulfeto de manganês, do teor de oxigênio do banho (prática de desoxidação) ou pela adição de novos elementos tais como Ti, Zr, Ca e terras raras (RE) que resultam na formação de novos tipos de sulfetos [44].

Por outro lado, ainda que em geral a obtenção de diferentes tipos de sulfetos siga uma estratégia de melhoria de desempenho do produto final, o fato dos sulfetos alterarem o comportamento mecânico a quente traz implicações imediatas para as operações de usinagem.

O comportamento dos diferentes tipos de sulfetos, no processo de usinagem, depende da deformabilidade, que é associada à sua composição química. Em ordem crescente de deformabilidade podem ser exemplificados: MnS, (Mn, Ca)S, MnS-RE₂S₃. Pesquisas na usinagem de aços resulfurados mostram que quanto maior a deformabilidade da inclusão de sulfeto menor a força de corte, e sob o ponto de vista deste critério melhor a usinabilidade [44].

⇒ Efeito da quantidade de sulfetos (fração volumétrica)

Pesquisas realizadas indicam que uma quantidade de sulfeto de manganês de 1,0 a 1,5 % favorece a usinabilidade [32].

A melhoria da usinabilidade depende da fração volumétrica, da morfologia e da plasticidade do sulfeto de manganês. Enquanto, o aumento da fração volumétrica em 1,5 %, produz um marcante acréscimo na usinabilidade, conforme mostra a figura 29. Maiores quantidades de enxofre geram efeitos menos significativos. Isto corresponde a um teor de enxofre na faixa de 0,3 a 0,4 %, considerando aços e operações de usinagem convencionais [39].

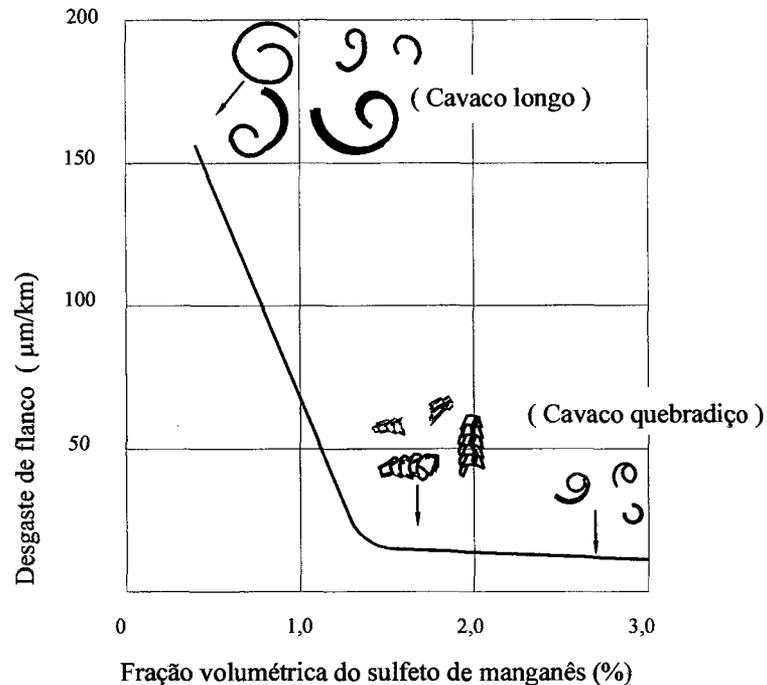


Figura 29 - Efeito da fração volumétrica do sulfeto de manganês sobre o desgaste de de flanco [39].

➤ Efeito da morfologia

Além da quantidade de enxofre presente nos aços, a morfologia e a distribuição das inclusões de sulfeto de manganês é de fundamental importância sobre a usinabilidade [23].

A influência da forma das inclusões não-metálicas sobre o índice de usinabilidade é mostrada na figura 30. O índice I é definido como a razão entre a velocidade de corte econômica (por exemplo v_{c20}) do material a ser avaliado pela velocidade econômica do aço AISI B 1112 resulfurado tomado como padrão, com índice 100%; entretanto, qualquer material pode ser tomado como padrão.

A razão entre o comprimento pela largura da inclusão L/B varia de 1 a 14 e o índice de usinabilidade varia de $I = 90$ a 200%. A curva obtida mostra que as inclusões de sulfeto de manganês, devem apresentar a forma globular melhorando assim a usinabilidade. Entretanto, tal forma geométrica é muito difícil de se obter, devido ao trabalho a quente, ao qual é submetido o material até chegar ao produto acabado [32].

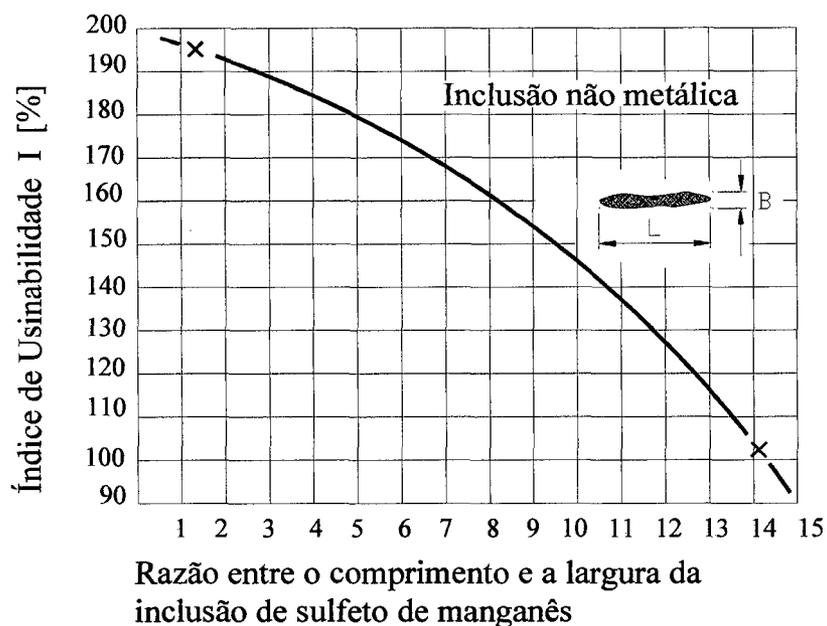


Figura 30 - Influência da forma das inclusões de sulfeto sobre o índice de usinabilidade [32]

Segundo Yeo [45], o uso de diferentes desoxidantes no aço tais como boro e alumínio, bem como a prática de temperaturas mais baixas de laminação, ocasionam a redução no tamanho e maior deformação nas inclusões de sulfetos, sendo desfavorável à usinabilidade do material.

A forma globular do sulfeto de manganês é a mais adequada, podendo ser obtida se uma adequada quantidade de oxigênio for retida no metal líquido durante o processo de desoxidação do aço. A plasticidade das inclusões de óxido-sulfetos conseqüentemente é elevada e sua forma não muda, até que o material seja submetido ao tratamento termo-mecânico [32].

Existem três tipos de inclusões de sulfeto de manganês nos aços, dependendo da maneira pela qual se formam e da sua morfologia:

- **Tipo 1:** Este tipo de sulfeto forma-se como fase líquida, para teores de oxigênio superiores a 0,02%, de acordo com o sistema ternário FeO-MnO-MnS, em uma solução líquida rica em ferro. Após a solidificação, esse sulfeto aparece na forma de partículas globulares homogeneamente distribuídas ou de partículas arredondadas de distribuição irregular. Os sulfetos do tipo 1 formam-se nos aços, nitidamente separados uns dos outros, na forma de células, conforme mostra a figura 31a [5].
- **Tipo 2:** Este tipo de sulfeto precipita na fusão do aço, para teores de oxigênio inferiores a 0,01%, nos contornos de grãos primários em fundidos ricos em sulfeto de manganês, com uma fase semelhante à fase eutética do sulfeto de manganês. Os sulfetos do tipo 2 não se apresentam na forma de células fechadas e sim partem de um centro, na forma de uma estrela, para a periferia. Nisto pode-se verificar a formação de bifurcações, ou em alguns lugares, até a fusão entre as células, conforme mostra a figura 31b [5].
- **Tipo 3:** Este tipo de sulfeto cristaliza na solidificação do ferro com cristais de ponto de fusão mais baixo, na forma de cristais com cantos vivos. Uma condição básica para a formação deste tipo de sulfeto é a presença do teor de carbono e de silício entre 0,1 e 0,4 %, bem como um teor de alumínio de 0,05 a 0,3 %.

Os sulfetos do tipo 2 precipitam-se nas regiões interdendríticas, no entanto assim como o tipo 1, são distribuídos de forma regular, conforme mostra a figura 31c. Eles correspondem, de acordo com a sua composição e estrutura, ao sistema cúbico de face centrada do sulfeto de manganês [5]



Figura 31a - Sulfeto do tipo 1 [46]



Figura 31b - Sulfeto do tipo 2 [46]

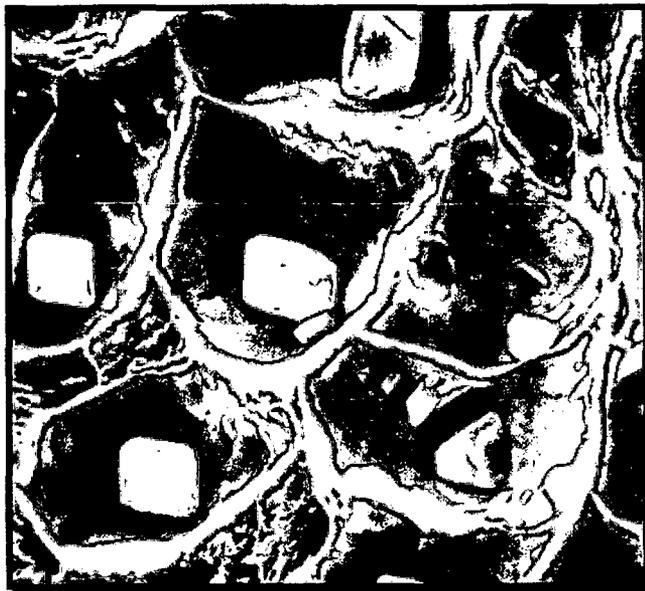


Figura 31c - Sulfeto do tipo 3 [46]

Relacionando os sulfetos com a usinabilidade, os do tipo 1 apresentam resultados mais favoráveis. Em decorrência disso, procura-se obter o sulfeto do tipo 1 por processos metalúrgicos [5].

d - Influência das inclusões metálicas

A melhoria da usinabilidade através das inclusões metálicas é esperada por um mecanismo similar se comparadas às inclusões não metálicas, porém estas inclusões apresentam-se geralmente finamente dispersas e insolúveis na matriz, e seguem o seguinte princípio:

- ⇒ Favorecem a ruptura por cisalhamento através da formação de microtrincas, favorecidas pela liquefação do metal (entre 250 a 300 °C).
- ⇒ Melhoria da quebra do cavaco (através de inclusões de Pb e Bi) devido ao mecanismo de fragilização por metal líquido, bem como redução na resistência ao corte em baixas velocidades.
- ⇒ Redução na resistência ao corte apesar da baixa temperatura na região de corte [37].

Influência de inclusões metálicas de chumbo sobre a usinabilidade

O chumbo é um aditivo metálico, adicionado aos aços de corte fácil, introduzido após os anos 50. O efeito do chumbo sobre a usinabilidade é mais favorável que o enxofre. Embora as propriedades mecânicas dos aços não sejam afetadas significativamente à temperatura ambiente, a resistência e a tenacidade são afetadas negativamente na faixa de temperatura entre 250 a 400 °C [5].

O chumbo não solubiliza no aço, o que significa que se apresenta na forma de inclusões na matriz metálica. Nos aços de corte fácil são adicionados em quantidades de 0,1 a 0,35 % e em casos especiais até 0,50 % de chumbo [32].

As inclusões de chumbo apresentam-se dispersas na matriz metálica, como fase independente insolúvel, ou depositadas sobre as inclusões de sulfeto de manganês. Resultados de pesquisa mostram que com a combinação de tais inclusões pode-se alcançar melhoria da usinabilidade dentro de uma grande variação de condições de corte.

Em baixas velocidades de corte o chumbo é mais favorável à usinabilidade, atuando sobre a formação do cavaco e as condições de desgaste na face da ferramenta. De acordo com dados citados por pesquisadores, a usinabilidade de aços com a presença de tais inclusões pode ser melhorada de 30 a 100 % [32].

A figura 32 compara a vida de uma ferramenta em função da velocidade de corte para dois aços de corte fácil resulfurados, um ligado ao chumbo (0,15 a 0,35 % Pb) e o outro sem adição de chumbo. Conforme mostra a figura, abaixo da velocidade de corte $v_c = 100$ m/min a ferramenta no ensaio, utilizando o aço com adição de chumbo, apresentou um menor desgaste de flanco. Para velocidades de corte acima de 100 m/min, os desgastes provocados por tais aços sobre a ferramenta de corte se confundem, demonstrando a perda da eficiência do chumbo. Para o desgaste de cratera, a eficiência do chumbo pode ser comprovada até a velocidade de corte $v_c = 200$ m/min [5].

As figuras 32 e 33 mostram o comportamento de desgaste da ferramenta de corte (flanco e cratera) no torneamento de um aço de corte fácil, apresentando variações no teor de chumbo. Observa-se que um aumento no teor de chumbo de 0 a 0,29 % leva a uma redução do desgaste de flanco para faixas de velocidade até 100 m/min. O teor de chumbo no aço de corte fácil não exerce influência significativa sobre o desgaste de cratera na ferramenta. Para faixas de velocidades acima de 100 m/min, o desgaste de flanco apresenta um comportamento inverso. Para velocidades de corte acima de 100 m/min e para avanços grandes, o filme de chumbo é destruído e a progressão do desgaste é intensa [5].

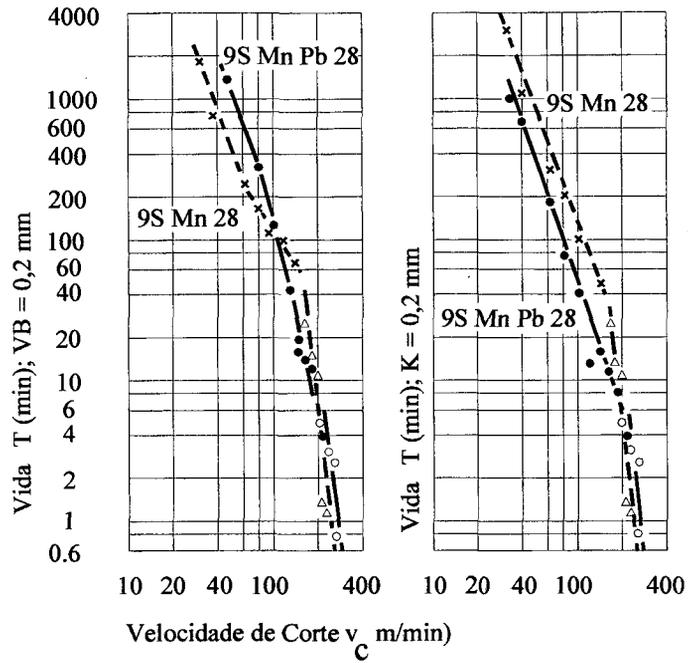


Figura 32 - Influência da presença do chumbo sobre a vida na ferramenta de corte no torneamento dos aços de corte fácil [5]

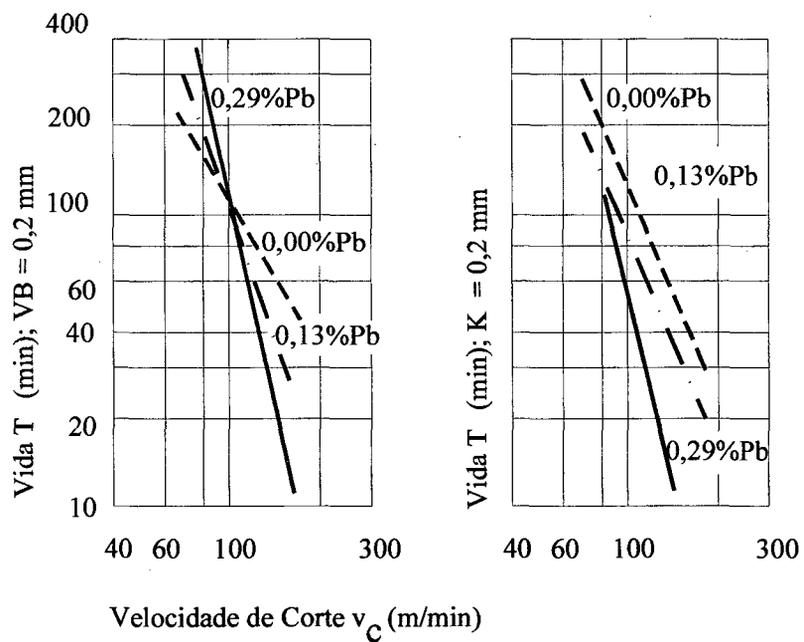


Figura 33 - A influência da variação do teor chumbo sobre a vida da ferramenta de corte [5]

Além do chumbo, o bismuto é utilizado nos aços como inclusão metálica, de forma a melhorar a usinabilidade. A utilização do bismuto como inclusão metálica será abordada em detalhe no item 2.4.

2.2.6 - Influência dos elementos de liga sobre a usinabilidade

A composição química exerce influência sobre as propriedades mecânicas e tecnológicas do material devido à presença de determinados elementos de liga no material. Os efeitos devido à presença destes elementos no aço, bem como os efeitos sobre os critérios de usinabilidade são apresentados na tabela 3, entretanto, a literatura disponibilizada não forneceu informações completas sobre a influência de determinados elementos químicos sobre os critérios de avaliação da usinabilidade [32].

Cinco grupos de elementos podem estar presentes nos aços e exercem influência sobre a usinabilidade:

- elementos que formam inclusões não-metálicas: enxofre, telúrio e selênio;
- elementos que formam inclusões metálicas: chumbo e bismuto;
- elementos solúveis na ferrita: níquel, cobre, estanho, manganês e fósforo;
- elementos que formam carbonetos: cromo, molibdênio, tungstênio, nióbio e vanádio;
- elementos que formam óxidos: alumínio, silício, cálcio e manganês.

