

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

Estudo da Influência do Bismuto Sobre a Usinabilidade de Aços DIN-
20MnCr5

GRAZIELA CESTARIDA SILVA GRANDO
Engenheira Química

Dissertação para obtenção de título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre - RS

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

Estudo da Influência do Bismuto Sobre a Usinabilidade de Aços DIN-
20MnCr5

GRAZIELA CESTARIDA SILVA GRANDO
Engenheira Química

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre - RS

2012

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Dr. Luis Augusto Colebergue Klujszo, Gerdau

Dr. Márcio Levi Kramer de Macedo, DEMET - UFRGS

Dr. Toni Roger Lima, DEMET - UFRGS

Prof. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Porto Alegre, Março de 2012.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à GERDAU, pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento pessoal e profissional. Aos colegas da Gerdau pelo companheirismo e pela ajuda prestada sempre que necessário, em especial às equipes da Aciaria, Laboratório Químico e Metalúrgico. Aos colegas Jair Leopoldo Janoski e Eng. Marcos Vinícius Garcia Neves, especialistas em suas atividades.

Agradeço à Leila pelo apoio na realização do trabalho e auxílio na interpretação de alguns resultados e ao professor Afonso Reguly pelo conhecimento e orientação recebida durante o trabalho.

Agradeço à minha família, por todo apoio psicológico, carinho e compreensão durante os dois anos de duração das aulas e elaboração deste projeto, em especial à minha mãe, por toda força e motivação. E aos amigos e amigas que compartilharam os bons momentos e os mais difíceis e tornaram essa jornada menos difícil, mais alegre e divertida.

Obrigado a todos pelo apoio.

RESUMO

Este estudo busca avaliar a influência do elemento bismuto na usinabilidade do aço DIN-20MnCr5. Para isso utilizou-se três aços desta qualidade com diferentes concentrações de bismuto (sem Bi, 0,026% Bi e 0,046% Bi). Um quarto aço contendo 0,016% de bismuto foi utilizado em ensaio de campo. Algumas propriedades mecânicas foram testadas a fim de verificar possíveis alterações decorrentes da adição do bismuto. Este estudo foi feito com barras redondas laminadas de bitola 73,03 mm. Com o objetivo de minimizar efeitos do histórico termo-mecânico do material, os aços foram submetidos a um tratamento térmico de normalização anteriormente aos testes. Para a avaliação do desempenho dos três materiais testados quanto à usinabilidade, utilizou-se o método comparativo direto. A caracterização metalúrgica dos materiais estudados envolveu análise da composição química, microestrutura e inclusões. Para a verificação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de dureza, impacto Charpy, resistência à tração e ductilidade a quente. A usinabilidade foi avaliada pela forma do cavaco, através da operação de torneamento cilíndrico e desgaste de flanco através da operação de furação, todos os ensaios conduzidos sem a utilização de fluido de corte. Os resultados obtidos mostram uma influencia significativa do bismuto sobre a usinabilidade do material estudado, com considerável evolução no desempenho do aço com 0,026% e 0,046% de bismuto. Quanto às propriedades mecânicas, não foram verificadas diferenças significativas entre os três diferentes materiais à exceção da ductilidade a quente que se mostrou prejudicada em função da adição de bismuto. O ensaio de campo consistiu no acompanhamento do desempenho do material no processo de fabricação de peças para veículos agrícolas, os resultados encontrados mostraram ganhos expressivos com a utilização do aço com 0,016% de bismuto.

ABSTRACT

This study evaluates the influence of the element bismuth on the machinability of steel DIN-20MnCr5. For this three different bismuth concentrations were tested (NoBi, 0.026wt.% Bi and 0.046wt.% Bi). A fourth steel containing 0,016wt.%Bi was used in the field test. Some mechanical properties were also analyzed to verify changes due to the addition of bismuth. This study was done using hot rolled round bars with 73.03 mm in diameter. In order to minimize effects of thermal or mechanical history prior to testing the steels were submitted to a normalizing heat treatment. The direct comparative method was used to evaluate the machinability performance of the three steels tested. The metallurgical characterization of the materials studied involved chemical, microstructural and inclusions analyses. To verify the mechanical properties hardness, Charpy impact, tensile strength and hot workability tests were performed. The machinability was evaluated by the shape of the chip, through turning machining and flank wear through the drilling operation, all tests were performed without the use of cutting fluid. The results show a significant influence of bismuth on the machinability of the material studied, with considerable enhancement in the performance of the steel 0,026wt.%Bi and 0,046wt%Bi. The mechanical properties did not show significant differences between the three steels with the exception of the hot workability which was impaired due to the addition of bismuth. The field test consisted in monitoring the performance of the material in manufacturing parts for agricultural vehicles, the results showed significant gains with the use of steel with 0,016wt.%Bi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte. (10)	6
Figura 2.2	Desgaste por abrasão na ferramenta de usinagem. (21)	7
Figura 2.3	Desgaste por adesão na ferramenta de usinagem. (21)	7
Figura 2.4	Desgaste de flanco por abrasão e adesão em brocas helicoidais com diferentes parâmetros de corte. (27)	8
Figura 2.5	Tipos de desgastes em brocas helicoidais. (21)	9
Figura 2.6	Componentes da Força de Usinagem no Torneamento. (13)	11
Figura 2.7	Componentes ortogonais da força de usinagem em furação. (18)	13
Figura 2.8	Diagrama da cunha cortante. (11)	14
Figura 2.9	Zonas de Cisalhamento primária e secundária. (11)	15
Figura 2.10	Cavaco Contínuo. (13)	15
Figura 2.11	Cavaco de Cisalhamento. (13)	16
Figura 2.12	Cavaco de Ruptura. (13)	16
Figura 2.13	Influência da forma de cavaco no valor do coeficiente volumétrico. (13)	18
Figura 2.14	Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos. (17)	18
Figura 2.15	Inclusões de Sulfeto de Manganês no aço SAE 1040. (11)	20
Figura 2.16	Sulfeto de manganês envolto por uma capa de Telureto de Manganês Sulfeto de Manganês. (3)	21
Figura 2.17	$\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ Sistema ternário mostrando a composição de alcance da anortita. (9)	23
Figura 2.18	Capa de chumbo envolvendo uma inclusão de MnS. (3)	24
Figura 2.19	Microanálise em linha de uma inclusão metálica de chumbo. (3)	24
Figura 2.20	Solicitações térmicas na cunha de corte. (23)	25
Figura 2.21	Resultados do teste de molhabilidade. (19)	27
Figura 2.22	Inclusões metálicas de bismuto associadas à micro trincas na formação do cavaco, durante a usinagem de um aço com 0,20% Bi à velocidade de corte de 120 m/min. (3)	28

Figura 2.23	Resultados de testes de ductilidade a quente, realizados no simulador Gleeble de aços com adições de bismuto, bismuto-boro e chumbo. (26).....	28
Figura 2.24	Relação entre temperatura e redução de área. (19)	29
Figura 2.25	MnS envelopado por uma capa de bismuto metálico. (3)	30
Figura 3.1	Fluxo de produção. (29)	32
Figura 3.2	Estabilizadores (a) e Barras inferiores (b). (24)	33
Figura 3.3	Seção de corte das amostras	35
Figura 3.4	Esquema de captura de imagens na seção longitudinal para análise de inclusões.	35
Figura 3.5	Esquema de captura das imagens.	36
Figura 3.6	Esquema com as posições de medições de dureza na superfície das amostras..	37
Figura 3.7	Corpo de prova com entalhe em U e 5 mm de profundidade (NBR 6157, ABNT 1980)..	38
Figura 3.8	Esquema ilustrativo dos corpos-de-prova conforme instruções na norma ASTM E 8M. (15)	38
Figura 3.9	Esquema do corpo-de-prova utilizado no ensaio de ductilidade a quente.	39
Figura 3.10	Esquema da montagem para ensaio de tração.	40
Figura 3.11	Sensor de deslocamento da amostra (LGage).	40
Figura 3.12	Representação do ciclo realizado no teste.	41
Figura 3.13	Distribuição de furos na seção transversal.	42
Figura 4.1	Amostra 0-Bi, seção transversal, mostrando a presença de ferrita e perlita. Posição: periferia (a) e meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica. Ataque Nital 2%. ..	46
Figura 4.2	Amostra 1-Bi, seção transversal, mostrando a presença de ferrita e perlita. Posição: periferia (a) e meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica. Ataque Nital 2%. ..	46
Figura 4.3	Amostra 2-Bi, seção transversal, mostrando a presença de ferrita e perlita. Posição: periferia (a) e meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica. Ataque Nital 2%. ..	47
Figura 4.4	Amostra 0-Bi, seção longitudinal, mostrando a presença de microinclusões tipo sulfetos, aluminatos e óxidos. Posição: periferia (a), meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica.	48
Figura 4.5	Amostra 1-Bi, seção longitudinal, mostrando a presença de microinclusões tipo sulfetos, aluminatos e óxidos. Posição: periferia (a), meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica.	49

Figura 4.6	Amostra 2-Bi, seção longitudinal, mostrando a presença de microinclusões tipo sulfetos, aluminatos e óxidos. Posição: periferia (a), meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica.	49
Figura 4.7	Amostra 0-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: periferia (a) e meio raio (b).	52
Figura 4.8	Amostra 0-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: núcleo	52
Figura 4.9	Amostra 1-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: periferia (a) e meio raio (b).	53
Figura 4.10	Amostra 1-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: núcleo	53
Figura 4.11	Amostra 2-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: periferia (a) e meio raio (b).	53
Figura 4.12	Amostra 2-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: núcleo	54
Figura 4.13	Inclusões metálicas de bismuto encapsulando o sulfeto de mangânês ou isoladas no aço 20MnCr5.	54
Figura 4.14	Resultados da análise por EDS.....	55
Figura 4.15	Imagem tamanho de grão (a); Distribuição tamanho de grão (b) para aço 0-Bi.	56
Figura 4.16	Imagem tamanho de grão (a); Distribuição tamanho de grão (b) para aço 1-Bi.	56
Figura 4.17	Imagem tamanho de grão (a); Distribuição tamanho de grão (b) para aço 2-Bi.	56
Figura 4.18	Curva Tensão x Deformação para aço 0-Bi.	58
Figura 4.19	Curva Tensão x Deformação para aço 1-Bi.	59
Figura 4.20	Curva Tensão x Deformação para aço 2-Bi.	59
Figura 4.21	Resultados dos ensaios de ductilidade a quente.	61
Figura 4.22	Aspecto dos corpos de prova após os ensaios de ductilidade a quente para as temperaturas de 900°C (a) e 1100°C (b).	61
Figura 4.23	Variação do coeficiente volumétrico versus avanço.	62
Figura 4.24	Cavacos formados nos ensaios do material 0-Bi para avanços de 0,066 mm/rot (a), 0,102 mm/rot (b), 0,205 mm/rot (c) e 0,336 mm/rot (d).	63

Figura 4.25 Cavacos formados nos ensaios do material 1-Bi para avanços de 0,066 mm/rot (a), 0,102 mm/rot (b), 0,205 mm/rot (c) e 0,336 mm/rot (d).	63
Figura 4.26 Cavacos formados nos ensaios do material 2-Bi para avanços de 0,066 mm/rot (a), 0,102 mm/rot (b), 0,205 mm/rot (c) e 0,336 mm/rot (d).	64
Figura 4.27 Desgaste de flanco de brocas helicoidais avaliado na região do meio raio....	65
Figura 4.28 Desgaste de flanco de brocas helicoidais avaliado na região do núcleo.	65
Figura 4.29 Desgaste de flanco de brocas helicoidais avaliado na região da periferia.. ...	66
Figura 4.30 Cavacos observados em ensaios de campo, aço DIN-20MnCr5 (a) e aço DIN-20MnCr5 com bismuto (b).	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade. (12).....	19
Tabela 2.2: Valores de Dureza versus composição das inclusões. (3)	22
Tabela 2.3: Propriedades Físicas do Bismuto. (14).....	25
Tabela 2.4: Propriedades físicas do ferro, chumbo e do bismuto. (11).....	26
Tabela 2.5: Composição química dos aços. (26).....	28
Tabela 2.6: Composição Química e dureza dos aços. (19).....	29
Tabela 3.1: Especificação da faixa de composição químicas do aço DIN-20MnCr5 em percentagem de massa (%).	34
Tabela 3.2: Parâmetros de corte empregados	43
Tabela 3.3: Ferramentas, insertos e parâmetros utilizados na fabricação de esferas de articulação.....	44
Tabela 4.1: Composição químicas dos aços testados em percentagem de massa (%).	45
Tabela 4.2: Classificação de inclusões segundo a norma ASTM E45A para as regiões núcleo, meio raio e periferia.	47
Tabela 4.3: Comprimento, tamanho de inclusões segundo a norma ASTM E45A para as regiões núcleo, meio raio e periferia	48
Tabela 4.4: Parâmetros estatísticos da quantificação de inclusões por imagem do aço 0-Bi.	49
Tabela 4.5: Parâmetros estatísticos da quantificação de inclusões por imagem do aço 1-Bi.	50
Tabela 4.6: Parâmetros estatísticos da quantificação de inclusões por imagem do aço 2-Bi.	50
Tabela 4.7: Resultados ensaios de dureza.	57
Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de impacto Charpy.....	58
Tabela 4.9: Resultados dos ensaios de Tração.	59
Tabela 4.10: Índice de Usinabilidade.	66
Tabela 4.11: Resultado comparativo do desempenho do aço com e sem adição de bismuto em campo.....	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Processos de Usinagem.....	3
2.2 Usinabilidade.....	4
2.3 Critérios para avaliação da Usinabilidade.....	5
2.3.1 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta	5
2.3.1.1 Desgaste por Abrasão.....	6
2.3.1.2 Desgaste por Adesão (ou por Aderência).....	7
2.3.1.3 Desgaste por Difusão	7
2.3.1.4 Desgaste por Oxidação.....	8
2.3.1.5 Desgaste em Brocas	8
2.3.2 Acabamento Superficial	9
2.3.3 Forças de Usinagem	10
2.3.4 Mecanismos de Formação do Cavaco.....	13
2.3.4.1 Tipos de Cavacos	15
2.3.4.2 Classificação do cavaco quanto à forma	16
2.4 Fatores que influenciam a usinabilidade	19
2.4.1 Influência dos Sulfetos Controlados	20
2.4.2 Influência dos Óxidos Controlados	21
2.4.3 Influência do Chumbo.....	23
2.4.4 Influência do Bismuto.....	27
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1 Matéria Prima.....	33
3.2 Análise Química.....	34
3.3 Caracterização Microestrutural	34
3.4 Análise de Inclusões.....	35
3.5 Tamanho de Grão	36
3.6 Propriedades Mecânicas.....	36
3.6.1 Ensaio de Dureza.....	37
3.6.2 Ensaio de Impacto Charpy	37
3.6.3 Ensaio de Tração	38
3.7 Usinabilidade	41
3.7.1 Ensaio de Cavaco.....	41
3.7.2 Ensaio de Desgaste	42
3.7.3 Ensaio de Campo.....	43
4. MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 Análise Química.....	45
4.2 Caracterização Microestrutural.....	45
4.3 Análise de Inclusões	47
4.4 Ensaio Mecânicos.....	57
4.4.1 Ensaio de Dureza	57
4.4.2 Ensaio de Impacto Charpy	57
4.4.3 Ensaio de tração	58
4.4.4 Ensaio de ductilidade à quente.....	60

4.5	Ensaio de Usinagem	62
4.5.1	Coeficiente Volumétrico do Cavaco	62
4.5.2	Desgaste de Flanco	64
4.5.3	Ensaio de Campo	67
5.	CONCLUSÕES	68
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

A competitividade entre mercados é amplificada pelo acelerado crescimento da tecnologia. A globalização e a facilidade do acesso a informações disseminam constantemente nas pequenas e grandes empresas as melhores práticas adotadas no ambiente industrial. Desta forma, a mentalidade da melhoria contínua de produtos e processos já não é um diferencial, mas sim, a garantia para manter a concorrência e a sobrevivência das corporações. O atual cenário econômico em que estamos inseridos deixa clara a necessidade das empresas se adequarem neste novo ambiente extremamente dinâmico.

A consciência desta realidade faz com que a prioridade das empresas seja investir no desenvolvimento de melhores produtos, reduzindo custos e atendendo às necessidades dos clientes. Os processos de usinagem representam um elevado custo para a indústria de autopeças e metal-mecânica, sendo de grande importância o desenvolvimento de um material que facilite a usinagem sem modificar as propriedades mecânicas exigidas para sua aplicação.

Os aços de corte fácil são projetados para oferecer os melhores desempenhos mediante operações de corte. As outras características são consideradas secundárias. Já os aços de usinabilidade melhorada devem cumprir as características exigidas pela aplicação (temperabilidade, resistência, etc.) e aumentar sua aptidão aos processos de usinagem.

Historicamente, o chumbo é o elemento amplamente utilizado com o objetivo de melhorar a usinabilidade dos aços, porém, devido a problemas ambientais e por ser tóxico ao ser humano, seu uso tem sido restrito. Devido a isto, outros elementos passaram a ser estudados e dentre eles o bismuto tem apresentado bons resultados.

Embora algumas siderúrgicas já utilizem o bismuto comercialmente em algumas qualidades de aço, o seu comportamento e as alterações que este aditivo pode provocar no material ainda não são conhecidos em sua totalidade. Este trabalho foi proposto com o objetivo de contribuir com o desenvolvimento e entendimento da influência do bismuto na usinabilidade de aços especiais, mais especificamente de aços da qualidade DIN-20MnCr5. Para isto as propriedades mecânicas e de usinagem dos aços DIN-20MnCr5 e DIN-20MnCr5 Modificado ao bismuto (com 2 diferentes teores de bismuto) foram avaliadas.

O material utilizado para este estudo foi produzido em uma usina de aços especiais focada na produção de aços longos voltados principalmente para atender a indústria automotiva.

O processamento do aço consiste primeiramente na fusão da carga, a qual é constituída por sucata, ferro-gusa e ferros-liga, em um forno de fusão a arco elétrico. Posteriormente, é realizado o refino primário neste mesmo equipamento. A próxima etapa do processo é o refino secundário, onde são adicionados elementos de liga e desoxidantes, seguidas do processo de degaseificação a vácuo, onde o excesso de gases, principalmente hidrogênio, é eliminado. Enfim, o aço é solidificado através de velocidades e temperaturas controladas a fim de se obter uma taxa de resfriamento adequada em uma máquina de lingotamento contínuo em seções quadradas de 155 ou 240 mm.

Os tarugos então são encaminhados à laminação, onde após um reaquecimento, são conformados a quente através da passagem por diversos canais e cilindros de laminação, obtendo-se uma barra com a seção redonda de bitola desejada.

