

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

RAFAEL VIEIRA SILVA JUNIOR

INFLUÊNCIA DE MICROLIGANTES NA USINABILIDADE E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO AÇO 1045

São Paulo

2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

S586i Silva Junior, Rafael Vieira.

Influência de microligantes na usinabilidade e propriedades mecânicas do aço 1045 / Rafael Vieira Silva Junior – 2010.

60 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) –
Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2010.

Bibliografia: f. 58-60.

1. Usinabilidade. 2. Aço 1045. 3. Microligantes. I. Título.

CDD 671.3

RAFAEL VIEIRA SILVA JUNIOR

INFLUÊNCIA DE MICROLIGANTES NA USINABILIDADE E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO AÇO 1045

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie como requisito parcial à obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Waldemar Alfredo
Monteiro

São Paulo

2010

RAFAEL VIEIRA SILVA JUNIOR

INFLUÊNCIA DE MICROLIGANTES NA USINABILIDADE E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO AÇO 1045

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

Aprovado em ____ de _____ de 2010.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Waldemar Alfredo Monteiro
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

Prof. Dr. Juan Alfredo Guevara Carrió
Universidade Presbiteriana Mackenzie

À minha esposa Flaviana, pelo constante incentivo e apoio; ao meu filho Lucas, pela ausência sentida durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram para o direcionamento e concretização desse trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Waldemar Monteiro pela orientação presente e contribuições oportunas, com as quais aprendi e ampliei meus conhecimentos.

À Flaviana, minha Princesa, pelo companheirismo, suporte e encorajamento presente em todos os momentos.

Ao Lucas pela compreensão da ausência do “Papai”.

Aos amigos Paulo Ribeiro e Dante Ribeiro pela oportunidade de trabalharmos juntos neste projeto.

Aos colegas da Belgo Bekaert Arames pela motivação e colaboração em momentos decisivos dessa jornada.

Ao meu pai (*in memoriam*) e à minha mãe pelos ensinamentos e pela luta para criar os quatro filhos.

Agradeço aos meus irmãos, familiares e amigos pelo incentivo à participação.

À Aço especial pelo suporte financeiro e apoio tecnológico.

Tudo evolui; não há realidades eternas:
tal como não há verdades absolutas.
(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

Foram investigados os efeitos da adição do Bismuto, do Boro, do Alumínio, do Titânio, do Enxofre e do Nitrogênio no aço 1045 para melhorar a usinabilidade do aço e também sua influência em propriedades mecânicas. Propõe-se substituir o uso do Pb por Bi como um elemento usado para melhorar a usinabilidade mantendo-se as características mecânicas do aço 1045. São apresentados resultados obtidos dos ensaios de usinabilidade, dureza e caracterizações microestruturais por microscopia óptica e eletrônica de varredura. Os resultados de impacto realizados indicaram que o aço 1045 com adição de boro, titânio, nitrogênio e enxofre apresentou a melhor tenacidade enquanto que os resultados de usinabilidade indicaram o aço 1045 adicionado com B, Bi, Ni e S como o melhor.

ABSTRACT

The effect of the addition of bismuth, boron, aluminum, titanium, sulphur and nitrogen in steel 1045 had been investigated to also improve the machinability of the modified steel and its influence in mechanical properties. It is considered to substitute the use of the lead as a used element to earn in machinability to keep the mechanical characteristics of 1045 steel. They will be presented results of machinability tests, hardness measurements and microstructural characterizations by optical and scanning electron microscopy. The results of the impact tests had indicated that 1045 steel with addition of boron, titanium, nitrogen and sulphur presented the best tenacity whereas the usinabilidade results had indicated the 1045 steel added with boron, bismuth, nitrogen and sulphur as most favorable.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Pag.	
Figura 1	Custo de uma peça plástica injetada para a indústria automobilística	17
Figura 2	Custo de fabricação de um molde para a indústria plástica	18
Figura 3	Comportamento tensão-deformação típico de um metal, mostrando a deformação plástica e elástica, o limite de proporcionalidade e a tensão limite de escoamento	28
Figura 4	Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração	29
Figura 5	Técnicas de ensaios de dureza, penetradores e fórmulas	30
Figura 6	Dimensões dos corpos de prova para ensaios Charpy-Impacto	31
Figura 7	Formas e grandezas de desgaste da ferramenta	33
Figura 8	Modelo de corpo de prova utilizado para o ensaio de usinabilidade	35
Figura 9	Torno ROMI Galaxy similar ao utilizado nos ensaios de usinabilidade	36
Figura 10	Variação de contraste em grãos polidos e atacados devido à diferença de orientação cristalográfica	38
Figura 11	Variação de contraste em grãos polidos e atacados devido ao contorno de grãos	39
Figura 12	Desenho esquemático da coluna do MEV	40
Figura 13	Máquina de corte Labotom-3 Marca Struers e embutidora EMHP40 Marca TECLAGO utilizadas para preparação dos corpos de prova	41
Figura 14	Lixadeira LaboPol-2 Marca Struers e politriz Pananbra DP9 Struers utilizada para preparação dos corpos de prova	41
Figura 15	Microscópio Óptico NIKON Eclipse LV150 utilizado nas análises metalográficas	42
Figura 16	Micrografia do aço 1045AINS	43
Figura 17	Micrografia do aço 1045BTiNS	43
Figura 18	Micrografia do aço 1045S	44
Figura 19	Micrografia do aço 1045BiS	44
Figura 20	Micrografia do aço 1045BBiNS	44
Figura 21	Evolução do resultado do teste de impacto em função do tipo de	45

	aço	
Figura 22	Evolução do resultado do teste de Dureza HB em função do tipo de aço	47
Figura 23	Tempo de vida da ferramenta para cada aço	48
Figura 24	Vida da ferramenta em função do volume de material removido	48
Figura 25	Desgaste de flanco em função do número de passes para cada material ensaiado	49
Figura 26	Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045A1NS	49
Figura 27	Evolução do desgaste da ferramenta após 6 passes no material 1045A1NS	50
Figura 28	Evolução do desgaste da ferramenta após 9 passes no material 1045A1NS	50
Figura 29	Evolução do desgaste da ferramenta após 12 passes no material 1045A1NS	50
Figura 30	Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045BiS	51
Figura 31	Evolução do desgaste da ferramenta após 4,5 passes no material 1045BiS	51
Figura 32	Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045S	52
Figura 33	Evolução do desgaste da ferramenta após 5 passes no material 1045S	52
Figura 34	Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045BiBNS	53
Figura 35	Evolução do desgaste da ferramenta após 12 passes no material 1045BiBNS	53
Figura 36	Evolução do desgaste da ferramenta após 21 passes no material 1045BiBNS	53
Figura 37	Evolução do desgaste da ferramenta após 27 passes no material 1045BiBNS	54
Figura 38	Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045BTiNS	54

Figura 39	Evolução do desgaste da ferramenta após 4,5 passes no material 1045BTiNS	55
Figura 40	Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045	55
Figura 41	Evolução do desgaste da ferramenta após 6 passes no material 1045	56
Figura 42	Evolução do desgaste da ferramenta após 9 passes no material 1045	56
Figura 43	Evolução do desgaste da ferramenta após 11,5 passes no material 1045	56
Figura 44	Micrografia Eletrônica (MEV) de uma amostra do aço 1045BBiNS	57
Figura 45	Espectro de EDS realizado no ponto 1 da Figura 40 onde é possível identificar traços de Bismuto no aço 1045BBiNS	57
Figura 46	Micrografia Eletrônica (MEV) da superfície da pastilha de metal duro utilizada para o ensaio de usinabilidade do aço 1045BBiNS em região que não teve contato com o material	58
Figura 47	Espectro de EDS realizado na ferramenta na região onde foi feita a imagem da Figura 45, onde fica clara a ausência de Bismuto na composição do revestimento da pastilha de metal duro	58
Figura 48	Micrografia Eletrônica (MEV) da pastilha de metal duro utilizada para o ensaio de usinabilidade do aço 1045BBiNS	59
Figura 49	Espectro de EDS realizado no ponto 1 da Figura 42 onde é possível identificar traços de Bismuto no aço 1045BBiNS na superfície de folga da ferramenta de corte utilizada para o ensaio de usinabilidade	59
Figura 50	Espectro de EDS realizado no ponto 1 da Figura 42 onde é possível identificar traços de Bismuto no aço 1045BBiNS na superfície de folga da ferramenta de corte utilizada para o ensaio de usinabilidade	60

LISTA DE TABELAS

	Pag.	
Tabela 1	Critérios de fim de vida de ferramenta recomendados pela norma ISO 3685 (1993)	34
Tabela 2	Dimensões dos corpos de prova e relação entre diâmetro e comprimento	35
Tabela 3	Dados referentes à geometria da Ferramenta	35
Tabela 4	Condições de usinagem para os ensaios	36
Tabela 5	Análise química das microadições	43
Tabela 6	Resultados dos ensaios de impacto	45
Tabela 7	Resultados dos ensaios de Tração	46
Tabela 8	Resultados dos ensaios de Dureza (HB).	46
Tabela 9	Resultados dos ensaios de usinabilidade	47

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p	Profundidade de corte
C_V	Vida da ferramenta para velocidade de corte [min.]
f / f_n	Avanço [mm/volta]
I	Comprimento total da aresta de corte [mm]
ISO	International standard association
K	Coefficiente angular da curva de vida da ferramenta
KT	Profundidade de cratera [mm]
R	Raio de Ponta da ferramenta de corte [mm]
T	Tempo de vida da ferramenta [min.]
T	Altura da ferramenta de corte [mm]
V_B	Desgaste de flanco médio [mm]
V_{BMAX}	Desgaste de flanco máximo [mm]
V_C	Velocidade de corte [mm/min.]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO GERAL	19
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA	20
1.4 METODOLOGIA	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 O AÇO	22
2.2 FATORES METALÚRGICOS QUE AFETAM A USINABILIDADE DOS AÇOS.....	22
2.2.1 SULFETOS DE MANGANÊS.....	23
2.2.2 INCLUSÕES METÁLICAS.....	23
2.3 ELEMENTOS DE LIGA	24
2.3.1 ALUMÍNIO.....	24
2.3.2 BORO	24
2.3.3 BISMUTO.....	25
2.3.4 ENXOFRE	25
2.3.5 MANGANÊS.....	26
2.3.6 TITÂNIO	27
2.3.7 CHUMBO	27
2.4 MATERIAIS E METODOS	28
2.4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	28
2.4.2 ENSAIOS DE DUREZA À PENETRAÇÃO.....	29
2.4.2.1 DUREZA BRINELL.....	29
2.4.2.2 DUREZA ROCKWELL.....	30
2.4.2.3 DUREZA VICKERS.....	30
2.4.3 ENSAIO CHARPY - IMPACTO.....	31
2.4.4 ENSAIO DE USINABILIDADE.....	32
2.4.4.1 DESGASTE DA FERRAMENTA.....	32
2.4.4.2 CRITÉRIO DE VIDA DA FERRAMENTA.....	33
2.4.4.3 TESTE DA TAXA DE DESGASTE.....	34
2.4.4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL- USINABILIDADE.....	34
2.5 TÉCNICAS MICROSCÓPICAS.....	36

2.5.1 MICROSCOPIA ÓPTICA E METALOGRAFIA (MATERIALOGRAFIA).....	37
2.5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	39
2.5.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL- MICROSCOPIA OPTICA.....	40
3 RESULTADOS.....	42
3.1 ANÁLISES QUÍMICAS E METALOGRÁFICAS.....	42
3.2 ENSAIOS MECÂNICOS.....	45
3.2.1 ENSAIO DE IMPACTO.....	45
3.2.2 RESULTADOS DE DUREZA E ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	46
3.3 ENSAIOS DE USINABILIDADE.....	47
3.4 DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS.....	60
4 CONCLUSÕES.....	62
5 BIBLIOGRAFIA.....	63

1 INTRODUÇÃO

Apesar do imenso progresso que tem sido obtido ao longo dos últimos anos no campo da Ciência de Engenharia dos Materiais, ainda existem grandes desafios tecnológicos, incluindo o desenvolvimento de materiais cada vez mais sofisticados e especializados, assim como a consideração do impacto ambiental causado pela produção dos materiais (CALLISTER, 2006). Dentro dos desafios tecnológicos existentes está o desenvolvimento de aços especiais para fabricação de componentes mecânicos que apresentem características mecânicas compatíveis com as solicitações de aplicação, baixos custos de obtenção, processamento e que não tragam impactos negativos ao meio ambiente e à saúde do ser humano.

Em função da grande competitividade existente entre os fabricantes de componentes mecânicos, moldes e outros, o fator custo de processamento tornou-se decisivo na compra de materiais utilizados para este fim. Os custos do processo de fabricação do molde em uma peça plástica injetada para a indústria automobilística representam 30 % do custo final da peça no mercado.

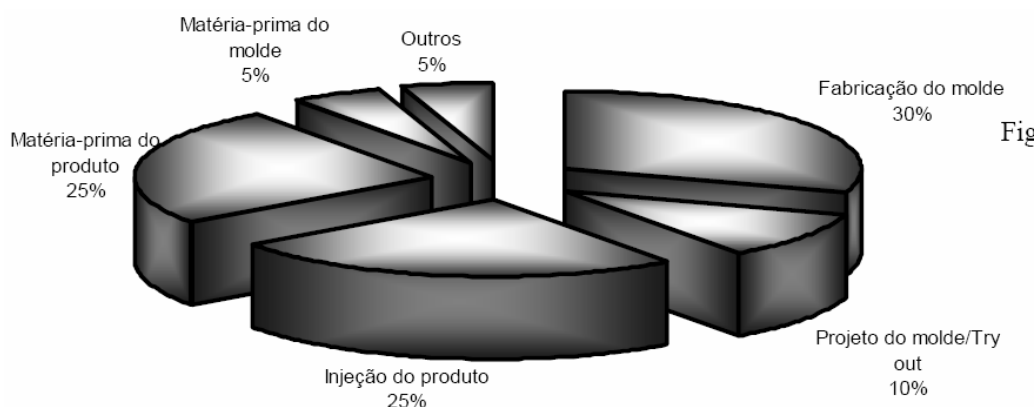


Figura 1: Custo de uma peça plástica injetada para a indústria automobilística.

A usinagem do molde representa 65% do custo total de fabricação de um molde, por esse motivo, surge a necessidade do desenvolvimento de aços que apresentem boas características de usinabilidade e processamento sem a perda das características mecânicas.

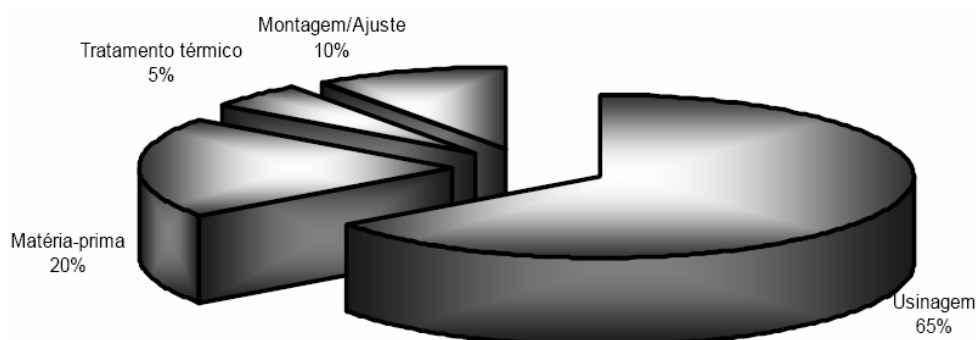


Figura 2: Custo de fabricação de um molde para a indústria plástica.