Os dois primeiros grupos de elementos são consideradas aditivos, tendo em vista a melhoria da usinabilidade. O grupo de elementos químicos formadores de inclusões não-metálicas e metálicas exerce forte influência no bom desempenho do aço no processo de usinagem, já abordado nos capítulos anteriores [21].

➤ Influência dos elementos solúveis na ferrita sobre a usinabilidade

Os elementos dissolvidos na ferrita têm como consequência prática o efeito de endurecimento por solução sólida. Fósforo, silício e manganês exercem um forte efeito endurecedor da ferrita, enquanto tungstênio e cromo exercem um efeito endurecedor moderado. Tais elementos promovem a queda da ductilidade da ferrita, o que melhora a usinabilidade devido à formação de cavacos mais quebradiços e um melhor acabamento superficial [27].

Outra consequência prática da presença de elementos dissolvidos na ferrita diz respeito à sua distribuição. O fósforo e o estanho e mesmo quando dissolvidos na matriz, tendem a segregar nos contornos de grão, resultando em fragilização do material [27].

➤ Influência dos elementos formadores de carbonetos sobre a usinabilidade

Os elementos de liga formadores de carbonetos apresentam diferentes níveis de estabilidade. Em outras palavras, o carbono presente no aço apresenta afinidade diferente para os diversos elementos de liga, resultando em tendências diferentes quanto à formação de carbonetos. Em ordem crescente de estabilidade tem-se: Cr, Mo, W, Ti, Nb, Ta e Zr [26].

Além disso, alguns elementos tendem a formar carbonetos especiais (isentos ou com baixo teor de ferro), tais como o cromo (formando Cr_7C_3), o vanádio (formando VC), titânio (TiC), e nióbio (NbC). Outros elementos, tais como manganês, tendem a se dissolver no carboneto de ferro (cementita), sem formar um carboneto especial, e ainda, alguns elementos tendem a formar carbonetos mistos, tais como molibdênio e tungstênio, podem formar (Mo, W) C [27].

Como consequência da formação de carbonetos tem-se a possibilidade da obtenção de aços com carbonetos mais duros que a cementita, resultando num material de maior resistência ao desgaste do que aquele obtido sem adição de elementos de liga. De forma geral, os carbonetos provocam um aumento progressivo no desgaste de flanco da ferramenta de metal-duro, como no caso do carboneto de titânio que eleva o limite de resistência do material formando precipitado de carboneto de titânio [27].

➤ Influência do fósforo e demais elementos sobre a usinabilidade dos aços

Os aços de corte fácil apresentam um teor de fósforo de até 0,15 %. O fósforo aumenta a fragilidade dos aços à temperatura ambiente. Entretanto, em operações de usinagem de aços contendo fósforo, podemos obter uma melhor qualidade superficial e um aumento na vida da ferramenta. Teores acima de 0,15% de fósforo no aço, entretanto, exercem efeito negativo sobre o desgaste da ferramenta, de modo que o fósforo é raramente utilizado em grandes quantidades [32].

Os aços tratados ao cálcio apresentam melhoria nas características de usinabilidade devido à incorporação do cálcio nas inclusões óxidas, resultando em inclusões com características de deformação mais desejáveis. São formadas inclusões de cálcio-aluminatos de forma esférica encapsuladas com enxofre. Tais inclusões podem manter sua forma esférica durante o processo de laminação a quente, o que reduz a anisotropia na ductilidade e na tenacidade [28].

Telúrio e selênio são adicionados aos aços contendo ou enxofre ou chumbo, de forma que a usinabilidade destes aços pode ser aumentada em até 30% ou mais. Além disso é possível obter uma redução na rugosidade e cavacos mais curtos. Na presença de manganês e enxofre o selênio forma selenetos e sulfetos de manganês $Mn(Se, S)$, que favorecem a usinabilidade. O selênio exerce efeito favorável na formação do sulfeto de manganês ajudando a manter a forma globular após a deformação a quente, gerando condições favoráveis de corte, melhor acabamento superficial e condições de formação de cavaco favoráveis [32].

ELEMENTO QUÍMICO	EFEITO NO AÇO	CRITÉRIO DE USINABILIDADE				USINABILIDADE
		Força de corte	Cavaco	Desgaste	Acabamento	
Carbono	Perlita/Cementita	0		0		0
Silício	Forma inclusões duras de SiO ₂	0	0	0		0
Manganês	Participa na formação de MnS e carbonetos					0 < 1%
Alumínio	Forma nitretos e óxidos Favorece a formação de uma estrutura de grãos refinada		0	0		0
Titânio	Forma nitretos e carbonetos Favorece a formação de uma estrutura refinada Aumenta a tenacidade		0	0		0
Cobre	Aumenta a tenacidade Aumenta a resistência a altas temperaturas			0	0	0
Enxofre	MnS, FeS. Fragilização a quente	0	0		0	0
Fósforo	Fragilização a frio/Segregação	0	0	0	0	0
Oxigênio	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MnO (FeO, Cr ₂ O ₃)			0		0

Contin.

ELEMENTO QUÍMICO	EFEITO NO AÇO	CRITÉRIOS DE USINABILIDADE				USINABILIDADE
		Força de corte	Cavaco	Desgaste	Acabamento	
Nitrogênio	Forma nitretos com Alumínio, titânio e etc		⊖	⊖		⊖
Pb (Te, Bi, Se)	Insolúvel na matriz metálica	⊕	⊕	⊖	⊕	⊕
Níquel	Favorece a formação de uma estrutura refinada de grãos					⊖
Cobalto	Aumenta a tenacidade e a resistência em elevadas temperaturas			⊖	⊖	⊖
Cromo	Forma carbonetos e favorece a formação de uma estrutura refinada de grãos					⊖
Molibdênio	Forma carbonetos e favorece a formação de uma estrutura refinada de grãos					⊖
Tungstênio	Forma carbonetos e favorece a formação de uma estrutura refinada de grãos					⊖
Nióbio	Forma carbonetos e nitretos Aumenta a tenacidade		⊖	⊖		⊖
Vanádio	Forma carbonetos e nitretos Aumenta a tenacidade		⊖	⊖		⊖

EFEITO SOBRE A USINABILIDADE: FAVORÁVEL ⊕ DESFAVORÁVEL ⊖

Tabela 3 - Influência de um particular elemento sobre a usinabilidade, com ênfase nos critérios de usinabilidade/König e Kreis [32].

2.3 - O papel do bismuto como inclusão metálica na melhoria da usinabilidade do aço

As primeiras referências quanto à utilização do bismuto como inclusão metálica, tendo em vista a melhoria da usinabilidade dos aços (inoxidáveis austeníticos e aços carbono) surgiram no início dos anos 40.

No início da década de 60 foi desenvolvida pesquisa utilizando um aço fundido alta liga (20 % de Mn) com teores de bismuto variando de 0,2 a 0,4% voltado para uma aplicação não-magnética específica. Os resultados reportavam que o coeficiente de atrito era reduzido pela metade [47].

2.3.1 - Justificativas para a utilização do bismuto

O bismuto, quando comparado chumbo, distingui-se como um metal seguro devido à característica comprovada de ser atóxico e não-cancerígeno, apesar de ser um metal pesado.

Na tabela periódica de elementos químicos o bismuto está localizado na região de fronteira entre os metais e os não-metais. Apresenta a mais forte característica metálica do seu grupo, sendo caracterizado por apresentar baixo ponto de fusão (271 °C) [47]. As tabelas 4 e 5 resumem as propriedades mecânicas do bismuto e as propriedades físicas do bismuto, chumbo e ferro, respectivamente [47, 48].

Na atualidade, considerações ecológicas, escassez de energia, aumento nos custos de produção e exigências quanto à qualidade dos produtos, têm despertado interesse na produção de aços com adição de bismuto.

Durante o processo de fabricação dos aços ao chumbo ocorre geração de vapores metálicos tóxicos, impossíveis de serem eliminados do ambiente de fabricação. Devido a este fato, surgiram tentativas de se substituir os aços ao chumbo, o que têm culminado na produção de aços de usinabilidade melhorada com adição de bismuto [49]. O bismuto foi considerado o primeiro elemento químico na tentativa de se substituir o chumbo nos aços, devido ao fato de ser um metal macio, apresentar baixo ponto de fusão e devido à possibilidade de atuar como um lubrificante [48].

O bismuto apresenta solubilidade limitada no ferro sólido, segregando rapidamente. Apresenta vantagem em relação ao chumbo devido à sua densidade ($9,8 \text{ g/cm}^3$) ser mais próxima à densidade do ferro ($7,87 \text{ g/cm}^3$), o que favorece uma distribuição mais uniforme das partículas no aço [48].

Propriedade	Valor
Modulo de elasticidade	$4,6 \times 10^6 \text{ psi}$
Modulo de cisalhamento	$1,8 \times 10^6 \text{ psi}$
Dureza Brinell	4 - 8 HB
Tensão superficial a 300°C	375 ergs/cm^2

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do bismuto [48]

Elemento	Número atômico	Peso atômico	Densidade g/cm ³ a 20° C	Densidade em relação ao ferro	Ponto de fusão °C	Ponto de ebulição °C
Bismuto	83	208,9	9,8	+ 24%	271	1564
Chumbo	82	207,2	11,35	+ 44%	327	2900
Ferro	26	55,9	7,87	-	1538	4925

Tabela 5 - Propriedades físicas do bismuto, chumbo e ferro [47]

2.3.2 - Função e mecanismo de ação do bismuto nos aços

Tanto chumbo quanto bismuto (isoladamente ou combinados) quando presentes na matriz metálica, atuam durante o corte do aço como um lubrificante interno. Quando adicionados em conjunto o bismuto aumenta a eficiência do chumbo, acarretando uma melhoria na usinabilidade dos aços. Devido à deformação plástica, estas partículas tendem a formar um filme com características lubrificantes na interface ferramenta/cavaco, reduzindo o atrito [51].

Muitos autores afirmam que os aditivos metálicos (bismuto ou chumbo) atuam por mecanismos similares de forma a melhorar a usinabilidade. Entretanto, por suas propriedades físicas serem diferentes, os efeitos que cada um possa exercer de forma favorável à usinabilidade podem ser distintos. É possível que os aços ao bismuto comportem-se de forma diferente dos aços ao chumbo e a eficiência relativa destes elementos varie sob certas condições de corte e em função dos critérios de usinabilidade [51].

Quatro teorias têm sido propostas em relação ao mecanismo através do qual estes aditivos atuam de forma a melhorar a usinabilidade. Apesar das pesquisas sobre os mecanismos de melhoria da usinabilidade, através de inclusões metálicas, terem sido conduzidas por mais de 40 anos, ainda não existe consenso entre os pesquisadores sobre estes mecanismos. Na publicação apresentada por Yagushi [51] as quatro teorias são discutidas:

➤ O efeito lubrificante na interface cavaco/ferramenta

As inclusões metálicas tendem a formar um filme na interface cavaco/ferramenta de corte com características lubrificantes evitando a adesão.

➤ O efeito fragilizante da microestrutura

As temperaturas na zona de cisalhamento, durante o processo de usinagem, podem atingir valores tais que excedam o ponto de fusão da inclusão metálica, gerando uma aparente redução na resistência ao cisalhamento, devido à formação de núcleos de fratura resultantes da liquefação da inclusão metálica.

➤ Diferença de propriedades mecânicas entre a inclusão e a matriz

A diferença de propriedades mecânicas entre a inclusão metálica e a matriz aumenta a concentração de tensão. As inclusões metálicas, sendo mais macias que a matriz, acomodam mais deformação plástica, reduzindo assim a energia necessária à deformação total [51].

➤ Aumento da eficácia das inclusões de sulfeto de manganês

Quando as inclusões de bismuto apresentam-se na matriz em combinação com as inclusões de sulfeto, estas aumentam a eficácia das inclusões de sulfeto de manganês através da fragilização da interface (induzem a formação de trincas) [51].

a - O mecanismo da fragilização por metal líquido

Durante a usinagem a deformação imposta pela ferramenta de corte induz a formação de microtrincas na matriz metálica. Estas trincas geralmente seguem em direção aos contornos de grão e de fases. Para que ocorra a propagação das microtrincas é necessário que ocorra um desprendimento de energia. Assim sendo, quanto menor a energia necessária para propagar a microtrinca, maior a facilidade de se usinar um determinado material, conseqüentemente melhor a usinabilidade [52].

Durante o processo de usinagem a temperatura do aço, nas regiões adjacentes à microtrinca, é elevada devido ao calor gerado durante o processo de corte. Se um metal líquido fragilizador está presente na matriz metálica ou depositado sobre a ponta de uma microtrinca, a energia necessária à propagação da microtrinca é reduzida [52].

Quando uma microtrinca é inicialmente propagada nas adjacências de uma inclusão de metal líquido fragilizador, e a temperatura no local onde se encontra a inclusão é elevada o suficiente para liquefazer o metal, ocorre imediato transporte do metal líquido para a ponta da microtrinca. Este transporte segue em direção aos contornos de grão e de fases na matriz metálica [51]. O transporte do metal líquido é feito com espessura de poucos átomos, porém o suficiente para desempenhar sua função como fragilizador.

O baixo ponto de fusão do metal líquido fragilizador e a sua tendência em molhar os contornos de grão e de fases permite fragilizar regiões distantes do gume da ferramenta de corte. A extensão na qual o metal líquido atua como fragilizador é diretamente relacionada à frequência de oportunidade do metal sofrer imediato transporte para a ponta da microtrinca [52].

Um metal líquido fragilizador é um metal ou liga que:

- Apresenta ponto de fusão relativamente baixo;
- Permanece na fase líquida na temperatura dominante na ponta da microtrinca;
- Apresenta baixa energia livre de superfície (tensão superficial) próximo ao seu ponto de fusão, de forma a molhar grandes superfícies ao longo dos contornos de grão e de fases [52]. Quanto menor o valor da energia livre de superfície, maior a área coberta pelo metal líquido fragilizador.

O bismuto é um metal que apresenta baixo ponto de fusão (271°C) e o valor da energia livre em temperaturas próximas ao ponto de fusão é baixo (375 ergs/cm^2). Como resultado, desde que não ocorra interferência nestas propriedades, o bismuto apresenta uma forte tendência em molhar os contornos de grãos e de fases no aço, numa distância relativamente grande, a partir do gume da ferramenta, fragilizando estas regiões [52].

Quando os aços apresentam em sua microestrutura inclusões de sulfeto de manganês e inclusões metálicas (bismuto ou chumbo) tal combinação torna-se favorável à melhoria da usinabilidade. A inclusão de sulfeto de manganês atua como um nucleador das microtrincas e as inclusões metálicas como propagadores das microtrincas [52].

Quando a inclusão de sulfeto de manganês apresenta um tamanho médio maior que 2 e menor que 10 micrometros o número de inclusões que atuam como nucleadores de microtrincas é aumentado, se comparado com um aço contendo a mesma quantidade de sulfeto de manganês em tamanhos maiores, elevando desta forma a probabilidade das inclusões metálicas atuarem como metal líquido fragilizador [52].

Yagushi [51], utilizando em seus experimentos um aço baixo carbono resulfurado com adição de inclusões metálicas (chumbo e bismuto), reportou que se um número significativo de microtrincas se formam como resultado do mecanismo de fragilização por metal líquido nas zonas de cisalhamento, a resistência ao cisalhamento efetiva pode diminuir devido:

- ⇒ À redução da área real de deformação.
- ⇒ À concentração de tensão, que aumenta a formação de bandas de cisalhamento.

Segundo Yagushi [51] há possibilidade do metal líquido fragilizador exercer influência sobre o mecanismo de formação do cavaco (facilitando a quebra do cavaco) e reduzir o tamanho da zona secundária de cisalhamento, exercendo um efeito favorável sobre a usinabilidade.

De forma a verificar tais suposições, foram feitas observações sobre o comportamento das zonas primária e secundária de cisalhamento, bem como no mecanismo de formação de cavaco, considerando a presença de inclusões metálicas na matriz do aço, conforme discutido a seguir:

i - Zona primária de cisalhamento

O cisalhamento na zona primária ocorre durante um espaço de tempo muito pequeno e em altas taxas de deformação. Desta forma, a menos que o transporte de elementos fragilizadores não seja rápido o suficiente para formar uma trinca na zona primária de cisalhamento, o mecanismo de fragilização por metal líquido não exerce uma influência significativa sobre a usinabilidade, mesmo que outras condições sejam satisfeitas [51].

A temperatura na ponta da trinca é outro fator importante no mecanismo de fragilização por metal líquido. A temperatura na ponta da trinca deve alcançar um valor tal que atinja o ponto de fusão da inclusão metálica para que o mecanismo seja efetivo. Yagushi [51], em seu experimento, estimou a temperatura na zona primária de cisalhamento em função da velocidade de corte para os aços de corte fácil com adição de bismuto (0,1 e 0,2 % respectivamente), sendo os resultados obtidos apresentados na figura 34. Embora o método empregado (Shaw) não seja de grande precisão, os resultados experimentais devem ser considerados. A temperatura da peça foi considerada de 60 °C, considerando que a temperatura é elevada durante o processo de corte.