Este trabalho abordará o desempenho do aço com adição de bismuto durante a usinagem, utilizando ensaios de furação e torneamento, buscando verificar seu impacto no processo das indústrias de autopeças.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de Usinagem

Usinagem é um termo utilizado para processos de remoção de material de uma peça, usualmente na forma de cavacos (7). Esta remoção é feita através de uma ferramenta chamada de ferramenta de corte. O processo de usinagem tem como principais objetivos: dar à peça o acabamento superficial, a forma de acordo com as especificações de fabricação e com o emprego, a obtenção de peculiaridades como saliências, reentrâncias, furos rosqueados ou passantes, etc. Dentre os inúmeros processos de usinagem, podemos citar o torneamento, furação, descascamento, fresamento, retífica, brochamento, roscamento, dentre outros.

Nestes processos, algumas variáveis atuam de forma mais significativa, devendo ser controladas de maneira mais cuidadosa para evitar problemas indesejáveis. Dentre as variáveis, podemos citar algumas, como o material a ser usinado, geometria inicial da peça, material e revestimento do inserto, tipo e concentração do fluido de corte e parâmetros de corte como velocidade, avanço e profundidade de corte (7).

Dentro do segmento metal-mecânico a usinagem é, sem dúvida, um dos processos de conformação mais utilizados. Em função dos altos volumes processados e dos altos custos de operação envolvidos, o segmento de mercado de usinagem é de grande importância para os fornecedores de aço e suas ligas.

2.2 Usinabilidade

A usinabilidade compreende todas as propriedades que influenciam no processo de usinagem. Esta propriedade pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo, índice ou porcentagem, um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão (13). Em outras palavras, a usinabilidade pode ser definida como sendo a capacidade do material de uma peça se deixar usinar.

Pode-se medir a usinabilidade de um metal através da determinação da vida da ferramenta. Este método consiste em verificar qual o material que garante vida mais longa da ferramenta sob condições prefixadas de tipo de ferramenta e de condições de corte como velocidade, avanço e profundidade de corte. Outro método se refere à velocidade de corte, onde se determina a máxima velocidade segundo a qual uma ferramenta padronizada, sob condições pré-determinadas de operação, pode continuar a apresentar resultados satisfatórios, num período específico de tempo (6).

A vida da ferramenta e a velocidade de corte estão relacionadas pela equação 1:

$$V_c T_v^n = C_t \quad \text{equação (1)}$$

Onde V_c é a velocidade de corte, T_v a vida da ferramenta e n e C_t são constantes empíricas que correspondem às condições de corte e à usinabilidade do material.

Um terceiro método corresponde ao consumo de força, medido pela força necessária para remover um volume unitário de material, sob condições específicas de usinagem (6).

Entendem-se como propriedades de usinagem de um metal, aquelas que expressam o seu efeito sobre as grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem. Pode-se avaliar a usinabilidade de um material também através do desgaste da ferramenta, do acabamento superficial, da força de usinagem e das características do cavaco. Tais critérios podem ser utilizados isoladamente ou em conjunto.

Alguns fatores importantes que influenciam a usinabilidade de um material são: o teor de carbono, elementos de liga, inclusões e tratamentos térmicos.

2.3 Critérios para avaliação da Usinabilidade

2.3.1 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta

Durante a usinagem, a ferramenta de corte sofre desgaste que representa um fator limitador do grau de utilização da mesma e define a economia de um processo através dos custos e tempo de corte. O conhecimento dos mecanismos de desgaste permite a escolha mais adequada de ferramenta e condições de usinagem.

Define-se o desgaste em ferramentas de corte como uma perda gradual de material do corpo pela ação de contato físico da ferramenta com a peça e o próprio cavaco em um meio seco ou úmido, onde vários são os fenômenos causadores do desgaste (10). Os quatro principais mecanismos de desgaste de ferramenta de corte são:

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

O diagrama da figura 2.1 representa os mecanismos de abrasão, adesão, difusão e formação de óxidos em função da temperatura de corte ou de qualquer parâmetro que venha a influenciá-la, como por exemplo, a velocidade de corte e o avanço (5). Neste sistema fatores tais como o material da ferramenta e da peça, as condições de corte e a geometria da ferramenta afetam a temperatura e a pressão na região de corte fazendo com que alguns mecanismos prevaleçam sobre os outros (10). Em baixas temperaturas apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e pode-se observar no diagrama a predominância do mecanismo de adesão. Já em temperaturas elevadas, a adesão se torna pouco atuante e participação dos mecanismos de oxidação e difusão aumentam com o aumento de temperatura e a difusão cresce em uma escala exponencial (20).

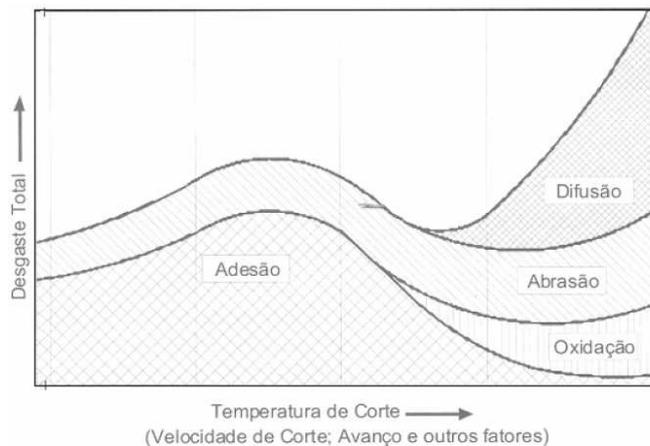
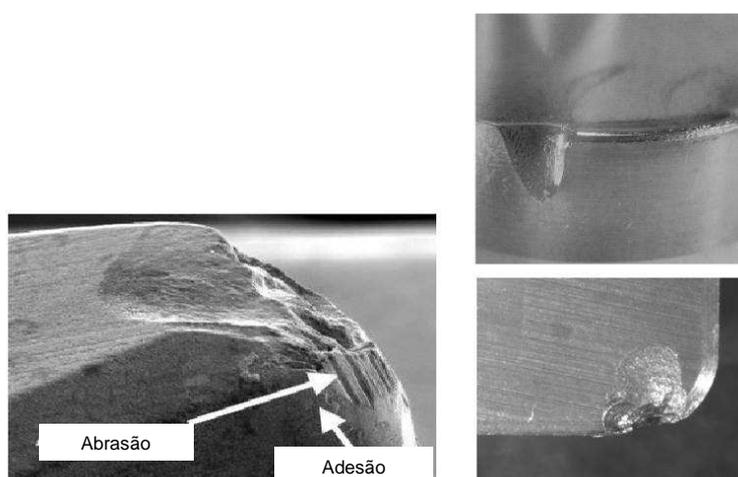


Figura 2.1 Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte. (10)

2.3.1.1 Desgaste por Abrasão

O desgaste por abrasão ocorre devido ao atrito das partículas da superfície da ferramenta com os constituintes duros do material usinado (3). A abrasão, como ilustrada na figura 2.2, provoca a remoção ou deslocamento da superfície do material da ferramenta de corte através de atrito das partículas de dureza relativamente maior que o material de base, estando essa solta ou presa numa superfície de contato (5). Este tipo de desgaste depende principalmente: a) da relação das durezas da ferramenta e do material em dadas condições de usinagem; b) do seu estado de encruamento e; c) da quantidade e distribuição das inclusões duras do material a ser usinado como alumina, silicatos, carbonitreto ou carbonetos. Pode-se reduzir o desgaste por abrasão eliminando, ainda no aço líquido durante seu refino, as partículas de óxidos abrasivos ou modificando-as de forma a torná-las líquidas ou com forma arredondada (3).



*Adaptado

Figura 2.2 Desgaste por abrasão na ferramenta de usinagem. (21)

2.3.1.2 Desgaste por Adesão (ou por Aderência)

Esse mecanismo predomina em baixas velocidades de corte, em geral, na área de saída de cavacos, o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez, promovem o fluxo irregular de cavaco, causando micro-caldeamentos do cavaco à superfície de saída da ferramenta. A figura 2.3 mostra o aspecto de uma ferramenta que sofreu desgaste por adesão, o material devido à solitação intermitente sofre a fadiga removendo parte da superfície de contato da ferramenta (8).



Figura 2.3 Desgaste por adesão na ferramenta de usinagem. (21)

2.3.1.3 Desgaste por Difusão

A difusão consiste na transferência de átomos de um material para o outro, o que causa variações nas propriedades na camada superficial da ferramenta. Para que ocorra o desgaste por difusão são necessários três fatores combinados: i) elevadas temperaturas na região de contato; ii) afinidade química entre a ferramenta e o material da peça; e iii) tempo de contato. A difusão é responsável pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois na superfície de saída da ferramenta são geradas as condições necessárias para a difusão dos materiais, que vêm a ser, altas temperaturas e tempo de contato cavaco-ferramenta (8).

A utilização de ferramentas revestidas de compostos duros e inertes ajuda na redução do desgaste por difusão (3).

2.3.1.4 Desgaste por Oxidação

A oxidação acontece através da reação, em elevadas temperaturas, dos materiais com o oxigênio presente no ar e na água dos fluídos de lubrificação e refrigerantes. Quanto maior a afinidade do material da ferramenta pelo oxigênio, maior será a taxa de desgaste por oxidação. Esta reação química resulta em óxidos que fragilizam e deixam porosa a superfície da ferramenta. A oxidação ocorre principalmente nas regiões limitadas pelo cavaco e peça e a interface ferramenta/peça (3).

2.3.1.5 Desgaste em Brocas

No processo de furação, a variação de velocidade de corte e a dificuldade em expulsar os cavacos da região de corte caracterizam, geralmente, como principais mecanismos de desgaste a abrasão mecânica e adesão, como ilustrado na figura 2.4. (27)

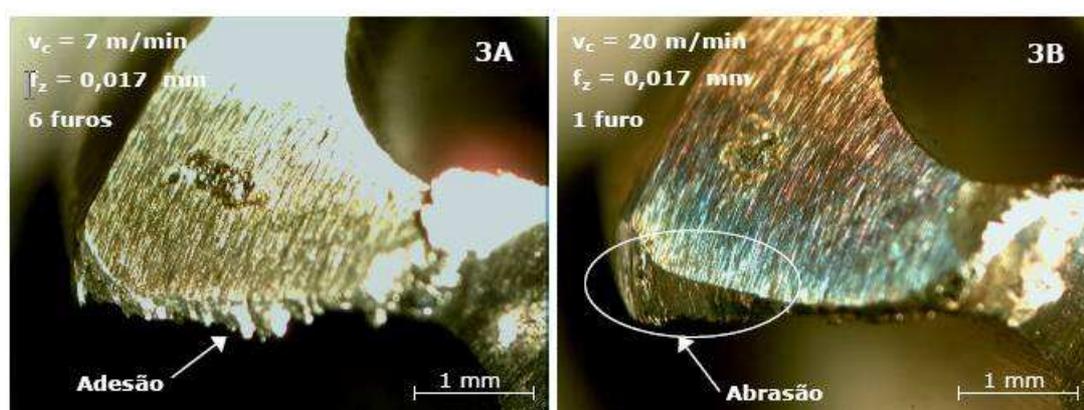


Figura 2.4 Desgaste de flanco por abrasão e adesão em brocas helicoidais com diferentes parâmetros de corte. (27)

O desgaste da ferramenta no processo de furação ocorre em diversas áreas como os flancos, as superfícies de saída do cavaco, aresta transversal, nas pontas e guias laterais da broca.

Conforme a região onde ocorre, identificam-se cinco tipos diferentes de desgaste (4). O desgaste total da broca compreende o desgaste de flanco, das guias, de cratera, de quina e do gume transversal como apresentado na figura 2.5. Os dois primeiros, por serem os mais encontrados, são normalmente escolhidos para estabelecer o critério de fim de vida da broca (18).

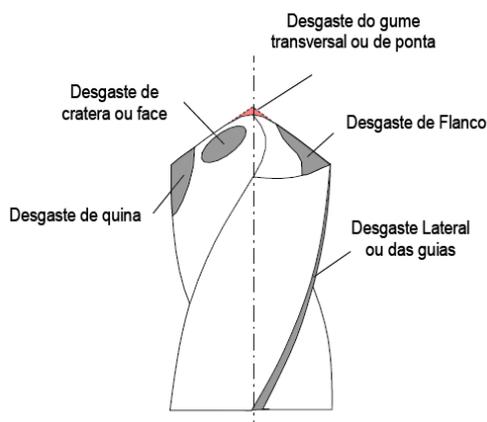


Figura 2.5 Tipos de desgastes em brocas helicoidais. (21)

No desgaste da quina, a velocidade de corte atinge seu valor máximo, resultando em uma maior carga térmica. Como consequência, a quina sofre, então, um arredondamento que se estende até as guias. As guias são então exigidas pelo atrito, podendo atuar como uma aresta cortante. Os desgastes de quina e de guia têm influência sobre a superfície gerada pela broca, ou seja, o diâmetro do furo e a qualidade da superfície. O desgaste no gume transversal é basicamente mecânico devido ao ângulo de saída negativo e às baixas velocidades de corte. Este desgaste tem um efeito de auto afiação do gume (18).

O desgaste de cratera ocorre por fatores térmicos e por mecanismos abrasivos, pois ocorre na face da ferramenta, na região onde ocorrem as temperaturas mais elevadas na cunha da ferramenta (18).

O desgaste de flanco é considerado o mais comum, por isso é normalmente empregado para comparar desempenho da ferramenta em diferentes condições de trabalho. Ocorre na superfície de incidência devido ao atrito das arestas de corte da broca contra a superfície da peça. Este desgaste é representado por uma faixa de desgaste nos flancos da broca ao longo da aresta principal de corte com largura variável, geralmente mais larga na ponta de corte (4).

2.3.2 Acabamento Superficial

A qualidade das superfícies obtidas na usinagem pode ser um critério para determinação dos parâmetros de entrada e geralmente é avaliada através da rugosidade superficial.

Entende-se como rugosidade superficial um conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro.

A qualidade superficial desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na qualidade de deslizamento, na resistência ao desgaste, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, na qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, na aparência, resistência à corrosão e a fadiga (22).

A rugosidade de uma superfície é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta. No torneamento, ela é influenciada principalmente pela forma do raio de quina da ferramenta e pelo avanço, diminuindo com o aumento do raio de quina e aumentando com o aumento do avanço. Em relação à velocidade de corte, ela inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade e passa a diminuir ao ultrapassar uma determinada velocidade. Isso acontece devido à formação de gume postiço, que pode ocorrer a pequenas velocidades de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades de corte mais altas (2).

2.3.3 Forças de Usinagem

O conhecimento da força de usinagem possibilita estimar a potência do equipamento necessário para a realização do processo, além de apresentar relação com o desgaste das ferramentas de corte, tornando um fator importante na determinação da usinabilidade de um material. Condições de corte que apresentem uma maior força de usinagem refletem numa maior dificuldade de usinagem do material. Assim, para uma melhor usinabilidade observa-se que os esforços de corte apresentam-se em menor valor (5)

A força de usinagem é a força total que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem e é considerada agindo em direção e sentido sobre a ferramenta (13). O conhecimento da força de usinagem F_u ou de suas componentes: força de corte F_c , força de avanço F_f e da força passiva F_p , é a base:

- Para o projeto de uma máquina ferramenta (dimensionamento das estruturas, acionamentos, fixações, etc.);
- Para a determinação das condições de corte e de trabalho;

- Para a avaliação da precisão de uma máquina ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça);
- Para a explicação de mecanismos de desgaste.

A figura 2.6 apresenta de forma esquemática as componentes da força de usinagem. Sua componente num plano ou numa direção qualquer é obtida projetando-se a força de usinagem F_u sobre esse plano ou direção. As componentes contidas no plano de trabalho e no plano efetivo de referência são as de maior importância prática (13).

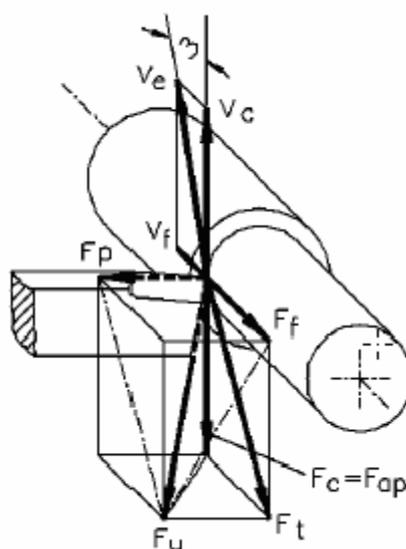


Figura 2.6 Componentes da Força de Usinagem no Torneamento. (13)

Em geral as componentes das forças de usinagem variam com as condições de trabalho como material da peça e geometria da ferramenta. O tipo de material da ferramenta atua principalmente no coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta e, em decorrência disso, principalmente sobre a força passiva e na força de avanço.

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

O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte é fundamental, pois eles afetam a potência necessária para o corte, a capacidade de obtenção de pequenas tolerâncias, temperatura de corte e desgaste de ferramenta (8).

A força de corte é o principal fator no cálculo da potência necessária para usinagem, depende principalmente do material a ser usinado, das condições efetivas de usinagem, da seção de usinagem e do processo.

A equação fundamental da força de corte, equação 2, denominada de equação de Kienzle, permite relacionar as constantes do processo de usinagem com o material a ser usinado, conceitualmente independe do processo de usinagem.

$$F_c = k_s * A \quad \text{equação (2)}$$

$$A = b * h = a_p * f \quad \text{equação (3)}$$

Onde k_s (N/mm²) é a pressão específica de corte; A representa a área da seção de corte; b é o comprimento de corte; h a espessura de corte; a_p a profundidade do corte e f o avanço (13).

A pressão específica de corte é por definição a força de corte para a unidade de área da seção de corte. Também é uma variável medida em laboratório e depende do material empregado, da seção de corte, da geometria da ferramenta, da velocidade de corte, da rigidez da ferramenta e do fluido de corte.

No caso do processo de furação, a importância do conhecimento dos esforços de corte está relacionada com a determinação dos fenômenos que ocorrem na região de formação do cavaco, para a explicação de mecanismos de desgaste e como critério para a determinação da usinabilidade de um material.

Durante a furação verifica-se resistência à penetração da broca devido: a) ao corte do material nas duas arestas principais, b) ao corte e esmagamento do material na aresta transversal e c) ao atrito das guias com a parede do furo e d) entre a superfície de saída da broca e o cavaco (18).

A força de usinagem que atua sobre a cunha cortante durante a furação, da mesma forma que no torneamento, pode ser decomposta em três componentes força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e a força passiva (F_p) como mostra a figura 2.7.