Usinabilidade é o termo mais frequentemente usado para denotar o desempenho de usinagem de um material; pode ser definido pela capacidade de um material ser cortado ou usinado por uma ferramenta apropriada (PIMENTEL, 2004). Devido aos vários parâmetros de processo e propriedades dos materiais que podem afetar a usinabilidade do par ferramenta-peça, a determinação do índice de usinabilidade torna-se complexa e seu uso deve ser criterioso – pois um material que possui um índice de usinabilidade maior de acordo com determinado critério pode apresentar um comportamento completamente distinto quando outro critério for considerado (AMORIM, 2002). Os aços carbono têm uma ampla faixa de usinabilidade, dependendo das suas propriedades mecânicas (SALDARRIAGA, 2008). Assim sendo, deve-se levar em consideração a composição química, tratamento térmico, tipos e quantidades de inclusões antes de definir um material a ser utilizado para usinagem, pois estas características do material aliadas ao tipo de ferramentas e operação de usinagem a ser realizada definirão o seu custo de fabricação.

Além da discussão em torno das características de qualidade e custo, outro termo importante discutido pelas grandes empresas na atualidade é a sustentabilidade, o que leva a utilização de métodos de fabricação que não impactem na saúde dos seus colaboradores, na comunidade e não depreciem o meio ambiente. Dessa forma, cresce a discussão sobre a utilização de metais pesados para obtenção de determinadas características mecânicas. O chumbo é um metal comumente utilizado para alcançar bons níveis de usinabilidade nos aços, mas já existem restrições ao seu uso devido aos impactos negativos à saúde dos trabalhadores expostos a este metal durante a fabricação ou reciclagem. Algumas das novas legislações europeias sobre metais pesados podem

afetar o consumo desses aços, como a lei dinamarquesa sobre produção, uso e comercialização do chumbo, ou o “Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles” que proíbem a reciclagem de componentes de veículos que contenham metais pesados, incluindo o chumbo (EVANGELISTA, 2003).

1.1 OBJETIVO GERAL

Nesse estudo foram investigados os efeitos da adição de bismuto, boro, alumínio, titânio, enxofre e nitrogênio na usinabilidade do aço 1045 e a sua influência nas propriedades mecânicas. Para isso, pretende-se propor a substituição da utilização do chumbo como elemento utilizado para ganhos em usinabilidade, e ao mesmo tempo, manter as características mecânicas do aço 1045. dentro dos parâmetros utilizados atualmente no mercado que são:

Dureza: acima de 170 HB

Resistência mecânica: Acima de 600 N/mm²

Tenacidade: entre 5 e 6 Joules

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Neste estudo serão investigados os efeitos da adição de bismuto, boro, alumínio, titânio, enxofre e nitrogênio na usinabilidade do aço 1045 e a sua influência nas propriedades mecânicas em tração, impacto e na dureza. O aço 1045 foi fornecido pela empresa AÇOESPECIAL, a fundição dos lingotes com os microligantes foi feita no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e os ensaios de usinabilidade no laboratório de usinagem do departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP (DEF/FEM/UNICAMP). Caracterizações microestruturais por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura foram realizadas nas amostras fundidas. As análises das superfícies de folga e de saída das ferramentas utilizadas para usinagem foram realizadas num microscópio estereoscópico e no microscópio eletrônico de varredura.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho é de grande importância devido à larga utilização do aço 1045 na indústria metal mecânica. O conhecimento do efeito da adição de bismuto, boro, alumínio, titânio, enxofre e nitrogênio na usinabilidade do aço 1045 e a sua influência nas propriedades mecânicas é uma contribuição técnica relevante. Com este trabalho pretende-se obter características tecnológicas aperfeiçoadas de acordo com a aplicação do produto final e fornecer uma gama de possibilidades que adequem este aço a exigências específicas para construção de componentes mecânicos e suas aplicações.

Chumbo e bismuto são elementos com características físico-químicas muito semelhantes que formam inclusões metálicas no aço, as quais possuem mecanismo de atuação na usinagem parecido com as inclusões de sulfeto de manganês (KLUJSZO E SOARES, 2004). Por esse motivo pretende-se comprovar que o chumbo pode ser substituído pelo bismuto como microligante, sendo o Bismuto um elemento que não apresenta os mesmos problemas ambientais do chumbo, podendo dessa forma contribuir para a preservação do meio ambiente e para a qualidade de vida das pessoas envolvidas com o processo de fabricação do aço 1045. Outra vantagem da aplicação do bismuto é o seu comportamento durante a solidificação, quando permanece na interface sólido/líquido evitando o crescimento das dendritas e obtém uma granulação mais fina do aço, o que resulta em melhores características mecânicas.

1.4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse trabalho foi realizado um amplo levantamento bibliográfico para obtenção de parâmetros, dados teóricos e normas que auxiliaram nas conclusões dos resultados obtidos nas experiências.

Com respeito à parte experimental primeiramente a matéria prima foi fundida em um forno a vácuo, sendo que após a fusão foram feitas as adições dos elementos microligantes no aço 1045 de referência. Foram vazados cinco lingotes de aproximadamente 90 kg cada com as seguintes composições:

O aço 1045 foi fornecido pela empresa AÇOESPECIAL, a fundição dos lingotes com os microligantes foi feita no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e os ensaios de usinabilidade no laboratório de usinagem do departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP (DEF/FEM/UNICAMP)

Identificação	Composição
1045AINS	1045 + Al + N + S
1045BTiNS	1045 + B + Ti + N + S
1045S	1045 + S (teor acima do usual, valor médio de 0,075 %)
1045BiS	1045 + Bi + S
1045BiBNS	1045 + Bi + B + N + S

Para determinação da usinabilidade de cada material, inclusive o 1045 de referência, foram usinados corpos de prova de acordo com a norma ISO 3685, 1993, segundo a qual o critério de fim de vida da ferramenta foi aquele definido para avaliação da usinabilidade.

A caracterização micro estrutural do material fundido consistiu na preparação da amostra metalográfica (corte, lixamento, polimento e ataque químico) para observação por microscopia óptica. Após a preparação das amostras metalográficas, foram executados ensaios de tração para a determinação do limite de escoamento, do limite de resistência e redução de área, também foi realizado ensaios de impacto Charpy para determinação da Tenacidade do material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O AÇO

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor, os aços comerciais não são ligas binárias de fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação (CHIAVERINI, 1996). A presença destes elementos secundários pode ser definida pelo tipo de processo utilizado para obtenção do aço e/ou através de adições para se alcançar determinadas características mecânicas exigidas pela aplicação do material e características desejadas.

2.2 FATORES METALÚRGICOS QUE AFETAM A USINABILIDADE DOS AÇOS

É comum se pensar no meio produtivo que a usinabilidade é uma propriedade intrínseca ligada à dureza do material da peça e a sua resistência mecânica. Assim, seguindo esse raciocínio, um material mole é de boa usinabilidade e um material duro de baixa usinabilidade. Porém, esse raciocínio é falso. Embora a dureza e a resistência mecânica sejam fatores importantes de influência na usinabilidade do material, outros fatores também são bastante importantes, como a qualidade das inclusões e de aditivos para melhorar a usinabilidade, a quantidade de partículas duras, a microestrutura, a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de saída da ferramenta, etc. (DINIZ ET. AL.; 2000).

O fator metalúrgico dos aços predominante com respeito à usinabilidade é, obviamente, a dureza. Aços de baixo carbono com baixa dureza e alta ductilidade têm tendência à formação da aresta postiça de corte, com consequente redução da vida da ferramenta e deterioração do acabamento superficial (DINIZ ET. AL., 2000)

Um segundo fator metalúrgico que afeta a usinabilidade dos aços é a microestrutura (DINIZ ET. AL., 2000). Sem alterar, por exemplo, a composição química de um aço, mas simplesmente provocando uma modificação na sua microestrutura, pode-se facilmente obter melhor usinabilidade (CHIAVERINI, 1996).

Um terceiro fator metalúrgico de influência na usinabilidade dos aços é a presença de inclusões. Macro inclusões são consideradas aquelas que têm diâmetro maior que 150 μ m. Elas são em geral, muito duras e abrasivas, por isso é necessário para fins de boa usinabilidade que se procure ter um material livre deste tipo de inclusões. As micro inclusões estão sempre presentes em algum nível na composição de um aço (DINIZ ET. AL., 2000).

2.2.1 Sulfetos de manganês:

- ✓ São obtidos pela adição de enxofre em quantidades suficientes para se combinar com o manganês e com o ferro, os quais são insolúveis no aço (DINIZ ET. AL., 2000).
- ✓ Das várias fases que os sulfetos podem formar nos aços comerciais, o sulfeto de manganês é o único que melhora a usinabilidade eficientemente. Acredita-se que isto se deve à baixa dureza e alta plasticidade do sulfeto de manganês quando submetido a altas temperaturas alcançadas durante a usinagem (KOVACK, 1974)
- ✓ As inclusões de MnS podem ser do tipo globular ou podem tornar-se alongadas durante a laminação do aço. De qualquer modo, elas favorecem a usinabilidade porque causam a formação de um cavaco quebradiço e atuam como uma espécie de lubrificante, impedindo que o cavaco adira à ferramenta e destrua a sua aresta cortante, além de melhorar a qualidade superficial da peça (DINIZ ET. AL.; 2000).

2.2.2 Inclusões metálicas:

- ✓ O emprego de elementos formadores de inclusões metálicas nos aços já vem sendo amplamente estudado ao longo de décadas. Basicamente, o chumbo e o bismuto são os elementos atualmente utilizados nos aços onde se busca um aumento na usinabilidade (LUIZ ET. AL.; 2003).

- ✓ O efeito da adição de chumbo e bismuto para formação de inclusões metálicas será detalhado junto com a revisão bibliográfica dos elementos de liga.

2.3 ELEMENTOS DE LIGA

De modo geral, os elementos de liga permitem um certo controle sobre as propriedades do material, por vezes condicionado a outras variáveis como tratamentos térmicos e mecânicos. Os efeitos decorrentes da adição de alguns desses elementos nas propriedades dos aços são mais estudados e divulgados, devido especialmente a seu uso freqüente em projetos (AMORIM, 2002).

2.3.1. Alumínio

O alumínio é utilizado como desoxidante, desgaseificante, refinador de grão e principalmente, para acalmar os aços de baixo carbono. Ele tem a capacidade de endurecer muito a ferrita por entrar em solução sólida nela. A maneira de desoxidar um aço influencia o controle de tamanho de grão da austenita: usando-se o Alumínio, o aço terá tendência a ficar com os grãos finos pela distribuição muito fina de Al_2O_3 , que age como núcleos que promovem a estrutura de grãos mais finos (SOUZA, 1989).

O alumínio aumenta moderadamente a temperabilidade do aço, quando dissolvido na austenita ele refina o grão de ferrita e da austenita devido à formação e precipitação de óxido e nitreto de alumínio, que obstruem o crescimento do grão, impedindo ainda a fragilização do aço, além disso, o alumínio evita a porosidade em peças fundidas (SOUZA, 1989).

2.3.2. Boro

O boro é um elemento largamente usado no aumento da temperabilidade e tenacidade dos aços, nos quais ele deve estar em solução sólida e não em forma de óxidos, nitretos e carbonitretos. O uso do boro para aumento da usinabilidade está associado à formação do B_2O_3 que tem baixo ponto de fusão ($450^\circ C$) e a partir dos $210^\circ C$ se encontra no estado viscoso. Desta forma, apresenta-se como lubrificante e protetor da ferramenta durante a usinagem dos aços (LUIZ ET. AL., 2003).

No tratamento de normalização, o boro não produz perlita fina e, portanto, não influi em sua resistência, o que faz os aços com boro normalizados ficarem mais fáceis de serem usinados e trabalhados mecanicamente do que os aços com elementos de liga equivalentes de mesma temperabilidade (SOUZA, 1989).

2.3.3. Bismuto

O emprego do bismuto como elemento químico que melhora a usinabilidade dos aços é recente. A utilização do Bismuto com o objetivo de melhorar a usinabilidade dos aços e do alumínio iniciou-se na década de 1970 e esta finalidade representa o seu maior consumo entre as aplicações possíveis (OJEBUOBOH, 1992).

O elemento mais usado na substituição do chumbo é o bismuto. Bastante próximo do chumbo na Tabela periódica o bismuto possui, além de um baixo ponto de fusão, algumas características que o diferencia dos outros metais, que são o fato de expandir na solidificação e apresentar menor condutividade térmica no estado sólido entre os metais (OJEBUOBOH, 1992).

As mudanças microestruturais, induzidas pelo bismuto durante a solidificação pode ser entendida em termos de atividade superficial do bismuto. Quando se inicia a solidificação, o bismuto segrega para a interface líquido/sólido, bloqueando significativamente o crescimento da dendrita na direção de alguns planos metalográficos. Durante a solidificação eutética, os carbonetos também são expostos ao efeito de barreira gerado pelo bismuto, sendo assim envolvidos por este elemento. Isto provoca a redistribuição do carbono e dos principais elementos de liga entre a solução sólida e os carbonetos (CHAUS, 2005).

O efeito do uso do bismuto em aços de corte fácil é semelhante ao do chumbo, devido ao seu baixo ponto de fusão ele gera uma camada protetora na interface ferramenta / peça, que faz com que um filme líquido seja formado entre a superfície da ferramenta e o cavaco.

2.3.4. Enxofre

De todos os aditivos usados para gerar aumento na usinabilidade, o enxofre é o mais barato e um dos mais amplamente usados. Seu uso, porém, acarreta certos efeitos nocivos, como a deterioração das propriedades mecânicas, plasticidade a quente e

resistência à corrosão do material usinado. Logo, sua aplicabilidade se condiciona principalmente a uma análise detalhada de custo de usinagem – de modo geral, deseja-se saber se a economia decorrente do uso deste aditivo cobre o prejuízo devido à diferença no custo do material e às alterações nas propriedades deste (AMORIM, 2002).

O enxofre está sempre presente nos aços como elemento residual em baixos teores. Ele é considerado elemento prejudicial às propriedades mecânicas do aço, pois pode ocasionar fragilidade ao frio e ao quente, ou seja, baixa resistência ao impacto, baixa ductilidade e baixa resistência à fadiga, pela formação do sulfeto de ferro, que se localiza nos contornos de grão da ferrita e da perlita (SOUZA; 1989). A dessulfuração do aço é feita principalmente pelo manganês, que forma o sulfeto de manganês que fica uniformemente distribuído pela estrutura. O sulfeto de manganês possui baixo ponto de fusão e grande plasticidade e eliminando o sulfeto de ferro, não causa os prejuízos citados (SOUZA, 1989).