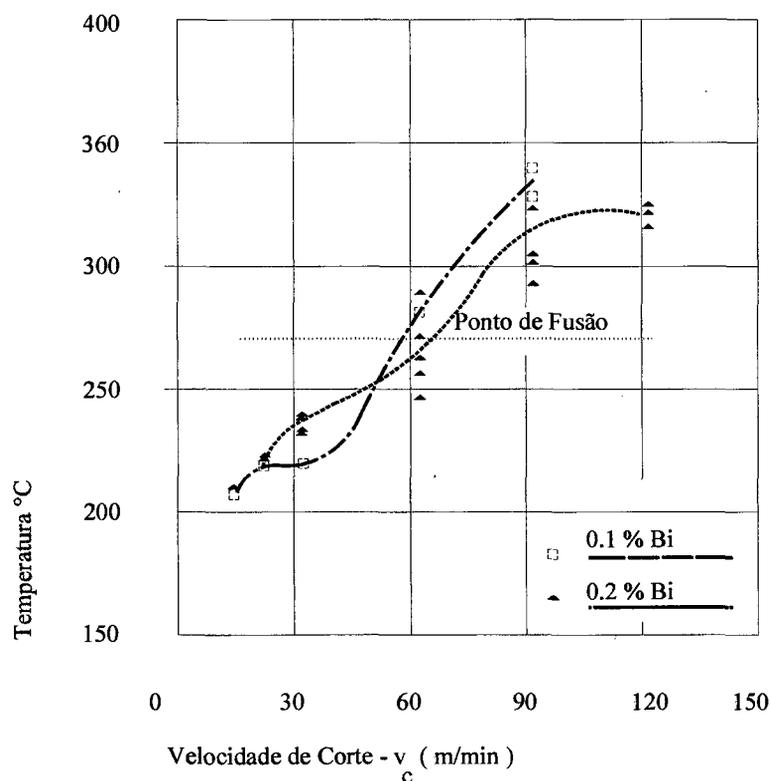


Figura 34 - Temperatura estimada na zona de cisalhamento primária em função da velocidade de corte [51]

Conforme as curvas obtidas, a temperatura média na zona de cisalhamento aumenta com o aumento da velocidade de corte, fato confirmado de forma prática através de observações da completa fusão das inclusões nos cavacos formados em altas velocidades de corte e a incompleta fusão das inclusões nos cavacos formados em baixa velocidade de corte. Por outro lado, o ponto de fusão do bismuto é atingido em velocidades de corte em torno de 60 m/min. Acima dessa velocidade a temperatura média tende a diminuir com o aumento do teor de bismuto no aço.

Em baixa velocidade de corte, embora não haja ocorrido a fusão das partículas de bismuto, há possibilidade que ocorra uma fusão parcial das inclusões se a temperatura localizada exceder o ponto de fusão [51].

Segundo Yaguchi [51], o mecanismo de fragilização por metal líquido pode exercer um papel importante sobre a usinabilidade, entretanto conclusões definitivas não podem ser tiradas, especialmente para os aços que apresentam teor de bismuto igual a 0,1 % em baixas velocidades de corte, devido às seguintes razões:

- Não é possível concluir que as microtrincas sejam formadas na zona primária de cisalhamento, devido à possibilidade de se formarem em regiões distantes da zona primária, como resultado da tensão residual ou da tensão gerada pelo quebra-cavaco.
- A fusão das inclusões metálicas, conforme observado nos cavacos formados em baixas velocidades de corte, foram parciais, exceto na amostra contendo 0,2% de bismuto. Esta fusão parcial pode ser explicada pelo aumento da temperatura causado pelo escoamento do calor da zona secundária de cisalhamento.
- Existe incerteza em se estimar a resistência ao cisalhamento na zona primária. Conforme observação dos cavacos segmentados, formados na usinagem dos aços com 0,2% de bismuto em baixas velocidades de corte, torna-se difícil o cálculo da resistência ao cisalhamento com precisão. Portanto, não existem fortes evidências que suportam a redução da resistência ao cisalhamento na zona primária.

ii - Zona secundária de cisalhamento

Observações realizadas através de análise de microestrutura e dureza demonstram que ocorre uma extensiva deformação por cisalhamento na interface entre o cavaco e a face da ferramenta, caracterizando a zona secundária de cisalhamento. As forças atuantes nesta região foram consideradas com a seguinte suposição: a zona secundária de cisalhamento sendo uma reta paralela ao ângulo de saída da ferramenta e desprezando-se a formação do gume postiço. Observa-se no gráfico, conforme mostra figura 35, que força de corte tende a diminuir com o aumento do teor de bismuto (de 0,1 para 0,2 %). Tal observação leva a concluir que os aditivos metálicos exercem um papel importante na zona secundária de cisalhamento. Entretanto, não é evidente se esta redução na força é resultado da redução do comprimento da zona de cisalhamento ou da resistência ao cisalhamento [51].

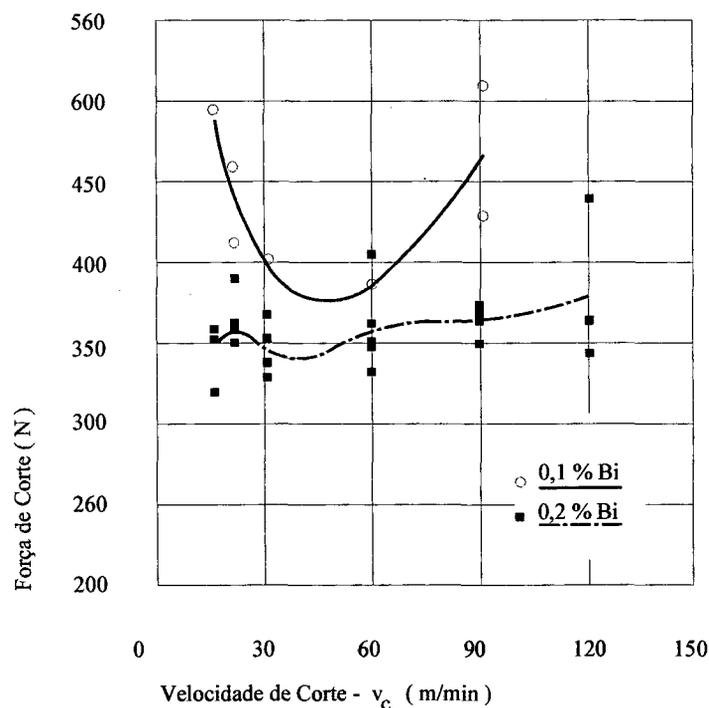


Figura 35 - Força de corte em função da velocidade atuando na zona secundária de cisalhamento [51]

Com relação à temperatura na zona secundária de cisalhamento, foi observada sobre a superfície do cavaco (que entra em contato com a face da ferramenta) a fusão das partículas de inclusões metálicas, sendo estas associadas com formação das microtrincas. De acordo com as observações, concluiu-se que a temperatura na zona secundária de cisalhamento excedeu o ponto de fusão das inclusões de bismuto. Desta forma, foi considerada a hipótese do metal líquido exercer um papel importante na zona secundária de cisalhamento [51].

iii - Mecanismo de fratura do cavaco

Nas velocidades de corte acima de 60 m/min todos os cavacos formados na usinagem dos aços baixo carbono ressulfurados com adição de chumbo ou de bismuto foram do tipo vírgula, similares aos cavacos formados na usinagem do aço AISI 1215, utilizado como material de referência. Os efeitos não significativos das inclusões metálicas sobre a formação do cavaco em altas velocidades pode ser explicado pelo fato do comprimento do cavaco ser curto inclusive para o aço AISI 1215 utilizado como material de referência [51].

Em baixas velocidades de corte o tamanho e a morfologia do cavaco dependem significativamente do tipo e da quantidade de aditivo. Nos aços com adição de chumbo o comprimento do cavaco geralmente diminuiu com o aumento do teor de chumbo. Em baixas velocidades de corte os cavacos formados na usinagem dos aços com 0,1% de bismuto foram similares aos aços com 0,2% de chumbo (semi-contínuos). Entretanto, na usinagem dos aços com 0,2% de bismuto os cavacos formados foram diferentes. A presença de fitas longas e espirais curtas foram observadas em baixa velocidade de corte [51].

A afirmação que o comprimento do cavaco diminui com o aumento do teor de chumbo, em baixas velocidades de corte, é explicada pelas microtrincas formadas pelo metal líquido fragilizador nos cavacos. As microtrincas atuam como núcleo de fratura e não são necessariamente formadas na zona primária de cisalhamento [51].

2.3.3 - Forma de ocorrência das inclusões de bismuto nos aços

Quando o bismuto é adicionado em conjunto com o chumbo nos aços, as inclusões de bismuto apresentam-se dissolvidas nas inclusões de chumbo e/ ou depositadas sobre as inclusões de sulfeto de manganês. Durante o processo de laminação, devido à deformação, estas inclusões ficam comprimidas nas pontas dos sulfetos alongados [50].

As inclusões de bismuto apresentam-se nos aços como precipitados de poucos micrometros de diâmetro. O bismuto precipitado pode circundar as inclusões de sulfeto de manganês ou pode existir como partículas isoladas, conforme mostra a figura 36 [50].

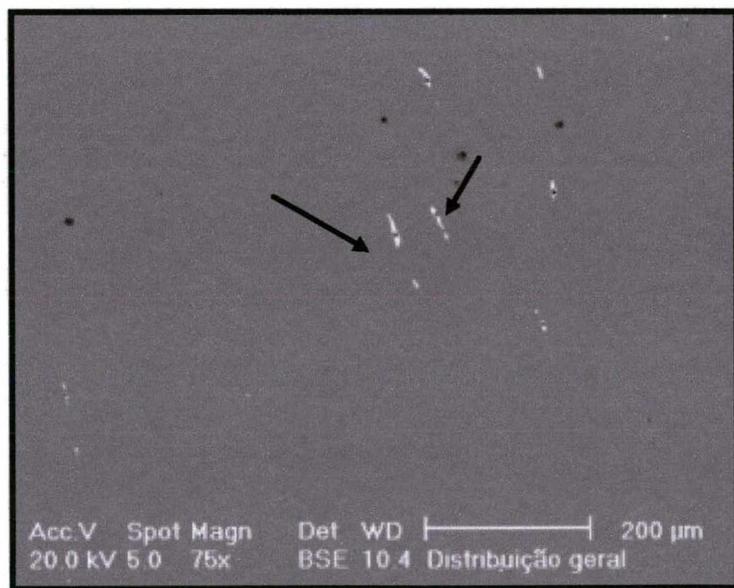


Figura 36 - Forma de ocorrência do bismuto na matriz metálica (fase clara).

2.3.4 - Resultados experimentais de ensaios usinabilidade de aços

a - Ensaio de usinabilidade do aço 1045 AISI

Dados fornecidos pela indústria norte americana reportam uma significativa melhoria na usinabilidade dos aços AISI 1045 com adição de bismuto. São reportados na literatura ensaios de vida da ferramenta, em operação de torneamento, utilizando barras laminadas de aços 1045 das seguintes classes:

- Aço 1045 Bi (aço com adição de Bismuto e apresentando estrutura de grãos refinada com alumínio);
- Aço 1045 Ca (aço com adição de cálcio e apresentando estrutura de grãos refinada com alumínio);
- Aço 1045 padrão (aço apresentando estrutura de grãos refinada com alumínio) [53].

Todos os ensaios foram realizados a seco, com ferramentas de aço-rápido (insertos triangulares AISI tipo M43), com velocidades de corte variando de 39 a 55 m/min, profundidade de corte 2 mm e avanço 0,2 mm. No ensaio de torneamento as velocidades de corte para uma vida $T = 20$ e $T = 60$ minutos foram utilizadas como critério comparativo de usinabilidade entre os diferentes materiais. Conforme tabela 6, os aços com adição de bismuto apresentaram valores de velocidades de corte 16 a 17 % maior que os valores apresentados pelo aço 1045 padrão, embora os aços com tratamento ao cálcio tenham apresentado valores de velocidades até 13% maiores que o aço 1045 padrão. Quando a usinabilidade dos aços foram comparadas para a velocidade de corte de 43 m/min, a vida da ferramenta de corte para os aços 1045 com adição de bismuto foi 5 vezes maior que a vida da ferramenta para os aços 1045 padrão, embora a vida da ferramenta para os aços 1045 com tratamento ao cálcio fosse 4 vezes maior que ao aço padrão.

Os resultados obtidos, conforme a figura 37, mostram que os aços com adição de bismuto apresentaram maior vida ferramenta [53].

Classe	V _{c20}		V _{c60}	
	Velocidade	Taxa relativa	Velocidade	Taxa relativa
1045 padrão	42 m/min	100 %	38 m/min	100%
1045 Bi	49 m/min	116 %	45 m/min	118%
1045 Ca	46 m/min	109%	43 m/min	114%

TABELA 6 - Resultados de testes de vida da ferramenta na usinagem de aços AISI 1045 [53]

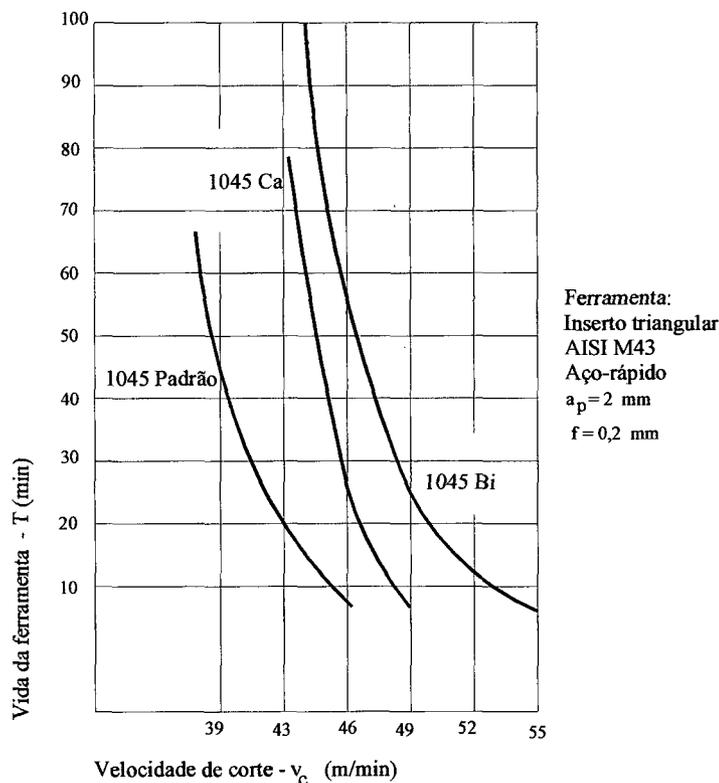


Figura 37 - Curvas de vida de ferramentas de aço rápido na usinagem do aço 1045 [53]

b - Ensaio de usinabilidade do aço inoxidável AISI 304

Os aços inoxidáveis austeníticos tais como AISI 304 geralmente apresentam problemas ao serem usinados. De forma a melhorar a usinabilidade destes materiais é geralmente feita a adição de elementos tais como enxofre, selênio e/ou chumbo. A adição de enxofre, entretanto, acarreta na redução na resistência à corrosão, que é a propriedade mais importante dos aços austeníticos. Selênio e chumbo podem se dissolver em água ou em outros líquidos, inviabilizando assim a adição em aços a serem utilizados na fabricação de partes de máquinas voltadas à indústria alimentícia. A limitação imposta pelo uso de tais elementos culminou no desenvolvimento do aço AISI 304 BF (com adição de bismuto) [54].

São reportados na literatura ensaios de vida da ferramenta, com o uso de ferramentas de metal duro em operações de torneamento, de forma a avaliar a usinabilidade do aço 304 BF em comparação aos aços AISI 304 (padrão) e AISI 303. As condições utilizadas foram: ferramenta de corte de metal-duro (classe K 10), avanço 0,08 mm, profundidade de corte 1 mm, velocidade de corte 60 m/min e óleo solúvel como fluido de corte [54].

Nos ensaios com a utilização de ferramentas de metal duro a vida de ferramenta foi menor na usinagem do aço AISI 304 BF se comparado ao aço AISI 303 e não apresentou diferença significativa em relação ao aço AISI 304 [54], conforme mostra a figura 38.

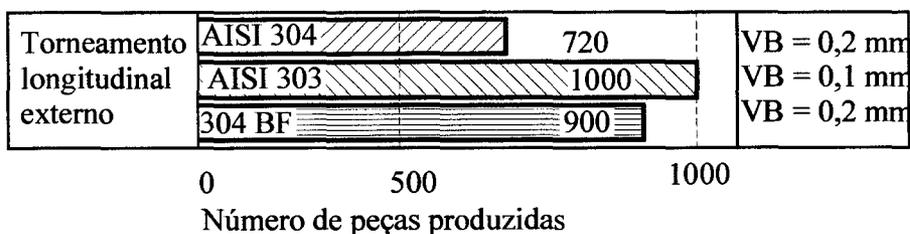


Figura 38 - Resultados de ensaio de vida em tornos automáticos [54]

3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 - Planejamento dos ensaios

Na realização deste trabalho, em consequência da disponibilidade limitada de tempo no estudo da influência da modificação da microestrutura, através da adição de bismuto em um aço AISI 1040, proveniente do lingotamento contínuo, processo de laminação e tratamentos térmicos, as ferramentas de corte foram consideradas “não-influentes” sobre o resultado. O estudo se limitou ao torneamento longitudinal externo, através de ensaios de longa duração, sendo este regido pela norma ISO 3685/1977, abrangendo uma faixa ampla de velocidades, avanços e profundidades de corte. A opção pelo ensaio de torneamento longitudinal externo se deve à facilidade de obtenção dos dados experimentais como também por ser uma das operações de usinagem mais utilizadas na indústria. Os dados obtidos na operação de torneamento podem ser transferidos, de forma limitada, para os demais processos de usinagem, tais como a furação, fresamento, alargamento, dentre outros [9, 13, 14].

3.1.1 - Grandezas envolvidas

Para verificar a influência das variáveis de entrada do processo sobre os critérios de avaliação da usinabilidade (vida da ferramenta, acabamento superficial, formas de cavaco e força de usinagem), torna-se necessário um estreito controle das grandezas envolvidas, de forma que só uma sofra alteração mantendo-se as demais constantes, o que possibilita avaliar e verificar os efeitos através dos resultados obtidos [13]. O número de grandezas de entrada envolvidas no processo de usinagem é elevado e as principais são apresentadas na tabela 7.