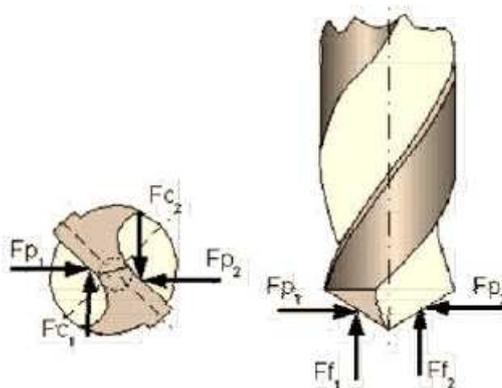


Figura 2.7 Componentes ortogonais da força de usinagem em furação. (18)

A força de corte é responsável pelo momento de torção (M_t), a força de avanço decorre da atuação da aresta transversal e da resistência ao corte do material e a força passiva atuante em uma parcela da aresta principal de corte, tem sentido oposto à força passiva atuante na outra, anulando-se.

Uma broca helicoidal durante o corte é submetida, principalmente, a esforços de torção e compressão. Estes esforços são consequência, respectivamente, da rotação e do avanço da broca. Logo, para estimar os esforços do processo de furação deve-se calcular o momento torçor e a força de avanço do processo (18).

2.3.4 Mecanismos de Formação do Cavaco

Os primeiros estudos para explicar o mecanismo da formação do cavaco foram realizados no final do século XIX. Neste período, considerava-se que a formação do cavaco ocorria pela fratura do material à frente da aresta de corte da ferramenta, no entanto, esta suposição foi substituída pela teoria do plano de cisalhamento (13).

O conhecimento do mecanismo de formação do cavaco é fundamental para que se possa avaliar a influência dos materiais, parâmetros de corte e mecanismos de desgaste da ferramenta.

A formação do cavaco em condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido se processa da seguinte forma, de acordo com a figura 2.8 (25):

- a) Uma porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça;
- b) O material recalcado sofre deformação plástica que aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento sejam suficientes para iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Estes planos instantâneos definem uma região entre a peça e o cavaco, chamada região de cisalhamento primário que é assimilada a um plano de cisalhamento, definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ ;

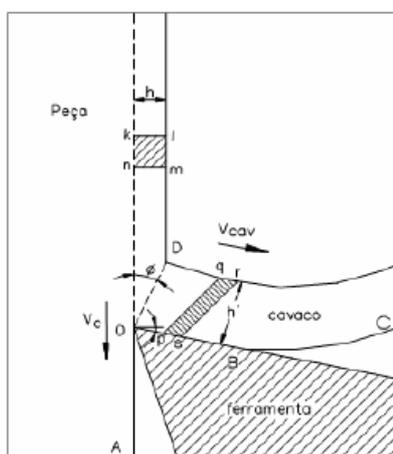


Figura 2.8 Diagrama da cunha cortante. (11)

- c) Prosseguindo a penetração, haverá uma ruptura parcial ou total na região de cisalhamento, dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem. Em materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza nas proximidades da aresta cortante, o cavaco originado é o chamado cavaco contínuo. Materiais frágeis originam cavaco de cisalhamento ou de ruptura.
- d) O movimento relativo entre a ferramenta e a peça provoca um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, uma nova porção de material irá se formar, cisalhar e também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo o fenômeno.

A segunda região de cisalhamento está localizada na interface cavaco-ferramenta chamada zona de cisalhamento secundária como ilustra a figura 2.9. Nesta região ocorreriam fenômenos com altíssima geração de calor e desgaste por transferência de átomos entre ferramenta e cavaco (11).

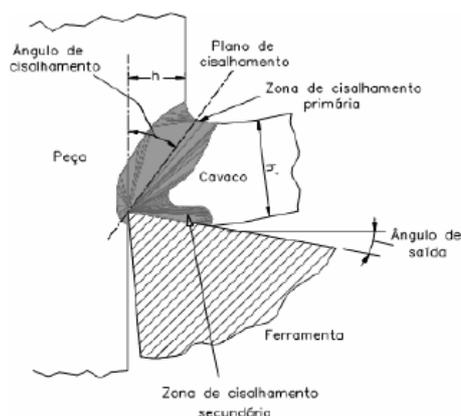


Figura 2.9 Zonas de Cisalhamento primária e secundária. (11)

2.3.4.1 Tipos de Cavacos

Os tipos de cavacos de acordo com suas características são (13):

- Cavaco contínuo – Constituído por lamelas justapostas numa disposição contínua (ver figura 2.10). O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno avanço.

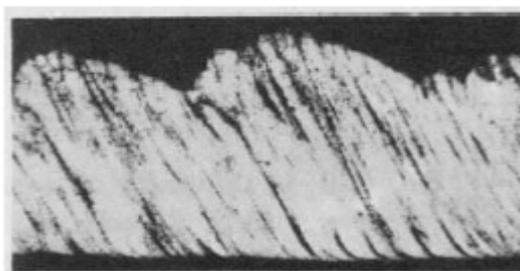
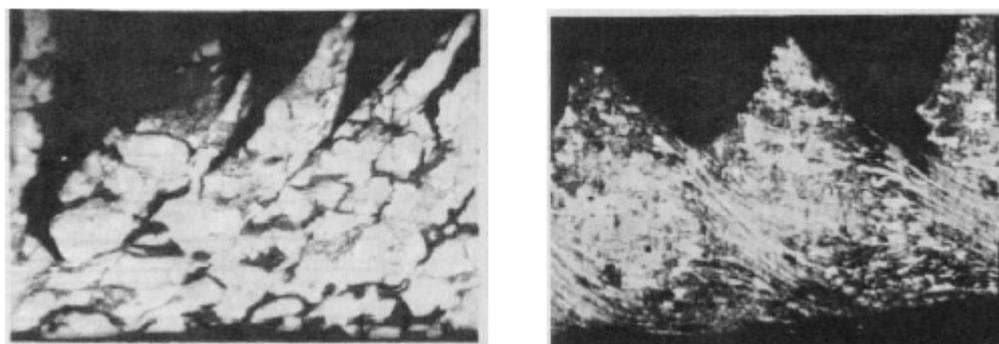


Figura 2.10 Cavaco Contínuo. (13)

- Cavaco de cisalhamento – Comum em materiais com baixa ductilidade, o cavaco de cisalhamento é constituído de grupos lamelares distintos e justapostos (ver figuras 2.11a e 2.11b). Irão formar-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento devido ao aumento da temperatura, à heterogeneidade da microestrutura do material,

ou a vibrações externas que conduzem às variações de espessura do cavaco. O cavaco de cisalhamento também se forma usando-se grandes avanços, velocidades de corte geralmente inferiores que 100 m/min e ângulo de saída pequeno.



(a)

(b)

Figura 2.11 Cavaco de Cisalhamento. (13)

- Cavaco de ruptura – Constituído de fragmentos arrancados da peça usinada (ver figura 2.12). Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na zona de cisalhamento primário), os quais permanecem separados. Comum para materiais frágeis ou de estrutura heterogenea como o ferro fundido e o bronze.

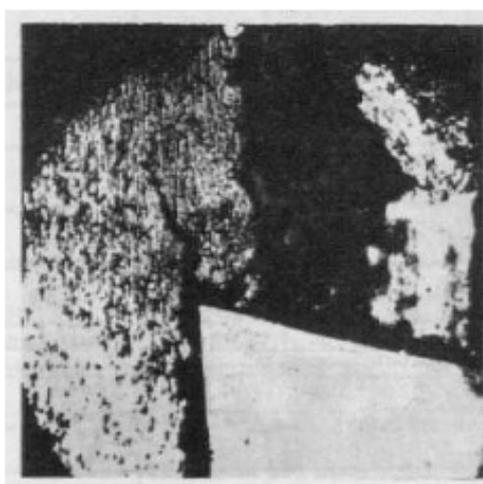


Figura 2.12 Cavaco de Ruptura. (13)

2.3.4.2 Classificação do cavaco quanto à forma

Quanto à forma, os cavacos são classificados em (13):

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

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

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

A definição do coeficiente volumétrico de cavaco C_v conforme equação 4 (13).

$$C_v = \frac{4000 \cdot V_{cavaco}}{\pi \cdot (d^2 - (d - 2 \cdot a_p)^2) \cdot l} \quad \text{equação (4)}$$

Onde:

V_{cavaco} = volume de cavaco medido, em ml

d = diâmetro da seção, em mm

a_p = profundidade de corte, em mm

l – comprimento usinado, em mm

Este coeficiente fornece um valor relativo das diferentes formas de cavaco, pois depende da maneira com que o mesmo é armazenado. A figura 2.13 fornece os valores de C_v para diferentes formas de cavaco (13). Para a determinação de V_{cavaco} foi considerado o armazenamento manual de cavaco.

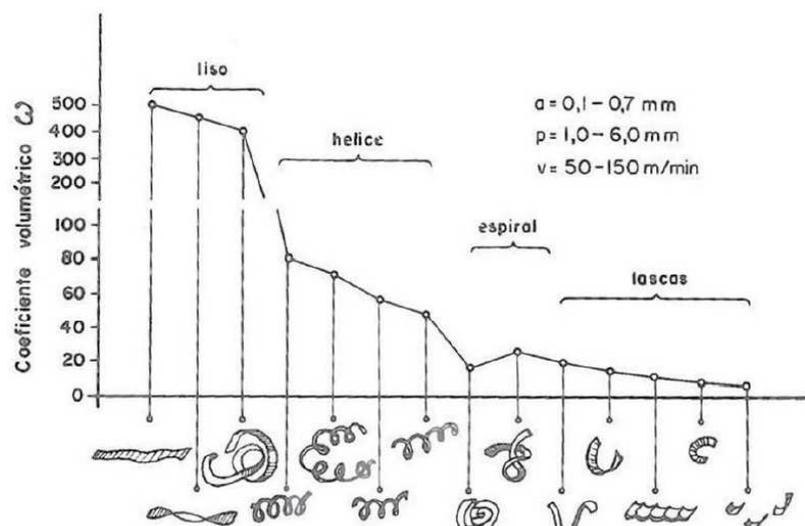


Figura 2.13 Influência da forma de cavaco no valor do coeficiente volumétrico. (13)

A figura 2.14 mostra o efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos. Um aumento da velocidade de corte ou uma redução do avanço tendem a mover a forma do cavaco para esquerda, o que significa produzir cavacos em fitas. O avanço é o parâmetro que mais influencia a forma do cavaco (11).

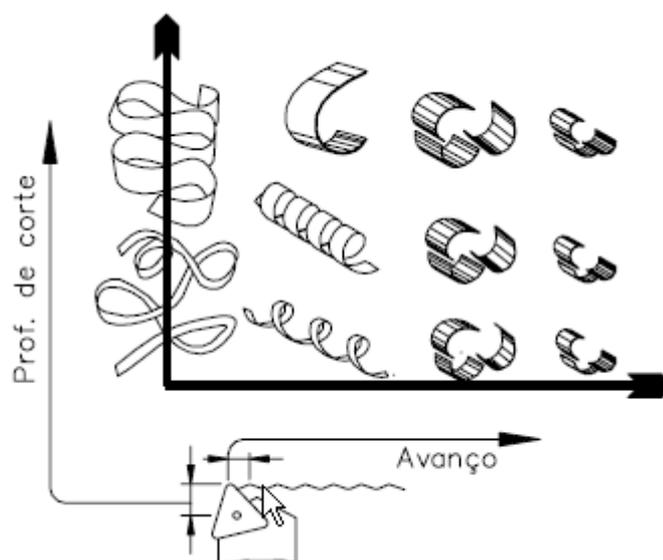


Figura 2.14 Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos. (17)

Para processos de furação, a capacidade de produzir furos até uma determinada profundidade é função do comprimento da ferramenta, da capacidade de remoção dos cavacos, do diâmetro e comprimento do furo.

Um dos maiores problemas no processo de furação é a expulsão dos cavacos de dentro do furo. Se os cavacos não forem formados de uma maneira tal que propiciem sua

retirada, eles podem provocar entupimento do furo, aumento do torque e a conseqüente quebra da broca.

O melhor para este processo é gerar cavacos que tenham uma geometria que facilite sua remoção do furo. Se o cavaco formado tiver o formato de fita, sua retirada será muito difícil. Cavacos helicoidais ou em lascas são os que podem ser mais facilmente removidos dos furos. Quanto maior a profundidade dos furos maior será a dificuldade da remoção dos cavacos (18).

2.4 Fatores que influenciam a usinabilidade

Como já comentado anteriormente, os aços de usinabilidade melhorada devem atender as características exigidas pela sua aplicação, porém, com o objetivo de melhorar sua aptidão à usinagem, sofrem modificações em fatores que influenciam direta ou indiretamente esta propriedade. A adição de elementos formadores de inclusões metálicas e/ou não metálicas nos aços é amplamente utilizada, de forma controlada, com o objetivo de melhorar determinadas propriedades, como por exemplo, a usinabilidade (3).

O desenvolvimento dos aços de usinabilidade melhorada consiste principalmente em introduzir, de modo controlado, inclusões, metálicas ou não metálicas, no aço. Algumas das tecnologias estudadas com este objetivo podem ser observadas na tabela 2.1 (3).

Tabela 2.1: Tecnologias aplicadas para melhoria da usinabilidade. (12)

Aplicação	Características	Resultados
Sulfetos controlados	Controlar fator de forma dos sulfetos	Aumento usinabilidade V _c * baixas
Óxidos Controlados	Tratamento ao cálcio	Aumento usinabilidade V _c * altas
Baixo oxigênio	Evitar formação de inclusões abrasivas	Aumento da Usinabilidade
Pb / Bi / inclusões metálicas	Formar inclusões metálicas	Aumento usinabilidade V _c * baixas/médias
Se / Te / B / Aditivos	Sulfetos controlados Óxidos visco-plásticos	Aumento usinabilidade V _c * baixas Aumento usinabilidade V _c * altas

* V_c – é velocidade de corte

Estas tecnologias podem ser aplicadas isoladamente ou de forma combinada, dependendo dos resultados objetivados.

2.4.1 Influência dos Sulfetos Controlados

O enxofre está presente em praticamente todos os tipos de aços produzidos, geralmente formando sulfeto de manganês (MnS) como ilustrado na figura 2.15. Tradicionalmente, as inclusões de MnS são as mais visadas em aços de corte fácil.

O enxofre quando na forma de sulfeto de manganês é responsável por grandes vantagens no que tange à usinabilidade, porém a presença destas inclusões deve ser cuidadosamente controlada, pois afeta as propriedades mecânicas do material, principalmente a resistência ao cisalhamento e à corrosão. As inclusões de MnS podem agir de três diferentes formas (11):

1 – Apresentando propriedades bem diferentes da matriz de aço, o MnS tem o efeito usinagem, aparece um efeito de entalhe que aumenta localmente a tensão de cisalhamento aplicada e diminui a tensão de ruptura na zona de formação do cavaco.

2 – Diminuindo a força de corte e reduz consideravelmente as dimensões da aresta postiça de corte aumentando a faixa de velocidade em que ela ocorre.

3 – Formando camada protetora sobre a superfície de saída da ferramenta, reduzindo a força de atrito entre o cavaco e a ferramenta, agindo como lubrificante. O decréscimo na força de atrito resulta num ângulo de cisalhamento maior e produz um cavaco mais quebradiço.

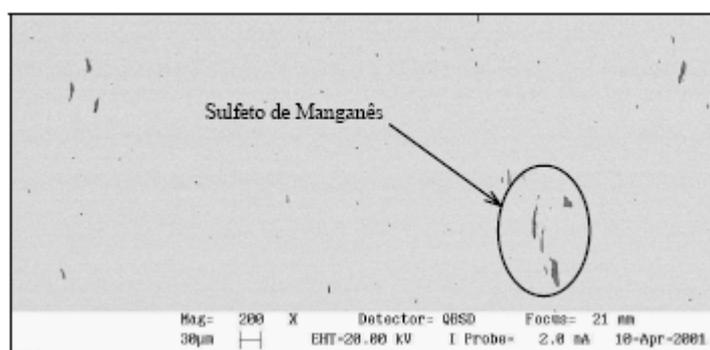


Figura 2.15 Inclusões de Sulfeto de Manganês no aço SAE 1040. (11)

Durante a solidificação do aço, os sulfetos de manganês podem precipitar em três diferentes morfologias. Na morfologia do tipo I, os sulfetos apresentam formato globular, geralmente associados com uma fase rica em oxigênio, formando os oxi-sulfetos, isso ocorre em aços com teores de oxigênio acima de 200 ppm com tamanhos da ordem de 10-30 μm . Os sulfetos finos com distribuição uniforme, normalmente descrevendo um eutético e confinados em regiões interdendríticas, constituem a morfologia do tipo II e ocorrem geralmente em aços com teor de oxigênio abaixo de 100 ppm. Por último, na morfologia do tipo III, os sulfetos são angulares e dispersos. Este tipo de morfologia ocorre geralmente em aços com baixo teor de oxigênio. (3)

O controle da morfologia dos sulfetos pode ser realizado pela adição de elementos como telúrio e selênio. Estes elementos promovem um decréscimo na deformabilidade à quente dos sulfetos de manganês que estariam envelopados por MnTe ou PbTe, (em aços com Pb), figura 2.16, este envelope, líquido, acomodaria as altas tensões e restringiria a deformação dos MnS. Porém, nem todos os sulfetos apresentam um envelope de teluretos. (3)

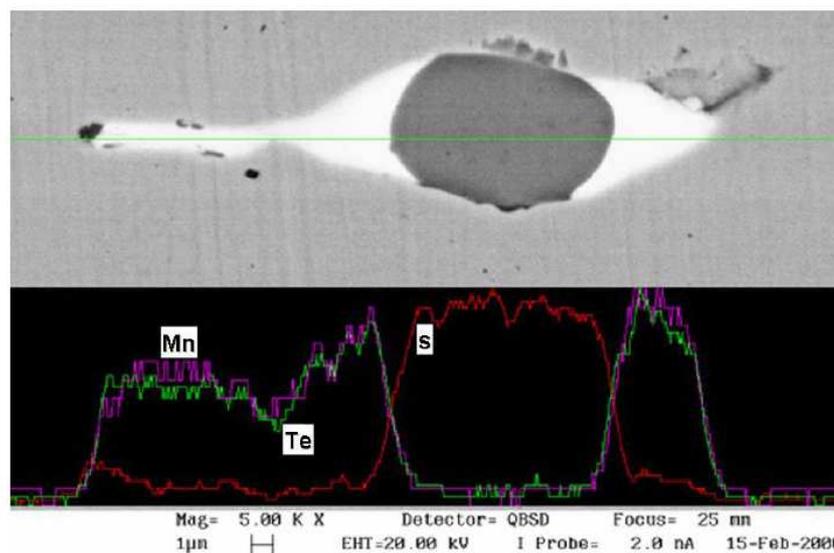


Figura 2.16 Sulfeto de manganês envolto por uma capa de Telureto de Manganês Sulfeto de Manganês. (3)

2.4.2 Influência dos Óxidos Controlados

As inclusões presentes no material, quando mais duras que a ferramenta de corte, provocam abrasão e o desgaste significativo do flanco das mesmas. A inclusão de alumina presente em praticamente todos os aços, em função dos processos de desoxidação, possui dureza extremamente elevada. Devido a isso, sua eliminação ou modificação para

inclusões de dureza menor que a ferramenta é uma das características na produção dos aços de usinabilidade melhorada. O tratamento com cálcio é o mais utilizado industrialmente para a obtenção de inclusões mais macias e arredondas. (3)

A tabela 2.2 demonstra os valores de dureza de acordo com a composição química das inclusões.