O enxofre há muito tempo vem sendo utilizado como elemento de liga nos aços com a finalidade de aumento da usinabilidade. Assim sendo, o enxofre é o elemento de liga mais importante quando julgado em termos de benefícios econômicos com aumento de produtividade de usinagem. O enxofre em aços dessulfurados pelo manganês ou que possuem uma determinada quantidade deste elemento formam sulfetos de manganês que dependendo da quantidade, distribuição e morfologia melhoram a usinabilidade dos aços.

2.3.5. Manganês

A função principal do manganês é combinar-se com o enxofre, formando sulfeto de manganês (MnS), impedindo que se forme o sulfeto de ferro (FeS), responsável pela fragilização do aço, principalmente a temperaturas mais altas (SOUZA, 1989).

As características e influência do sulfeto de manganês já foram discutidas anteriormente.

2.3.6. Titânio

O titânio é adicionado ao aço como desoxidante, sendo esta a sua função principal. Ele é o elemento com maior tendência à formação de carboneto em altas temperaturas, de sulfeto e de nitreto (SOUZA, 1989).

Quando o titânio está em excesso nos aços-carbono de baixo teor de carbono, ele acalma e torna o aço muito resistente ao envelhecimento pela formação de carboneto e nitreto de titânio. Quanto mais houver titânio em excesso, mais a curva tensão-deformação obtida no ensaio de tração do material ficará semelhante à curva dos aços encruados ou de ligas não-ferrosas, isto é, ausência do patamar de escoamento, não importando o tratamento final do aço (normalizado, recozido ou envelhecido após encruamento). Este é um fator importante para aços destinados à estampagem profunda na forma de chapa. Além disso, o titânio em excesso faz diminuir a tenacidade e a resistência à fadiga e prejudica a usinabilidade do aço pela formação excessiva de inclusões abrasivas (SOUZA, 1989).

2.3.7. Chumbo

Adicionado em teores que varia de 0,1 a 0,35% em massa, o chumbo é adicionado no aço líquido durante o vazamento nos moldes. Como este metal é insolúvel no aço fundido, forma-se uma fina dispersão de partículas isoladas de chumbo ou este metal forma uma película envolvente em torno das microinclusões de sulfeto (DINIZ ET. AL., 2000).

Quanto às propriedades do material, a adição de chumbo causa alterações mínimas nas tensões de escoamento e ruptura, bem como na ductilidade e resistência à fadiga. Apesar de excelente no que diz respeito ao aumento da usinabilidade com um mínimo dano as demais propriedades, o uso de chumbo como aditivo nos metais tem diminuído gradativamente, pois devido a sua elevada toxicidade, cada vez mais novas leis ambientais restringem a produção destes aços (AMORIM, 2002).

2.4 MATERIAIS E MÉTODOS

2.4.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova de geometria definida a um esforço crescente de tração, aplicado continuamente até a fratura e no simultâneo registro do alongamento em função da força aplicada (MORAIS ET. AL , 2008).

Para os metais, o fenômeno do escoamento ocorre no momento em que surge uma deformação plástica ou permanente; a tensão limite de escoamento é determinada através da definição de uma pré-deformação específica e serve como um indicativo da tensão na qual tem início a deformação plástica. O limite de resistência à tração corresponde à tensão de tração máxima que pode ser suportada por um corpo de prova, enquanto o alongamento percentual e a redução de área são medidas da ductilidade do material – a quantidade de deformação plástica que ocorreu até a fratura (CALLISTER, 2006).

A ductilidade é outra propriedade mecânica importante. Ela representa uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado até o momento da fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena, ou mesmo nenhuma deformação plástica até o momento da sua fratura, é chamado de frágil.

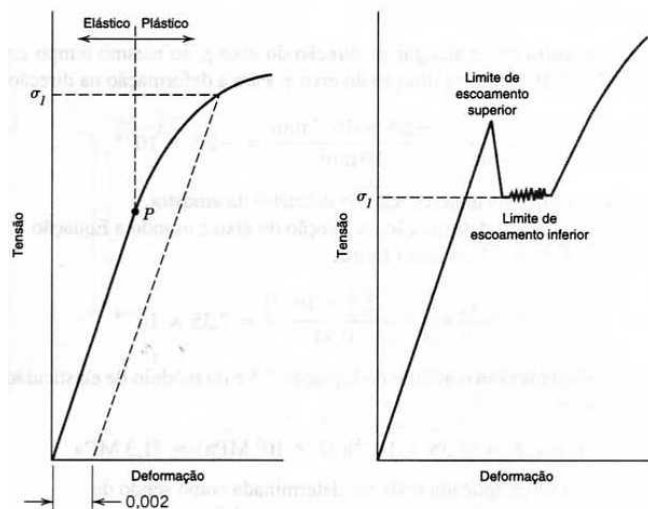


Figura 3: Comportamento tensão-deformação típico de um metal, mostrando a deformação plástica e elástica, o limite de proporcionalidade, e a tensão limite de escoamento. (FONTE: CALLISTER, 2006)

A fim de determinar a ductilidade, limite de escoamento e limite de resistência à tração dos materiais fundidos foram usinados cinco corpos de prova com as dimensões observadas na figura 7.

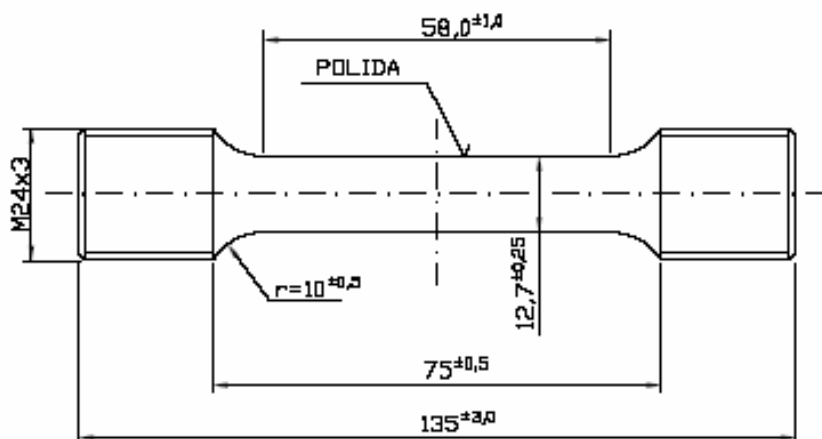


Figura 4: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração

2.4.1 Ensaio de dureza à penetração

O ensaio de dureza à penetração é de grande interesse para o estudo da metalurgia e dos materiais, sendo que o material mais duro consegue penetrar o material menos duro, ou seja, resistência à deformação plástica localizada. Existem vários tipos de testes de dureza à penetração.

2.4.2.1 Dureza Brinell

Padronizado em 1900, consiste na impressão em uma superfície metálica lisa e isenta de óxidos com uma esfera de aço de 10 mm de diâmetro e uma carga de 3000 kgf. Para metais macios, esta carga é de 500 kgf e a esfera é de carboneto de tungstênio. O tempo é de, geralmente, 30 s. Após a remoção de carga, mede-se o diâmetro da impressão com a utilização de um microscópio de baixa resolução, fazendo-se a média de suas leituras (MORAIS ET. AL., 2008).

2.4.2.2 Dureza Rockwell

É o teste de dureza mais amplamente utilizado, devido a sua velocidade, impossibilidade de erros operacionais, pequeno tamanho de impressão e capacidade de distinguir pequenas diferenças entre materiais duros (MORAIS ET. AL., 2008).

Aplica-se uma pré-carga de 10 kgf, para ajustar o corpo de prova, minimizando a necessidade de preparação da superfície e reduzindo a tendência para aderência do metal no penetrador. A seguir, aplica-se a carga principal. A profundidade de penetração é, automaticamente, registrada em um mostrador contendo 100 divisões, onde cada divisão representa a penetração aproximadamente 2µm. O mostrador é tal que menores penetrações (ou seja, maiores durezas) implicam em números de durezas grandes, sem unidades (MORAIS ET. AL., 2008).

2.4.2.3 Dureza Vickers

O penetrador de diamante em forma de pirâmide e base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces opostas, produz valores de impressão, à semelhança da dureza Brinell. A forma de impressão é um losango regular (MORAIS ET. AL., 2008). O valor de dureza é dado por uma equação (Ver Figura 2)

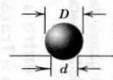



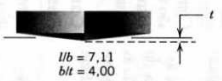





Ensaio	Penetrador	Forma da Impressão		Carga	Fórmula para o Número Índice de Dureza*
		Vista Lateral	Vista Superior		
Brinell	Esfera com 10 mm em aço ou carbeto de tungstênio			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			P	$HV = 1,854P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$HK = 14,2P/l^2$
Rockwell e Rockwell Superficial	Cone de diamante; esferas de aço com diâmetro de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol.			60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg }	
				15 kg } Rockwell Superficial 30 kg } 45 kg }	

Figura 5: Técnicas de ensaios de dureza, penetradores e fórmulas (Fonte: CALLISTER, 2006)

2.4.3 Ensaio Charpy – Impacto

O ensaio Charpy destina-se à medição da tenacidade de um material, isto é, sua capacidade de absorver energia até a fratura (MORAIS ET. AL., 2008). A tenacidade é um termo mecânico usado em vários contextos; genericamente, ela representa uma medida da habilidade de um material para absorver energia até a sua fratura (CALLISTER, 2006).

O ensaio é realizado em pêndulo de impacto. O corpo de prova é fixado num suporte, na base da máquina. O martelo do pêndulo - com uma borda de aço endurecido de raio específico - é liberado de uma altura pré-definida, causando a ruptura do corpo de prova pelo efeito da carga instantânea. A altura de elevação do martelo após o impacto dá a medida da energia absorvida pelo corpo de prova.

Os corpos de prova podem ser de diferentes tipos e dimensões dos entalhes. A norma americana E23 especifica os tipos. Eles são divididos em três grupos, a saber: A, B e C. Todos possuem as mesmas dimensões. A seção transversal é quadrada com 10 mm de lado e o comprimento é de 55 mm. O entalhe é executado no ponto médio do comprimento e pode ter três diferentes formas, em V em forma de fechadura e em U invertido, que correspondem aos grupos A, B e C respectivamente. Para esse trabalho o entalhe utilizado foi o tipo C conforme figura 8, com 2,00mm de largura e 5,0 mm de profundidade.

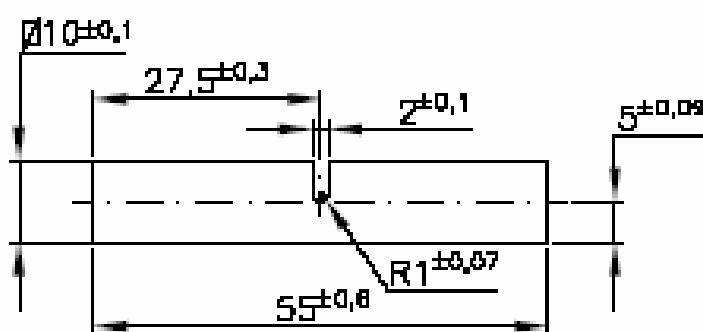


Figura 6: Dimensões dos corpos de prova para ensaios Charpy – Impacto

2.4.4 Ensaio de Usinabilidade

De um modo geral, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade) um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Em outras palavras pode-se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Entendem-se como propriedades de usinagem de um material, aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, tais como a vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, os esforços de corte, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco (DINIZ ET. AL.; 2000).

Inúmeros ensaios de usinabilidade têm sido propostos por diferentes pesquisadores para julgar o comportamento do material, numa combinação peça-ferramenta, em relação às grandezas características de usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial, temperatura de corte, etc. Para a avaliação da usinabilidade são, geralmente, usados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto:

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

2.4.4.1 Desgaste da ferramenta

Durante a usinagem, a ferramenta é submetida a um desgaste que depende da forma da solicitação e da duração de utilização da ferramenta (WEINGAERTNER, 1990).

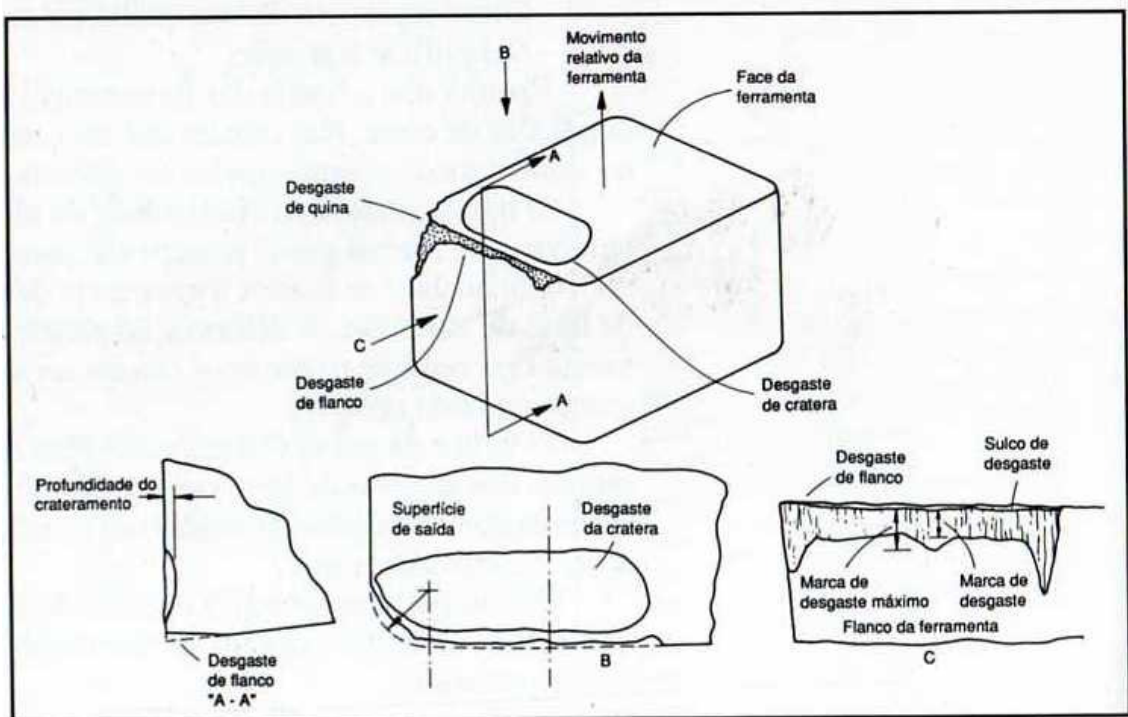


Figura 7: Formas e grandezas de desgaste da ferramenta (FONTE: WEINGAERTNER, 1990)

A Figura 3 mostra as formas de desgaste mais frequentes em uma ferramenta de torneamento. A cunha da ferramenta desgasta na face e no flanco. Os desgastes de flanco e cratera são, na prática, os mais empregados como critérios de fim de vida.

2.4.4.2 Critério de vida da ferramenta

A vida da ferramenta é normalmente o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material. A vida “T” é o tempo mínimo que uma ferramenta resiste do início do corte até a sua utilização total e é definida através da fórmula de Taylor (WEINGAETNER, 1990)

$$T = V_C^K \cdot C_V$$

Onde: T = vida da ferramenta [min.]