Parâmetros de entrada		Processo de Torneamento	Resultados do ensaio
Sistema	Parâmetros de corte	Características de processo	Tecnologia
Máquina-ferramenta Rigidez	↳ Avanço a_p ↳ Vel. de corte v_c	↳ Força de usinagem ↳ Potência ↳ Mecanismos de desgaste ↳ Temperatura	Redução do custo de fabricação e aumento da produtividade em decorrência do: ↳ Cavaco formado (menor volume ocupado, facilidade de transporte) ↳ Ferramenta (maior tempo de utilização) ↳ Força (menores esforços exigidos da máquina-ferramenta) ↳ Acabamento (melhor qualidade superficial)
Peca Microestrutura	↳ Profundidade de corte a_p	Influências externas: ↳ Vibrações	
Ferramenta Geometria (ângulos) Material: Aço- rápido Metal-duro.			
Corte a seco			

Tabela 7 - Grandezas de entrada e resultados obtidos no ensaio de torneamento [5]

a - Variáveis de entrada

As velocidades de corte foram escolhidas tendo-se em vista a verificação da melhoria ou não da usinabilidade do aço AISI 1040 (microestrutura modificada pela técnica de adição de inclusões metálicas) dentro das faixas de velocidade de corte comumente utilizadas pela indústria em operações de torneamento de peças.

De forma a abranger uma maior variedade de aplicações, foram definidas velocidades de corte de 30 a 315 m/min, obedecendo um escalonamento, dentro de uma série geométrica, conforme a norma ISO 3685/1977. Para velocidades de corte de 30 a 56 m/min foram empregadas ferramentas de aço-rápido e para velocidades de corte de 200 a 315 m/min foram utilizadas ferramentas de metal-duro.

➤ Material da peça - Microestrutura

Neste trabalho é feita a avaliação da usinabilidade do aços baixo carbono, que são aços geralmente utilizados pela indústria na fabricação de elementos de máquinas tais como eixos, árvores, o que envolvem operações de torneamento, furação, fresamento, entre outros. Os materiais a serem avaliados de forma comparativa são os aços AISI 1040, provenientes de corridas distintas (A, B, C e D), sendo a composição química dos mesmos descrita no anexo 1. O termo “Modificado” é utilizado para designar o aço AISI 1040 contendo inclusões metálicas de bismuto e o termo “Referência” para o material sem modificação.

De forma a obter uma melhor identificação dos materiais ensaiados foram retiradas amostras das barras no sentido longitudinal e preparadas através de técnicas metalográficas. As amostras foram analisadas com o auxílio de microscopia óptica e com ampliações de 1000 vezes, conforme mostra o anexo 2. As comparações feitas entre as microestruturas, através da microscopia óptica, não revelou diferenças significativas no tamanho e distribuição relativa das fases.

Em análises feitas através de microscopia eletrônica de varredura, foi detectada a presença de inclusões metálicas e não-metálicas na matriz dos aços modificados, bem como inclusões de alumina envolvidas por inclusões metálicas de bismuto, exemplificadas no anexo 3 e já citadas na literatura na figura 26 [38]. A comprovação da pertinência das afirmações acima foi feita através de análise de espectogramas, anexo 3, que mostram nitidamente os picos de bismuto, alumínio, cálcio, entre outros.

Análise da microestrutura pela microscopia eletrônica de varredura

A análise micrográfica das amostras dos aços foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura Philips XL - 30.

Durante a fase de produção ou análise de materiais, torna-se necessária a análise da microestrutura que permite:

- Compreender as correlações entre microestrutura - defeitos - propriedades;
- Predizer as propriedades do material quando estas correlações são estabelecidas.

As técnicas mais utilizadas para este tipo de análise são a microscopia óptica e eletrônica.

Na microscopia óptica, o contraste da imagem é resultado da diferença de refletividade da luz nas diversas regiões da microestrutura, uma vez que o sistema é constituído basicamente pela fonte de iluminação e do sistema de lentes. Uma das limitações da microscopia é o aumento máximo conseguido, que fica em torno de 2000 vezes. Como consequência pequenos detalhes estruturais não são possíveis de serem detectados através desta técnica [55].

A microscopia eletrônica de varredura se apresenta como técnica mais adequada, pois permite alcançar aumentos superiores aos da microscopia óptica. Dependendo do material pode-se atingir até 900.000 vezes, mas para análise de materiais normalmente o aumento não ultrapassa a ordem de 10.000 vezes. Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações de superfície.

Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução. Já os retroespalhados fornecem informações sobre a variação da composição.

☞ Ferramenta de corte - Material e geometria

Foram utilizadas ferramentas de aço-rápido HSS 5/8 x 4. 1/2" (com 10% de cobalto), afiadas em retificadora de ferramentaria, e ferramentas de metal-duro TNMG 16 04 08 (GC 4015) positiva, conforme mostra a figura 39, com o suporte (porta-ferramentas) MT JNR 2525 M 16 M1. As pastilhas de metal-duro são revestidas com alumina (camada interna) e com nitreto de titânio (camada externa), o que confere às mesmas uma boa resistência ao desgaste. As geometrias das ferramentas utilizadas são descritas no anexo 4.

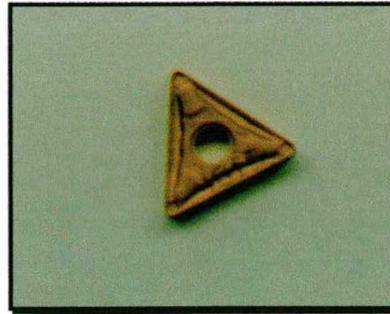


Figura 39 - Pastilha de metal duro revestida SANDVIK

➤ Parâmetros de corte para os ensaios de vida da ferramenta

É pré-estabelecida uma condição padrão de corte, de forma a verificar a influência da variável (microestrutura modificada pela adição de inclusão metálica) sobre os critérios de vida da ferramenta. Os parâmetros utilizados são apresentados na tabela 8.

Material	v_{c1} [m/min]	v_{c2} [m/min]	v_{c3} [m/min]	a_p [mm]	f [mm]
Aço AISI 1040 Referência (A)	30	35	45	2,0	0,16
Aço AISI 1040 Modificado (B)	35	45	56	2,0	0,16
Aço AISI 1040 Referência (C)	200	250	315	2,5	0,2
Aço AISI 1040 Modificado (D)	200	250	315	2,5	0,2

Tabela 8 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de vida da ferramenta [56]

➤ Parâmetros de corte para os ensaios de determinação das componentes da força de usinagem

Dentre os fatores que exercem influência sobre o comportamento das componentes da força de usinagem foi avaliada a influência do avanço e velocidade de corte.

O avanço e a profundidade de corte são variáveis da equação de Kienzle, e permitem verificar (através da espessura e largura de corte) o comportamento da força específica de corte [3].

As condições de corte utilizadas para os ensaios de força na usinagem dos aços AISI 1040 (Modificado e de Referência) correspondentes às corridas A e B, respectivamente, são mostradas na tabela 9 e para cada condição foram feitas três repetições de ensaio. Em cada condição de velocidade de corte foram variados um total de cinco avanço para uma mesma profundidade de corte.

v_{c1} [m/min]	v_{c2} [m/min]	a_p [mm]	f_1 [mm]	f_2 [mm]	f_3 [mm]	f_4 [mm]	f_4 [mm]
45	200	2,5	0,16	0,18	0,2	0,25	0,30

Tabela 9 - Condições de corte para os ensaios de força de usinagem [56]

➤ Parâmetros de corte para os ensaios de acabamento

A avaliação comparativa da usinabilidade dos materiais segundo o critério de acabamento foi feita com utilização de ferramentas de metal-duro, o que garante uma melhor reprodutibilidade geométrica e evita a ocorrência de grandes dispersões de medidas causadas por problemas de afiação.

Na determinação do critério acabamento superficial, a velocidade e a profundidade de corte foram mantidas constantes, variando-se o avanço num total de oito vezes, com o objetivo de medir os valores de rugosidades R_a e R_z .

Esta análise é feita comparando-se as rugosidades obtidas em cada material, mantendo-se as demais variáveis de processo ($v_c = 45$ m/min, $a_p = 2,5$ mm) constantes.

➤ Parâmetros de corte para os ensaios de formação do cavaco

As formas dos cavacos gerados através de ensaios de torneamento são utilizadas na avaliação comparativa da usinabilidade dos aços AISI 1040. Quanto à escolha das variáveis foi considerada a influência de seis avanços e quatro velocidades de corte, mantendo-se a profundidade de corte constante. As condições de corte empregadas são apresentadas no capítulo 4 juntamente com os resultados alcançados

b - Variáveis de saída

➤ Vida da ferramenta

Segundo as pesquisas, a eficiência das inclusões metálicas varia sob certas condições de corte e em função dos critérios de usinabilidade. No principal critério de avaliação ou seja, vida da ferramenta, as inclusões metálicas deformadas são depositadas sobre a face da ferramenta, atuando como um filme com características lubrificante que age de forma favorável sobre a vida da ferramenta, minimizando os efeitos dos mecanismos de desgaste pelo mecanismo de adesão.

Segundo as pesquisas já realizadas a formação deste filme lubrificante só pode ser considerada em baixas velocidades de corte (< 100 m/min), principalmente nas faixas de velocidade que favorecem a formação do gume postiço (na faixa de velocidade de corte de 20 a 40 m/min) [5, 51].

A verificação da influência das inclusões sobre o comportamento do aço em relação ao critério de vida entretanto, foi realizada comparando-se os tempos de vida (tempo para atingir um valor de desgaste médio de flanco VB pré fixado) obtidos na usinagem dos aços Modificados e dos aços de Referência.

Embora não seja evidente estabelecer previamente que tipo de desgaste irá prevalecer sobre a ferramenta de corte, é necessário para a execução dos ensaios que se estabeleça o tipo e o valor do critério de fim de vida. O critério adotado no ensaio dos AISI aços 1040 com o uso de ferramentas de aço-rápido foi desgaste médio de flanco $VB = 0,2$ mm e para o uso de ferramentas de metal-duro $VB = 0,3$ mm [56].

➤ Força de corte

Segundo Yagushi [51], as inclusões metálicas exercem um papel importante na zona secundária de cisalhamento. A força de corte tende a diminuir com o aumento do teor de inclusões metálicas, entretanto ainda não é claro se esta redução na força é resultado da redução do comprimento da zona de cisalhamento ou da resistência do material ao cisalhamento.

Neste trabalho serão medidas e avaliadas as componentes (força de corte e de avanço) da força de usinagem com diversos avanços. A avaliação comparativa entre os materiais será realizada pela comparação dos valores da força específica de corte $k_{c 1.1}$ obtidos no ensaio.

⇒ Acabamento superficial

Os parâmetros de rugosidade mais empregados na indústria são:

- Desvio médio de rugosidade - R_a
- Profundidade de rugosidade - R_t
- Profundidade média de rugosidade - R_z
- Profundidade máxima de rugosidade - $R_{máx}$

Para avaliação da usinabilidade, em relação à qualidade superficial, foram adotados os parâmetros R_a e R_z , devido ao fato destes parâmetros serem menos influenciados por perturbações externas. Na análise da qualidade superficial não são utilizados os parâmetros horizontais de superfície (erros de forma, perfil e ondulação), pois estes são influenciados pelo tipo de processo de usinagem e máquina-ferramenta utilizada e pelo fato de não terem relação direta com a usinabilidade do material [13].

No presente ensaio serão executadas medições de rugosidade em pontos equidistantes ao longo do corpo de prova, torneado com o uso de ferramentas de metal-duro com raio de quina $r_e = 0,8$ mm.

⇒ Formação de cavacos

Objetivando-se caracterizar os cavacos formados foram estabelecidas condições de corte com uma seqüência de avanços e velocidades de corte, mantendo-se a profundidade de corte constante.

Nos ensaios de usinagem é utilizada a norma ISO 3685/1977 (formas de cavaco) para a classificação dos cavacos formados.

3.2 - Equipamentos utilizados

3.2.1 - Máquina-ferramenta

Para execução dos ensaios de usinabilidade foi utilizada como máquina-ferramenta, um torno universal Romi I - 45 (figura 40). A máquina-ferramenta era equipada com um sistema de variação contínua de rotação da árvore. Em relação ao avanço, os erros sistemáticos ficaram em torno de 2%, e em decorrência da variação da rotação sob carga, tornou-se necessária a verificação da velocidade de corte com auxílio de um tacômetro portátil, reduzindo desta forma os erros. Os dados técnicos referentes ao torno Romi I - 45 são mostrados no anexo 5.



Figura 40 - Máquina-ferramenta Torno Romi I-45

3.2.2 - Sistema de medição das componentes da força de usinagem

A força de usinagem foi avaliada através das componentes forças de corte (F_c) e de avanço (F_f). As medições foram feitas com auxílio de uma plataforma piezelétrica Kistler, amplificadores de carga e sistema de aquisição automática de dados. Estes foram processados em microcomputador, através de programas especialmente desenvolvidos, sendo os dados apresentados na forma de gráficos e tabelas (figura 41).

Na plataforma piezelétrica o sinal da força produzida é captado. Um amplificador de sinais amplifica o sinal gerado pela plataforma e remete a um analisador de sinais Hewlett Packard HP (Data Acquisition), que transforma o sinal emitido em gráfico, mostrando em tempo real de usinagem o comportamento da força de corte. Um software (SADA), trata os dados do analisador de sinais [13, 14].

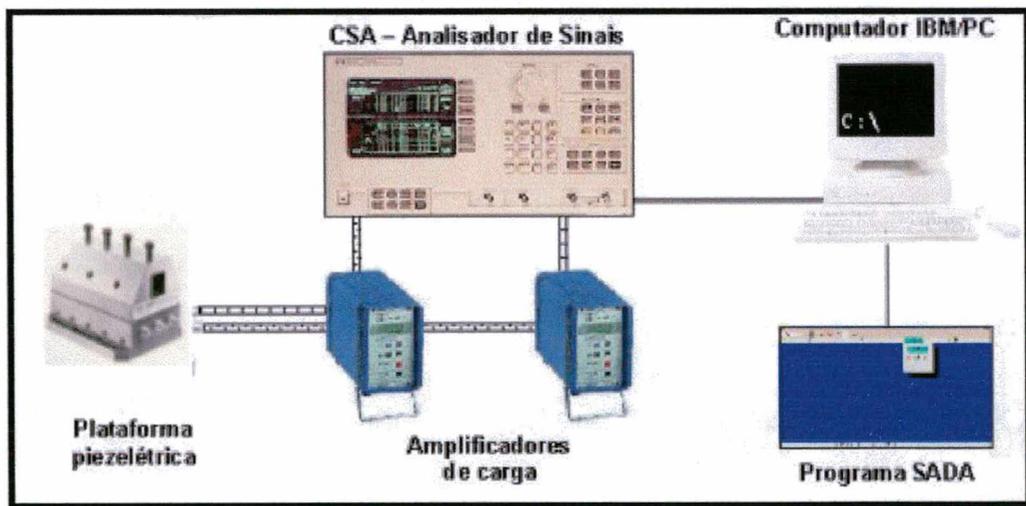


Figura 41 - Esquema de montagem do sistema de medição de forças na usinagem. [57]

Foi empregada a plataforma piezelétrica Kistler modelo 9263, para três canais de saída capazes de captar as componentes da forças de corte (F_c), força de avanço (F_f), e força passiva (F_p),

⇒ Amplificador de sinais:

Os amplificadores de sinais Kistler, modelo 5006, empregados tem a finalidade de converter os sinais de carga elétrica em tensões proporcionais aos carregamentos mecânicos, conforme mostra o anexo 6.

⇒ Analisador de sinais (DATA ACQUISITION)

É responsável pela conversão do sinal analógico em digital (HP, modelo 3497) conforme mostra o anexo 6.

⇒ Processamento dos dados

Para o processamento dos dados foi empregado um computador modelo 486 DX com 8 Mbytes de memória RAM. Os programas computacionais empregados foram AQUISI (aquisição de dados) e SADA (análise de dados).

O sistema foi calibrado para as componentes relevantes da força de usinagem. Na calibração foram empregadas massas-padrão e uma balança, com relação de braço conhecida.

3.2.3 - Medição do desgaste da ferramenta

Para a medição da largura média do desgaste de flanco foi utilizado um microscópio de ferramentaria, (NIKON) modelo Mesuriscopo, conforme mostra a figura 42. Os dados técnicos são mostrados no anexo 7.

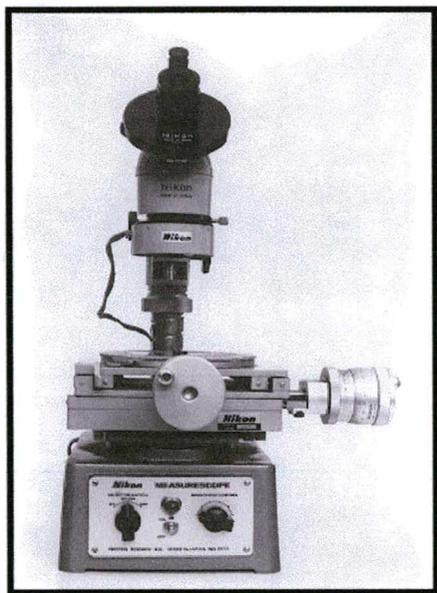


Figura 42 - Microscópio de ferramentaria - Nikon

3.2.4 - Sistema de medição da rugosidade

Para medição da qualidade superficial é utilizado um rugosímetro analógico, modelo Perthometer M 3 A, conforme mostra a figura 43. Os dados técnicos são mostrados no anexo 8.