Tabela 2.2: Valores de Dureza versus composição das inclusões. (3)

<i>Fase</i>	<i>Composição</i>	<i>Dureza (kp/mm²)</i>
Corundum	Al ₂ O ₃	3000 – 4500
Cristobalita	SiO ₂	1600
Manganosita	MnO	400
Gehlenita	2CaO.SiO ₂ . Al ₂ O ₃	1200
Anortita	CaO.2SiO ₂ . Al ₂ O ₃	850

O uso do cálcio na desoxidação visa controlar a plasticidade das inclusões de óxidos de modo a torná-las menos abrasivas durante o processo de usinagem. Dependendo do desoxidante utilizado e do controle das reações metal-escória, são formadas inclusões com diferentes composições químicas. Em altas velocidades de corte, o controle das inclusões de óxidos no aço é mais efetivo do que os revestimentos de ferramentas para prevenir desgaste por cratera. (3)

As inclusões no campo da anortita no diagrama ternário cal-sílica-alumina (ver figura 2.17) influenciam positivamente a usinabilidade dos materiais, pois apresentam menor dureza e ponto de fusão, criando uma barreira à difusão de material da ferramenta para o cavaco durante usinagem a altas velocidades de corte e prevenindo o desgaste tipo cratera, facilitado pelas altas temperaturas geradas em condições agressivas de velocidade. (9)

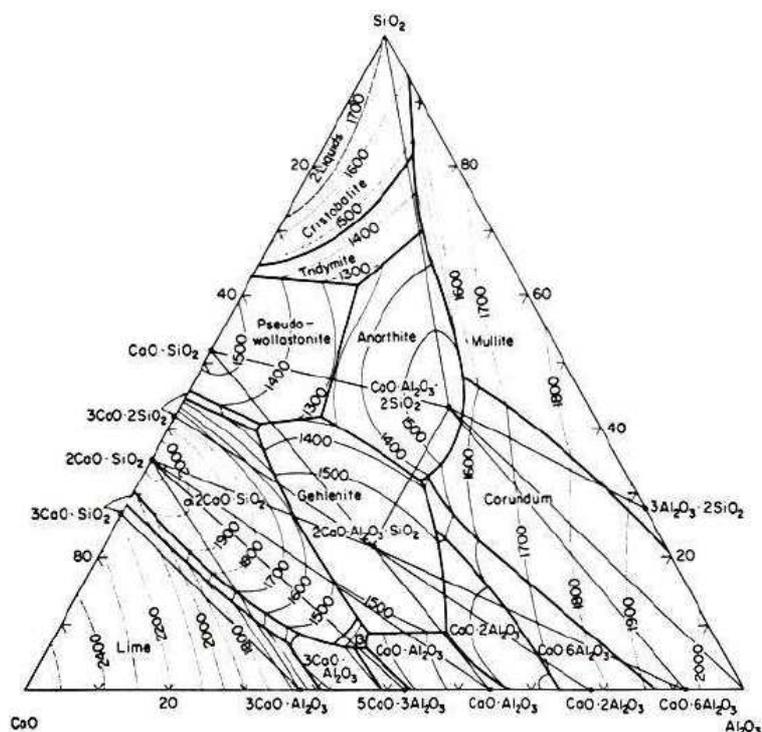


Figura 2.17 SiO₂-CaO-Al₂O₃ Sistema ternário mostrando a composição de alcance da anortita. (9)

2.4.3 Influência do Chumbo

Os estudos sobre a utilização do chumbo nos aços iniciaram na década de 40, porém a produção em escala industrial somente aconteceu na década de 60. A adição do chumbo é outro meio de melhorar a usinabilidade dos aços. As adições são feitas no aço líquido durante seu vazamento nos moldes. Como esse metal é insolúvel no aço fundido, forma-se uma fina dispersão de partículas de chumbo. As inclusões de chumbo podem ser observadas associadas ao MnS (ver figura 2.18) ou de forma isolada (ver figura 2.19). (3)

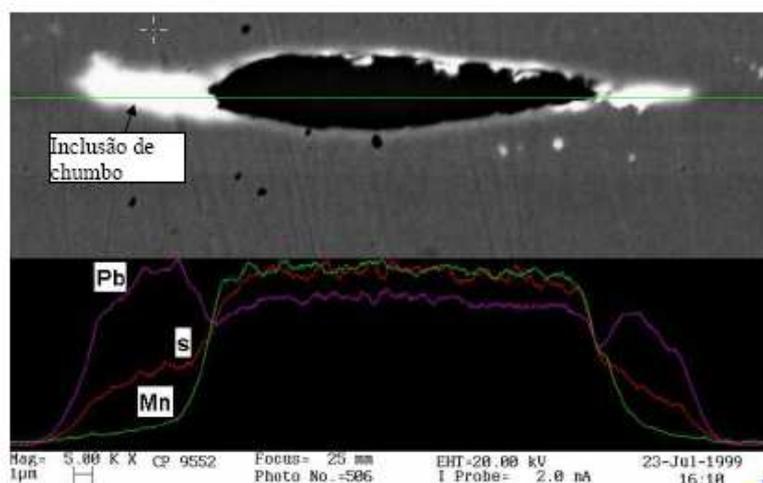


Figura 2.18 Capa de chumbo envolvendo uma inclusão de MnS. (3)

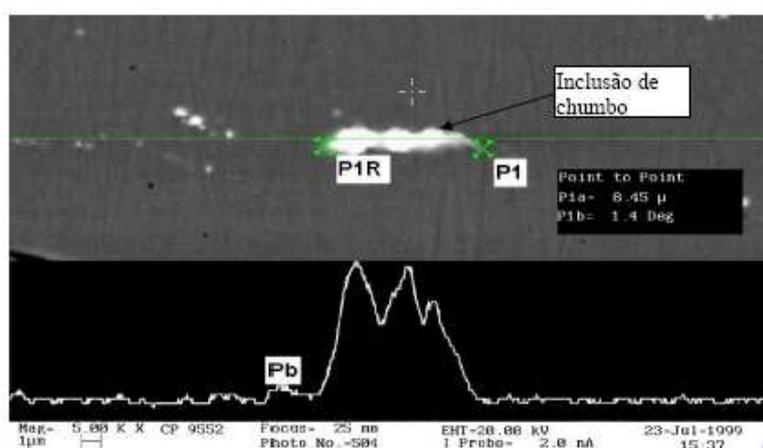


Figura 2.19 Microanálise em linha de uma inclusão metálica de chumbo. (3)

Os efeitos das inclusões de chumbo são bastante discutidos nas comunidades científicas. Pode-se citar três efeitos (19):

- Efeito Lubrificante: durante o processo de usinagem, a temperatura na região entre a região de deformação e a ponta da ferramenta (ver figura 2.20) se eleva acima da temperatura de fusão do chumbo, fazendo com que as inclusões líquidas de chumbo promovam um efeito lubrificante entre a ferramenta e o cavaco;
- Fragilização do metal líquido: as inclusões metálicas de chumbo quando líquidas fragilizam o aço, diminuindo a resistência ao cisalhamento, facilitando assim a remoção do material;
- Formação do cavaco: as partículas do chumbo atuam como concentradores de tensões na região de deformação, que causam o surgimento de micro-

trincas durante a usinagem, com isso diminuindo a resistência ao corte e facilitando a quebra do cavaco.

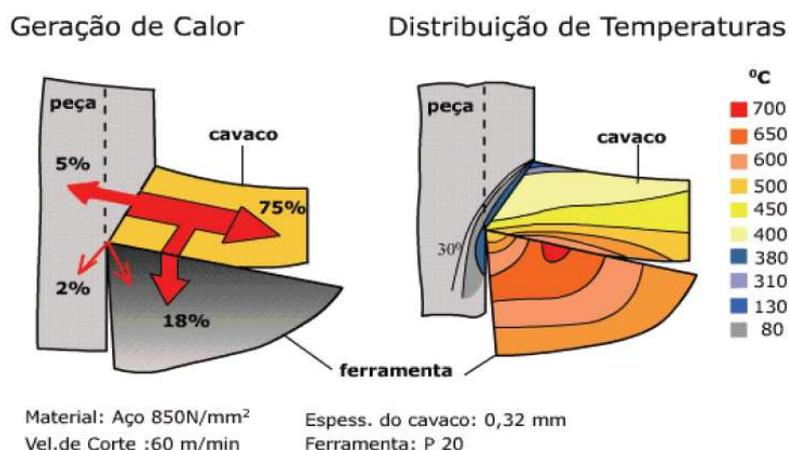


Figura 2.20 Solicitações térmicas na cunha de corte. (23)

Outros elementos, como arsênio, antimônio e estanho, poderiam desempenhar papel semelhante na interface dos contornos de grão, porém esta fragilização se dá de forma mais acentuada na faixa de temperaturas características dos processos de usinagem em baixas e médias velocidades de corte. (11)

Contudo, o chumbo apresenta alguns problemas, primeiro porque sua densidade é superior à densidade do ferro, assim as inclusões de Pb apresentam forte tendência a segregar, segundo porque se trata de um elemento tóxico e por isso as leis ambientais e de saúde pública dificultam a manufatura e o uso dos aços ao chumbo. Para minimizar os efeitos prejudiciais, estações especiais de captação de pó devem ser usadas na aciaria juntamente com a redução do tempo de exposição dos trabalhadores aos fumos do chumbo. (11)

Diversas alternativas têm sido testadas para substituir o chumbo como elemento potencializador da usinabilidade entre as quais podemos citar bismuto, cujas propriedades estão apresentadas na tabela 2.3, selênio, telúrio, cálcio, etc. cada uma delas com as suas particularidades e limitações.

Tabela 2.3: Propriedades Físicas do Bismuto. (14)

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
Número Atômico	83
Estrutura Cristalina	Romboédrico
Isótopos Estáveis	1

Massa Atômica	208,98
Ponto de Fusão	271°C
Ponto de Ebulição	1,564°C
Calor de Fusão	52,1 J/g
Calor de Vaporização	728 J/g
Calor Específico	0,0123 J/g
Coefficiente de Expansão Linear	13,45 x 10 ⁻⁶ /°C
Densidade (20°C)	9,8 g/cm ³
Densidade (271°C)	10,07 g/cm ³
Volume de Expansão na Solidificação	3,2%
Condutividade Térmica (20°C)	8,368 W/(m.K)
Resistividade Elétrica (0°C)	106,8 μΩ.cm

O elemento bismuto é pesado, trivalente, cristalino e de coloração rosácea. É o mais diamagnético de todos os metais. O bismuto está localizado próximo ao chumbo na tabela periódica, apresentando como característica o fato de se expandir na solidificação e apresentar baixa condutividade térmica no estado sólido. (14)

A primeira publicação que registra o uso do bismuto com a finalidade de melhorar as propriedades do aço quanto à usinagem ocorreu em 1941 (16), relatando que pequenas adições de bismuto, entre 0,1% - 0,5%, melhoram significativamente a usinabilidade de aços inoxidáveis sem haver prejuízo nas propriedades mecânicas ou resistência a corrosão. Contudo, a utilização industrial do bismuto com este objetivo somente aconteceu 20 anos depois.

A necessidade de substituir o chumbo utilizado nos aços de usinabilidade melhorada impulsionou as pesquisas sobre o bismuto. Apresentando propriedades químicas e físicas semelhantes ao chumbo, como pode ser observado na tabela 2.4, era previsível que o bismuto seria também um aditivo efetivo para melhorar a usinabilidade dos aços (11) com a vantagem de não ser tóxico e não apresentar riscos ao meio ambiente.

Tabela 2.4: Propriedades físicas do ferro, chumbo e do bismuto. (11)

<i>Elemento</i>	<i>Densidade T=20°C (g/cm³)</i>	<i>Ponto de Fusão (°C)</i>	<i>Ponto de Ebulição (°C)</i>	<i>Pressão de Vapor à 1600°C (atm)</i>
Pb	11,36	327	1725	0,44
Bi	9,8	271	1560	0,62
EutéticoPb/Bi	-	125	-	-

2.4.4 Influência do Bismuto

O bismuto é um elemento químico de símbolo Bi, de número atômico 83 (83 prótons e 83 elétrons), encontrado no grupo 15 da classificação periódica dos elementos químicos. Quando em temperatura ambiente, encontra-se no estado sólido e suas principais propriedades físicas estão listadas na tabela 2.3.

O bismuto, assim como o chumbo, possui baixo ponto de fusão, por esta razão, a elevação da temperatura na região de deformação durante a usinagem confere ao material o mesmo efeito lubrificante entre o cavaco e a ferramenta que o chumbo proporciona ao material, assim como o efeito de fragilização do metal líquido. Estes dois efeitos são benéficos à usinabilidade, melhorando principalmente a vida de ferramenta ainda com a vantagem de que a metade da adição de bismuto, em relação ao chumbo, proporciona ao material resultados muito semelhantes, isto ocorre em função da molhabilidade na matriz aço do bismuto em relação ao chumbo (19). No seu estudo para o caso do aço AISI 1030, onde o ângulo de contato do bismuto é menor do que o do chumbo para qualquer temperatura (ver figura 2.21), ou seja, o bismuto possui melhor molhabilidade, o que resulta em um significativo efeito de fragilização apesar da menor adição.

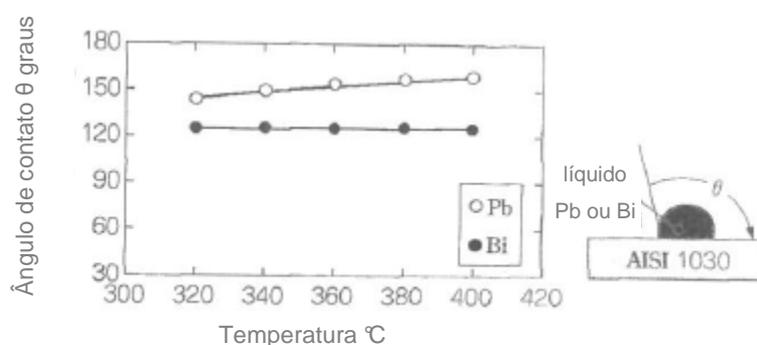


Figura 2.21 Resultados do teste de molhabilidade. (19)

O bismuto também atua como concentrador de tensões gerando micro-trincas e facilitando a quebra do cavaco, o que é extremamente benéfico para o processo de usinagem. A figura 2.22 apresenta as inclusões metálicas de bismuto associadas à micro-trincas na formação do cavaco. (3)



Figura 2.22 Inclusões metálicas de bismuto associadas à micro trincas na formação do cavaco, durante a usinagem de um aço com 0,20% Bi à velocidade de corte de 120 m/min. (3)

Contudo, o bismuto apresenta efeito deletério quanto a ductilidade à quente. Observa-se, na figura 2.23, que o aço B1, cuja composição química está apresentada na tabela 2.5, apresenta um baixo desempenho para as temperaturas compreendidas entre 950K e 1300K. Este efeito provocado pelo bismuto pode ser minimizado pela adição de boro, conforme o aço B2, que segrega intergranularmente reduzindo o efeito de fragilização intrergranular do bismuto. (26)

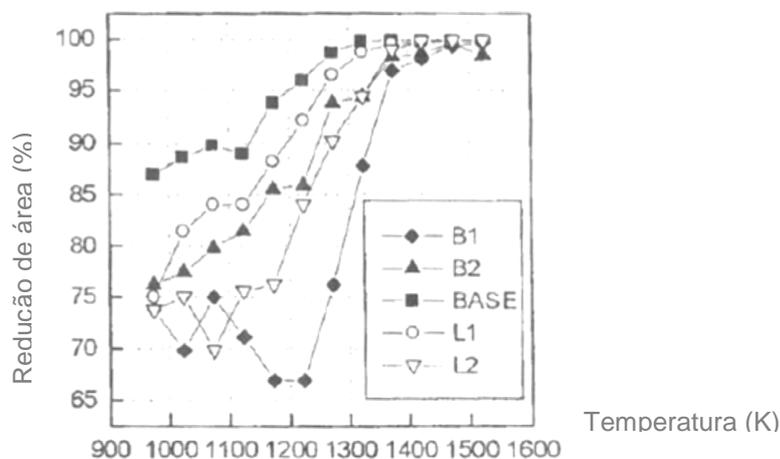


Figura 2.23 Resultados de testes de ductilidade a quente, realizados no simulador Gleeble de aços com adições de bismuto, bismuto-boro e chumbo. (26)

Tabela 2.5: Composição química dos aços. (26)

Aço	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	s-Al (%)	V (%)	s-B (ppm)	In-B (ppm)	N (ppm)	Aditivos (%)
B1	0,45	0,25	0,74	0,015	0,030	0,07	-	-	38	0,027 Bi

B2	0,45	0,26	0,70	0,015	0,024	0,07	23	6	41	0,062 Bi
Base	0,46	0,26	0,74	0,016	0,029	0,07	-	-	37	-
L1	0,45	0,25	0,73	0,015	0,017	0,08	9	-	36	0,05 Pb
L2	0,43	0,26	0,72	0,015	0,018	0,07	-	-	41	0,15 Pb

*Adaptado

Para temperaturas entre 250°C e 400°C, os aços com bismuto novamente apresentam desempenho significativamente inferior. A redução de área chega ao seu mínimo próximo de 300°C (19). Este comportamento, para o aço de composição química conforme tabela 2.6, pode ser observado na figura 2.24.