V_C = velocidade de corte [m/min.]

C_V = vida para velocidade de corte = 1m/min. [constante]

K = coeficiente angular da curva de vida.

2.4.4.3 Teste da taxa de desgaste

Considerado o mais eficiente dos ensaios de usinabilidade, este ensaio, regulamentado pela norma ISO 3685 de 1993, consiste no torneamento de corpos de prova, com parada da operação e verificação do desgaste da ferramenta em intervalos regulares. O procedimento é repetido continuamente até que o desgaste da ferramenta chegue a um limite preestabelecido como o fim de vida da ferramenta (AMORIM, 2002).

Tabela 1: Critérios de fim de vida de ferramenta recomendados pela norma ISO 3685 (1993)

Critérios de fim de vida da ferramenta de corte	
Desgaste de flanco médio (V_B)	0,3 mm
Desgaste de flanco máximo ($V_{Bmax.}$)	0,6 mm
Profundidade de cratera (KT)	$0,06+0,3.f$
Falha catastrófica	

2.4.4.4 Procedimento experimental – Usinabilidade

O desenvolvimento experimental foi realizado no laboratório de usinagem do departamento de Engenharia de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP (DEF/FEM/UNICAMP) com o apoio da Aço especial. Foram realizados ensaios de torneamento para determinação da usinabilidade com acompanhamento do desgaste de flanco da ferramenta para determinação do fim da vida da ferramenta.

Os corpos de prova para o ensaio de usinabilidade foram preparados respeitando-se a relação comprimento/diâmetro menores do que 10 conforme especificado pela norma ISO 3685 (1993) como pode ser verificado na Tabela 2. Esta condição é importante para a garantia da não ocorrência de vibração durante o ensaio.

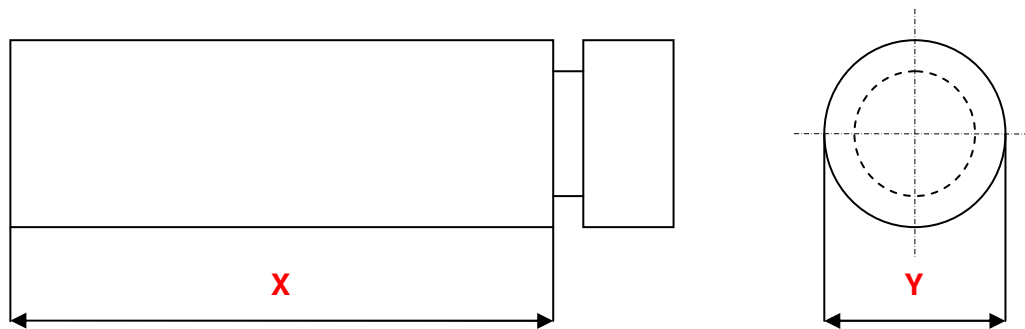


Figura 8: Modelo de corpo de prova utilizado para o ensaio de usinabilidade.

Todos os corpos de prova foram preparados com um canal de alívio após o comprimento a ser usinado, conforme figura 8, para facilitar a saída da ferramenta.

Tabela 2: dimensões dos corpos de prova e relação entre diâmetro e comprimento

Material	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Relação Diâmetro/ comp.(X/Y)
1045	238	78	3,05
1045BTiNS	277	82	3.38
1045BiBNS	277	101	2.74
1045S	278	104	2.67
1045BiS	279	98	2.85
1045AINS	282	92	3.06

Para usinagem dos corpos de prova foi utilizado um torno ROMI galaxy 20, equipado com CNC Fanuc 21i-t, 15kW de potência e rotação máxima igual a 4500rpm conforme Figura 9. Foi utilizada uma ferramenta de corte da marca WELLER, codificação TNMG 160404EN-TMF WM 1500, recomendada para aços em geral (classe ISO P20) conforme Tabela 3.

Tabela 3: Dados referentes à geometria da Ferramenta

Dados da Ferramenta		
	t	4,76
	R	0,4
	I	15,5
	d	9,52



Figura 9: Torno ROMI Galaxy similar ao utilizado nos ensaios de usinabilidade

Fonte: ROMI

Após cada passada, a ferramenta foi avaliada num microscópio estereoscópico óptico e fotografada. A vida da ferramenta foi determinada tendo como critério o desgaste de flanco $V_B = 0,3$ mm, ou próxima desse valor, principalmente quando se temia pela quebra da mesma. Para esse trabalho as condições de usinagem foram definidas conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Condições de usinagem para os ensaios

V_C (m/min.)	f_n (mm)	A_P (mm)
500	0,15	1,0

2.5 TÉCNICAS MICROSCÓPICAS

Alguns elementos estruturais possuem dimensões macroscópicas, isto é, são suficientemente grandes para serem observados a olho nu. Contudo, na maioria dos materiais, os grãos constituintes possuem dimensões microscópicas, com diâmetros que podem ser da ordem de alguns micrometros e seus detalhes devem ser investigados utilizando-se algum tipo de microscópio (CALLISTER, 2006).

Tanto os microscópios óticos como os microscópios eletrônicos e de ponta de prova são comumente utilizados em microscopia. Esses instrumentos auxiliam na investigação das características microestruturais de todos os tipos de materiais. Algumas

dessas técnicas empregam equipamentos fotográficos em conjunto com o microscópio; a fotografia na qual a imagem é registrada é chamada de fotomicrografia (CALLISTER, 2006).

O exame microscópico é uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização dos materiais. Dentre as várias aplicações importantes para os exames microestruturais, podem ser destacadas as seguintes: assegurar que as associações entre as propriedades e a estrutura (e os defeitos) sejam compreendidas da forma apropriada a fim de prever as propriedades dos materiais uma vez que essas relações tenham sido estabelecidas; projetar novas ligas com novas combinações de propriedades; determinar se um material foi ou não tratado termicamente de maneira correta; verificar o modo de uma fratura mecânica (CALLISTER, 2006).

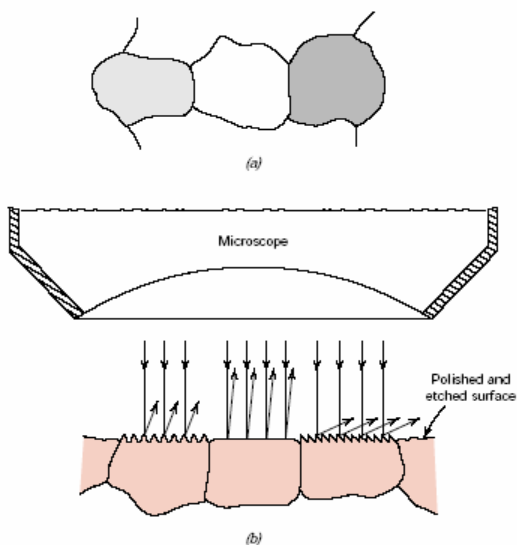
2.5.1 Microscopia óptica e metalografia (materialografia)

Apesar das novas técnicas desenvolvidas, a microscopia óptica ainda hoje é uma das técnicas mais utilizadas na observação, análise e documentação de materiais. A máxima resolução de um moderno microscópio óptico é aproximadamente de 250nm e uma profundidade de campo similar que permite uma boa formação da imagem com aumentos da ordem de 1000 vezes (MONTEIRO, 2009).

A utilização da microscopia ótica na análise de materiais surgiu, praticamente, com o trabalho pioneiro de Sorby (1826 – 1908), tido como precursor da moderna metalografia, quando em 1863, observou pela primeira vez uma estrutura metálica ao microscópio. Desde então, pode-se definir metalografia como o ramo da tecnologia que estuda e interpreta a estrutura interna dos metais e suas ligas, como também a relação entre as suas composições químicas, propriedades físicas e mecânicas. Atualmente, estendemos esta definição para todos os materiais (metálicos, cerâmicos, poliméricos e seus respectivos compósitos) com o nome de “MATERALOGRAFIA” (MONTEIRO, 2009).

Normalmente, preparos de superfícies cuidadosos e meticulosos são necessários para revelar os detalhes importantes da microestrutura. A superfície da amostra deve ser primeiro lixada e polida até atingir um acabamento liso e espelhado. Isso é conseguido utilizando-se papéis e pós-abrasivos sucessivamente mais finos. A microestrutura é revelada mediante a aplicação de um tratamento de superfície que

emprega um reagente químico apropriado em um procedimento conhecido como ataque químico. A reatividade química dos grãos de alguns materiais monofásicos depende da orientação cristalográfica. Consequentemente, em uma amostra policristalina, as características apresentadas após o ataque químico variam de grão para grão (CALLISTER, 2006).

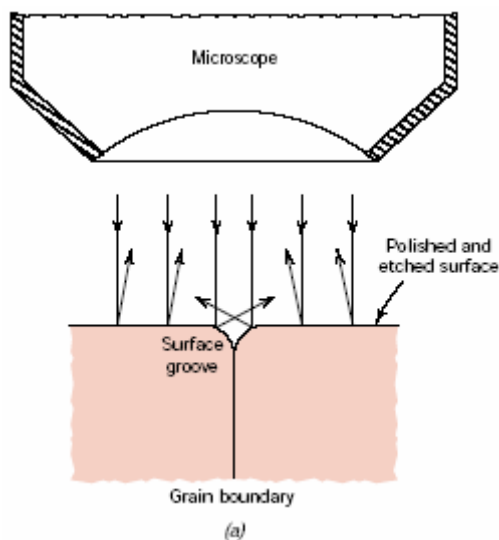


a – Estrutura da superfície da maneira como ela pode parecer quando vista através de um microscópio, o brilho ou textura de cada grão depende de suas propriedades de refletância.

b – Como a luz incide em uma direção perpendicular à superfície do grão é refletida por três grãos diferentes que tiveram suas superfícies submetidas a um ataque químico, onde cada grão possui uma orientação diferente.

Figura 10: Variação de contraste em grãos polidos e atacados devido à diferença de orientação cristalográfica (CALLISTER, 2006).

Pequenos sulcos são formados ao longo dos contornos de grãos como consequência do processo de ataque químico. Uma vez que os átomos ao longo das regiões dos contornos de grão são quimicamente mais reativos, eles se dissolvem em uma velocidade maior do que aqueles localizados no interior dos grãos.



a – Os sulcos se tornam identificáveis quando vistos sob um microscópio, pois refletem a luz em ângulos diferentes daqueles apresentados pelos grãos propriamente ditos.

Figura 11: Variação de contraste em grãos polidos e atacados devido ao contorno de grãos (Fonte: CALLISTER, 2006)

2.5.2 Microscopia Eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura é a técnica de caracterização microestrutural mais versátil hoje disponível, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente engenharia e ciências dos materiais, engenharias metalúrgica e de minas, geociências e ciências biológicas, dentre outros. A interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou o micro volume a ser analisado gera uma série de sinais que podem ser utilizados para caracterizar propriedades da amostra, tais como composição, superfície topográfica, cristalográfica, etc (KAHN, 2009).

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse referem-se usualmente às imagens de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados, ao passo que na microsonda eletrônica o sinal de maior interesse corresponde aos raios X característico, resultante do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos presentes em um microvolume (KAHN, 2009).

A principal razão de sua utilização está associada à alta resolução que pode ser atingida, da ordem de 100Å , e à grande profundidade de foco, da ordem de 300 vezes melhor que a do microscópio óptico, resultando em imagens com aparência tridimensional. São obtidas informações topográficas utilizando-se elétrons de baixa

energia, da ordem de 50 eV. Informações sobre o número atômico ou orientação são obtidas utilizando elétrons de alta energia. Pode-se ainda obter informações sobre domínios em amostras magnéticas ou utilizar os sinais devido à condutividade induzida pelo feixe de elétrons e luz catodoluminescente para a caracterização e análise de falhas de dispositivos semicondutores. Além disso, o MEV possibilita a obtenção de informações químicas da ordem de micrômetros (MONTEIRO, 2009).

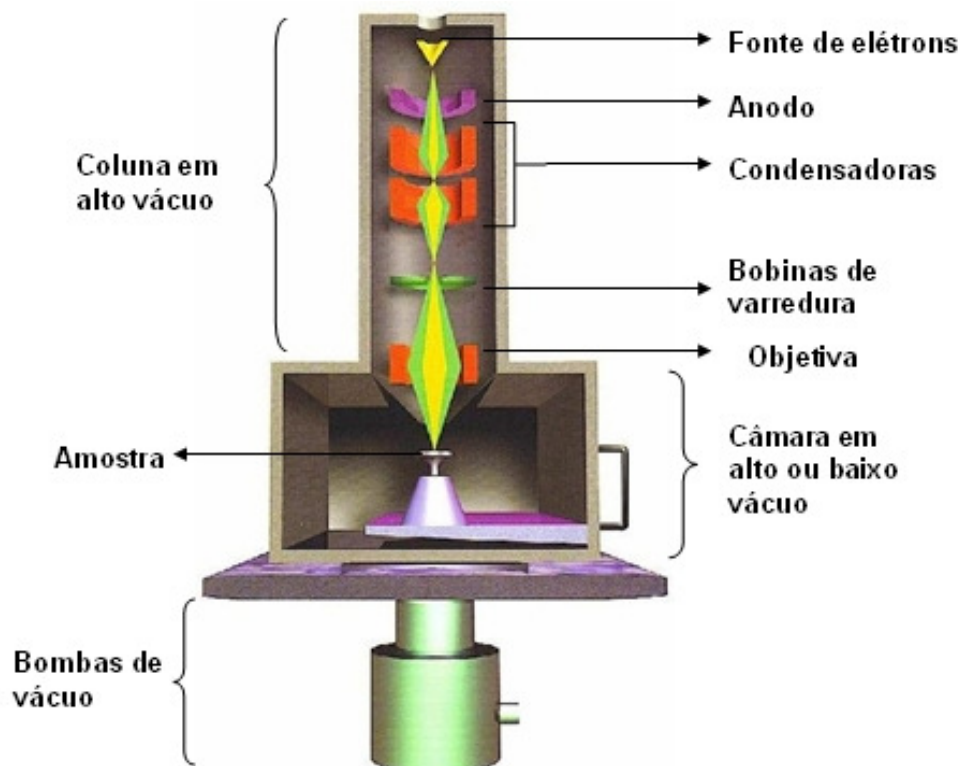


Figura 12: Desenho esquemático da coluna do MEV

2.5.3 Procedimento experimental – Microscopia óptica

Os corpos de prova utilizados para análise microscópica foram cortados em uma cortadeira Laboton-3 e embutidos com baquelite em uma embutidora Teclago EMHP40 conforme a figura 13.



Figura 13: Máquina de corte Labotom-3 Marca Struers e embutidora EMHP40 Marca TECLAGO utilizadas para preparação dos corpos de prova

Posteriormente os corpos de prova foram lixados e polidos em uma Lixadeira LaboPol-2 Marca Struers e polidos em uma politriz Pananbra DP9 Struers conforme figura 14. Após serem polidos os corpos de prova foram atacados com Nital 2%, analisados e fotografados em um Microscópio óptico conforme a figura 15.