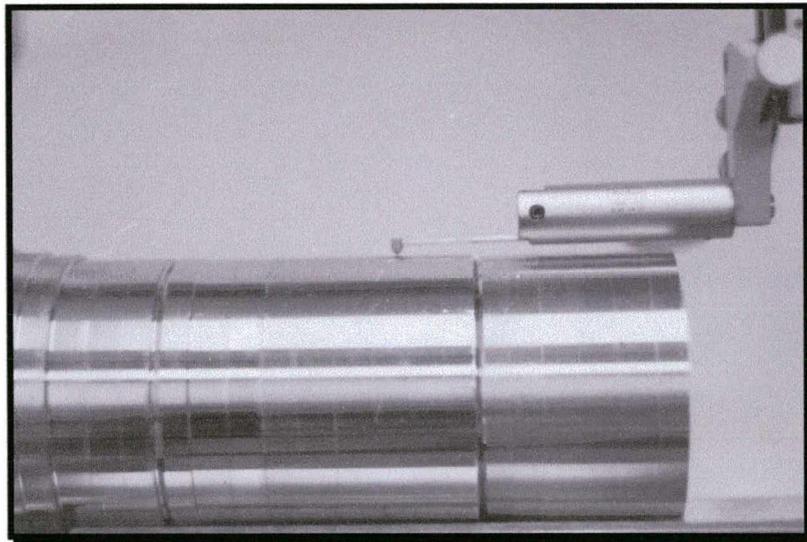


Figura 43 - Sistema de medição da rugosidade (Rugosímetro Modelo Perthometer M 3 A) [58]

4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os ensaios de usinabilidade descritos referem-se aos ensaios realizados no escopo de uma pesquisa tecnológica, realizada no Laboratório de Mecânica de Precisão, e tem como objetivo avaliar o comportamento relativo dos aços AISI 1040 com microestrutura modificada, em relação a um aço AISI 1040 considerado como material de referência, especificamente no processo de torneamento longitudinal.

Quanto as condições de corte adotadas para os ensaios de vida da ferramenta, o emprego de baixas velocidades de corte ($v_c < 100$ m/min), com uso de ferramentas de aço-rápido, deve-se aos resultados significativos apresentados pela literatura nesta condição de velocidade. Foram também testadas as faixas de altas velocidades de corte ($v_c > 100$ m/min) comumente utilizadas pela indústria, com o uso de ferramentas de metal-duro. Quanto aos parâmetros de avanço e profundidade de corte estes, foram selecionados para a faixa de trabalho de desbaste leve.

Na análise dos resultados, as discussões referentes aos ensaios realizados com ferramentas de aço-rápido e metal-duro são apresentadas separadamente.

4.1 - Ensaaios de vida da ferramenta de corte

Através de uma análise de tendência, verifica-se que as curvas obtidas apresentam um comportamento atípico, já que com o aumento da velocidade de corte não ocorre decréscimo na vida da ferramenta. Resultados similares aos obtidos na usinagem dos aços AISI 1040, entretanto, são apresentados na literatura, onde em algumas faixas de velocidade de corte verifica-se um comportamento atípico na vida da ferramenta para variações na velocidade de corte. Ou seja, em algumas regiões de velocidade de corte baixa ocorrem aumentos na vida da ferramenta para acréscimos na velocidade de corte. Na usinagem aços de corte fácil, tal fato é explicado em parte pelo deslocamento da faixa de formação do gume posição para determinados intervalos de velocidade de corte, sendo observado nestes intervalos a formação de gumes menores e mais estáveis.

O principal critério no estudo da usinabilidade dos aços ensaiados foi o critério de desgaste das ferramentas. Verificou-se em todos os ensaios que o desgaste das ferramentas apresenta um comportamento discreto após a estabilização do gume, sendo progressivo na fase final da vida. A forma de desgaste, dominante para as ferramentas de aço-rápido como também para as ferramentas de metal-duro, foi o desgaste de flanco. Apenas para ensaios excessivamente longos algumas ferramentas apresentaram a formação de uma cratera, embora não fosse determinante para o fim da vida da ferramenta de corte. Para desgastes maiores, algumas ferramentas apresentaram lascamentos no gume ou até ruptura total da ferramenta. Além do desgaste de flanco médio observou-se a formação de entalhe no gume principal. Este entalhe em alguns ensaios foi determinante para o fim de vida da ferramenta de corte.

Para uma maior confiabilidade dos resultados os ensaios, para cada condição de corte, foram repetidos três vezes. Apesar deste procedimento, em muitas condições de corte ensaiadas, a dispersão dos resultados não permitiu uma análise clara e conclusões definitivas sobre a influência das inclusões metálicas sobre a usinabilidade do aço em questão.

Para avaliar, de forma comparativa, os valores de desgastes das ferramentas, foi necessário que estes fossem definidos pelo mesmo critério de fim de vida. O critério dominante foi o de desgaste de flanco, observados em ensaios prévios, sendo este portanto adotado como critério de fim de vida. Foram definidos $VB = 0,2$ mm para as ferramentas de aço-rápido e $VB = 0,3$ mm para as ferramentas de metal-duro.

No ensaio de vida, utilizando ferramentas de aço-rápido, o comportamento esperado da vida da ferramenta, analisado pelo desgaste de flanco na usinagem do aço AISI 1040, segundo a maioria das referências clássicas [3, 5], é decrescente com o aumento da velocidade de corte. Nos ensaios realizados observou-se que a tendência expressa pelos resultados indica um comportamento diferente ao da literatura, conforme mostra a figura 44.

Tanto o aço de referência quanto o modificado (corridas A e B) apresentaram um comportamento de desgaste de flanco regular crescente com o aumento do tempo de corte, porém um comportamento não-esperado em relação à vida da ferramenta. Com o aumento da velocidade de corte, faixa de 30 a 45 m/min, inicialmente foi observado um aumento na vida da ferramenta de corte (para $VB = 0,2$ mm) e, para velocidades de corte ainda maiores, um aumento de vida da ferramenta na usinagem do aço de referência e uma diminuição de vida da ferramenta na usinagem do aço modificado.

Um comportamento destes é esperado em velocidades de corte menores, onde o fim da formação de gume postiço pode levar ao aumento da vida da ferramenta com um aumento da velocidade de corte. König [5] cita este comportamento para faixas de velocidades de 20 a 45 m/min na usinagem do aço Ck 53 N ($a_p = 2$, $f =$ de 0,1 a 0,25 mm). König [5] mostrou a dependência entre o comportamento de vida da ferramenta de corte, nesta faixa de velocidade de corte, através de ensaios com interrupção brusca de velocidade de corte.

Por não se dispor de um sistema de interrupção de corte, no entanto, não se pode fazer nenhuma afirmação definitiva quanto ao comportamento das curvas. Uma segunda possibilidade de se comprovar o comportamento apresentando pelas curvas de desgaste (figura 44) é através da medição da rugosidade. Para se verificar este comportamento através da rugosidade é necessário que apenas o processo esteja influenciando a mesma e que as demais variáveis influentes estejam controladas. Como as ferramentas empregadas são de aço-rápido, e no processo de reafiação das mesmas não há uma boa repetibilidade geométrica do raio de quina, não pode ser feita uma afirmação definitiva de forma a explicar o aumento da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte.

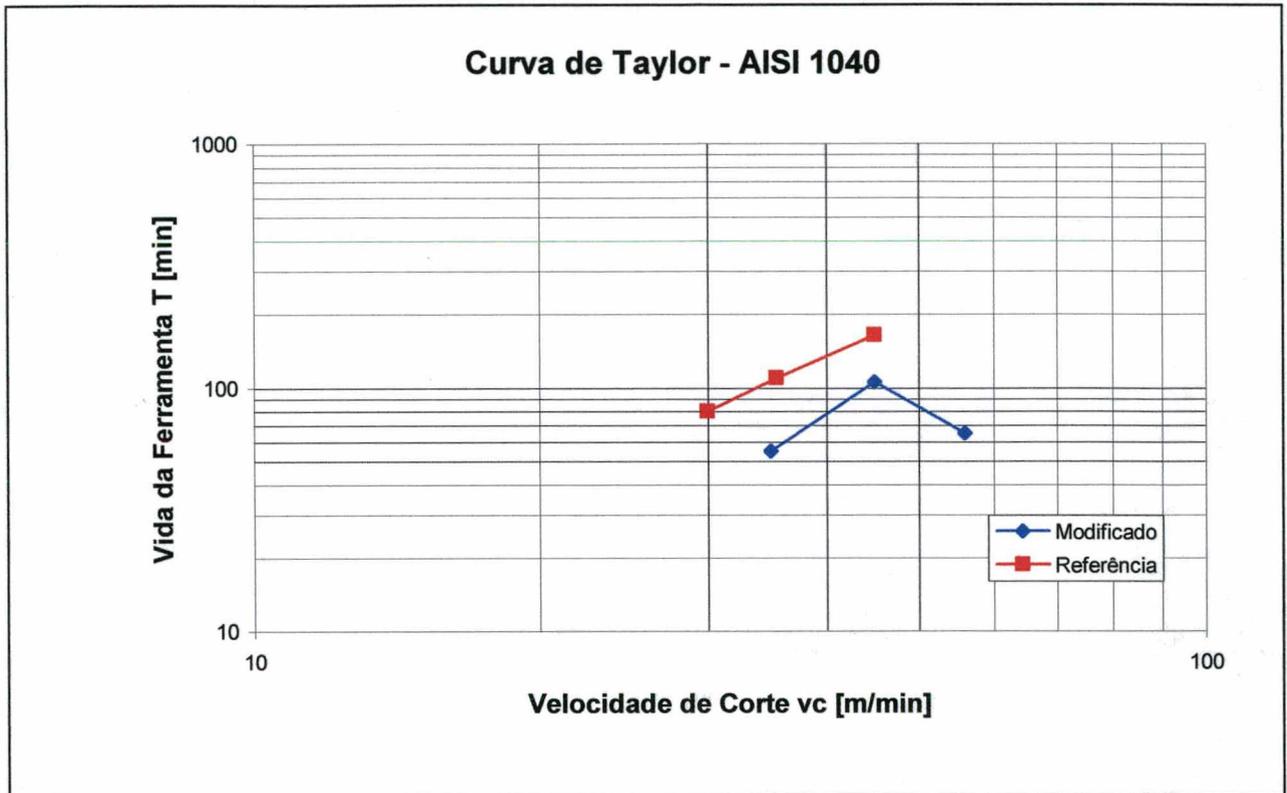


FIGURA 44 - Curvas de vida obtidas na usinagem dos aços AISI 1040 (corridas A e B) com emprego de ferramentas de aço rápido (Geometria: $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\chi = 45^\circ$ e $r_e = 0,8$ mm)[56]

Nos ensaios de vida da ferramenta de corte, realizados com o emprego de ferramentas de metal-duro na usinagem dos aços AISI 1040 (corridas C e D), as ferramentas de corte apresentaram também um comportamento de desgaste de flanco regular crescente com o aumento do tempo de corte. Com o aumento da velocidade de corte (de 250 a 315 m/min) o desgaste da ferramenta foi conforme esperado, ou seja, aumenta o desgaste com o aumento da velocidade de corte. Disto resulta que a vida da ferramenta decresce com o aumento da velocidade de corte, conforme mostra a figura 45.

Devido às condições severas de atrito alcançadas nestas condições de corte, observou-se que as ferramentas de corte utilizadas na usinagem dos aços de referência apresentavam uma maior incidência de desgaste de entalhe que nos aços modificados, entretanto não se pode atribuir com segurança o comportamento de desgaste ocorrido à microestrutura do material às condições de corte utilizadas e aos demais fatores influentes no processo. A figura 46 e 47, mostram os desgastes de flanco (para $VB = 0,3 \text{ mm}$) e de entalhe na usinagem dos aços de referência e modificado.

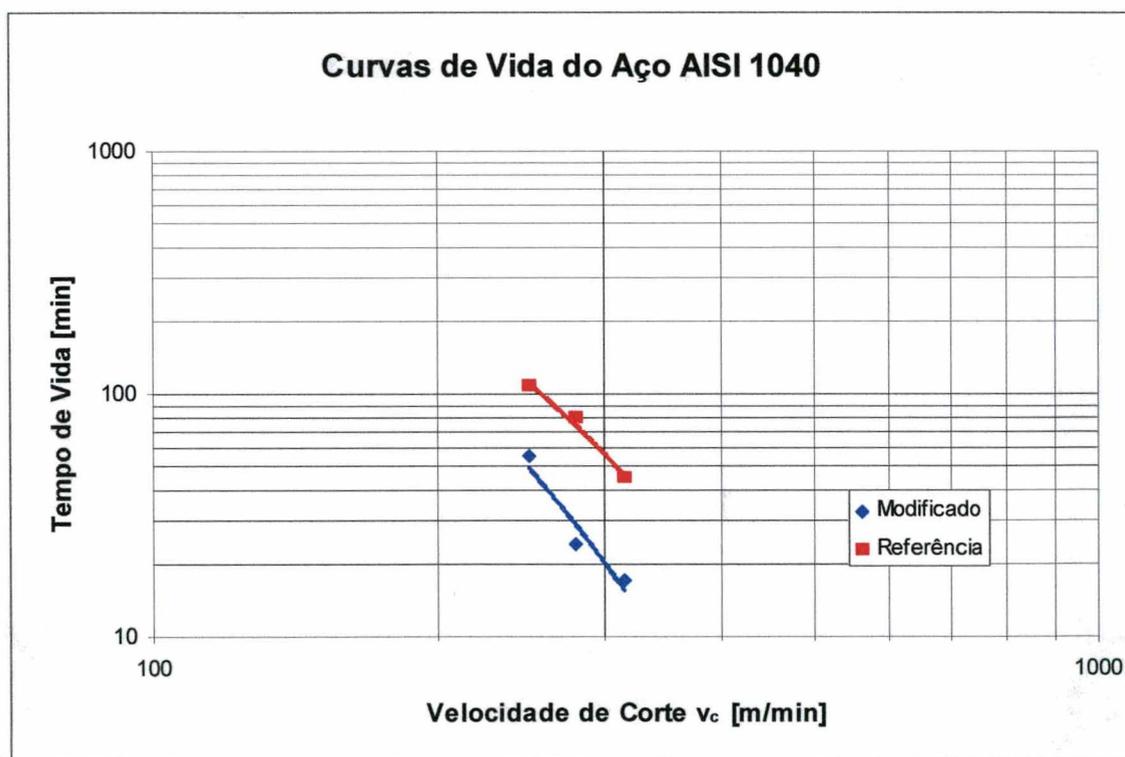


Figura 45 - Curvas de vida das ferramentas obtidas na usinagem dos aços AISI 1040 (corridas C e D) com emprego de ferramentas de metal duro (Geometria: $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\chi = 93^\circ$ e $r_e = 0,8 \text{ mm}$) [56].

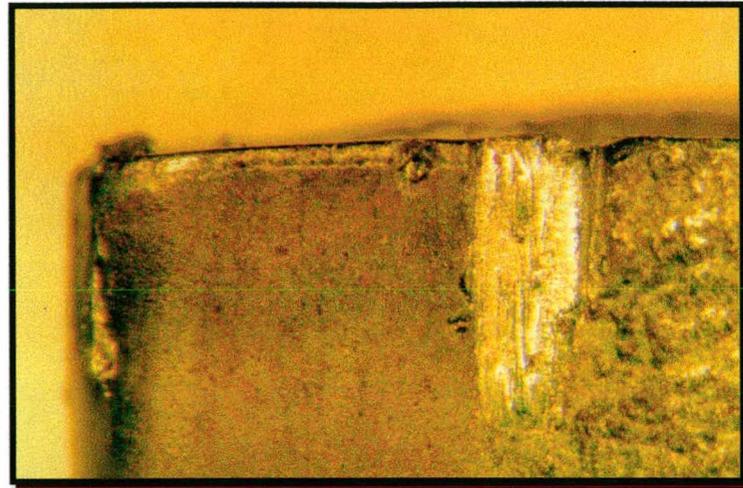


Figura 46 - Desgaste de entalhe da ferramenta de metal-duro na usinagem do aço AISI 1040 (corrida A) de referência [56]

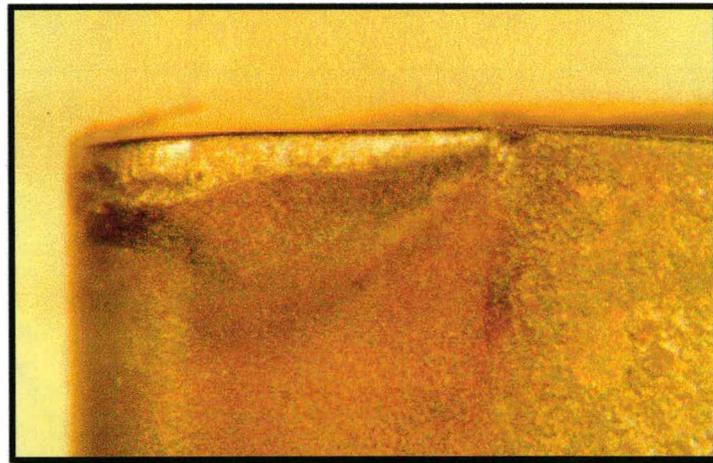


Figura 47 - Desgaste de flanco médio da ferramenta de metal-duro na usinagem do aço AISI 1040 (corrida B) Modificado [56]

4.2 - Ensaio da força de usinagem

A força de usinagem é um critério complementar para avaliação da usinabilidade. A força específica de corte e a força específica de avanço são grandezas que permitem concluir sobre a maior ou menor dificuldade na usinagem de um material. Forças específicas maiores levam a um trabalho de corte maior e associado a este, temperaturas mais elevadas. A combinação da força específica de corte e temperaturas elevadas se refletem em uma maior solicitação térmica da ferramenta de corte e os mecanismos de desgaste são mais pronunciados.

Os parâmetros de corte que exercem maior influência sobre o comportamento das componentes da força de usinagem são o avanço, a profundidade e a velocidade de corte. Embora a variação na geometria da ferramenta também exerça influência sobre a força de usinagem, os ensaios de medição das componentes da força de usinagem se limitaram à utilização das ferramentas de metal-duro comerciais empregadas nos ensaios de vida.

Os resultados dos ensaios de usinabilidade, baseados no critério da força de usinagem, são apresentados na forma de gráficos das componentes da força de usinagem em função da variação do avanço e da velocidade de corte, conforme mostram as figuras 48 e 51.

Com o aumento da velocidade de corte verifica-se uma redução na força específica de corte. O trabalho de corte por mm^3 usinado (produto da velocidade pela força de corte) conseqüentemente diminui com o aumento da velocidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte, a distribuição do calor entre cavaco, peça e ferramenta sofre alterações. À medida que a velocidade de corte aumenta, as parcelas de calor que são conduzidas para a peça e a ferramenta diminuem, ao passo que a parcela que é conduzida ao cavaco aumenta. Com isto a raiz do cavaco, principalmente na região primária de cisalhamento, sofre um aumento da temperatura, permitindo uma redução na força de usinagem. O aumento da temperatura, no lado inferior do cavaco, é fortemente influenciado pelo aumento da velocidade de corte, porém não influencia o balanço energético pela redução na força de corte [9].