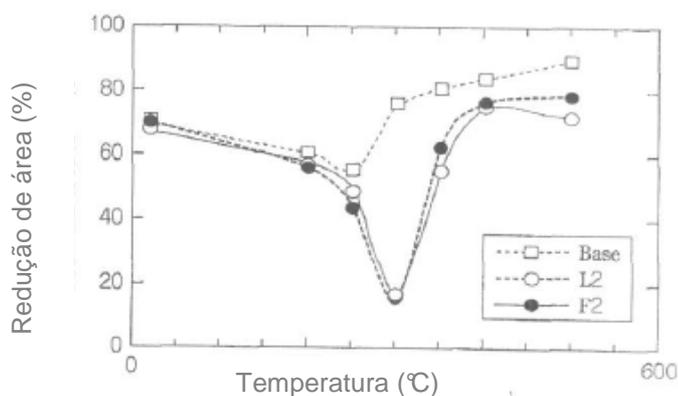


Figura 2.24 Relação entre temperatura e redução de área. (19)

Tabela 2.6: Composição Química e dureza dos aços. (19)

Aço	C	Si	Mn	P	S	Cr	Pb	Bi	Hardness (HV)
F2	0,30	0,22	0,74	0,013	0,020	0,12	-	0,10	41
Base	0,31	0,19	0,72	0,013	0,013	0,10	-	-	37
L2	0,29	0,18	0,68	0,014	0,015	0,19	0,22	-	41

*Adaptado

As inclusões de bismuto podem ser observadas isoladas, encapsulando inclusões de MnS (figura 2.25) ou simplesmente ligadas aos sulfetos, que passam a apresentar um formato mais elíptico, diferente da forma tradicionalmente alongada que os sulfetos apresentam quando isolados. (3)

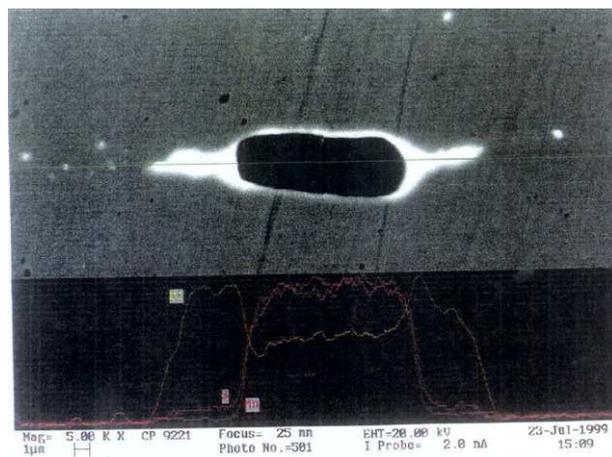


Figura 2.25 MnS envelopado por uma capa de bismuto metálico. (3)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A matéria prima utilizada neste estudo foi produzida nas instalações de uma usina de aços especiais. Para isso, foi elaborado um PEX1 (Programa de Experiência), onde todas as orientações necessárias para a fabricação dos materiais são definidas e repassadas às áreas de produção envolvidas.

O PEX elaborado para este estudo consistiu em um seqüencial de três corridas do aço DIN-20MnCr5, sendo a primeira da qualidade padrão e as demais com adições de bismuto. As corridas foram produzidas conforme esquema representado da figura 3.1.

¹ PEX (Programa de Experiência) – Aplica-se aos projetos, homologações, trabalhos de melhorias, otimização de métodos ou alterações que impactam na fabricação do produto, acompanhados ou propostos pelas áreas de Pesquisa e Desenvolvimento ou Engenharia de Produto e Processo.

3.1 Matéria Prima

O aço escolhido para o trabalho é segundo a norma Alemã DIN-20MnCr5. Esse aço possui uma larga aplicação como fabricação de engrenagens, eixos e também esferas para articulações em peças de veículos agrícolas, que é o foco deste trabalho, como estabilizadores, niveladores, barras inferiores, etc. A figura 3.2 mostra algumas aplicações deste aço.

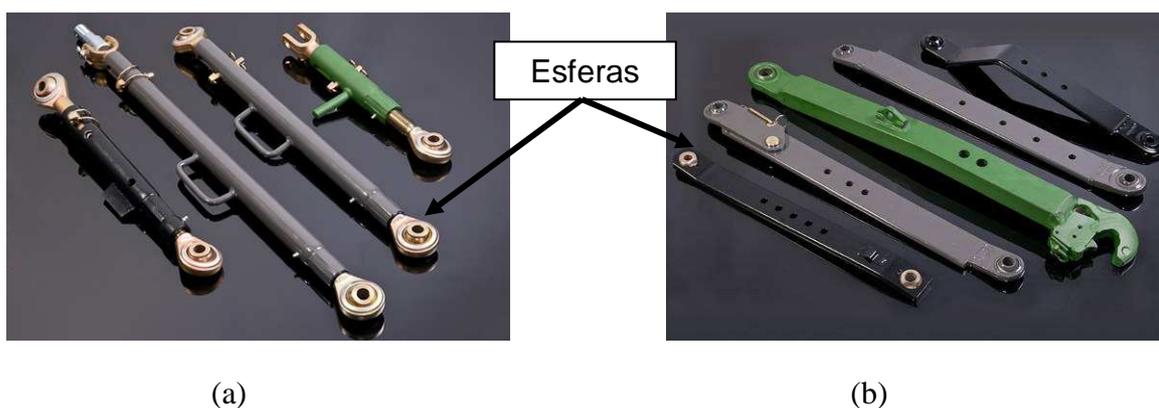


Figura 3.2 Estabilizadores (a) e Barras inferiores (b). (24)

Dois processos de usinagem são basicamente utilizados na produção das peças, o processo de furação e de torneamento. O ponto de maior criticidade no processo de usinagem deste material é a formação do cavaco, pois geralmente observa-se a formação do cavaco tipo fita, que devido à dificuldade de se partir, oferece o risco de enroscar na ferramenta ou entupir o buraco durante a furação, o que resulta na quebra da ferramenta, provocando assim perdas no processo e conseqüente baixa de produtividade. Outro inconveniente é quanto o recolhimento deste cavaco, pois ocupa um grande volume, o que dificulta sua estocagem e transporte.

A adição do bismuto neste aço visa principalmente modificar o tipo de cavaco formado, minimizando assim os problemas anteriormente descritos. Outro ganho esperado decorrente da adição do bismuto é a redução do desgaste de ferramenta durante o processo de furação. Contudo, o Bi provoca a fragilização do material tornado-se crítico para defeitos superficiais. Desta forma, é importante conhecer a quantidade mínima de bismuto que deve ser adicionada para melhorar a usinabilidade do aço sem prejudicar sua qualidade superficial.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram produzidas três corridas, com composição química previamente definida. Na primeira corrida, foi produzido aço base, da

qualidade DIN-20MnCr5, sem qualquer modificação. Nas outras duas corridas foram adicionadas diferentes quantidades de bismuto objetivando concentrações de 0,02% e 0,04%, valores objetivados de forma aleatória. A faixa de composição química do aço DIN-20MnCr5 pode ser observada na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificação da faixa de composição químicas do aço DIN-20MnCr5 em percentagem de massa (%).

Aço	C	Si	P	S	Mn	Cr
DIN-20MnCr5	0,17-0,22	0,15-0,40	Max. 0,035	Max. 0,035	1,10-1,40	1,00-1,30

Os tarugos, originalmente com seção de 155 mm, foram laminados em barras redondas de bitola 73,03mm, estas então utilizadas nos testes deste trabalho. Com o objetivo de eliminar efeitos de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tenha sido submetido anteriormente, as amostras foram submetidas ao ciclo de normalização na temperatura de 950°C por 1 hora e resfriado na temperatura ambiente. Após o ciclo de normalização foram realizados os ensaios para caracterização microestrutural, análise de inclusões, de tamanho de grão, das propriedades mecânicas e da usinabilidade.

3.2 Análise Química

A análise química foi realizada em corpos de prova de dimensões 20 x 20 x 10 mm em espectrômetro ótico de emissão da marca Thermo ARL modelo 4460. Os elementos carbono e enxofre foram analisados no equipamento marca Leco a partir de limalhas obtidas desses corpos

3.3 Caracterização Microestrutural

Para cada material foram analisadas três amostras escolhidas aleatoriamente. As foram preparadas utilizando procedimentos usuais de metalografia e atacadas com reagente Nital 2% para observação da microestrutura em microscópio óptico. As imagens foram captadas através de software de aquisição de imagens.

Para isso, primeiramente as amostras foram cortadas na seção transversal como mostra a figura 3.3, embutidas à quente em resina de poliestireno e devidamente identificadas. Após as amostras foram preparadas com lixas de granulometria 80, 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200 e posteriormente polidas com alumina de $0,3\ \mu\text{m}$, e por último para melhor acabamento, foram polidas novamente com pasta de diamante de $1\ \mu\text{m}$. Por fim, as amostras foram atacadas com reagente químico Nital 2% e analisadas nas regiões de núcleo, meio raio e periferia para identificar as fases presentes.

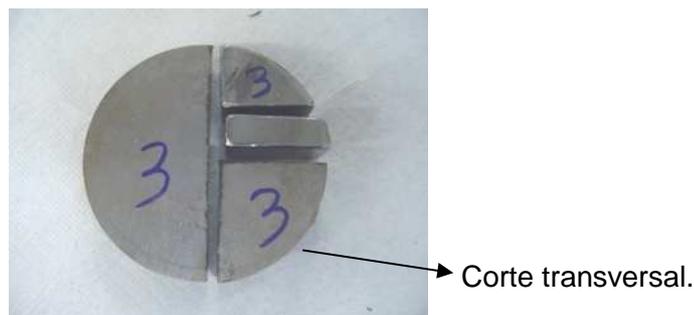


Figura 3.3 Seção de corte das amostras

3.4 Análise de Inclusões

O estado microinclusionário foi realizado segundo a norma ASTM E45 utilizando o Método A, para sulfetos, óxidos globulares, alumina e silicatos. As amostras foram cortadas na seção longitudinal, conforme figura 3.4, e temperadas em óleo (930°C). A preparação das amostras foi feita com lixas de granulometria 320 e 600 e polimento com pasta de diamante de $6, 3$ e $1\ \mu\text{m}$.

As imagens foram feitas utilizando-se um microscópio Olympus bx60m na magnificação $100\times$ e o software analisador de imagens “Leica QWin Pro”. Foram avaliados o comprimento total e o comprimento médio das inclusões nas regiões do núcleo, meio raio e periferia como mostra a figura 3.4.

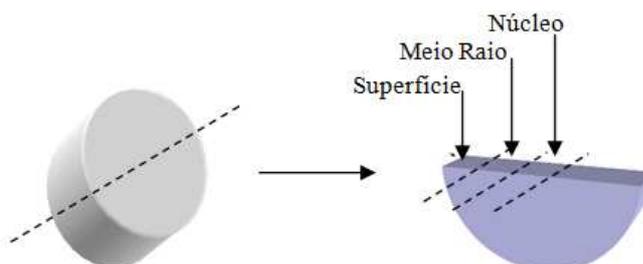


Figura 3.4 Esquema de captura de imagens na seção longitudinal para análise de inclusões.

Para quantificar as microinclusões foi usado o software analisador de imagens “Image Tool”. Foram avaliadas 90 regiões, conforme o esquema mostrado na figura 3.5. A calibração do software foi realizado com a obtenção da imagem de uma escala de 1 mm, na magnificação de 100x.

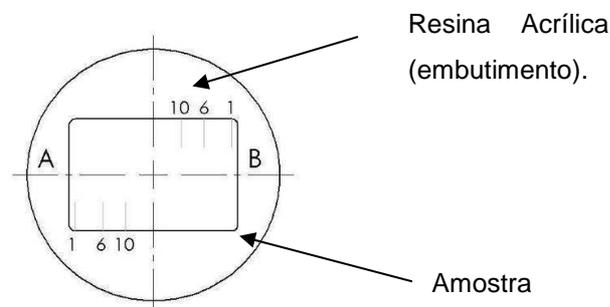


Figura 3.5 Esquema de captura das imagens.

As imagens foram obtidas a distâncias de 1 mm, 6 mm e 10 mm da aresta de ambos os lados, A e B, sendo A, a região do núcleo e B a periferia. Em cada distância do lado A ou B foram analisadas 15 regiões percorrendo toda a área referente a cada distância.

O método microanalítico com microsonda EDX – Oxford foi usado para caracterizar a forma de precipitação das inclusões de bismuto.

3.5 Tamanho de Grão

Para a revelação do tamanho de grão austenítico foi utilizado o método planimétrico e a classificação conforme a norma ASTM E112. As amostras foram tratadas termicamente em um forno a 950°C, lixadas polidas e atacadas com reagente Picral, a pós o preparo, as amostras foram então caracterizadas utilizando o software analisador de imagens “Leica QWin Pro”.

O método planimétrico envolve a contagem do número de grãos dentro de uma área conhecida. O número de grãos por unidade de área é usado para determinar o número grãos por unidade de área.

3.6 Propriedades Mecânicas

Foram realizados os ensaios mecânicos com o objetivo de verificar se a adição do bismuto altera de forma significativa as características de desempenho do aço. Para esta

verificação foram utilizados aos ensaios de dureza, impacto Charpy, tração e ductilidade à quente. Para os ensaios de dureza, impacto Charpy e tração, foram feitas três repetições para cada amostra, as médias dos resultados foram utilizadas como dado comparativo, para os ensaios de ductilidade à quente foram feitas duas repetições para cada temperatura.

3.6.1 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados utilizando a escala Brinell (HB) e as superfícies dos corpos de prova determinadas de acordo com a norma ASTM E10, utilizado durômetro Wolpert modelo BK 300b HT 2a. A carga utilizada foi de 750 Kg e esfera de 5 mm.

Para cada material foram retiradas 3 amostras onde a dureza foi medida em três posições distintas, conforme esquema mostrado na figura 3.6.

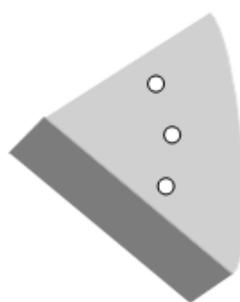


Figura 3.6 Esquema com as posições de medições de dureza na superfície das amostras

3.6.2 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto Charpy foi realizado utilizando corpos de prova com entalhe em U de 5 mm de profundidade (figura 3.7) na temperatura de 25°C como determinado pela norma NBR 6157 (ABNT, 1980).

Foram preparados três corpos de prova, retirados da posição meio raio das barras laminadas, sendo o plano de fratura transversal à direção de laminação.

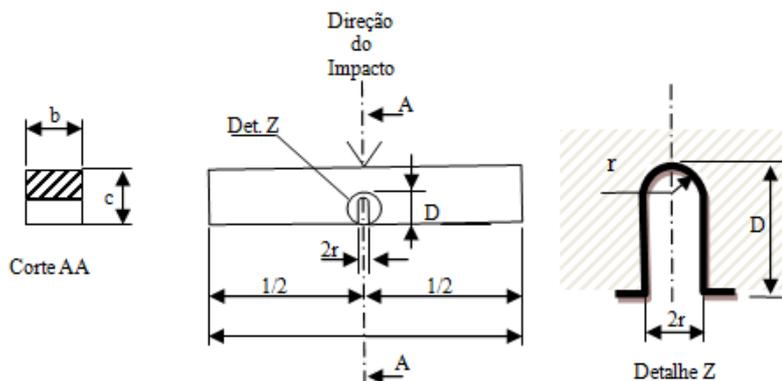


Figura 3.7 Corpo de prova com entalhe em U e 5 mm de profundidade (NBR 6157, ABNT 1980).

3.6.3 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM E8M para determinar o limite de escoamento, a redução de área, o alongamento e o limite de resistência. Para este ensaio foi utilizada uma máquina de Ensaio Universal Instron com capacidade de 60 toneladas.

Os corpos de prova para o ensaio de foram retirados na posição de meio raio das barras e após, usinados, conforme mostra a figura 3.8

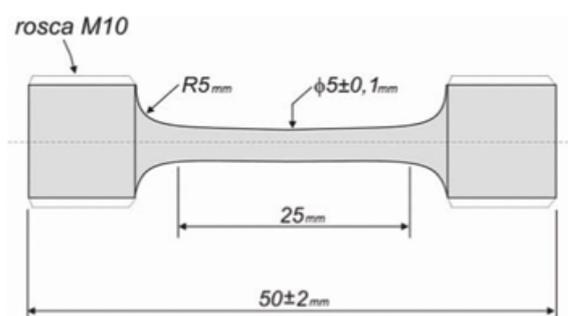


Figura 3.8 Esquema ilustrativo dos corpos-de-prova conforme instruções na norma ASTM E 8M. (15)

3.6.4 Ensaio de Ductilidade à Quente

O ensaio foi realizado com o módulo fixo e de tração do simulador termomecânico Gleeble 3500.

- ◆ **Módulo fixo** – módulo ao qual acopla-se um dos outros dois módulos, de tração ou compressão, de acordo com o ensaio a ser realizado. Abriga os atuadores hidráulicos, pneumáticos e elétricos, sendo controlado a partir do painel de controle digital;
- ◆ **Módulo de tração** – módulo capaz de abrigar montagens e ferramentas voltadas para testes que envolvem esforço de tração ou tratamentos térmicos.
- ◆ **Módulo de compressão** – módulo capaz de realizar ensaios de compressão.

Quanto ao sistema de aquecimento das amostras, o simulador trabalha com a passagem de corrente elétrica no corpo de prova. O corpo de prova (figura 3.9) é retificado para obter melhor precisão dimensional, também desta forma evitar imperfeições na sua superfície, o que poderia afetar o ensaio.

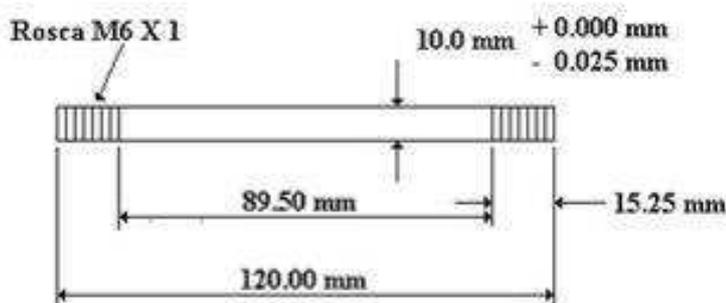


Figura 3.9 Esquema do corpo-de-prova utilizado no ensaio de ductilidade a quente.

A montagem utilizada para ensaios de tração é apresentada na figura 3.10. Durante os ensaios, o esforço e o aquecimento ocorrem somente na região central do corpo de prova. O termopar, para controle de temperatura, é soldado na região central da amostra e o conjunto é posicionado na câmara de vácuo do simulador termomecânico.

Para obtenção dos dados de deformação, é utilizado um transdutor durante o ensaio de tração chamado LGage, como ilustrado na figura 3.11. Este sensor permite medidas precisas do deslocamento durante o ensaio de tração.