Figura 14: Lixadeira LaboPol-2 Marca Struers e politriz Pananbra DP9 Struers utilizada para preparação dos corpos de prova



Figura 15: Microscópio Óptico NIKON Eclipse LV150 utilizado nas análises metalográficas

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISES QUÍMICAS E METALOGRAFICAS

As análises químicas mostram que para todos os lingotes o teor de enxofre ficou abaixo do usual (valor médio de 0,075%), o mesmo também aconteceu com o Bi que apresentou valores abaixo de 0,02%. Para as análises químicas foram utilizadas as seguintes técnicas:

- Espectrofotometria de Absorção atômica , equipamento marca Varian – Modelo AA200
- Espectroscopia de emissão em plasma – ICP , equipamento Marca Varian – MPX CCD - Simultâneos ICP-OES
- Analisador de Carbono e Enxofre , equipamento marca LECO – Modelo CS200

Tabela 5: Análise química das micro adições

ANÁLISES QUÍMICAS						
AMOSTRA	%Mn	%S	%B	%Bi	%Ti	%Al
1045BiBNS	1,024	0,044	0,022	0,014		
1045BTiNS	1,030	0,012	0,022		0,026	
1045BiS	0,778	0,018		0,016		
1045AINS	1,035	0,032				0,061
1045S	0,751	0,039				

Nas cinco micrografias ficam evidenciados os efeitos da adição de liga na microestrutura do aço. Nas Figuras 16,19 e 20 verifica-se uma pequena fração de ferrita distribuída em uma matriz perlítica, fato esse que pode ser associado à adição do alumínio e bismuto. Na ferrita é possível verificar pequenas inclusões, possivelmente sulfeto de manganês formado pela adição do enxofre. As micrografias 17 e 18 possuem uma fração de ferrita mais destacada sendo que a micrografia 18 apresenta maior número de inclusões distribuídas na Ferrita.

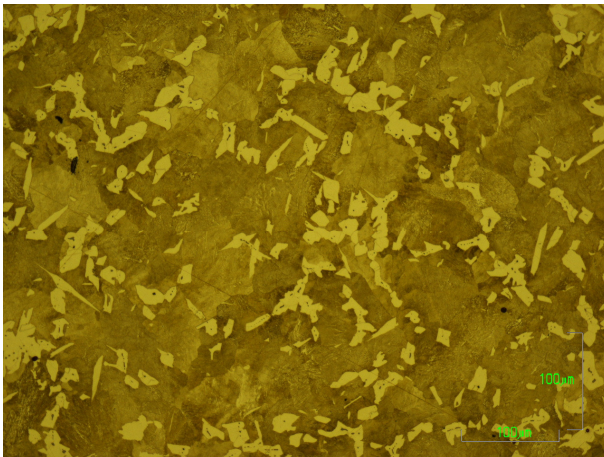


Figura 16: Micrografia óptica do aço 1045AlNS

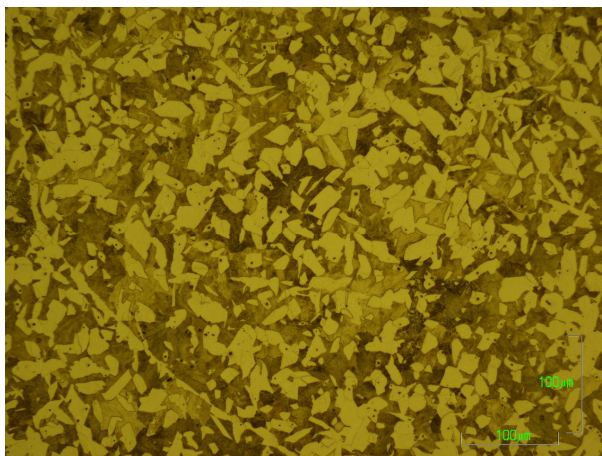
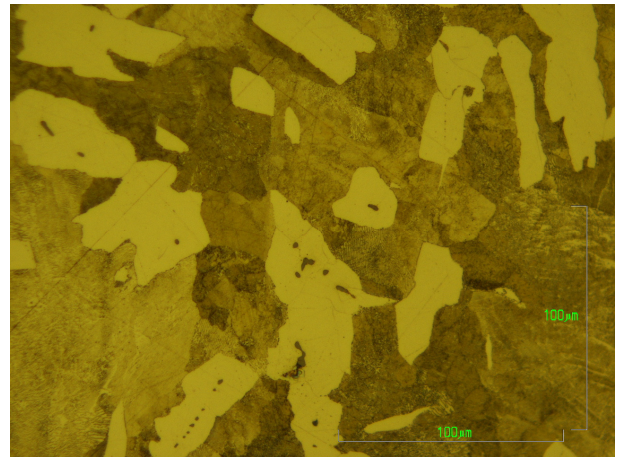
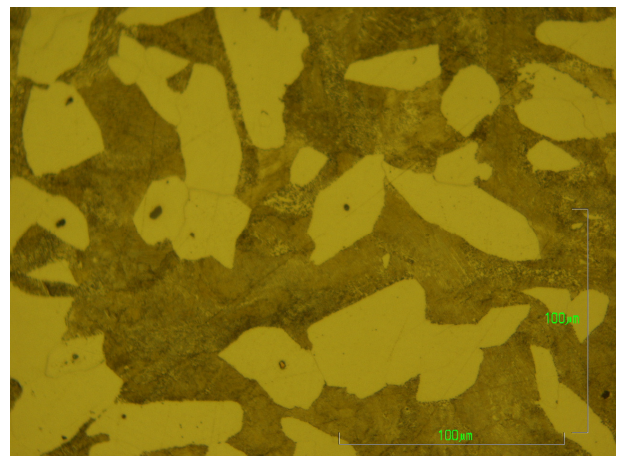


Figura 17: Micrografia óptica do aço 1045BTiNS.



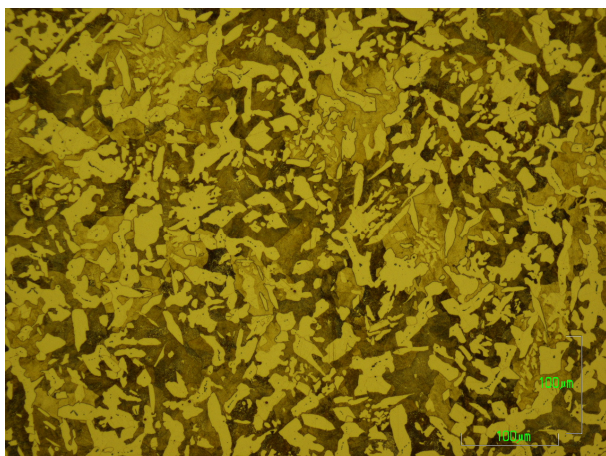


Figura 18: Micrografia óptica do aço 1045S

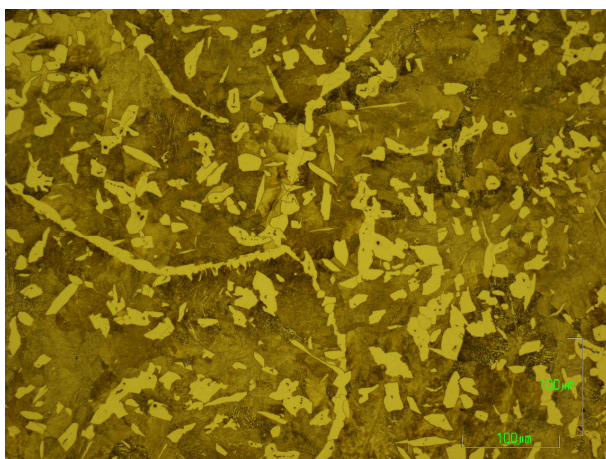
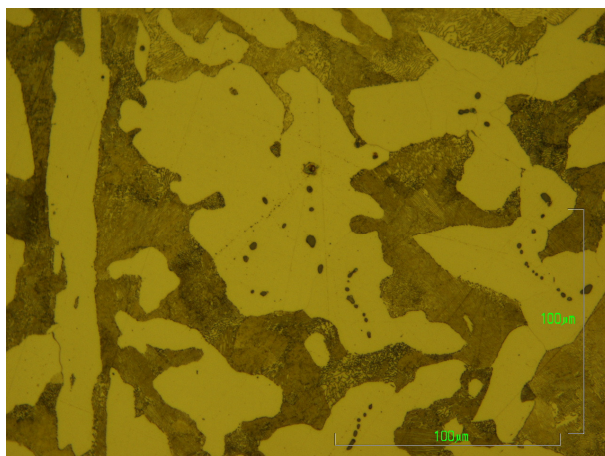


Figura 19: Micrografia óptica do aço 1045BiS

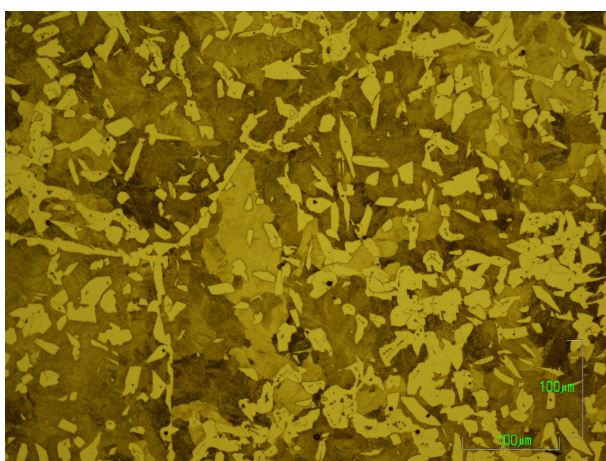
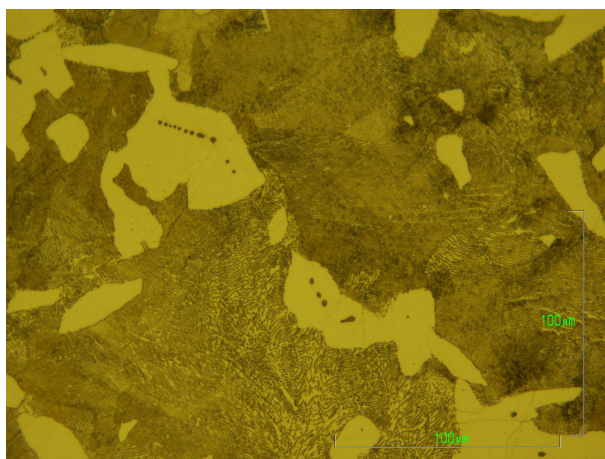
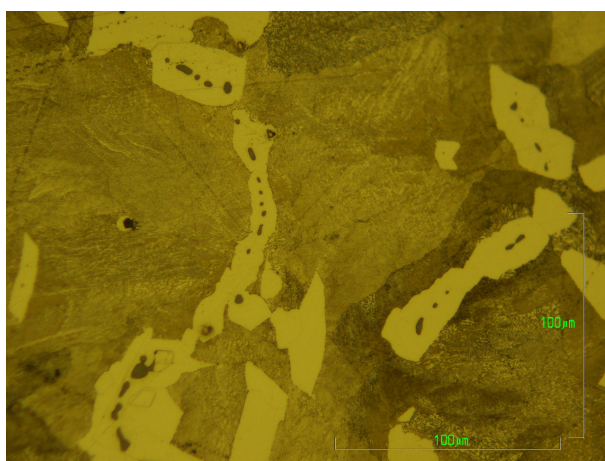


Figura 20: Micrografia óptica do aço 1045BBiNS.



3.2 ENSAIOS MECÂNICOS

3.2.1 ENSAIO DE IMPACTO

Os valores obtidos no ensaio de impacto mostram o resultado da adição dos microligantes na tenacidade do aço. Sendo que em relação ao material 1045, utilizado para fundição dos lingotes, percebe-se um ligeiro aumento nos aços 1045AINS, 1045BiS e 1045BiBNS . Já os aços 1045BTiNS e 1045S tiveram a sua tenacidade aumentada em 108% e 30% respectivamente.

Tabela 6: Resultados dos ensaios de impacto

AMOSTRA	RESULTADOS (J)				MÉDIA (J)	Desvio
1045BiBNS	6	6	7	6	6,25	0,50
1045BTiNS	10	11	14	13	12,00	1,83
1045BiS	6	6	6	6	6,00	0
1045AINS	6	5	6	6	5,75	0,50
1045	5	6	6	6	5,75	0,50
1045S	9	8	6	7	7,50	1,29

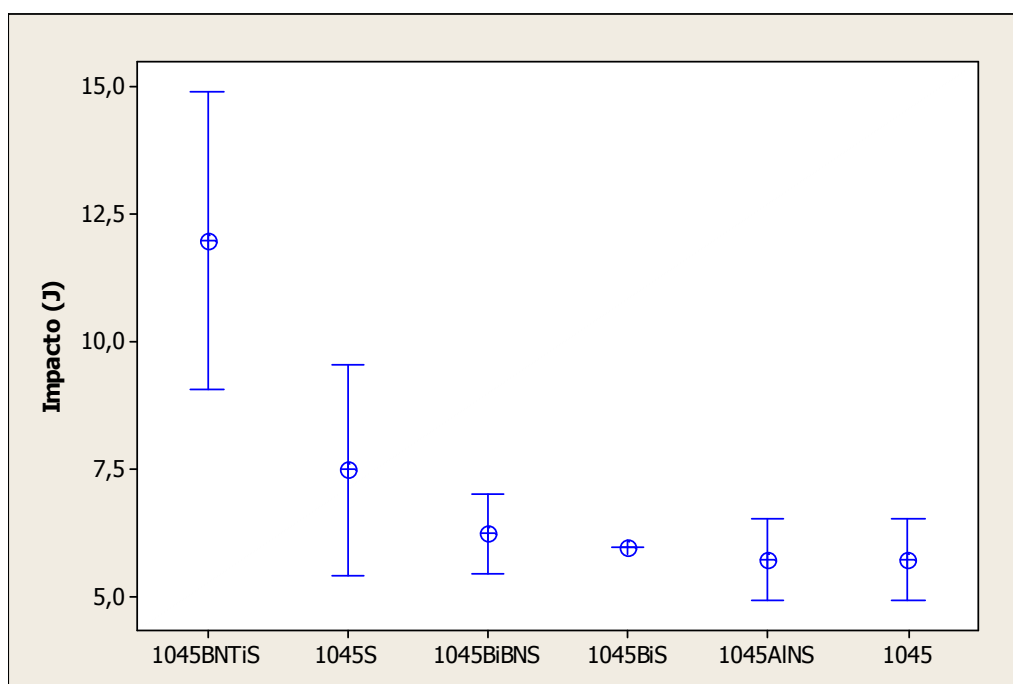


Figura 21: Evolução do resultado do teste de impacto em função do tipo de aço.

3.2.2 RESULTADOS DE DUREZA E ENSAIO DE TRACAO

Com relação ao resultado de Tensão de ruptura, limite de escoamento, alongamento e Redução de Área verifica-se um aumento nos aços 1045AINS e 1045BiBNS, mas esses resultados não são conclusivos já que foi realizada somente uma medida de cada aço devido à falta de material para confecção dos corpos de prova.