Para a velocidade de corte de 45 m/min e avanços pequenos, foram verificadas forças de corte e de avanço menores na usinagem do aço modificado em relação ao aço de referência (corridas A e B). Para avanços maiores, este comportamento mostra uma inversão, e pode ser explicado pela efeito das inclusões metálicas de bismuto para condições de usinagem com maiores deformações relativas (pequena espessura de usinagem e maior fator de recalque). As forças específicas de corte e os coeficientes angulares, calculados a partir dos dados gráficos das figuras 48 a 51 e empregando-se a equação de Kienzle, respectivamente, mostram uma tendência nítida da redução com o aumento da velocidade de corte, conforme mostra a tabela 10.

Material	AISI 1040 Modificado	AISI 1040 Referência	AISI 1040 Modificado	AISI 1040 Referência
velocidade de corte v_c (m/min)	45 m/min	45m/min	200 m/min	200 m/min
$k_c 1.1$ (N/mm ²)	2273	2098	1848,77	1864,65
$1 - m_c$	0,76	0,72	0,83	0,82

Tabela 10 - Força específica de corte na usinagem dos aços de referência e modificado [56]

Para velocidades de corte acima de 200 m/min, tanto os aços AISI 1040 Referência quanto os aços modificados, não apresentaram uma diferença significativa nos valores das forças de corte e de avanço. As figuras 50 e 51 mostram o comportamento das forças de corte e avanço para velocidades de corte de 200 m/min.

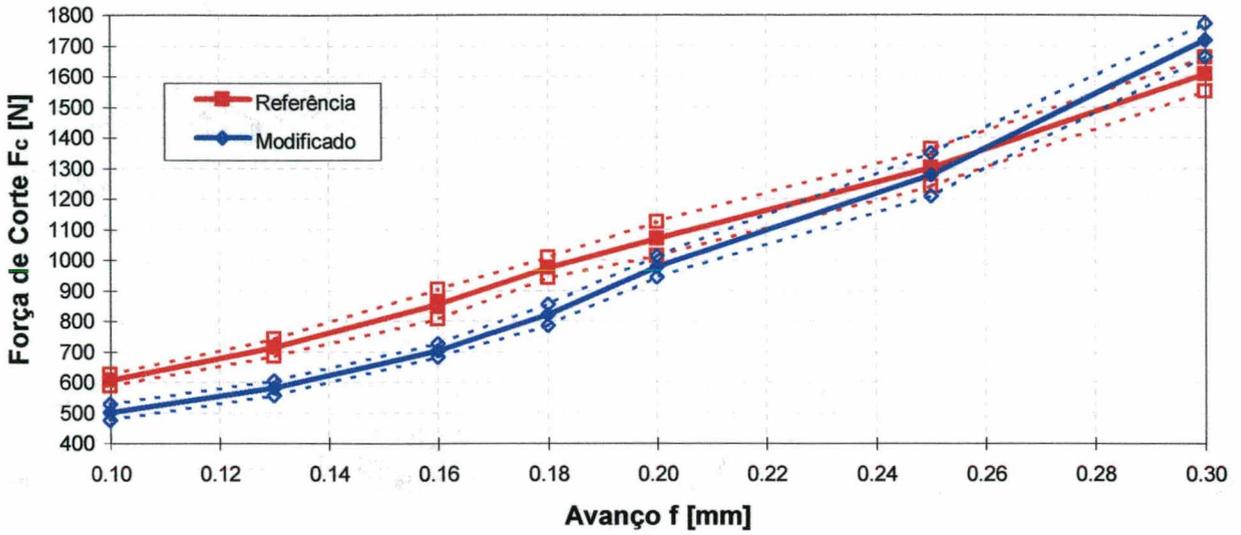


Figura 48 - Variação da força de corte em função do avanço para a velocidade de 45 m/min

Ferramenta de metal-duro com geometria: $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\chi = 93^\circ$ e $r_e = 0,8$ mm [56]

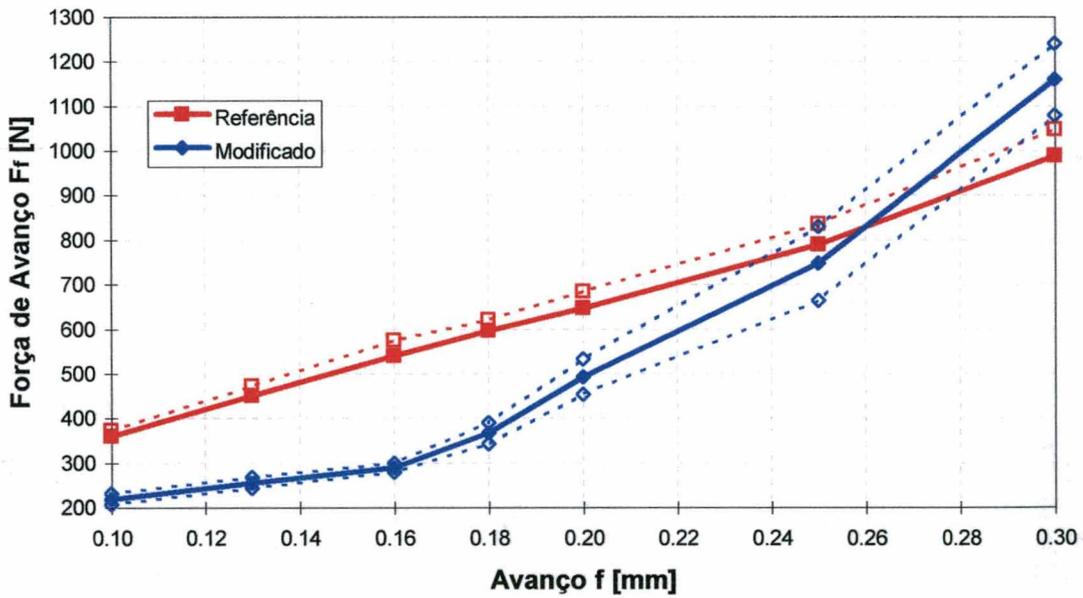


Figura 49 - Variação da força de avanço em função do avanço para a velocidade de 45 m/min

(Ferramenta de metal duro com geometria: $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\chi = 93^\circ$ e $r_e = 0,8$ mm) [56]

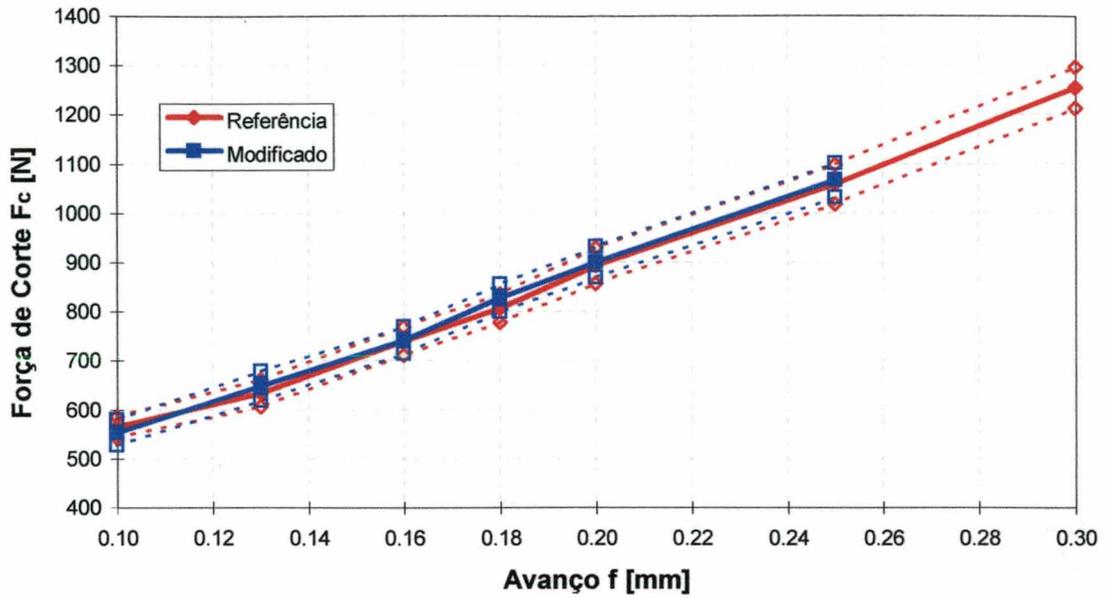


Figura 50 - Variação da força de corte em função do avanço para a velocidade de 200 m/min

(Ferramenta de metal duro com geometria: $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\chi = 93^\circ$ e $r_\epsilon = 0,8$ mm) [56]

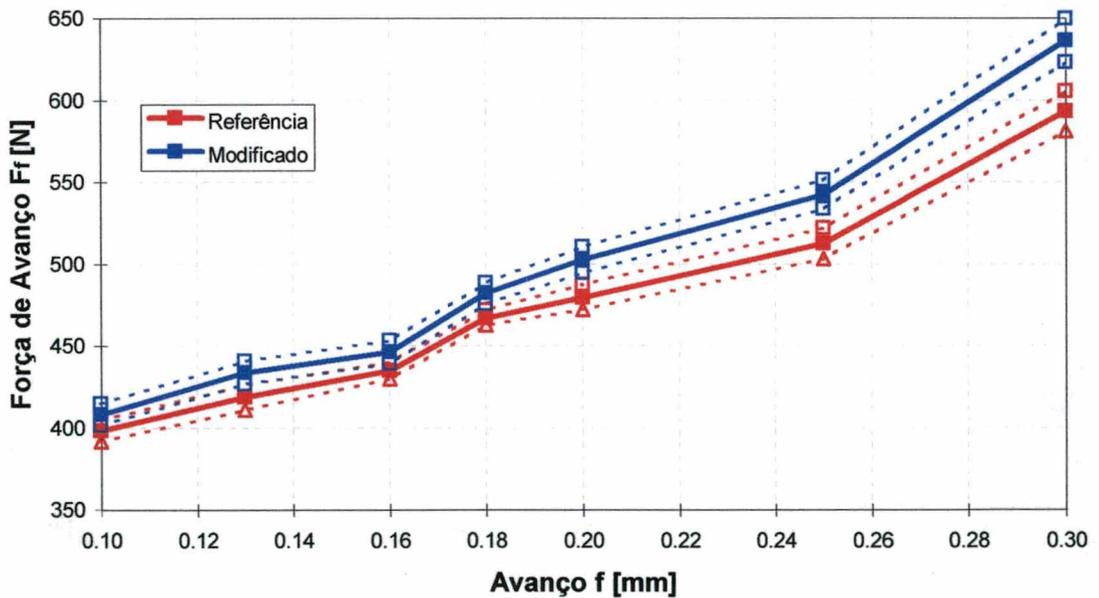


Figura 51 - Variação da força de avanço em função do avanço para a velocidade de

200 m/min (Ferramenta de metal duro com geometria: $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\chi = 93^\circ$ e $r_\epsilon = 0,8$ mm) [56]

4.3 - Ensaios de acabamento superficial

A avaliação comparativa da usinabilidade dos materiais, segundo o critério de rugosidade, foi feita com a utilização de ferramentas de metal-duro, o que garante uma melhor reprodutibilidade geométrica do raio de quina e evita assim a ocorrência de grandes dispersões de medidas causadas por problemas de afiação. A análise foi feita comparando-se as rugosidades obtidas em cada material mantendo-se constantes as variáveis de processo e condições de usinagem ($v_c = 45$ m/min e $a_p = 2,5$ mm) para as ferramentas utilizadas. A figura 52 mostra a curva de rugosidade R_a em função da variação do avanço, obtidas na usinagem dos aços AISI 1040 modificado e de referência (corridas A e B).

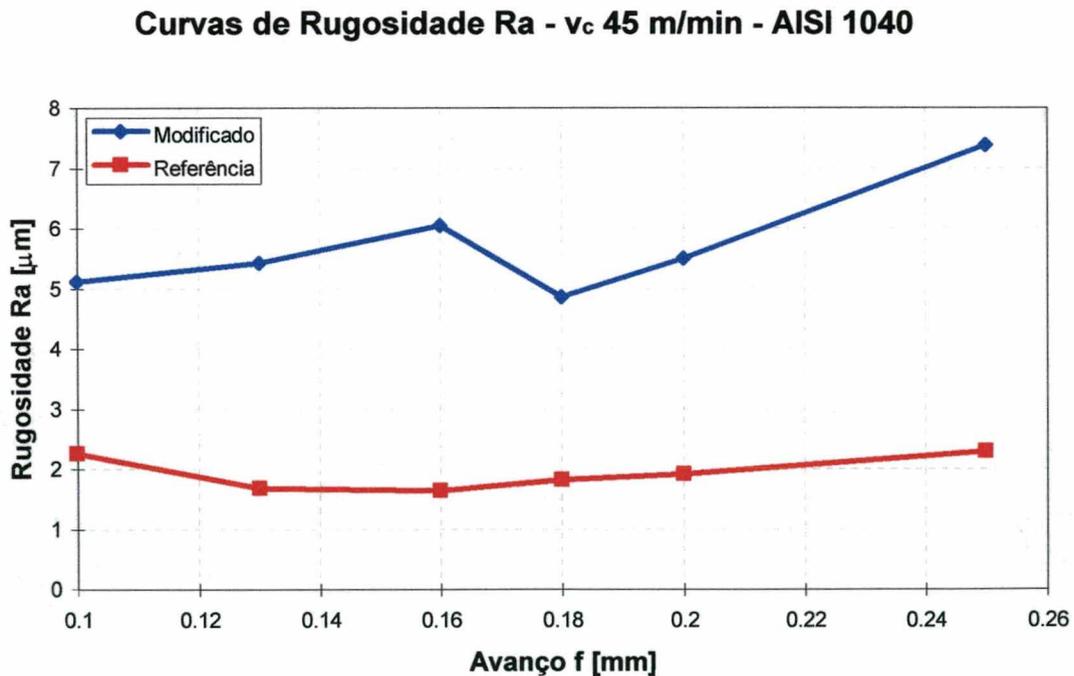


Figura 52 - Influência da variação do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem dos aços AISI

1040 (corridas A e B) (Ferramenta de metal duro com geometria: $\gamma = 6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$,

$\chi = 93^\circ$ e $r_\epsilon = 0,8$ mm) [56]

Como o critério de rugosidade é um critério de acabamento superficial do componente usinado, foi escolhida uma série de avanços situados na faixa de avanços de acabamento e desbaste leve. O aço de referência mostra uma rugosidade inferior à do aço modificado. Este comportamento pode ser associado à formação do gume postiço, que para os aços com adição de inclusões metálicas é deslocado determinadas faixas de velocidades de corte.

4.4 - Ensaio de formas e tipos de cavaco

As formas dos cavacos gerados, através dos ensaios de torneamento, são utilizadas na avaliação comparativa da usinabilidade dos aços AISI 1040 Modificado e de Referência.

Quanto à escolha das variáveis, foram consideradas a influência do avanço e da velocidade de corte, sendo definida uma combinação de seis avanços e quatro velocidades de corte, mantendo-se a profundidade de corte constante (2 mm).

Os cavacos foram analisados e classificados conforme a norma ISO 3685/1977, sendo esta em função da forma e do tipo de cavaco formado.

Na velocidade de 200 m/min, nos ensaios com os aços AISI 1040 Modificado e de Referência, correspondentes às corridas A e B, o cavaco formado foi da forma arco solto, para baixos e altos valores de avanço. Entretanto, foi observada a formação de cavacos do tipo espiral cônico na usinagem do aço AISI 1040 de Referência para um avanço de 0,13 mm. Nas velocidades de 15, 30 e 45 m/min, na usinagem do aço AISI 1040 de Referência os cavacos formados são predominantemente da forma arco solto. Para os baixos valores de avanço foi observada a formação de cavacos da forma espiral cônico.

Entretanto, para os aços modificados, nestas mesmas condições de velocidade de corte, os cavacos foram predominantemente do tipo espiral curto, entretanto para baixos valores de avanço foram observados cavacos do tipo espiral cônico. Os resultados são apresentados nas tabelas 11 e 12.

	f = 0,10	f = 0,13	f = 0,16	f = 0,18	f = 0,20	f = 0,25
v_c = 15	3.1 / 3.2	6.2 / 3.2	6.2 / 3.1	6.2 / 3.1	6.2 / 3.1	6.2
v_c = 30	3.1 / 3.2	3.1	3.1	3.1	3.1	6.2
v_c = 45	3.1 / 3.2	3.1	3.1	3.1	3.1	6.2
v_c = 200	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2

TABELA 11 - Classificação dos cavacos, aço AISI 1040 Modificado [56]

⇒ **Codificação:**

3.1 Cavaco espiral curto,

3.2 Cavaco espiral cônico,

6.2 Cavaco arco solto.

	f = 0,10	f = 0,13	f = 0,16	f = 0,18	f = 0,20	f = 0,25
v_c = 15	3.2 / 6.2	3.2 / 6.2	3.2 / 6.2	6.2	6.2	6.2
v_c = 30	3.2 / 6.2	3.2 / 6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
v_c = 45	6.2	6.2	6.2	6.2	6.1 / 6.2	6.1
v_c = 200	6.2	2.3 / 6.2	6.2	6.2	6.2	6.2

TABELA 12 - Classificação dos cavacos, aço AISI 1040 Referência [56]

⇒ **Codificação:**

- 3.1 Cavaco espiral curto,
- 3.2 Cavaco espiral cônico,
- 6.1 Cavaco arco conectado;
- 6.2 Cavaco arco solto.

As figuras 53, 54, 55 e 56 mostram quatro formas básicas de cavacos obtidas para as condições de corte utilizadas.