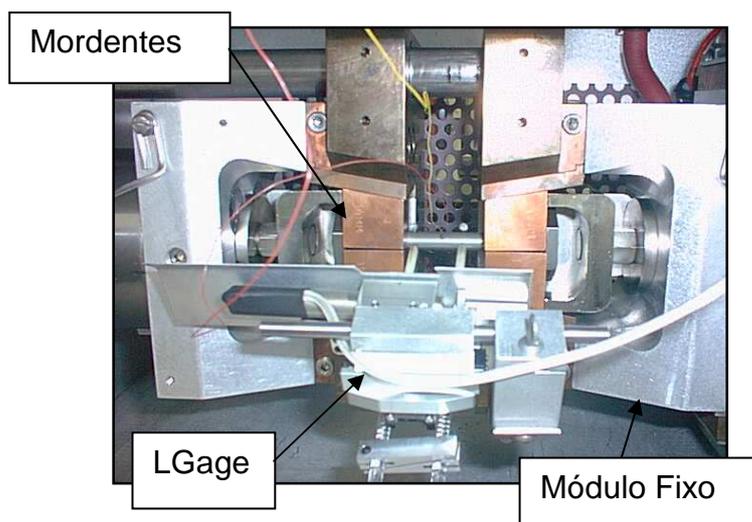


Figura 3.10 Esquema da montagem para ensaio de tração.

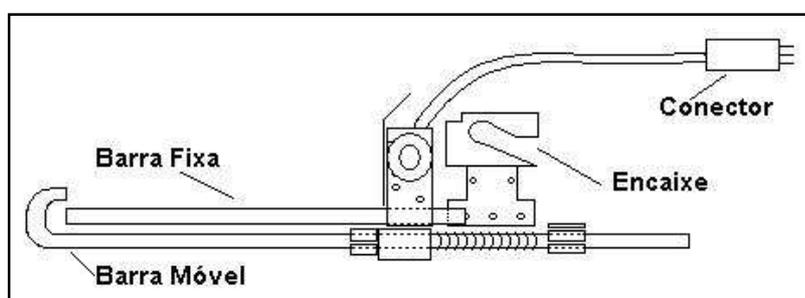


Figura 3.11 Sensor de deslocamento da amostra (LGage).

Os parâmetros da simulação foram definidos com base nas condições mais críticas do processo de laminação, o desbaste, pois é nesta etapa do processo que temos as menores taxas de deformação. Para a realização dos testes, todas as amostras sofreram o mesmo ciclo (figura 3.12) de aquecimento, a uma taxa de $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, da temperatura ambiente até a temperatura de 1300°C , que simula a temperatura máxima de laminação. Em seguida, as amostras permaneceram por 1 minuto nesta temperatura. Após, a temperatura foi reduzida, também a uma taxa de $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, até a temperatura de realização do ensaio de tração. A taxa de deformação utilizada foi de 5 s^{-1} , até o rompimento.

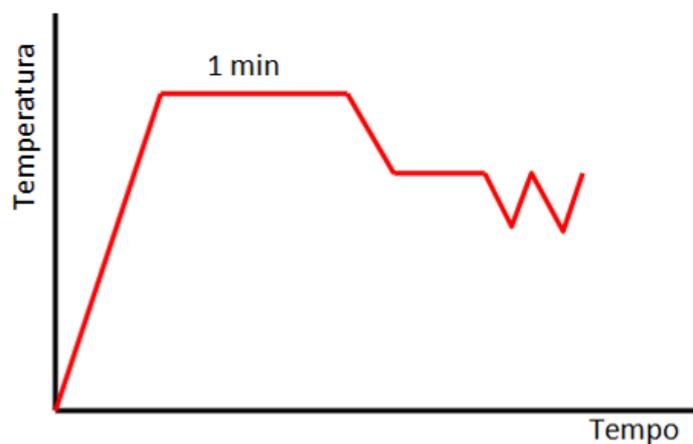


Figura 3.12 Representação do ciclo realizado no teste.

Os testes foram realizados em uma faixa de temperatura compreendida entre 900°C e 1250°C, com intervalos de temperatura de 50°C. Para cada temperatura, realizaram-se no mínimo dois testes. As medidas dimensionais foram realizadas com paquímetro digital.

3.7 Usinabilidade

Para avaliar a usinabilidade dos materiais, realizaram-se ensaios de torneamento para determinação do coeficiente volumétrico do cavaco, uma vez que se trata de uma característica fundamental nos processos de usinagem, e para determinar o índice de usinabilidade dos materiais, foram realizados ensaios de furação avaliando-se o desgaste de flanco.

3.7.1 Ensaio de Cavaco

Os ensaios de cavaco consistiram no registro da forma dos cavacos através de fotografias e do cálculo do seu coeficiente volumétrico. O equipamento empregado para estes ensaios foi o torno Romi IH-40, o qual apresenta um variador de frequência, para a manutenção da velocidade de corte. Antes de iniciar o ensaio foi executado um passe de 2 mm para a remoção de carepa e para a uniformização do diâmetro. O coeficiente volumétrico (C_v) foi calculado segundo a equação 4.

Os parâmetros de corte empregados para os ensaios foram velocidade de corte de 150 m/min, profundidade de corte de 2 mm e avanços de 0,066, 0,102, 0,205 e 0,336

mm/rot. As medições para cada avanço foram feitas três vezes. O volume do cavaco foi medido com uma proveta graduada, sendo o cavaco não compactado mecanicamente.

3.7.2 Ensaio de Desgaste

Inicialmente cada barra possuía 73,03 mm de diâmetro e foi seccionada no comprimento de 88 mm. O equipamento empregado para estes ensaios foi o centro de usinagem Romi Polaris V400. Cada amostra foi posicionada em uma placa autocentrante e teve a sua superfície superior faceada por fresamento para permitir o perpendicularismo com as brocas empregadas.

A seguir foi executada a seqüência de furação. O processo de furação foi feito em três regiões distintas permitindo que os dados pudessem ser avaliados no núcleo, meio raio e periferia. O diâmetro das amostras permitiu que em cada seção fossem feitos 4 furos ao núcleo, 10 ao meio raio e 14 na periferia. Os furos foram equidistantes circunferencialmente. Os furos ao núcleo distavam 8 mm do centro da amostra, enquanto os de meio raio e periferia distavam 19 e 30 mm, respectivamente. Na figura 3.13 é possível observar a distribuição dos furos na seção transversal, cada amostra com 73,03 mm de diâmetro.



Figura 3.13 Distribuição de furos na seção transversal.

A seguir, foi executado o ensaio para a determinação do índice de usinabilidade, para isso utilizou-se a curva de desgaste de ferramenta. Empregaram-se brocas de aço rápido helicoidais tipo A100, com 10 mm de diâmetro, construídas de acordo com a DIN 338, ângulo de ponta de 118°. Os parâmetros de corte empregados nesta etapa dos ensaios estão listados na tabela 3.2:

Tabela 3.2: Parâmetros de corte empregados

PARÂMETRO	VALOR
Velocidade de corte	20 m/min (640 RPM)
Tipo de Furação	Furação em cheio (sem pré-furo)
Velocidade de avanço	64 mm/min
Profundidade furada	71 mm
Fluido de corte	Não utilizado

Após cada passe, foi medido o desgaste de flanco VBb baseado no norma ISO 3685/1993 nas duas arestas, com o microscópio de medição Mitutoyo, utilizando-se a média como resultado. Inicialmente, o ensaio com cada broca foi conduzido até que a ferramenta apresentasse o desgaste de flanco VBb de 0,3 mm ou a ferramenta apresentasse colapso, o que ocorresse primeiro. Entretanto, foi constatado que a taxa de desgaste nas amostras 1-Bi e 2-Bi era muito menor, resultando em falta de matéria prima, assim o critério de desgaste de 0,2 mm foi estabelecido para todos os ensaios.

O índice foi calculado utilizando a equação 5. (13)

$$IU = \frac{C_{mp}}{C_m} \quad \text{equação (5)}$$

Onde IU é o índice de usinabilidade, C_{mp} representa o comprimento médio furado para a amostra padrão (0-Bi) e C_m o comprimento médio furado para as amostras 1-Bi e 2-Bi.

3.7.3 Ensaio de Campo

Os testes foram realizados em uma empresa ligada ao mercado de autopeças que produz esferas para articulações, conforme descrito do item 3.1.

A realização dos testes consistiu em verificar o desempenho do aço DIN-20MnCr5 sem bismuto e o mesmo aço com 0,016% de bismuto, produzido especialmente para a realização deste ensaio.

O desempenho do material foi avaliado através da forma do cavaco gerado durante a usinagem e o desgaste de ferramenta, sendo este último representado pelo número de peças produzidas por aresta de ferramenta. Para a fabricação destas peças o material passa por várias etapas de usinagem sendo utilizados os processos de furação e torneamento. As ferramentas, insertos e parâmetros utilizados estão apresentados na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Ferramentas, insertos e parâmetros utilizados na fabricação de esferas de articulação.

FERRAMENTAS	INSERTO	NUM. ARESTAS	Velocidade de corte (vc) m/min	Avanço (F) mm/rpm
Broca T.máx Ø19,00	16481657 (880- 03-03 05H-C) Sandvik	4	150	0,22
Broca T.máx Ø19,0	16481654 (880- 03-03 W06H-P) Sandvik	4	150	0,22
Ferramenta torneiar interno	CPMH090308HQ Kyocera	2	180	0,27
Ferramenta Acabamento	TNMG160412CQ Kyocera	6	Não informado	Não informado
Ferramenta de desbaste	SNMG 120408XS Kyocera	8	Não informado	Não informado
Ferramenta Acabamento	16490048 (DNMG150608- PF Sandvik)	4	310	0,45
Ferramenta de desbaste	DNMG 160612CQ Kyocera	4	350	0,4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Análise Química

O primeiro material foi chamado de aço 0-Bi, é o aço base, sem qualquer adição de bismuto. O segundo aço, 1-Bi, contém um valor intermediário de bismuto (0,026%) e o terceiro aço, 2-Bi, então, apresenta a maior concentração de bismuto (0,046%). Todos os tarugos envolvidos no estudo foram inspecionados antes de seguirem para a etapa de laminação. A composição química dos materiais pode ser observada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição químicas dos aços testados em percentagem de massa (%).

<i>Aço</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Al</i>	<i>N</i>	<i>Bi</i>
0-Bi	0,19	0,37	0,029	0,021	1,16	1,05	0,025	0,0103	0,000
1-Bi	0,19	0,31	0,029	0,023	1,20	1,08	0,022	0,0083	0,026
2-Bi	0,19	0,25	0,026	0,017	1,27	1,13	0,023	0,0064	0,046

4.2 Caracterização Microestrutural

A microestrutura do material é de suma importância, tendo em vista que a mesma está correlacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas da peça. Ela é um importante fator de influência na usinabilidade em função da possibilidade da transformação da microestrutura do aço ou ferro fundido sem alteração da composição química. (13)

Os microconstituintes alteram as características de ductilidade e de fragilidade em função da sua presença, quantidade e forma, promovendo diferentes condições de quebra de cavaco, abrasividade, força e temperatura de corte.

A presença de fases aciculares tipo bainita e martensita, em função do efeito extremamente abrasivo, também são indesejáveis na usinagem (1). A cementita é uma fase também abrasiva, pois é um carboneto (Fe_3C), partículas extremamente duras, o que reduz e vida de ferramenta.

A microestrutura dos três diferentes aços estudados foi analisada. Utilizando o método comparativo, todas as peças apresentaram a presença de ferrita e perlita, sendo 40% de perlita e 60% de ferrita. A variação transversal da microestrutura foi pequena, conforme mostram as figuras 4.1 a 4.3.

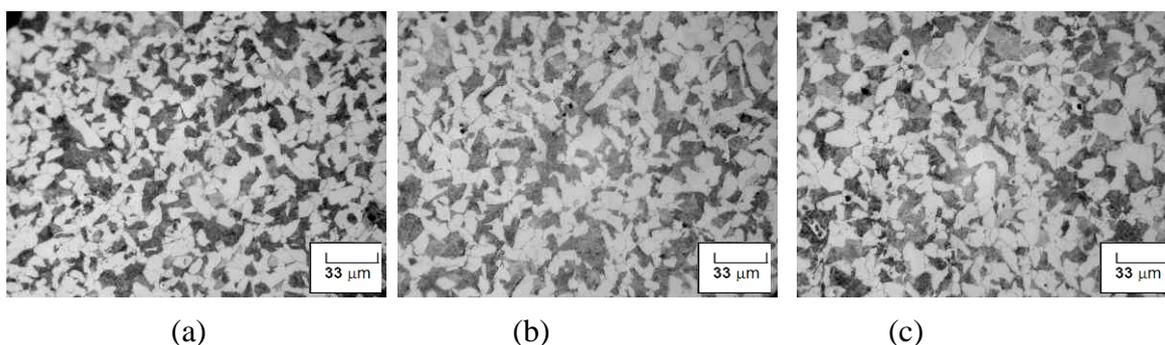


Figura 4.1 Amostra 0-Bi, seção transversal, mostrando a presença de ferrita e perlita. Posição: periferia (a) e meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica. Ataque Nital 2%.

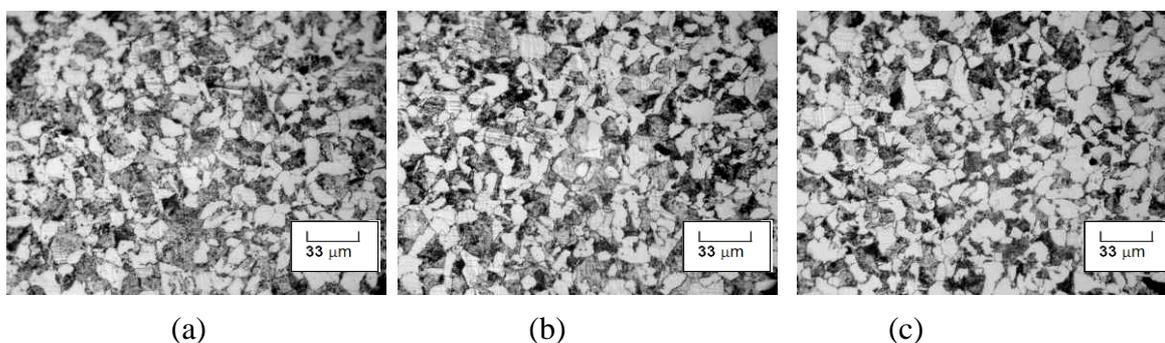


Figura 4.2 Amostra 1-Bi, seção transversal, mostrando a presença de ferrita e perlita. Posição: periferia (a) e meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica. Ataque Nital 2%.

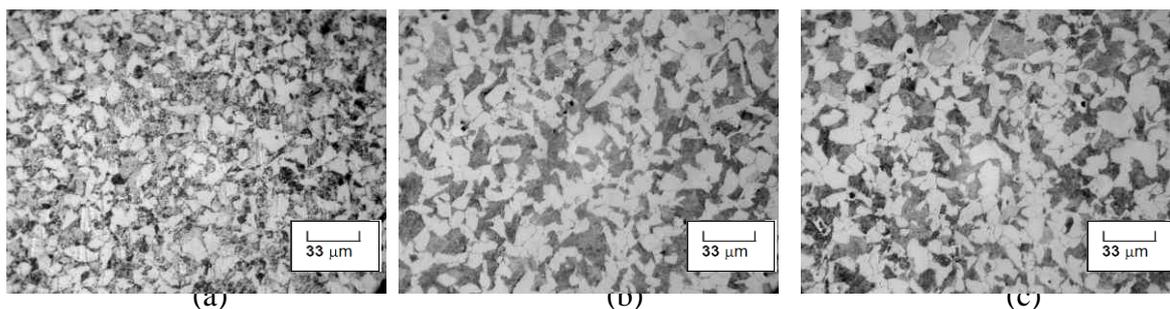


Figura 4.3 Amostra 2-Bi, seção transversal, mostrando a presença de ferrita e perlita. Posição: periferia (a) e meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica. Ataque Nital 2%.

Como verificado em estudos internos realizados em usina de aços especiais, em função da sua composição química, o aço DIN-20MnCr5 possui alta temperabilidade, o que significa que existe a possibilidade de ocorrer à presença de estrutura bainítica e mesmo martensítica em peças sem qualquer tratamento térmico. Como este trabalho visa avaliar somente a influência do bismuto sobre a usinabilidade do aço, para efeito comparativo, é conveniente que as peças tenham microestruturas iguais ou semelhantes.

4.3 Análise de Inclusões

Os materiais ensaiados foram caracterizados para avaliação microinclusionária. Os resultados para sulfetos, aluminatos e óxidos nas regiões de núcleo, meio raio e periferia, estão apresentados nas tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2: Classificação de inclusões segundo a norma ASTM E45A para as regiões núcleo, meio raio e periferia.

Conforme ASTM E45A			
Aço	Núcleo	1/2 Raio	Periferia
0-Bi	A2,5F;D1F	A1,5F;D1F	A0,5F;D1F
1-Bi	A2,5F;D1F	A2FD1F	A0,5F;D1F
2-Bi	A3F;D1F	A2,5F;D1F	A1F;D1F

Tabela 4.3: Comprimento, tamanho de inclusões segundo a norma ASTM E45A para as regiões núcleo, meio raio e periferia

Aço	Comprimento total em inclusões (μm)			Comprimento médio unitário das inclusões (μm)			Desvio padrão do comprimento médio unitário (μm)		
	Núcleo	1/2 Raio	Periferia	Núcleo	1/2 Raio	Periferia	Núcleo	1/2 Raio	Periferia
0-Bi	799	330	78	36	47	26	20,0	27,2	1,6
1-Bi	830	616	103	31	39	26	11,6	23,6	4,3
2-Bi	913	699	175	48	39	35	22,4	22,4	9,1

Foi verificado que o desvio padrão da variável analisada é elevado nas regiões entre núcleo e meio raio devido à grande heterogeneidade das dimensões das inclusões em todos os materiais analisados. Na região da periferia, observa-se que o desvio padrão é significativamente inferior aos encontrados entre núcleo e meio raio.

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6, apresentam o campo microinclusionário característico de cada material, onde foi verificado a grande dispersão de dimensões entre as microinclusões.

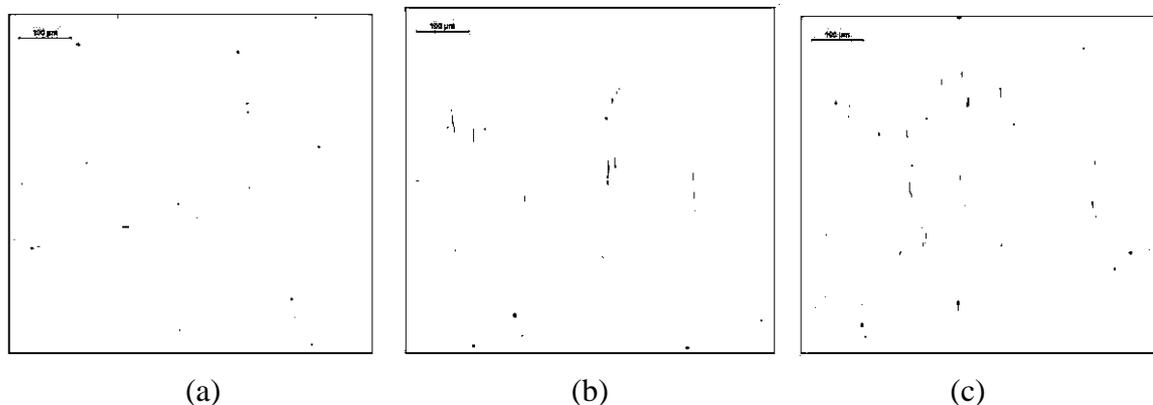


Figura 4.4 Amostra 0-Bi, seção longitudinal, mostrando a presença de microinclusões tipo sulfetos, aluminatos e óxidos. Posição: periferia (a), meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica.