Tabela 7 : Resultados dos ensaios Tração

AMOSTRA	TENSÃO DE RUPTURA (Rm) (N/mm ²)	ESCOAMENTO (Re) N/mm ²	ALONGAMENTO (%)	REDUÇÃO ÁREA (%)
1045BiBNS	619,7	382,2	5,9	5,2
1045BTiNS	608,2	335,2	11,3	10,7
1045BiS	614,9	326,3	7,6	7,5
1045AINS	660,5	392,8	7,5	8,5
1045	663,8	319,1	8,7	7,6
1045S	568,5	293,2	12,3	12,3

A Tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de dureza, onde percebe-se uma queda em relação ao aço 1045 nos aços 1045BiBNS; 1045BTiNS e 1045BiS abaixo de 10%. O aço 1045S apresentou uma queda de 19% na media e o aço 1045AINS apresentou um aumento na dureza de 2%.

Tabela 8: Resultados dos ensaios de Dureza (HB)

AMOSTRA	RESULTADOS (HB)				MÉDIA (HB)	Desvio
1045BiBNS	197	197	197	197	197,00	0
1045BTiNS	197	197	187	187	192,00	5,77
1045BiS	197	197	197	197	197,00	0
1045AINS	207	207	217	217	212,00	5,77
1045	207	206	207	206	206,50	0,57
1045S	170	170	163	170	168,25	3,50

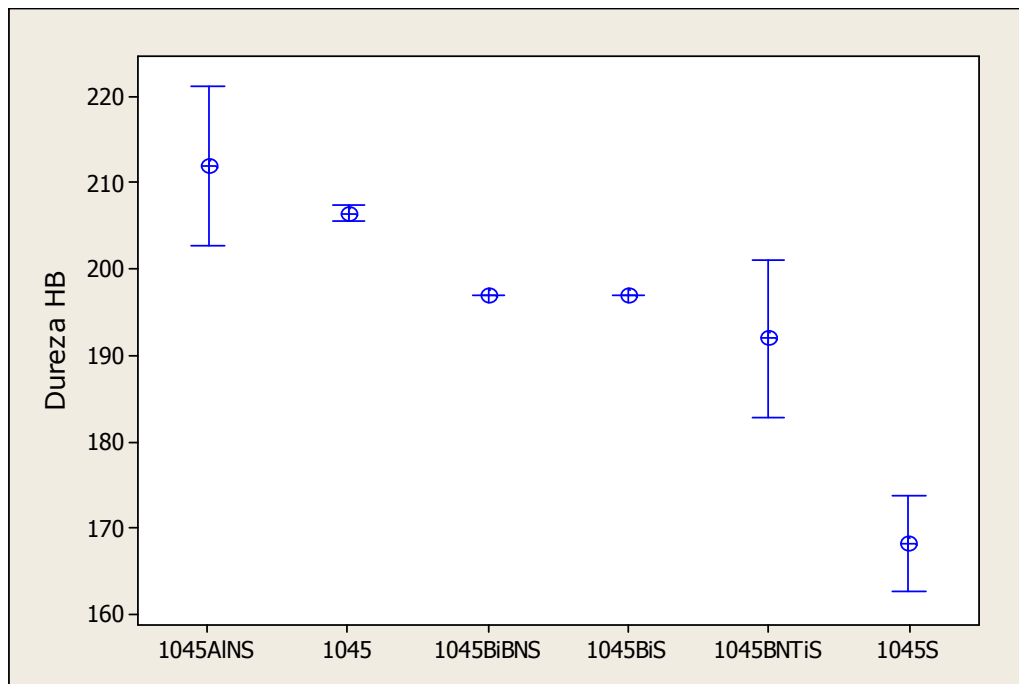


Figura 22: Evolução do resultado do teste de Dureza HB em função do tipo de aço.

3.3 ENSAIOS DE USINABILIDADE

Os resultados apresentados de vida da ferramenta e volume de material retirado podem ser observados na Tabela 9, que gerou as figuras 23 e 24. Analisando-se a Tabela 9 as figuras 23 e 24, nota-se que a vida em tempo e a em volume de material removido são proporcionais, nesse caso porque a velocidade de corte utilizada foi à mesma em todos os ensaios.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de usinabilidade

Material	1045BiBNS	1045AlNS	1045	1045S	1045BiS	1045BTiNS
Vida (min)	23,5	11,2	8	5,8	5	4,5
%	293,75	140	100	72,5	62,5	56,25

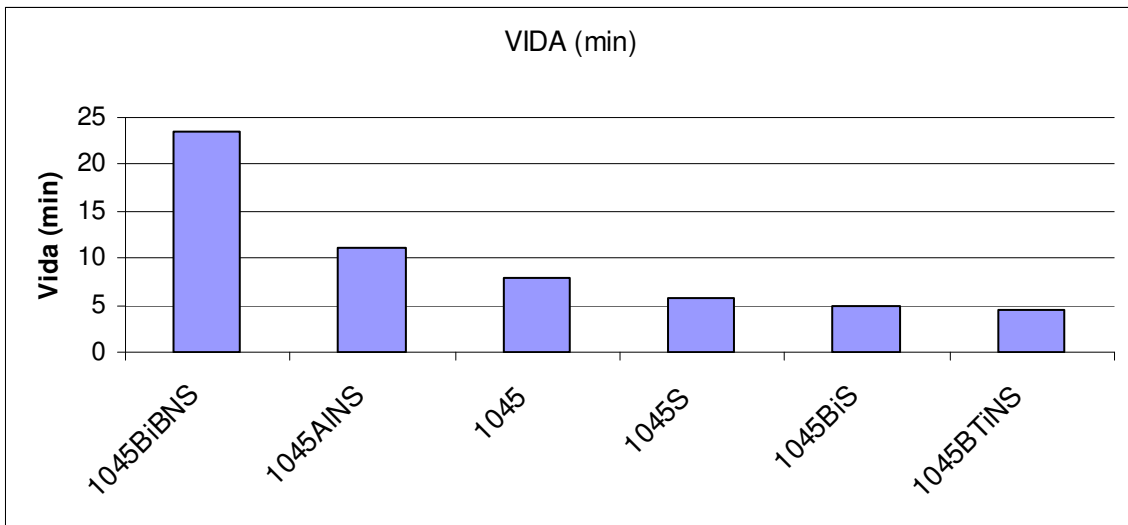


Figura 23: Tempo de vida da ferramenta de cada aço

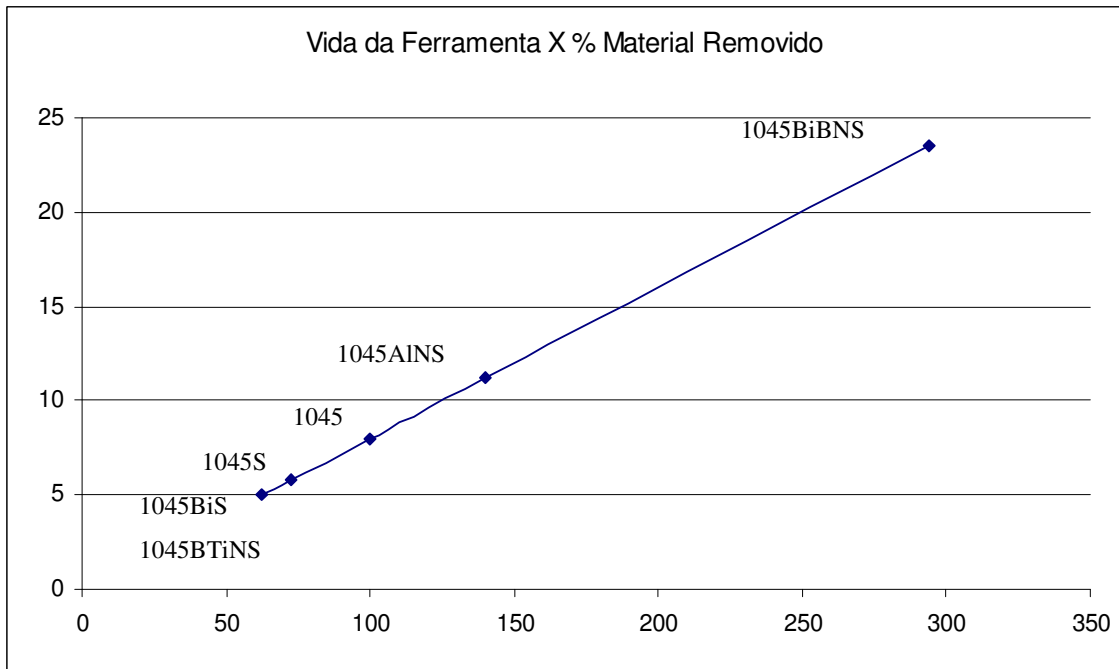


Figura 24: Vida da ferramenta em função do volume de material removido

A figura 25 mostra o desgaste da ferramenta em função do número de passes aplicados em cada material durante o ensaio de usinabilidade. Nesse gráfico nota-se o desgaste prematuro da ferramenta nos aços 1045S;1045BiS e 1045BTiNS e o aumento do desempenho da ferramenta nos aços 1045AINS e 1045BiBNS.

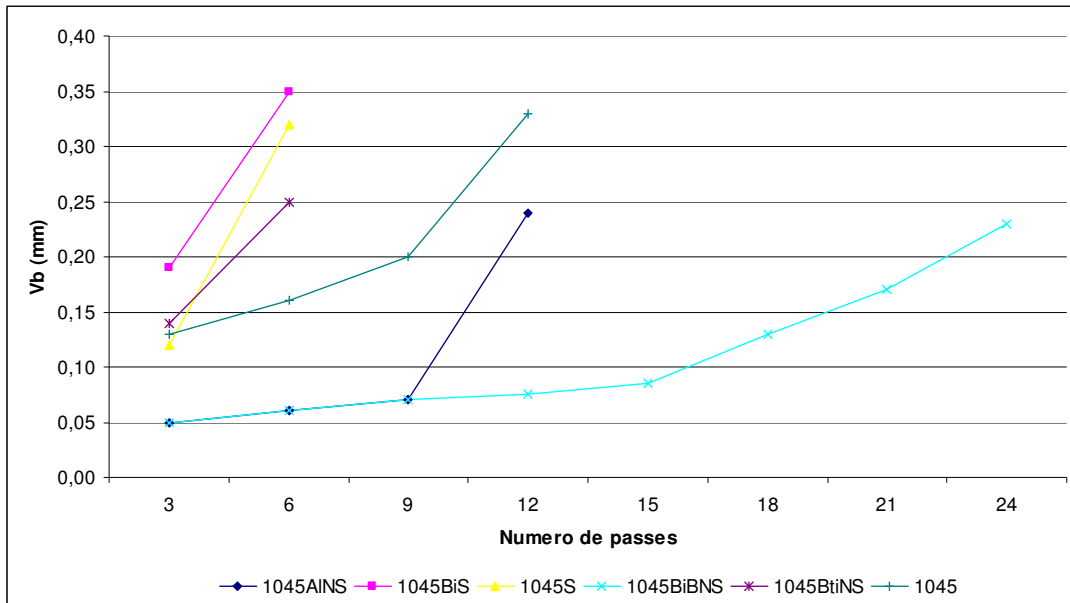
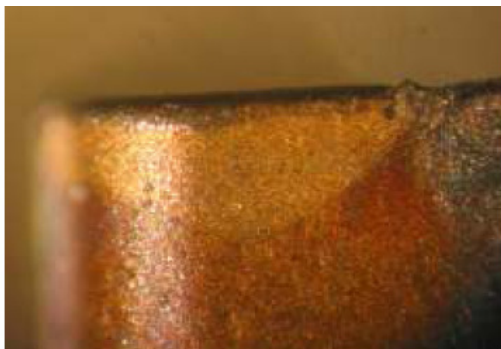


Figura 25: Desgaste de flanco em função do número de passes para cada material ensaiado

A seguir são apresentadas as imagens dos desgastes das ferramentas. Foram registradas imagens da superfície de folga principal e de saída da ferramenta a cada 3 passadas, aproximadamente 3 minutos de corte.



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 26: Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045AINS



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 27: Evolução do desgaste da ferramenta após 6 passes no material 1045A1NS



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 28: Evolução do desgaste da ferramenta após 9 passes no material 1045A1NS



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 29: Evolução do desgaste da ferramenta após 12 passes no material 1045A1NS

Observando as figuras de 26 a 29 referentes ao material 1045A1NS, nota-se o desgaste na superfície de folga inicialmente de entalhe, com progressão de desgaste de flanco em pontos localizados. Além disso, a superfície de saída permaneceu íntegra até

seis passadas, posteriormente apresentando sinais de adesão de material e desgaste de cratera. O desgaste de entalhe é visível também na superfície de saída.

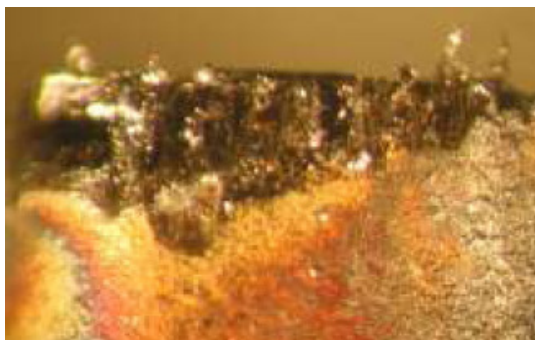


Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 30: Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045BiS



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 31: Evolução do desgaste da ferramenta após 4,5 passes no material 1045BiS

Observando-se as figuras 30 e 31, referentes ao material 1045BiS, nota-se que o desgaste da ferramenta, ocorrido na usinagem do material verde foi bem mais agressivo, danificando o revestimento logo nas primeiras passadas. Isso justifica a vida mais curta da ferramenta. Observa-se também bastante material aderido, principalmente na superfície de saída da ferramenta.



Superfície de folga

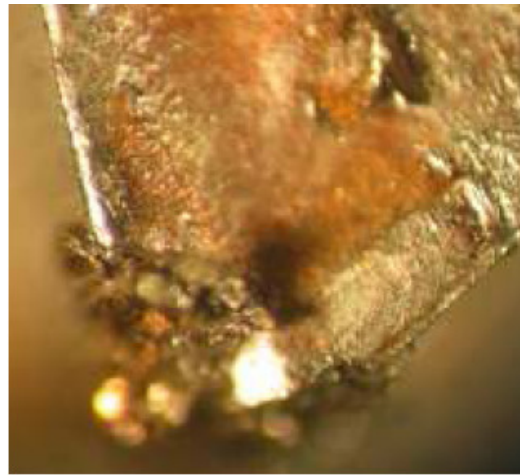


Superfície de saída

Figura 32: Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045S



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 33: Evolução do desgaste da ferramenta após 5 passes no material 1045S

Observando-se as figuras 32 e 33, referentes ao material 1045S, nota-se que em 5 passadas o material cinza propiciou o colapso da ponta da ferramenta, com muito material aderido e deformação plástica. Isso é indicador de condições de trabalho muito pesadas para a ferramenta.