Figura 53 - Cavaco espiral curto, aço AISI 1040 Modificado [56]



Figura 54 - Cavaco espiral cônico, aço AISI 1040 Modificado [56]



FIGURA 55 - Cavaco arco conectado, aço AISI 1040 Referência [56]

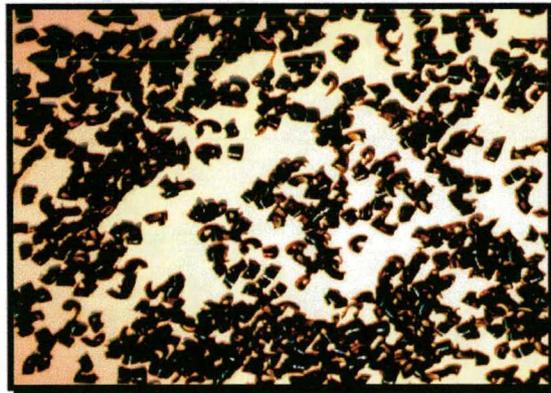


FIGURA 56 - Cavaco arco solto, aço AISI 1040 Modificado [56]

Quanto à avaliação comparativa da usinabilidade dos aços AISI 1040 Modificado e de Referência, corridas A e B, os cavacos não apresentaram diferenças significativas. Em todas as condições de corte utilizadas, as formas de cavacos geradas foram satisfatórias. Entende-se por formas satisfatórias aquelas em que os cavacos gerados apresentam baixo volume específico, facilidade de remoção e que não ofereçam perigo ao operador da máquina-ferramenta.

Quanto aos cavacos gerados na usinagem dos aços AISI 1040, correspondentes às corridas C e D, estes não apresentaram diferença significativas. Em todas as condições de corte utilizadas as formas dos cavacos gerados foram satisfatórias. Os resultados são apresentados nas tabelas 13 e 14.

	f=0,16	f=0,18	f=0,20	f=0,25	f=0,30	f=0,36
$v_c=200$	6.2	6.2	6.2	3.1/6.2	3.1/6.2	3.1/6.2
$v_c=250$	6.2	6.2	6.2	3.1/6.2	3.1/6.2	3.1/6.2
$v_c=280$	6.2	6.2	6.2	3.1/6.2	3.1/6.2	3.1/6.2
$v_c=315$	6.2	6.2	6.2	3.1/6.2	3.1/6.2	3.1/6.2

Tabela 13 - Classificação dos cavacos, aço AISI 1040 Modificado [56]

⇒ **Codificação:**

3.1. Cavaco espiral curto;

3.2. Cavaco arco solto.

	f=0,16	f=0,18	f=0,20	f=0,25	f=0,30	f=0,36
$v_c=200$	6.1/6.2	6.1/6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
$v_c=250$	6.1/6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
$v_c=280$	6.1/6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
$v_c=315$	6.1/6.2	6.1/6.2	6.2	6.2	6.2	6.2

Tabela 14 - Classificação dos cavacos, aço AISI 1040 Referência [56]

➤ **Codificação:**

6.1. Cavaco arco conectado;

6.2. Cavaco arco solto.

As figuras 57 e 58 mostram as formas de cavacos obtidas para as condições de corte utilizadas.



FIGURA 57 - Cavaco em arco solto [56]



FIGURA 58 - Cavaco em arco conectado [56]

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 - Conclusões

Quanto às condições de corte adotadas nos ensaios, verifica-se que a influência das inclusões metálicas sobre os vários critérios de avaliação da usinabilidade difere em dependência da velocidade de corte utilizada. Verifica-se também que quando é adotado um número limitado de condições de corte, para avaliar o comportamento de usinabilidade de um material, os ensaios não retratam fielmente o desempenho do material usinado.

Nas velocidades de corte de 250 a 315 m/min, utilizadas pela indústria no torneamento dos aços AISI 1040 com ferramentas de metal-duro revestidas, as taxas de deformação, localizadas entre lamelas adjacentes, impostas à microestrutura do material são significativas, e podem por sua vez não justificar a adição de inclusões metálicas de forma a favorecer a nucleação de trincas no material. Nas condições de corte utilizadas o efeito do estado inclusionário do material parece ser mais efetivo que os outros aspectos.

No passado as velocidades de corte eram limitadas pela vida da ferramenta de corte e pela potência instalada na máquina-ferramenta. Recentes desenvolvimentos de novos materiais das ferramentas têm permitido o emprego de velocidades de corte cada vez maiores, principalmente em operações de torneamento, com um satisfatório comportamento de vida da ferramenta de corte, o que por sua vez permite uma maior produtividade e implica em redução nos custos do processo, mesmo para os aços sem microestrutura modificada pela técnica da adição de inclusões metálicas.

Os aços modificados, disponibilizados para esta pesquisa, não permitiram comprovar uma melhoria na usinabilidade, quando comparados a aços pertencentes à mesma classe porém sem modificações na microestrutura.

A dispersão dos resultados obtidos nos ensaios de vida das ferramentas e principalmente a forte ação abrasiva exercida pelo material ensaiado sobre a ferramenta de corte, permitem referenciar que o efeito favorável das inclusões metálicas sobre a usinabilidade provavelmente foi mascarado pelo efeito negativo causado pelas inclusões não-metálicas abrasivas presentes na microestrutura do aço.

Quanto à formação de cavaco, o aço AISI 1040 não apresenta problemas típicos. Nas condições de velocidades de corte testadas as formas de cavacos gerados foram em espiral e em arco. Estas formas de cavacos são de fácil transporte e favorecem a automação do processo de fabricação. Não foi observada nenhuma modificação significativa na forma dos cavacos, na faixa de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte utilizadas nos ensaios dos materiais avaliados. Das observações feitas sobre as formas dos cavacos gerados, não há como considerar a melhoria na fragmentabilidade do cavaco, gerado na usinagem do aço AISI 1040 Modificado, devido à atuação das inclusões através do mecanismo de fragilização por metal líquido. Na avaliação comparativa os cavacos gerados não apresentaram diferenças expressivas.

Com a progressão do desgaste das ferramentas de corte, devido ao entalhe acentuado, em algumas situações foi observada a formação de um cavaco fortemente serrilhado lateralmente. Quando esta forma de cavaco predominava, a peça apresentava um grande número de aderências na superfície usinada.

Os resultados dos ensaios de acabamento superficial mostram que o aço AISI 1040 Referência apresentam um menor valor de rugosidade R_a e R_z se comparados aos aços AISI 1040 Modificado. A rugosidade é fortemente influenciada pela velocidade de corte, geometria da ferramenta e pelo avanço. Os ensaios realizados com ferramenta de aço-rápido não permitiram conclusões claras, devido à dispersão dos valores dos raios de quina destas ferramentas, pelo fato de terem sido afiadas manualmente. Para a velocidade de 45 m/min o aço com a microestrutura modificada apresentou uma rugosidade pior se comparado ao aço de referência (sem adição de bismuto). Este comportamento pode ser correlacionado com o deslocamento da faixa de velocidade de formação do gume posição para maiores valores de velocidade de corte.

Nos ensaios com o aço modificado o comportamento das força de usinagem não foi influenciado em velocidades de corte acima de 100 m/min. Para velocidade de corte menores (45 m/min), entretanto, observa-se uma diminuição da força de usinagem para os aços com microestrutura modificada. Tal fato reforça citações da literatura quanto ao efeito provocado pelas inclusões metálicas.

5.2 - Sugestão para futuros trabalhos

- Caracterização microestrutural detalhada, particularmente quanto ao estado inclusionário, de forma a se estabelecer uma correlação entre fração volumétrica, distribuição, natureza e tamanho das inclusões e usinabilidade.
- Execução de um maior número de ensaios, cobrindo uma ampla gama de condições de corte (avanços e velocidades de corte).

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JIN, L-Z, SANDSTRÖM, R. Evaluation of Machinability Data. **Journal of Testing and Evaluation, JTEVA**. v. 22, n. 3, p. 204 - 211, maio 1994.
- [2] MICHELETTI, G. F. Work on Machinability in the Co-operative Group C of CIRP. **Annals of the C.I.R.P.** v. 18, p. 13 - 30, maio 1994.
- [3] FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 5 ed. São Paulo: Blücher, 1977, 751 p.
- [4] TOLLEY, J., CHARLES J. A. Influence of Microstructure on Machinability of Wrought Steels. **Metals Technology**. p. 248 - 253, maio/jun. 1976.
- [5] KÖENIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fraesen, Bohren**. Duesseldorf: VDI-Verlag, 1990, Band 1.
- [6] MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por Arranque de Viruta**. 1 ed. Barcelona: Blume, 1986, 426 p.
- [7] SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting**. A practical Handbook. 1 ed Dept. Technical Sandvik Coromant, 1994, 500 p.
- [8] ZIMMERMAN, C., BOPPANA, S. P. Machinability Test Methods. **Machining of Specific Metals and Alloys**. p. 639 - 647, 1976.
- [9] N. N. Informações fornecidas pessoalmente pelo prof. Dr.- Ing Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 1998.
- [10] LOURENÇO, C. J. A **Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304**. Uberlândia, MG, maio 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - UFU, 110 p.
- [11] ISO 3685. **Tool Life Testing With Single Point Turning Tools**. 1 ed. 1977-05-15

-
- [12] JOHNE, P. Spanen von Aluminiumwerkstoffen II. Aluminium nr. 56, jahrg. 1980. p. 472 - 475.
- [13] SHUITEK, A J. **Usinabilidade de Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente.** Florianópolis, SC, agosto 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, 132 p.
- [14] GOMES, J O. **Características da Usinabilidade de Aços Inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316 com variação dos parâmetros metalúrgicos.** Florianópolis, SC, março 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, 105 p.
- [15] WEINGAERTNER, W. L. , SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas ligas.** Convênio UFSC - ALCAN. 2 ed. Florianópolis, 1991. 80 p.
- [16] STEMMER, C. E, **Ferramentas de Corte I.** 2 ed. Florianópolis: UFSC, 1989, 288 p.
- [17] JAWAHIR, J. S., LUTTERVELT, C. A. Recent Developments in Chip Control Research and Applications. **Annals of CIRP.** v. 42, p. 659 - 693, fev. 1993.
- [18] BARROW, G. Tool life Equations and Machining Economics. **Division of Machine Tool Engineering. Department of Mechanical Engineering - UMIST**
- [19] PYTEL S., RUDNIK, S. The Role of Inclusion Morfology on Machinability of Structural Bar Steels. **Institute of Physical Metallurgy and Metals Technology Technical University of Kraków.** Poland, p. 13 - 20, [Ca.1989].
- [20] SUBRAMANIAN S. V, KAY, D. R. Inclusion Engineering for the Improved Machinability of Medium Carbon Steels. **University of Iron and Steel Technology.** Bejjin/China, p. 73 - 83, [1997].

-
- [21] GONZALES, G. S. **Aspectos Metalúrgicos da Usinabilidade do Aço SAE 12L14, Submetido a Crescentes Níveis de Deformação a Frio por Trefilação.** Campinas, SP, Out. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM, 78 p.
- [22] TIPINIS V. A, COOK N. H. Machinability of Recessulfurized Steels. **Proceedings of 8th Mechanical Working and Steel Processing Conference, AIME.** New York. P. 285 - 308, [1969].
- [23] N. N. Informações fornecidas pessoalmente pelo prof. Dr. Eng. Pedro A N. Bernadinni, Florianópolis, 1998.
- [24] BLANK, J. R., NAYLOR D.J., WANNEP.H., Improved and More Consistent Steel for Machining. **Int. Symposium on Influence of Metallurgie on Machinability of Steel.** Tokio, p.397 - 419, 1977.
- [25] N. N. Informações fornecidas pessoalmente pelo prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, Florianópolis, 1998.
- [26] LANE, J. D., STAM J. W., WOLF, K. J. B. General Introductory Review of the Relationship Between Metallurgy and Machinability. p. 65 - 70, [195-].
- [27] BERNARDINNI, P. **Fundamentos dos Materiais.** Florianópolis: UFSC/LABMAT, 1995, 125 p.
- [28] RUNGTA, R.KIDMORE, A J., Inclusions: Advantages, Disadvantages and the Technological Trends. Ohio - USA, p. 1 - 19, [1987].
- [29] METALS HANDBOOK. Metalography and Microstructure. American Society for Metals. 9 ed, v. 9, p.9, 1985.

-
- [30] CHIAVERINI, V., Tecnologia Mecânica. **Materiais de Construção Mecânica**. São Paulo: Mc Graw Hill do Brasil, v.2 , 1978.
- [31] DUARTE FILHO, O. **Estudo Microestrutural e da capacidade de Carga na Furação por Escoamento com Condições de Trabalho Variáveis em Processo**. Florianópolis, SC, fev. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, 139 p.
- [32] LESKOVAR, P., GRUM, J. Wearing Action at Cutting Plates of Cemented Carbides. *Strojinski vestnik, Mechanical Engineering Journal*. v. 25, n. 3, p 1 - 8, 1979.
- [33] BOULGER, F. W. Machining Characteristics of Steels Metals Handbook - ASM. p 565 - 585.
- [34] KÖNIG, W., KREIS W. Werkstoffkenngrößen und ihre Bedeutung für die Zerpannung, Berichte Zum Symposium der Deutschen Gesellschaft für Metalkund Bad Neuheim, Zerspanen, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde E. V. p. 82 - 124 , 1973.
- [35] SIMS, C. E. Transactions of the Metallurgical Society of AIME. n. 215, p. 367 - 393, Jun. 1959.
- [36] KIESSLING, R., LANGE N. **Non-Metallic Inclusion in Steel**. 2 ed. London: The Metal Society, n. 194, 1978.
- [37] ARAKI, T. Roles of Inclusions in the Steel for the Fatigue Properties and Machinability Problems. Tóquio/Japan, p. 149 - 155, [198-].
- [38] PYTEL, S. M, GARCIA, C. I. Quantitative Assesment of the Influence of Calcium Additions on Tool Wear in 8620 Steel. **The Machinability Institute Inc.** "paginação irregular", [1980?].

-
- [39] KOVASCH, C. W., EKENROD J. J. Studies on Sulfide Inclusions on Machinability of Steels. **Mechanical Working and Steel Processing Conference AIME**. 13 ed. New York, p. 300 - 331, 1971.
- [40] N.N. Informações fornecidas pessoalmente pelo Dr. -Ing Joaquin Bas, Charqueadas/RS, 1998.
- [41] WICHER, A. Oxidische Einschlüsse auf die Zerspanbarkeit Kohlenstoffstähle. *Maschinemark*, v.71, n. 53, p. 19 - 53, 1971.
- [42] TRENT, F. M. **Metal Cutting**. 2 ed. London: Butterworths, 1984.
- [43] LESKOVAR, P. , GRUM J. , FERLAN D. Influence of Sulphur and Lead on Wear Process of Free Cutting Steels. **Mechanical Engineering Journal**. v. 27, n. 1, p. 1 - 13, 1981.
- [44] LAIZHU, J., KUN, C., HANNU H. Effects of the composition, Shape factor and area Fraction of Sulfide Inclusions on the Machinability Re-sulfurized Free Machining Steel. **Journal of Materials Processing Technology**. P. 160 - 165, 1994.
- [45] YEO, R. B. G., The effect of Oxigen in Resulfurized Steels - Part 1. **Journal of Metals**. v. 19, n.6, p 29 - 32, 1967.
- [46] HONEYCOMBE, R. W. K., HANCOCK, P. **Metallurgy and Materials Science**. 1 ed. London: British Library, 1981, 243 p.
- [47] OJEBUOBOH, F. K. Bismuth - Production, Properties and Applications. **Review of Extrative Metallurgy**. p. 46 - 49, abril 1992.
- [48] ABOUT BISMUTH IN INCUT 200: A New Series of Free Machining Steels. **The Bulletin of the Bismuth Institute**. p. 1- 6, [198-].
- [49] RECH, B., FINGER, U. Bismuth-Alloyed Steels with Improved Machinability. **The Bulletin of the Bismuth Institute**. p. 1 - 12, 1988.

-
- [50] ABORN, R. H. Bismuth: A Trace Alloy Additive in Iron and Steel. **The Bulletin of the Bismuth Institute**. não paginada, 1975.
- [51] YAGUCHI, H. Effect of Soft additives (PB/Bi) on Machinability of Low Carbon Resulphurised Free Machining Steels. **The Institute of Metals**. Chicago, p. 255 - 266, 1988.
- [52] INLAND STEEL COMPANY, Lynda M, Riekels. Free Machining Steel With Bismuth and Manganese Sulfide. Int. Cl. 3 C22C 38/60, U. S. Cl. 75/123 AA. United States Patent, 70. 830, p - 1 - 6, 10 Abril 1981.
- [53] US STEEL CORPORATION. About the Machinability of Bismuth-Containing Steels Bars. **The Bulletin of the Bismuth Institute**. p. 4 - 5, 1975.
- [54] KIMURA, Atsuyoshi, NAKAMUA, Sadayuki. Super STARCUT Stailless Steel 304 BF with Bismuth. **The Bulletin of the Bismuth Institute**. p. 1 - 4, 1986.
- [55] Maliska, A. M. **Fundamentos da Microscopia eletrônica de Varredura e Caracterização Microestrutural de aços Sinterizados Nitretados por plasma**. Florianópolis, fev. 1998. Monografia (como requerimento para concurso de prof. Adjunto no tema “Análise de microestrutura de materiais por microscopia eletrônica).
- [56] WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R.B., ..ZEILMANN, R. P. et al. Ensaios de Usinabilidade de Aços AISI 1040 Lotes 1 e 2. Convênio LMP - UFSC/GERDAU. Florianópolis 1998.
- [57] KISTLER Instrument GmbH. Aachen: Kistler. “não paginada”, 1987.
- [58] FEINSPRUEF GmbH, Perthometer M3 A . Aparelho de medição de superfície pelo registro de representação gráfica, avaliação e protocolo de perfis de superfície.