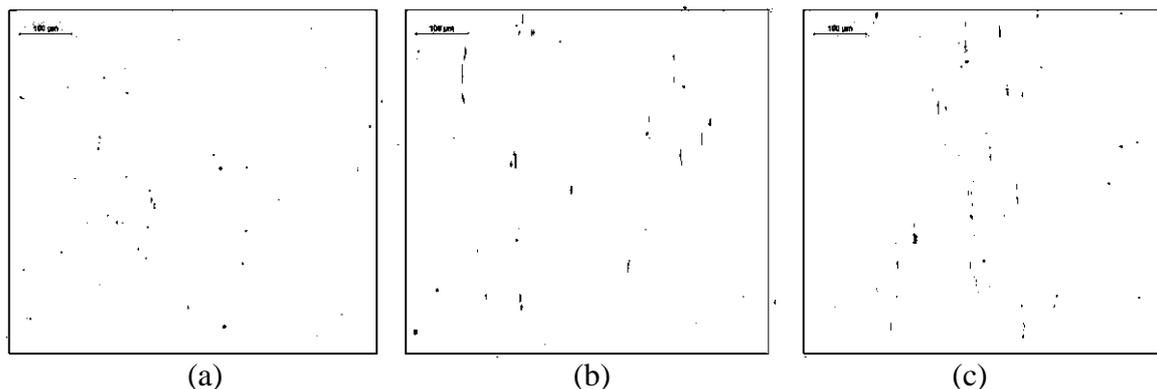


Figura 4.5 Amostra 1-Bi, seção longitudinal, mostrando a presença de microinclusões tipo sulfetos, aluminatos e óxidos. Posição: periferia (a), meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica.

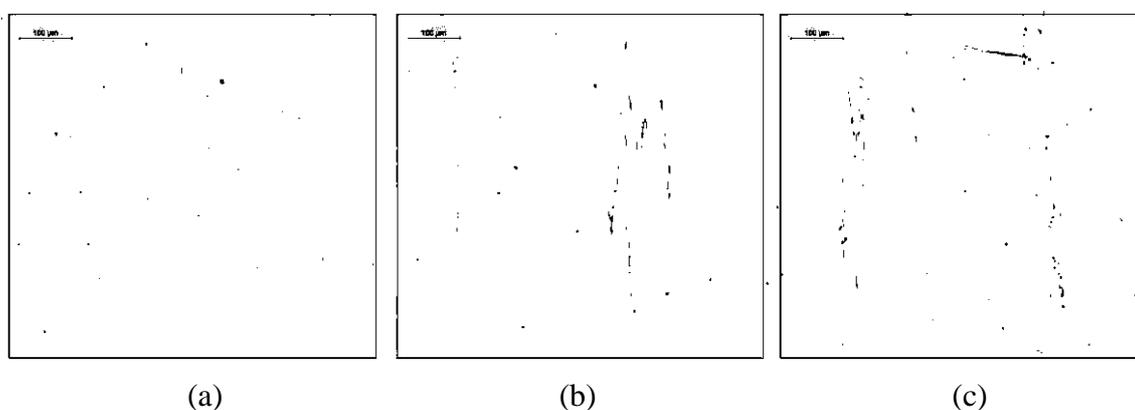


Figura 4.6 Amostra 2-Bi, seção longitudinal, mostrando a presença de microinclusões tipo sulfetos, aluminatos e óxidos. Posição: periferia (a), meio raio (b) e núcleo (c). Microscopia ótica.

As tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 mostram os resultados quantitativos de microinclusões nas distâncias de 1mm, 6mm e 10 mm da aresta sendo que 1A, 6A e 10A correspondem à região do núcleo e 1B, 6B e 10B a periferia.

Tabela 4.4: Parâmetros estatísticos da quantificação de inclusões por imagem do aço 0-Bi.

Posição	1A	6A	10A	10B	6B	1B
Posição (mm da periferia)	37,1	32,1	28,1	10	6	1
Área média das inclusões (μm^2)	4,6	5,3	7,0	6,2	6,6	4,4
Desvio padrão da área média (μm^2)	13,5	12,0	15,9	14,0	12,3	10,6
Maior valor de área (μm^2)	262,1	153,1	239,1	125,3	124,4	161,6
Menor valor de área (μm^2)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
% de área ocupada por inclusões	0,14	0,12	0,07	0,05	0,03	0,02
Número de objetos inclusões	2374	1816	769	664	309	355

observadas						
Área das inclusões (μm^2)	Frequência					
Até 10	2118	1548	625	548	244	306
Até 20	121	148	79	74	38	38
Até 30	55	58	27	18	15	8
Até 40	29	30	16	3	5	1
Até 50	17	8	6	2	2	0
Até 60	5	7	5	10	2	1
Até 70	5	3	5	4	1	0
Até 80	4	3	1	2	1	0
Até 90	7	2	1	2	0	0
Até 100	3	2	0	0	0	0
Até 110	3	3	0	0	0	0
Até 120	2	1	1	1	0	0
> 120	5	3	3	2	1	1

Tabela 4.5: Parâmetros estatísticos da quantificação de inclusões por imagem do aço 1-Bi.

Posição	1A	6A	10A	10B	6B	1B
Posição (mm da periferia)	37,1	32,1	28,1	10	6	1
Área média das inclusões (μm^2)	12,2	20,2	5,1	7,8	9,5	6,4
Desvio padrão da área média (μm^2)	30,0	31,0	16,1	18,2	19,5	19,3
Maior valor de área (μm^2)	376,6	246,4	222,5	215,5	152,4	225,1
Menor valor de área (μm^2)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
% de área ocupada por inclusões	0,10	0,08	0,10	0,06	0,04	0,03
Número de objetos inclusões observadas	661	326	1546	576	288	309
Área das inclusões (μm^2)	Frequência					
Até 10	480	480	1352	465	219	262
Até 20	66	66	75	50	30	26
Até 30	36	36	47	19	16	10
Até 40	23	23	27	13	4	4
Até 50	13	13	9	8	7	0
Até 60	11	11	11	6	2	1
Até 70	6	6	6	4	2	2
Até 80	7	7	5	5	0	1
Até 90	3	3	2	2	4	1
Até 100	5	5	3	1	2	0
Até 110	1	1	1	0	1	0
Até 120	1	1	1	0	0	0
> 120	9	9	7	3	1	2

Tabela 4.6: Parâmetros estatísticos da quantificação de inclusões por imagem do aço 2-Bi.

Posição	1A	6A	10A	10B	6B	1B
Posição (mm da periferia)	37,1	32,1	28,1	10	6	1
Área média das inclusões (μm^2)	14,5	11,7	12,1	3,4	5,8	4,1

Desvio padrão da área média (μm^2)	25,7	28,6	51,8	6,4	16,1	8,6
Maior valor de área (μm^2)	199,2	396,0	1301,1	52,5	177,6	89,9
Menor valor de área (μm^2)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
% de área ocupada por inclusões	0,05	0,08	0,16	0,02	0,03	0,02
Número de objetos inclusões observadas	293	555	1032	409	386	422
Área das inclusões (μm^2)	Frequência					
Até 10	176	397	817	375	334	370
Até 20	52	67	83	18	33	30
Até 30	27	38	46	9	6	14
Até 40	13	23	30	5	5	2
Até 50	10	6	11	1	2	4
Até 60	1	5	7	1	1	1
Até 70	3	7	7	0	0	0
Até 80	1	3	5	0	1	0
Até 90	3	0	4	0	0	1
Até 100	0	1	3	0	0	0
Até 110	1	1	2	0	0	0
Até 120	1	1	1	0	2	0
> 120	5	6	16	0	2	0

A maior concentração de microinclusões, para todas as amostras, foi encontrada na região núcleo, isto mostra uma distribuição heterogênea de microinclusões na matriz do aço, o que influencia nos resultados de usinabilidade.

A maior parte das microinclusões encontradas apresentou até $10 \mu\text{m}^2$ de área, consideravelmente pequenas. Inclusões com áreas maiores que $50 \mu\text{m}^2$ estão presentes em pequena quantidade.

Para a caracterização da precipitação do bismuto no aço em estudo, foi realizada, com auxílio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Através de análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDX) caracterizou-se as inclusões de coloração escura como sulfeto de manganês e as inclusões de coloração branca como bismuto.

As imagens obtidas nestas análises, nas regiões de núcleo, meio raio e periferia podem ser observadas nas figuras de 4.7 a 4.12.

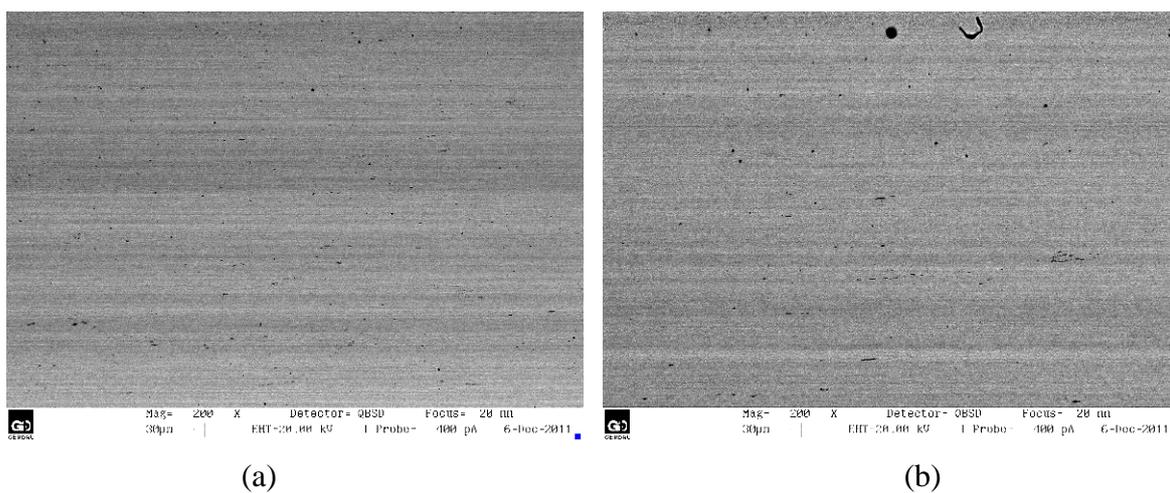


Figura 4.7 Amostra 0-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: periferia (a) e meio raio (b).

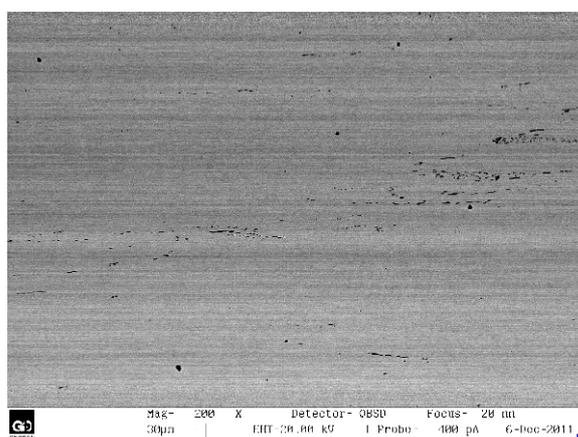


Figura 4.8 Amostra 0-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: núcleo

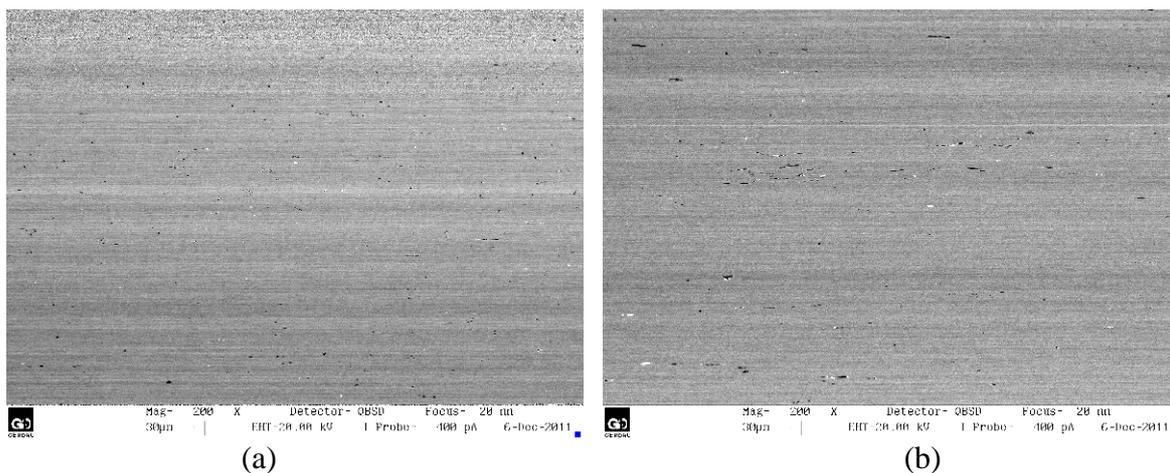


Figura 4.9 Amostra 1-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: periferia (a) e meio raio (b).

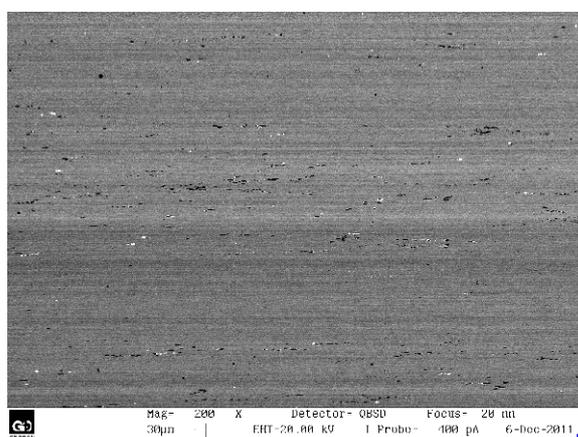


Figura 4.10 Amostra 1-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: núcleo

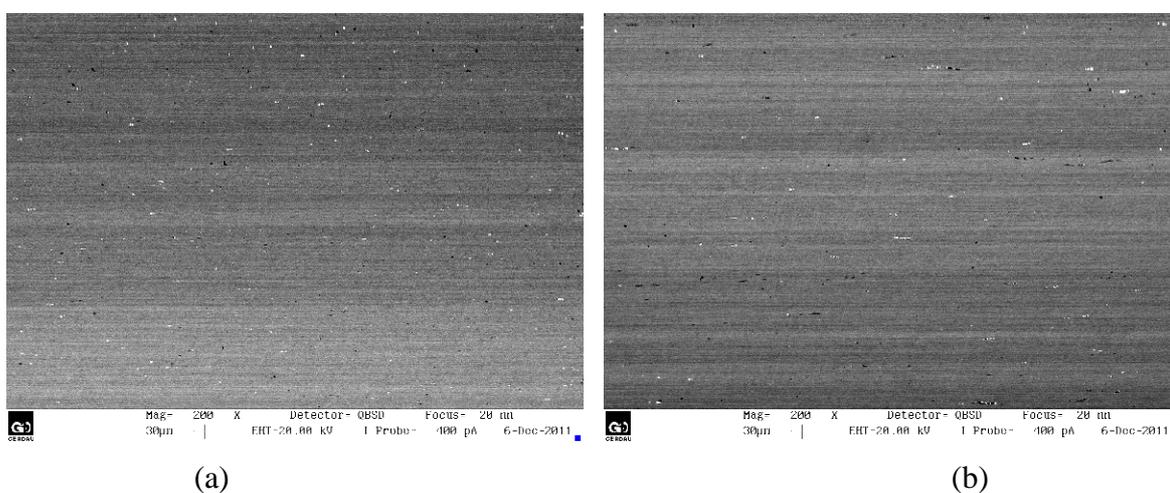


Figura 4.11 Amostra 2-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: periferia (a) e meio raio (b).

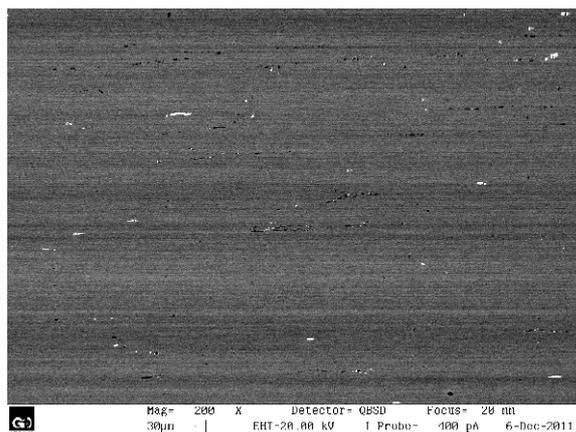


Figura 4.12 Amostra 2-Bi, seção longitudinal mostrando a presença de microinclusões. Posição: núcleo

Ampliando uma região onde verificamos a presença as inclusões de sulfetos de manganês e bismuto (figura 4.13), a fim de facilitar a observação, percebe-se que a precipitação do bismuto, em acordo com a literatura (3), ocorreu de forma isolada ou envolvendo o MnS.

As inclusões de bismuto quando acopladas ou envolvendo o MnS agem de forma a restringir a deformação do MnS fazendo com que assumam uma forma mais arredondada, porém nem todos os sulfetos apresentam-se acoplados ou envelopados pelo bismuto.