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 34: Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045BiBNS



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 35: Evolução do desgaste da ferramenta após 12 passes no material 1045BiBNS



Superfície de folga

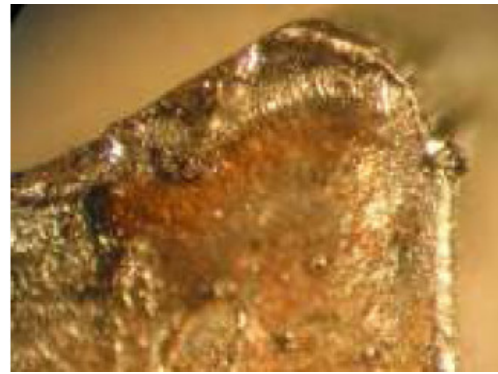


Superfície de saída

Figura 36: Evolução do desgaste da ferramenta após 21 passes no material 1045BiBNS



Superfície de folga

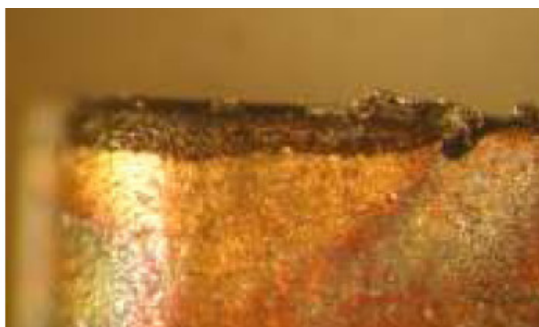


Superfície de saída

Figura 37: Evolução do desgaste da ferramenta após 27 passes no material 1045BiBNS

As figuras 34 a 37 mostram a evolução do desgaste da ferramenta devido a usinagem do material 1045BiBNS, que apresentou o melhor desempenho. Para melhor visualização são mostrados apenas 4 instantes.

Nota-se que inicialmente o desgaste abrasivo se dá de forma quase imperceptível. Surge um desgaste de entalhe, provavelmente devido à alta temperatura de corte, que favorece a oxidação, mas esse desgaste não é o que determina o final de vida da ferramenta. Observando a figura 25, percebe-se que a taxa de desgaste se eleva de forma bastante acentuada a partir do 15ª passe a ponto de danificar o raio da ponta da ferramenta. Há indícios de que esse material é menos agressivo ao revestimento da ferramenta, porém, uma vez removido esse revestimento o substrato suporta pouco a usinagem.

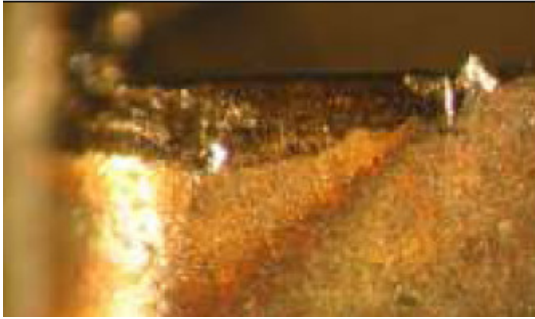


Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 38: Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045BTiNS



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 39: Evolução do desgaste da ferramenta após 4,5 passes no material 1045BTiNS

Observando-se as figuras 38 e 39 nota-se que o material 1045BTiNS provocou uma abrasão mais severa que os demais materiais. A ponta da ferramenta apresentou-se mais íntegra ao final da vida na usinagem desse material, mas a quantidade de material aderida à superfície da saída foi bastante significativa, podendo ser apontada inclusive como um dos fatores que determinou o final da vida da ferramenta.

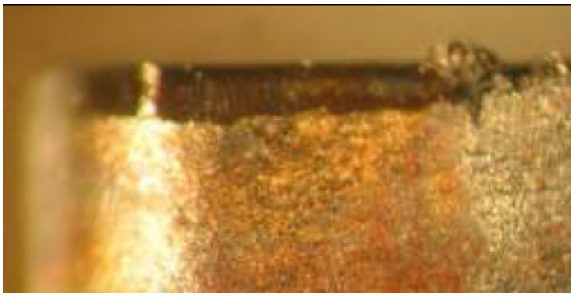


Superfície de folga

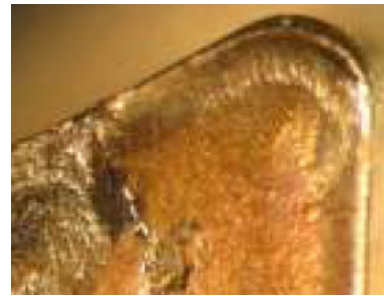


Superfície de saída

Figura 40: Evolução do desgaste da ferramenta após 3 passes no material 1045

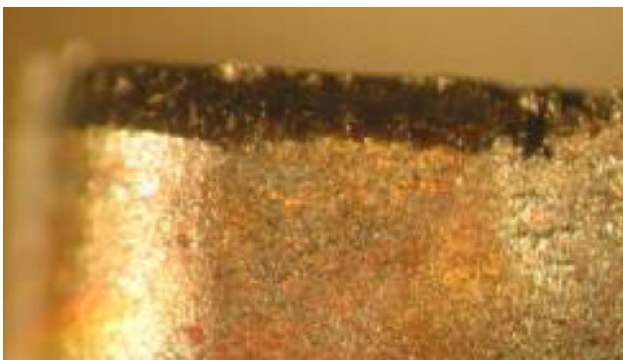


Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 41: Evolução do desgaste da ferramenta após 6 passes no material 1045

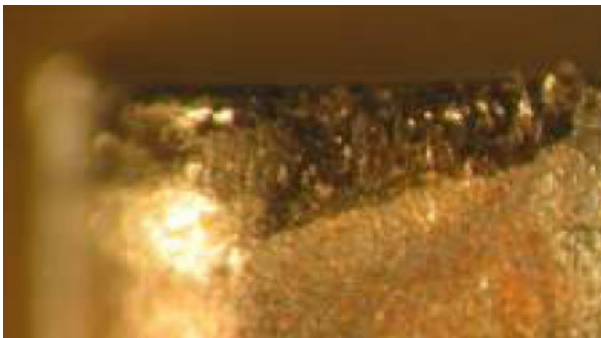


Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 42: Evolução do desgaste da ferramenta após 9 passes no material 1045



Superfície de folga



Superfície de saída

Figura 43: Evolução do desgaste da ferramenta após 11,5 passes no material 1045

O aço 1045, novamente gerou desgaste frontal abrasivo bastante delineado. Surgiram indícios de material aderido tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga. O desgaste foi gradativo e, aparentemente, o revestimento foi removido logo no início do ensaio. Isso pode ser observado no detalhe da superfície de folga da figura 43, pela coloração diferente que aparece na imagem, na região do desgaste de flanco.

Foram realizadas algumas análises EDS com microscópio eletrônico de varredura (MEV) a fim de se verificar a presença de Bismuto no material e na superfície de folga da ferramenta utilizada para usinar o corpo de prova do aço 1045BiBNS.

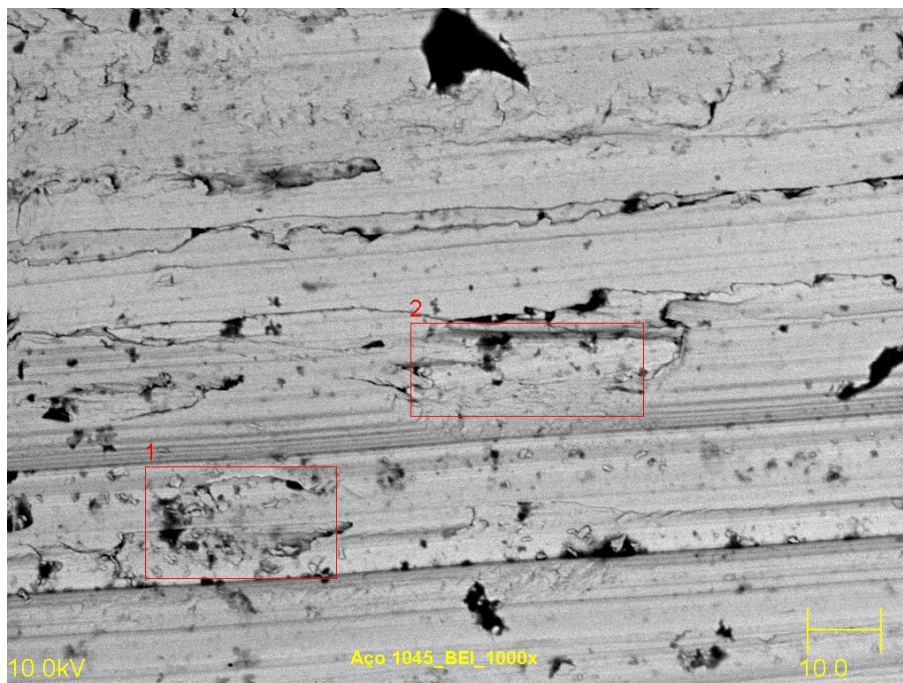


Figura 44: Micrografia eletrônica (MEV) de uma amostra do aço 1045BBiNS.

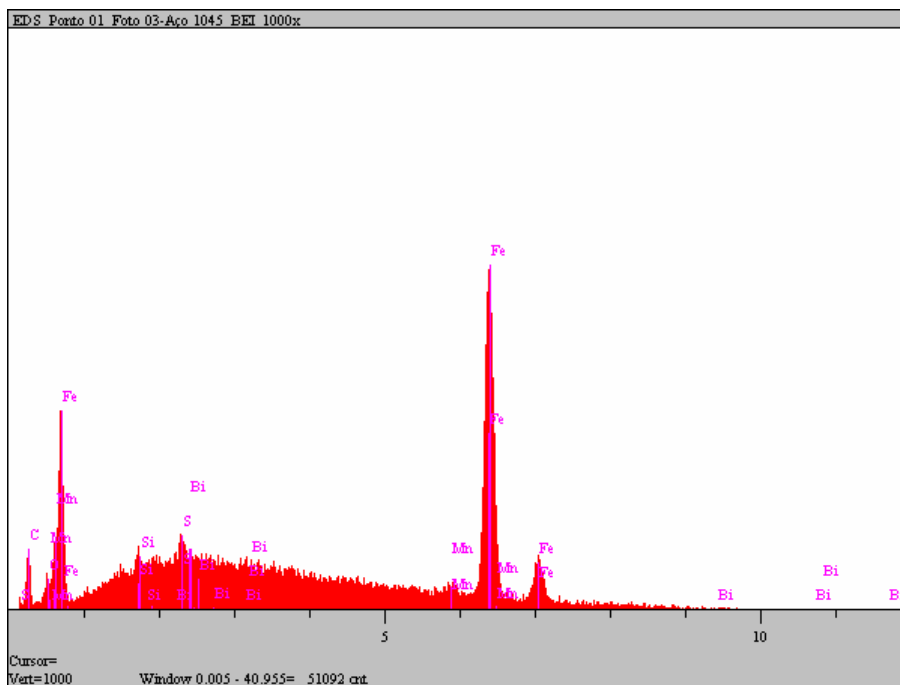


Figura 45: Espectro de EDS realizado no ponto 1 da Figura 44 onde é possível identificar traços de Bismuto no aço 1045BBiNS.

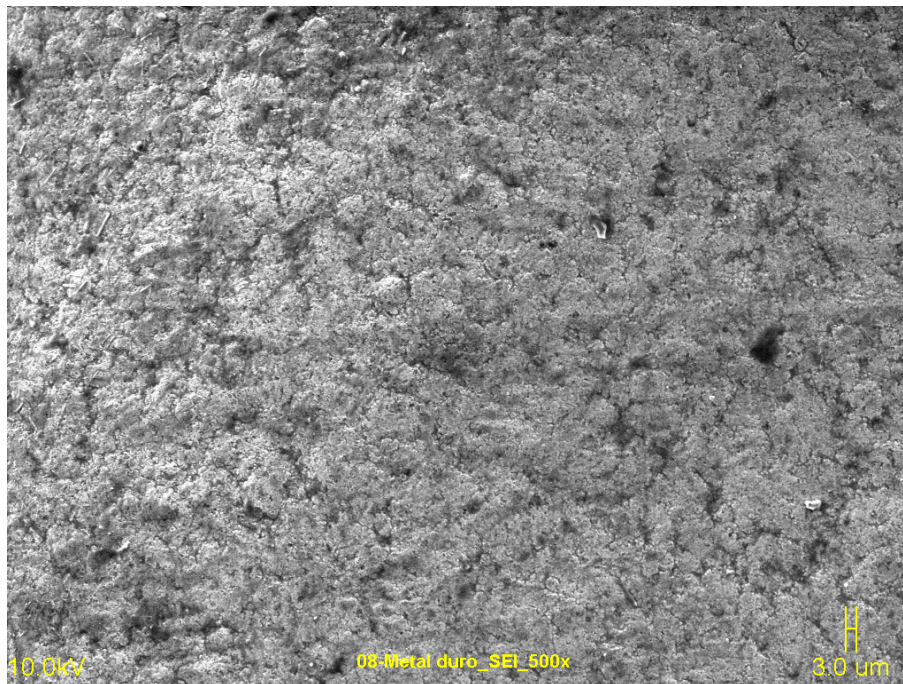


Figura 46: Micrografia eletrônica (MEV) da superfície da pastilha de metal duro utilizada para o ensaio de usinabilidade do aço 1045BBiNS em região que não teve contato com o material.

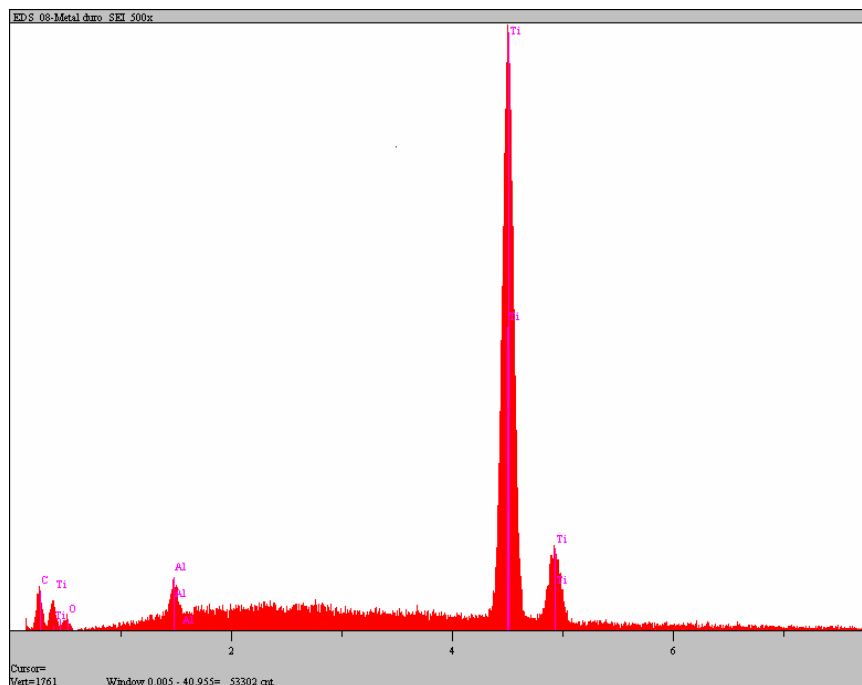


Figura 47: Espectro de EDS realizado na ferramenta na região onde foi feita a imagem da Figura 46, na qual fica clara a ausência de Bismuto na composição do revestimento da pastilha de metal duro.