7 - ANEXOS

Anexo 1

Material Aço 1040 AISI	
Corrida A	
Estado: Normalizado	
Dureza: 198 Hb	
Bitola: 101,6 mm	
Elemento químico	% em peso
Carbono	0,42
Silício	0,23
Manganês	0,75
Fósforo	0,016
Enxofre	0,022
Cromo	0,12
Níquel	0,07
Molibdênio	0,01
Alumínio	0,016
Cobre	0,11
Bismuto	Adicionado

Material Aço 1040 AISI	
Corrida B	
Estado: Normalizado	
Dureza: 200 Hb	
Bitola: 101,6 mm	
Elemento químico	% em peso
Carbono	0,4
Silício	0,23
Manganês	0,80
Fósforo	0,019
Enxofre	0,025
Cromo	0,12
Níquel	0,07
Molibdênio	0,01
Alumínio	0,017
Cobre	0,11

Tabela 15 e 16 - Composição química dos aços AISI 1040 Modificado e de Referência - corridas

A e B

Material Aço 1040 AISI	
Corrida C	
Estado: Recozido	
Bitola: 101,6 mm	
Elemento químico	% em peso
Carbono	0,37
Silício	0,22
Manganês	0,66
Fósforo	0,021
Enxofre	0,011
Cromo	0,06
Níquel	0,08
Molibdênio	0,01
Alumínio	0,018
Cobre	0,12
Bismuto	Adicionado

Material Aço 1040 AISI	
Corrida D	
Estado: Recozido	
Bitola: 101,6 mm	
Elemento químico	% em peso
Carbono	0,4
Silício	0,23
Manganês	0,81
Fósforo	0,019
Enxofre	0,022
Cromo	0,16
Níquel	0,1
Molibdênio	0,02
Alumínio	0,014
Cobre	0,16

Tabela 17 e 18 - Composição química dos aços AISI 1040 Modificado e de Referência correspondentes às corridas C e D.

Anexo 2

➤ Microestrutura do material analisado

A microestrutura do material é avaliada de forma qualitativa, através de observação do tamanho médio dos grãos ferríticos e das colônias perlíticas dos aços. Várias amostras foram retiradas no sentido longitudinal das barras, submetidas a metalografia (lixamento, polimento e ataque) e observadas através com auxílio de microscopia ótica. As microestruturas observadas não apresentaram diferenças significativas.

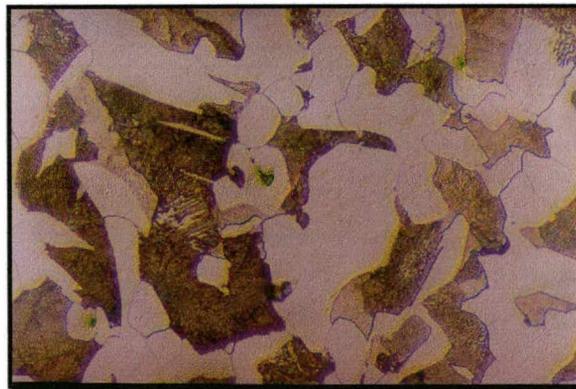


Figura 59 - Amostra longitudinal do aço
1040 AISI Modificado estado normalizado
(microscopia ótica, /1000 x) Corrida A

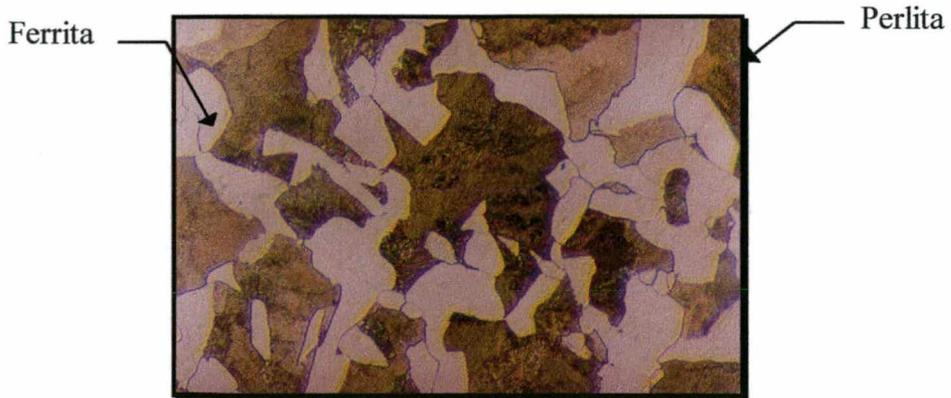


Figura 60 - Amostra longitudinal do aço 1040
AISI Referência estado normalizado (microscopia
óptica/ 1000 x) corrida B



Figura 61 - Amostra longitudinal do aço 1040
AISI Referência estado normalizado (microscopia
óptica/ 1000 x) corrida C

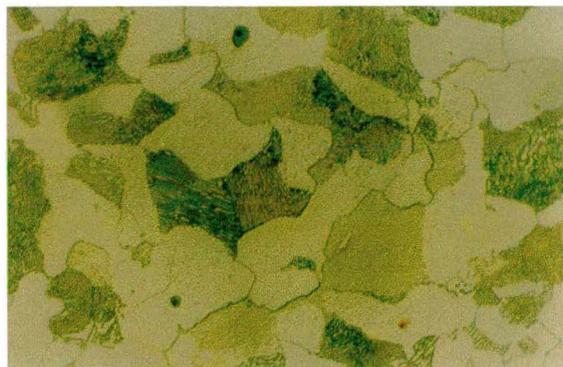


Figura 62- Amostra longitudinal do aço 1040

AISI Referência estado normalizado (microscopia
óptica/ 1000 x) corrida D

Foi verificada a presença de inclusões nos materiais avaliados. No aço 1040 AISI Modificado foi detectada a presença de inclusões de bismuto (fase clara) dispersas pela matriz e envolvendo inclusões não metálicas. Os espectrogramas obtidos revelam a presença de inclusões de alumina, envolvida por cálcio e sulfeto de manganês.

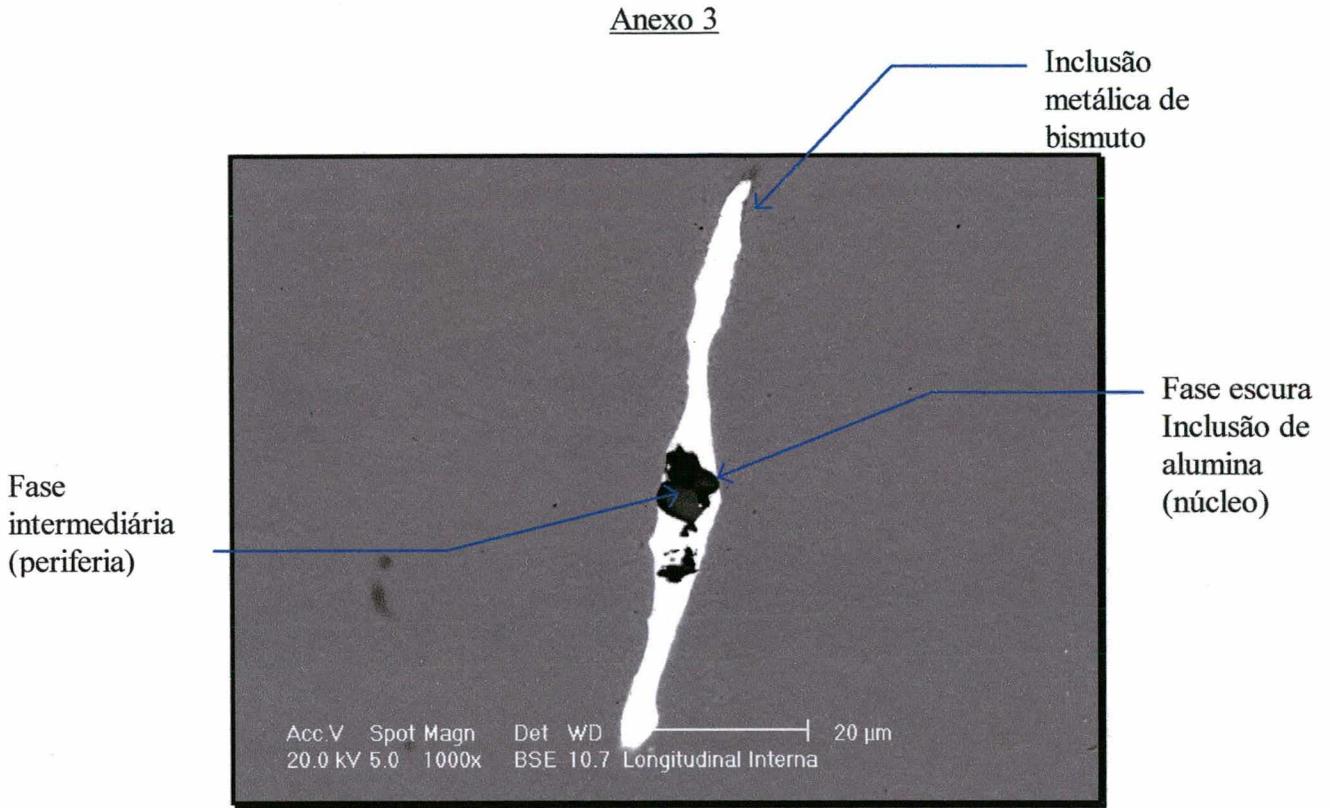


Figura 63 - Inclusão metálica de bismuto envolvendo uma inclusão não metálica.

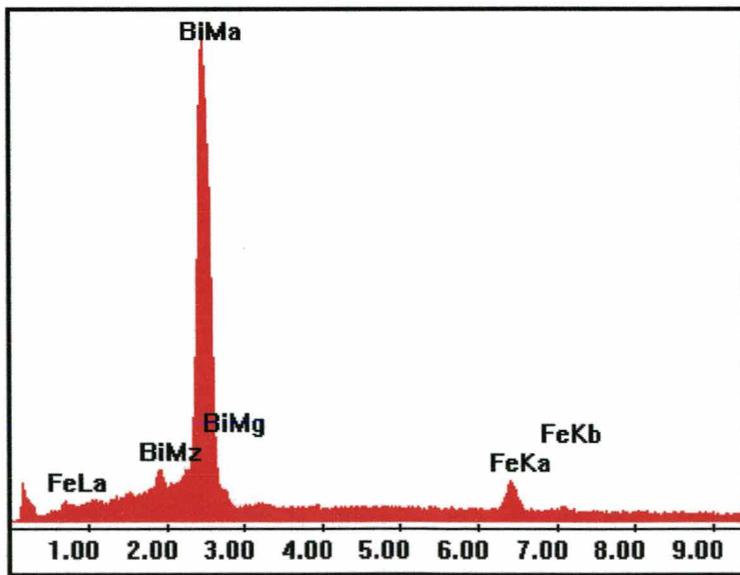


Figura 64 - Espectrograma da fase clara (brilhante)

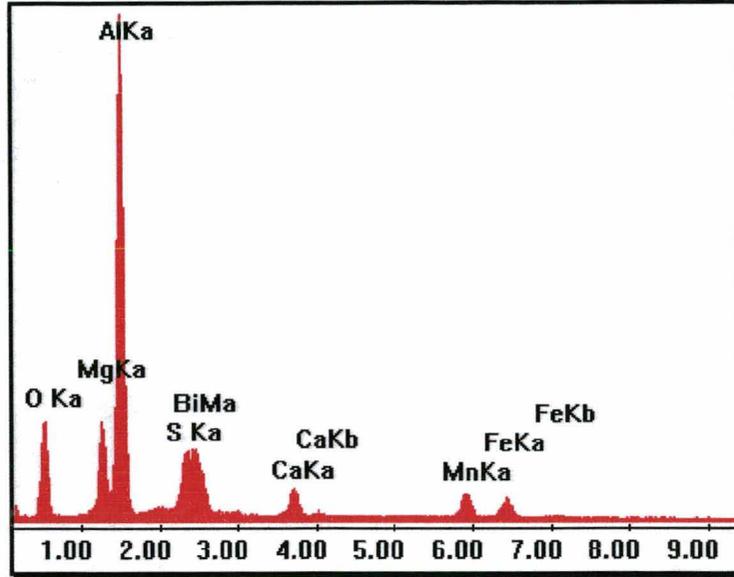


Figura 65 - Espectograma da fase escura (núcleo)

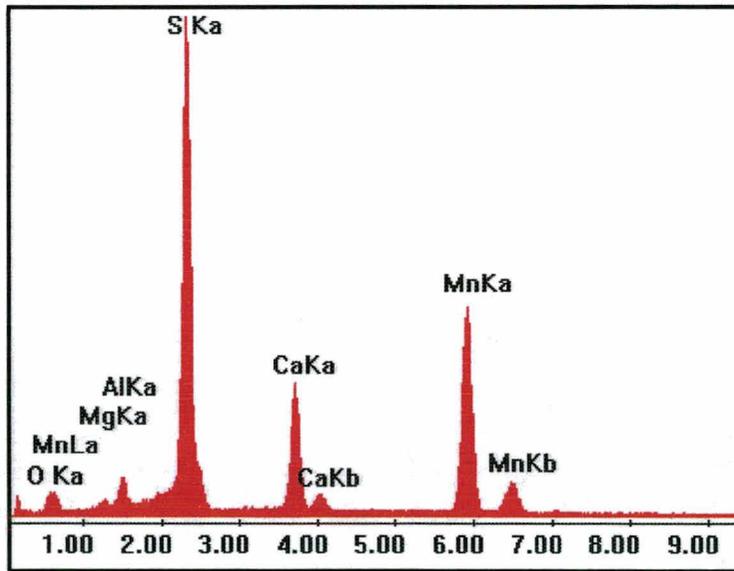


Figura 66 - Espectograma da fase intermediária

Anexo 4➤ Geometria da ferramenta de aço rápido:

- ↪ Ângulo de saída: $\gamma = 15^\circ$
- ↪ Ângulo de cunha: 69°
- ↪ Ângulo de incidência: $\alpha = 6^\circ$
- ↪ Ângulo de direção do gume principal: $\kappa = 45^\circ$
- ↪ Raio de quina da ferramenta $r_e = 0,8 \text{ mm}$

➤ Geometria da ferramenta de Metal duro

- ↪ Ângulo de saída: $\gamma \approx 6^\circ$
- ↪ Ângulo de Inclinação: $- 6^\circ$
- ↪ Ângulo de incidência: $\alpha = + 6^\circ$
- ↪ Ângulo de direção do gume principal: $\kappa = 93$
- ↪ Raio de quina da ferramenta $r_e = 0,8 \text{ mm}$

Anexo 5

➤ Dados técnicos do Torno Romi I 45

- ↳ Modelo: I - 45
- ↳ Fabricante: Indústrias Romi S.A
- ↳ Distância entre pontas: 2000 mm.
- ↳ Diâmetro admissível sobre o barramento: 620 mm.
- ↳ Potência instalada: 30 cv.
- ↳ Torque admissível: 12750 N.m.
- ↳ Gama de velocidades: 20 a 2500 rpm.
- ↳ Avanços longitudinais: 0,050 a 18 mm/rot.
- ↳ Avanços transversais: 0,017 a 6 mm/rot.

➤ Equipamentos de medição:

- ↳ Taco gerador (medição de rotação do torno):
- ↳ Fabricante: WEG Máquinas S.A.
- ↳ Modelo: 1.R/60;
- ↳ Constante de proporcionalidade: 0.06 V/rpm.

Anexo 6

➤ Dados técnicos da Plataforma Piezelétrica:

↳ Fabricante: KISTLER INSTRUMENTE AG.

↳ Modelo: 9263

↳ Faixas de medição (N):

0...15000 para F_x (F_f) e F_y (F_p)0...30000 para F_z (F_c)

↳ Sensibilidade (pC/N):

3.94 para F_x (F_f)3.96 para F_y (F_p)3.72 para F_z (F_c)

↳ Linearidade:

0.3% para F_x (F_f) e F_y (F_p)0.5% para F_z (F_c)

↳ Faixa de temperatura: 0 a 70 °C

➤ Amplificador de sinais:

➤ Dados técnicos:

↵ Fabricante	Kistler Instrumentos A.G.
↵ Modelo	5006
↵ Faixa de medição	$\pm 10 \dots 500.000$ pC
↵ Sensibilidade mecânica	0,1.....11.000 pC/unidade
↵ Sinal parasita do cabo	3.10^5 pCrms/pF
↵ Impedância de entrada	100 T
↵ Faixa de frequência	0...180kHz
↵ Linearidade	$\pm 0,05\%$
↵ Incerteza de medição	$\pm 1\%$
↵ Temperatura de utilização	0...50 °C
↵ Precisão: < 3% para as faixas de medição mais sensíveis.	

➤ Analisador de sinais (DATA AQUISITION)

➤ Dados técnicos:

↵ Fabricante	Hewlett-Packard
↵ Modelo	3497 A
↵ Impedância de entrada	$> 10^{10}$ (escala de 1 a 10 V)
↵ Mohms	$\pm 0,5\%$
↵ (escala 100 V)	

↳ Resolução	10 mV (para 3 dígitos,
↳ (escala 10V)	
↳ Número de aquisições/seg.	12
↳ Fabricante	Samsung
↳ Modelo	486 DX - 66 MHz
↳ RAM memory	8 Mbytes

Anexo 7

➤ Dados técnicos do Microscópio de ferramentaria

↳ Fabricante: Nikon - Japão

↳ Modelo: Mesuriscopes

↳ Mesa micrométrica com campo de medição de 50 x 100 mm.

↳ Resolução da mesa micrométrica: 0.001 mm.

Anexo 8

➤ Dados técnicos do Sistema de medição da rugosidade

↳ Fabricante: Feinpruef GmbH

↳ Modelo: Perthometer M3A

↳ Trajetória de deslocamento: 1.5 - 60 mm

↳ Precisão de deslocamento: $\pm 0.2 - 60$ mm

↳ Velocidade de apalamento: $0.5 - 0.1$ mm/s $\pm 5\%$

↳ Velocidade de retorno: 1.5 mm/s

➤ Posicionamento vertical:

↳ grosso: 135 mm, -20 para a superfície estabelecida.

↳ fino: 20 mm, através do parafuso de posicionamento.

➤ Posicionamento horizontal:

↳ grosso: através do botão correspondente.

↳ fino: botão para posicionamento fino

➤ Ajuste de inclinação:

↳ $\pm 1^\circ$, através do parafuso de posicionamento fino.