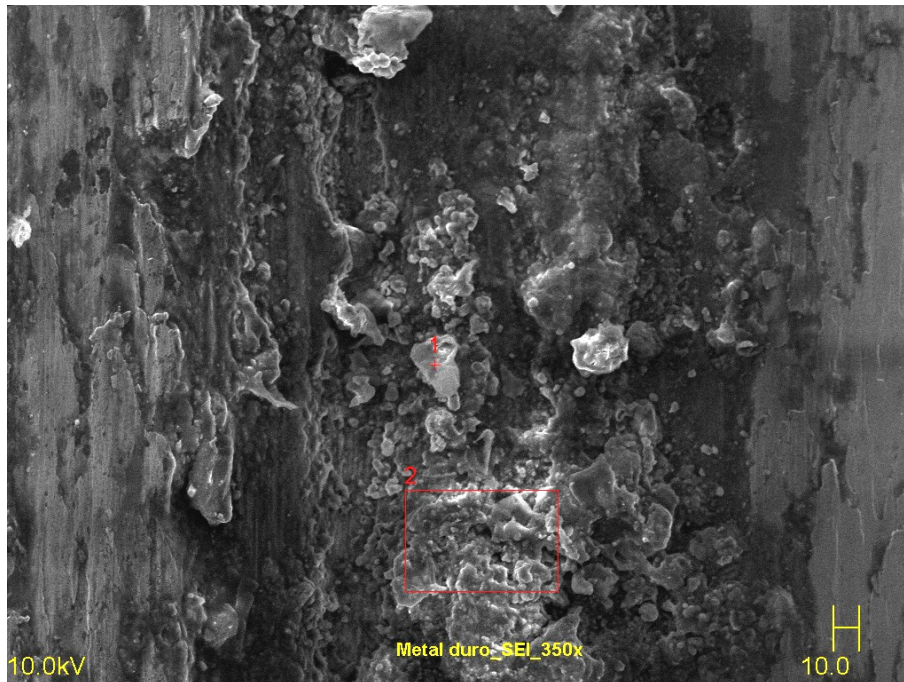


Figura 48: Micrografia eletrônica (MEV) da pastilha de metal duro utilizada para o ensaio de usinabilidade do aço 1045BBiNS.

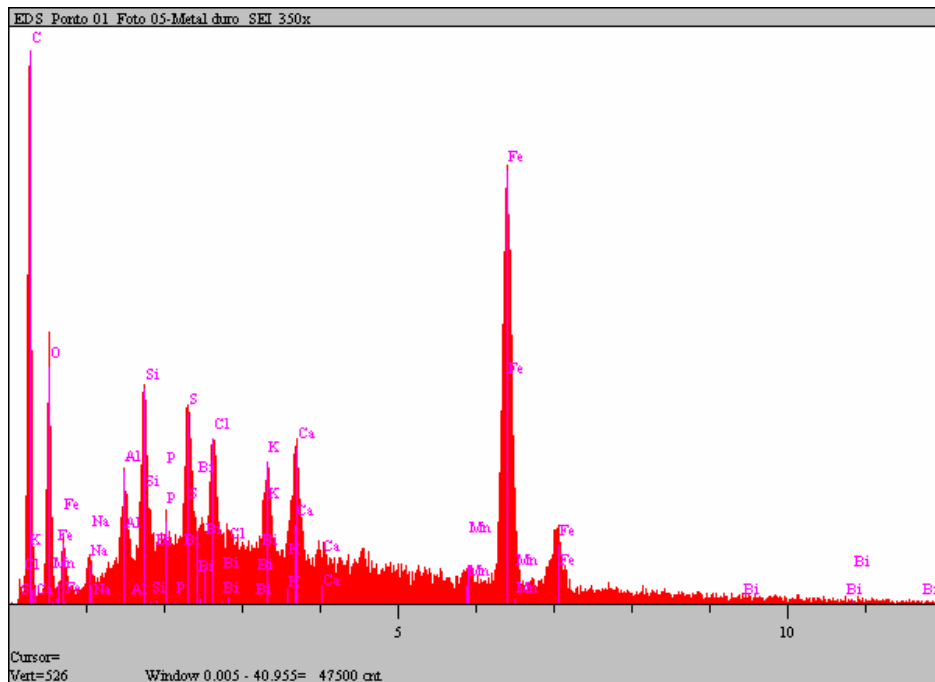


Figura 49: Espectro de EDS realizado no ponto 1 da Figura 48 onde é possível identificar traços de Bismuto no aço 1045BBiNS na superfície de folga da ferramenta de corte utilizada para o ensaio de usinabilidade.

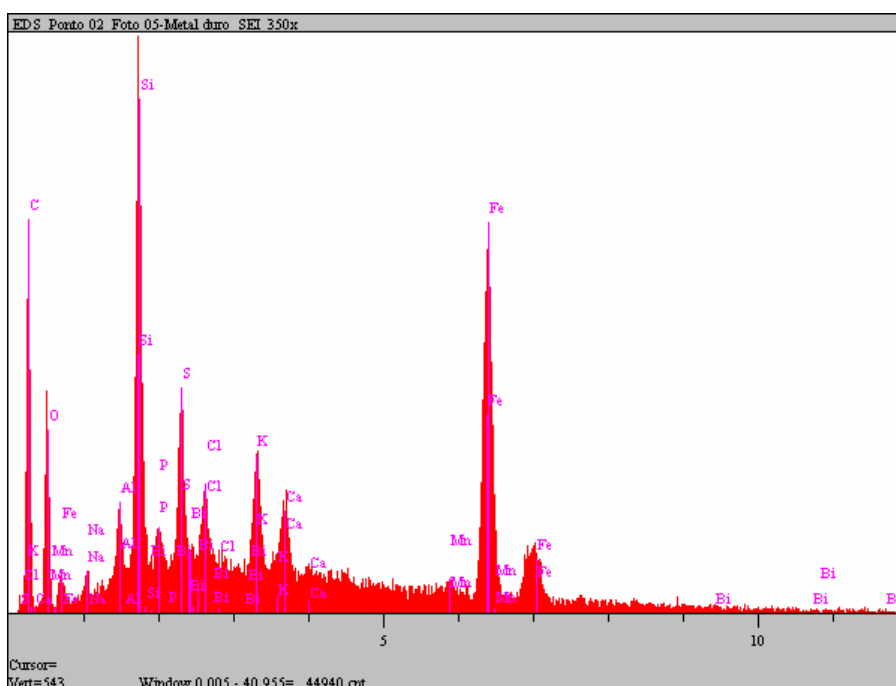


Figura 50: Espectro de EDS realizado no ponto 1 da Figura 48 onde é possível identificar traços de bismuto no aço 1045BBiNS na superfície de folga da ferramenta de corte utilizada para o ensaio de usinabilidade.

3.4. DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS

O aço 1045AINS apresentou o mesmo resultado com relação ao ensaio Charpy ao aço 1045. Os valores de redução de área no ensaio de tração mostram um aumento na ductilidade do material. Já no ensaio de usinabilidade este material apresentou uma melhora de 140% no volume de material removido em relação ao aço 1045. Provavelmente o bom resultado obtido no ensaio de usinabilidade foi decorrente do alto índice de dureza do material, o que evita a formação da aresta postiça de corte durante o processo de usinagem. Observando as Figuras 26, 27, 28 e 29 verifica-se que o desgaste da ferramenta durante a usinagem foi gradual e o revestimento não foi severamente agredido pelo processo, o que indica uma possível ação do sulfeto de manganês formado pela adição do enxofre.

O aço 1045BTiNS apresentou uma melhora de 108% no ensaio Charpy, 9% no limite de resistência a tração, e um aumento de aproximadamente 30% no alongamento e redução de área em relação ao 1045. Estes valores mostram que, diferentemente do aço 1045AINS, houve um aumento da Tenacidade do material que pode ser explicado

pela granulação mais fina da microestrutura apresentada. No ensaio de usinabilidade este aço apresentou uma queda de 44 % no volume de material removido até o fim da vida da ferramenta, este valor se explica pela formação de inclusões abrasivas devido à presença do titânio.

O aço 1045S apresentou uma redução na vida da ferramenta de 37,5% em relação ao aço 1045, possivelmente este resultado está relacionado à queda nos valores de dureza em relação aos valores encontrados no aço 1045. A microestrutura apresentada é de granulação mais fina, muito próxima do aço com alumínio resultando em maior ductilidade o que pode ter gerado aresta postiça de corte e conseqüentemente a redução da vida da ferramenta.

O aço 1045BiS apresentou resultados de usinabilidade muito próximos aos apresentados pelo aço 1045 com adição apenas de enxofre. Este lingote também apresentou teores muito de enxofre e bismuto abaixo do esperado e por esse motivo os resultados de usinabilidade foram prejudicados.

O aço 1045BBiNS foi o que apresentou propriedades mais próximas do objetivo do trabalho. A usinabilidade melhorou significativamente, a retirada de material em volume foi aumentada em 294% sem muita perda das características mecânicas. O material apresenta microestrutura com grãos de perlita e ferrita bem distribuídos, nas Figuras 34, 35, 36 e 37 é quase impossível notar o desgaste abrasivo da ferramenta.

Devido a quantidade reduzida de bismuto adicionado ao aço 1045BBiNS não foi possível quantificar este elemento através da microanálise eletrônica (EDS) nas inclusões deste aço, mas é possível verificar na microanálise por EDS (figura 45) do ponto 1 da Figura 44 a presença de Bi no espectro gerado, o que indica a presença deste elemento nestas regiões do aço. Junto com o bismuto também aparecem manganês e enxofre, o que mostra a possibilidade do bismuto estar concentrado ao redor das inclusões de sulfeto de manganês, mesmo comportamento associado ao chumbo conforme citam Luiz *et. al.* na apresentação *Tecnologias de Melhoria da Usinabilidade Dos Aços – Uma Revisão*, feita no ano de 2003.

Comparando o espectro da microanálise eletrônica por EDS da superfície de uma pastilha ainda não utilizada de metal duro (Figura 47) com o espectro da microanálise EDS da pastilha de metal duro depois do ensaio (figuras 49 e 50) é

possível verificar que após a usinagem o bismuto aparece como resíduo na superfície da ferramenta. Embora a microanálise seja qualitativa, pode-se afirmar que o bismuto realmente atuou como lubrificante durante a usinagem do material, conforme citam Trent e Wright.

Esses resultados dão uma indicação de que o aço 1045BiBNS pode substituir o aço 1045 com adição de chumbo, visando o aumento da usinabilidade destes aços.

4 CONCLUSÕES

- A adição do bismuto isolado em baixas quantidades não impacta no aumento de usinabilidade do aço 1045. Porém o bismuto associado ao boro, nitrogênio e enxofre em poucas quantidades traz resultados significativos de usinabilidade.
- A adição de titânio no aço 1045 aumenta significativamente a tenacidade do aço 1045.
- O aço 1045AINS apresentou o segundo melhor desempenho no ensaio de usinabilidade (aumento de 50%), mantendo as mesmas características mecânicas do aço 1045.
- O alumínio ou o bismuto podem substituir o chumbo como microligante utilizado para aumento da usinabilidade do aço 1045.

5 BIBLIOGRAFIA

AMORIM, Heraldo José de. *Estudo da Relação entre Velocidade de corte, Desgaste da Ferramenta, Rugosidade e Forças de usinagem em torneamento com ferramentas de metal duro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002

BAPTISTA, André Luis de Brito. *Aspectos metalúrgicos na avaliação da Usinabilidade de aços*. Revista Escola de Minas, ISSN 0370-4467, 2002.

CALLISTER, Willian D.. *Fundamentos da ciência e engenharia de materiais*. Brasil, LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2006.

CHAUS, Alexander S.. *Application of Bismuth for Solidification Structure Refinement and Properties Enhancement in As-cast High-Speed Steels*. ISIJ International, Vol. 45 2005.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. *Tecnologia da usinagem dos materiais*, São Paulo: Art Liber Editora, 2000.

IMAI, Tatsuya; KATAYAMA, Sakae. *Effect of tool Materials on Surface Machined Roughness and Cutting Force of Low Carbon Resulfurized Free-Machining Steel*, ISIJ International, Vol. 30, N° 4, pp. 331 – 337, 1990.

KLUIZJO, Luis Augusto Colembergue; SOARES, Rodrigo Belloc. *Aços de usinabilidade melhorada CORFAC® na GERDAU Açominas S.A Aços Finos PIRATINI*,

LUIZ, Nelis Evangelista; GALVANINI, Lucas de Toledo Barros; MACHADO, Alisson Rocha. *Tecnologias de Melhoria da Usinabilidade Dos Aços – Uma Revisão*, 9° Colóquio de Usinagem, LEPU/FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

MESQUITA, Rafael Agnelli; BARBOSA, Celso Antonio; *Aços com propriedades melhoradas para produção de moldes*. Revista Metal Mecânica, pp. 70-86, 2005.

OJEBUBOH, Funsho K., *Bismuth-Production, Properties and Applications*. Review of Extractive Metallurgy, 1992.

OIKAWA, Katsunari; OHTANI, Hiroshi; ISHIDA, Kiyohito; NISHIZAWA, Taiji; *The control of the morphology of MsN Inclusions in Steel during Solidification*. ISIJ International, Vol. 35 N° 4, pp 402-408, 1995.

PIMENTEL, Marcelo F.; PRADO, Edson Leme do; MIYADA, Kioshi; *Avaliação da usinabilidade dos aços de corte fácil através da elaboração das curvas de usinabilidade (curvas de TAYLOR) com o uso de ferramentas de aço rápido*. 59° congresso anual da ABM, 2004.

ROSA, Alessandra Bernardis. *Comparação da Performance de fresas de topo de metal duro e Coronite no Fresamento do aço 1045*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), PPGEM, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

SALDARRIAGA, Pablo Alejandro Correa, *Estudo dos campos de tensão gerados por inclusões durante o processo de torneamento em aços ABNT 1045 utilizando o método de elementos finitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), EPUSP, Universidade de São Paulo, 2008.

SOUZA, Sergio Augusto de. *Composição Química Dos Aços*. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1989

SUBRAMANIAN, S. V.; GEKONDE, H. O.; ZHANG, X.; GAO, J. *Design of steels for high speed machining*. Ironmaking and Steelmaking, Vol. 26, N° 5, 1999.

TRENT, M. C, WRIGHT, P. K.. *Metal Cutting Principles* – 4th edition, Butterworth – Heinemann, USA, 2000.

WANG X. M., HE X.L., *Effect of Boron Addition on Structure and Properties of Low Carbon Bainitic Steels*. ISIJ International, Vol. 42, 2002

WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; SCHROETER, Rolf Bertrand. *Tecnologia de usinagem do Alumínio e Suas Ligas*. Alcan Alumínio do Brasil S. A., 1990.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)