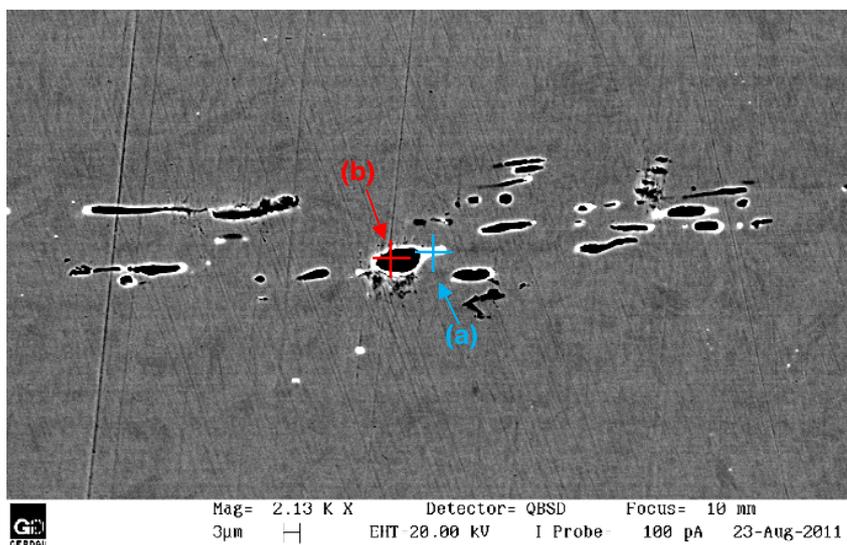


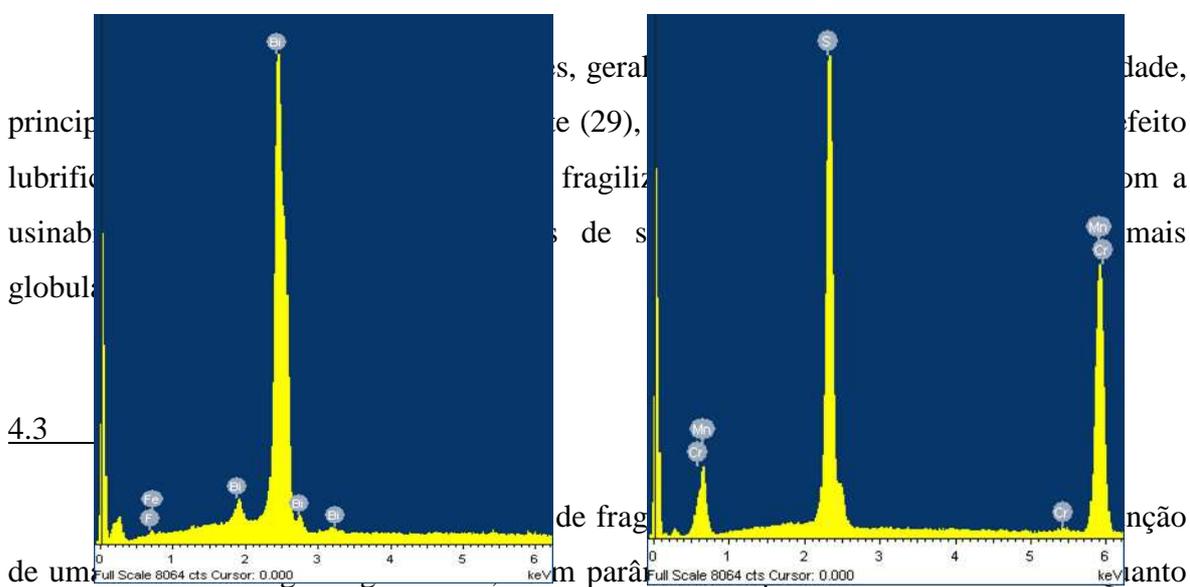
Figura 4.13 Inclusões metálicas de bismuto encapsulando o sulfeto de manganês ou isoladas no aço 20MnCr5.

As letras “a” e “b”, presentes na figura 4.13, indicam onde foram realizadas as análises por EDS (figura 4.14) comprovando que as inclusões de bismuto são observadas com coloração branca e os sulfetos de coloração escura.

(a)

(b)

Figura 4.14 Resultados da análise por EDS.



mais refinada a estrutura, menores são as fronteiras intergranulares e maiores são os contatos de natureza química e eletrostática, melhorando o comportamento frente às solicitações mecânicas impostas no trabalho de usinagem (2).

As figuras de 4.15 até 4.17 mostram a imagem e a distribuição do tamanho de grão para as amostras.

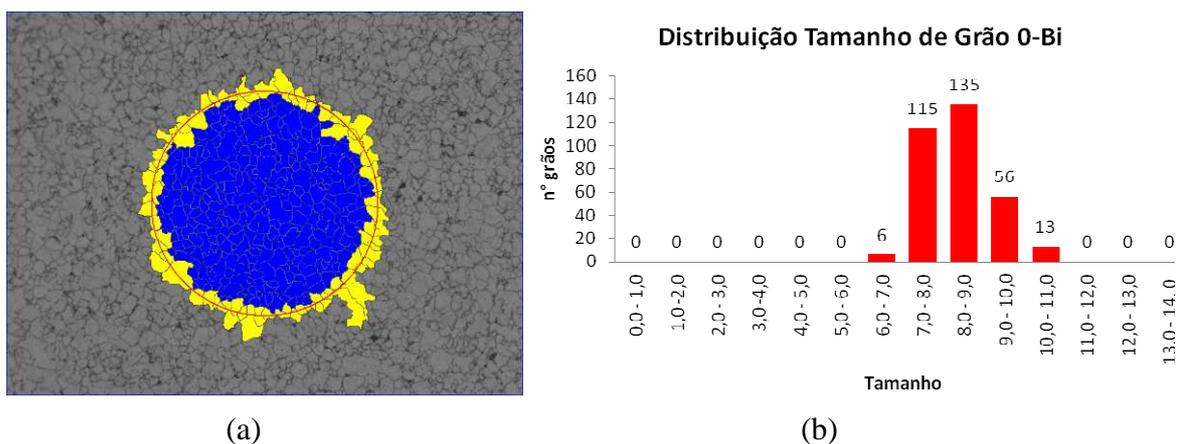


Figura 4.15 Tamanho de grão (a); Distribuição tamanho de grão (b) para aço 0-Bi.

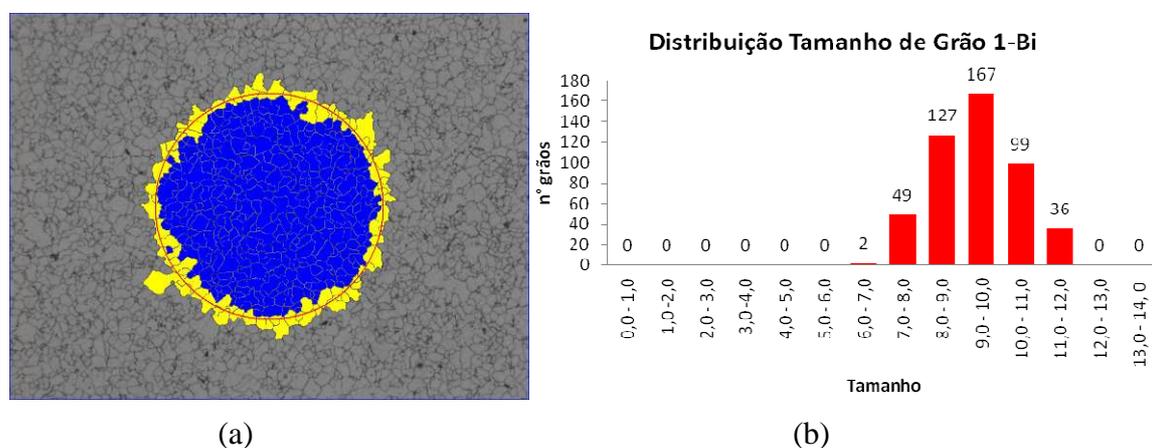


Figura 4.16 Tamanho de grão (a); Distribuição tamanho de grão (b) para aço 1-Bi.

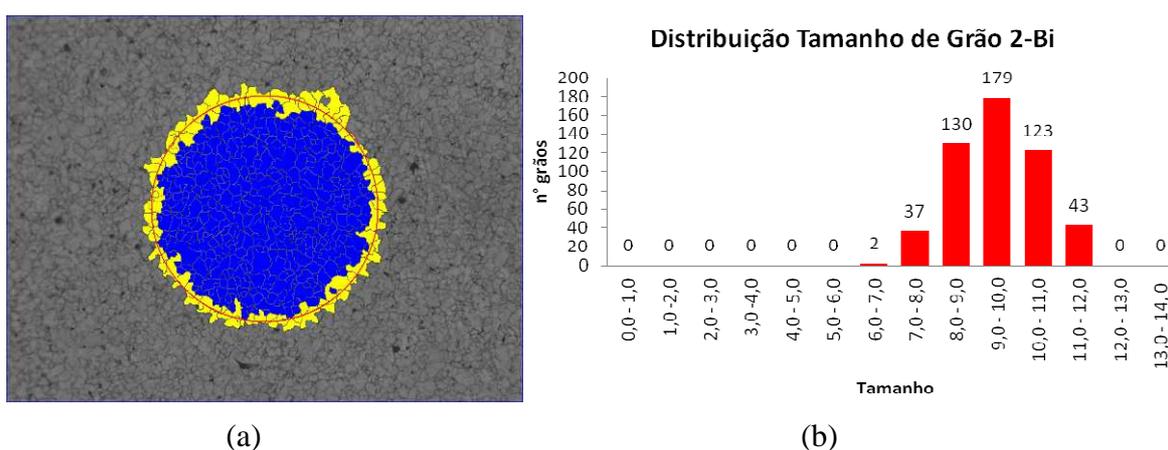


Figura 4.17 Tamanho de grão (a); Distribuição tamanho de grão (b) para aço 2-Bi.

Nos aços 0-Bi, 1-Bi E 2-Bi, o tamanho de grão observado, segundo a norma ASTM E112 foi ASTM 8.5, ASTM 9.0 e ASTM 9.0 respectivamente. Esta variação não é

consideravelmente significativa, consideram-se como grãos finos valores a partir de ASTM 5.0, que é uma estrutura benéfica para a usinabilidade do material.

4.4 Ensaio Mecânicos

4.4.1 Ensaio de Dureza

A dureza exerce uma influência marcante sobre a usinabilidade dos materiais, quanto mais elevada maior o desgaste da ferramenta e a potência empregada para a usinagem (2). Os valores encontrados para a dureza Brinell nas amostras 1-Bi e 2-Bi, ambas com bismuto, foram levemente inferiores ao resultado encontrado para a amostra padrão 0-Bi, conforme mostra a tabela 4.7.

Tabela 4.7: Resultados ensaios de dureza.

	0-Bi			1-Bi			2-Bi		
Amostras	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Dureza (HB)	158	158	155	150	150	149	150	146	152
	155	153	149	148	147	151	151	150	149
	150	148	153	148	148	147	148	152	151
Média	154,3	153,0	152,3	148,7	148,3	149,0	149,7	149,3	150,7
Desvio padrão	4,0	5,0	3,1	1,2	1,5	2,0	1,5	3,1	1,5

Apesar da diferença entre os valores de dureza encontrados sejam pouco significativos para a aplicação do material testado, percebe-se que as amostras com bismuto apresentam valores de dureza inferiores, o que favorece a usinabilidade.

4.4.2 Ensaio de Impacto Charpy

Os resultados para os ensaios de impacto Charpy estão apresentados na tabela 4.8. Valores encontrados na bibliografia, mostram uma perda de energia absorvida de $4,4\text{J/cm}^2$ comparando aços com e sem bismuto e $S=0,025\%$ (3). Para as condições utilizadas neste trabalho nota-se uma redução média de $1,5\text{J/cm}^2$ nos resultados para os aços com bismuto, esta redução não apresenta relevância na aplicação das peças produzidas com o material ensaiado.

Tabela 4.8: Resultados dos ensaios de impacto Charpy.

	Repetições	0-Bi	1-Bi	2-Bi
Impacto Charpy (J/cm ²)	1	42,18	40,22	40,22
	2	40,22	40,22	39,24
	3	42,18	41,20	41,20
	Média	41,86	40,55	40,22
	Desvio padrão	1,13	0,57	0,98

4.4.3 Ensaio de tração

As figuras 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam as curvas tensão-deformação para os três materiais sob estudo. Foram realizadas três repetições para cada material. A tabela 4.9 contém os resultados de todos os ensaios de tração realizados.

Todos os materiais testados possuem limites de escoamento nítidos variando entre 345 e 370 MPa. A resistência à tração varia de 548 a 558 MPa. Pelos resultados apresentados, percebe-se que os três materiais possuem praticamente igual resistência mecânica.

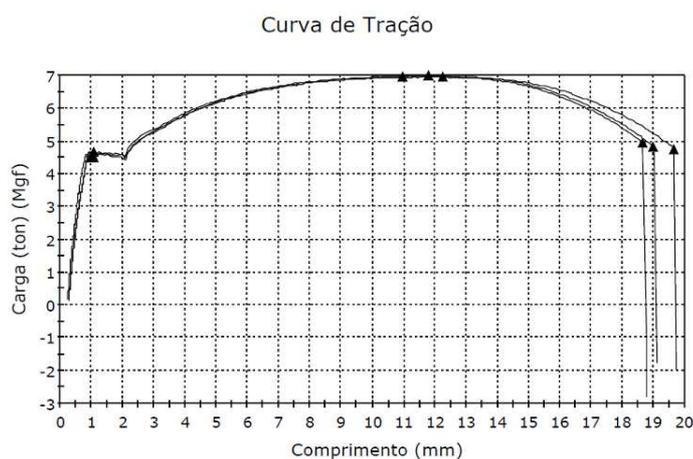


Figura 4.18 Curva Tensão x Deformação para aço 0-Bi.

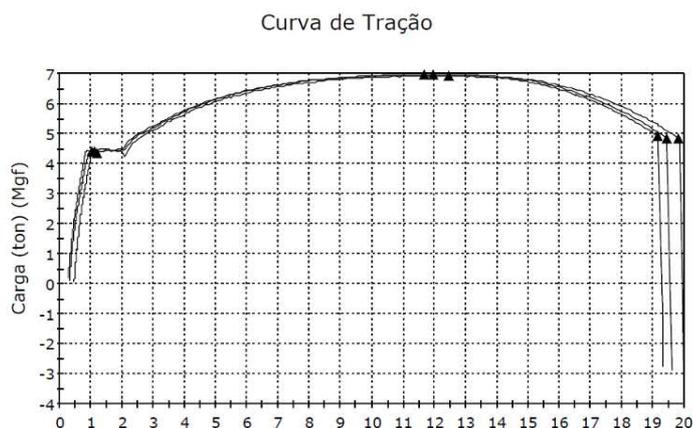


Figura 4.19 Curva Tensão x Deformação para aço 1-Bi.

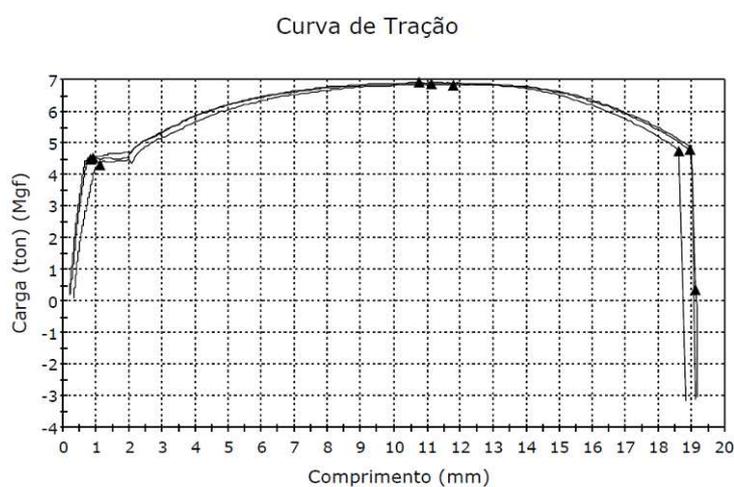


Figura 4.20 Curva Tensão x Deformação para aço 2-Bi.

Nota-se que, para todos os materiais testados, os resultados ficaram dentro dos valores esperados, sem apresentar variação significativa em relação aos valores do material padrão.

Tabela 4.9: Resultados dos ensaios de Tração.

	Repetições	0-Bi	1-Bi	2-Bi
Limite de Escoamento (MPa)	1	371	350	363
	2	360	347	345
	3	360	351	359
	Média	363,67	349,30	355,67

	Desvio	6,35	2,08	9,45
Resistência a Tração (MPa)	1	557	557	555
	2	557	553	548
	3	558	555	551
	Média	557,33	555	551,33
	Desvio	0,58	2,00	3,51
Redução de Área (%)	1	63	64	62
	2	63	63	62
	3	62	62	63
	Média	62,67	63	62,33
	Desvio	58	1,00	0,58
Alongamento (%)	1	30	30	30
	2	31	31	30
	3	29	30	30
	Média	30,00	30,3	30,00
	Desvio	1,00	0,58	0,00

4.4.4 Ensaio de ductilidade à quente

Em acordo com o encontrado na literatura (26) a presença do bismuto no aço provoca uma significativa perda de ductilidade em temperaturas abaixo de 1100°C, o que se intensifica com o aumento da concentração de bismuto no aço, figura 4.21.

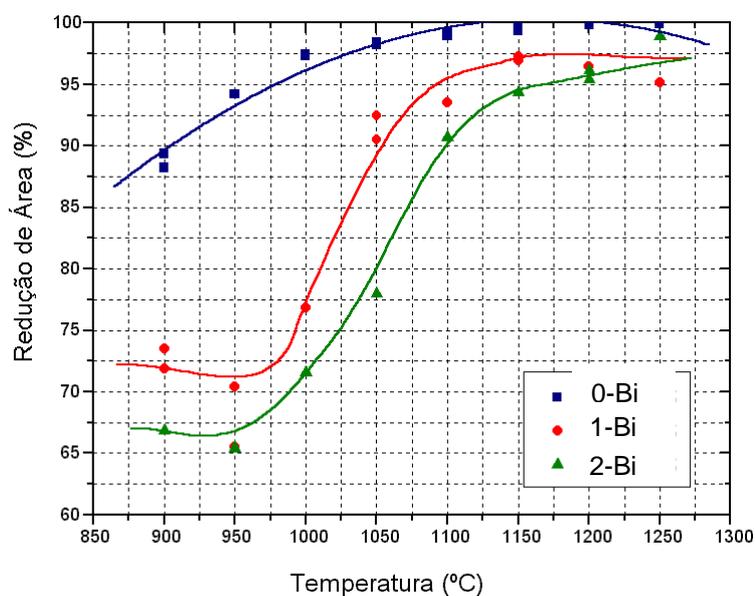


Figura 4.21 Resultados dos ensaios de ductilidade a quente.

A partir de 1100°C, a diferença entre os valores de redução de área das amostras começa a diminuir, alcançando valores superiores a 90%. Processos de conformação abaixo desta temperatura, como alguns passes na laminação a quente, podem ocasionar o surgimento de defeitos superficiais como trincas ou escamas.

A figura 4.22 mostra claramente a redução da ductilidade a quente, representada pelo % redução de área, da esquerda para a direita, com o aumento do teor de bismuto para as temperaturas de 900°C e 1100°C.

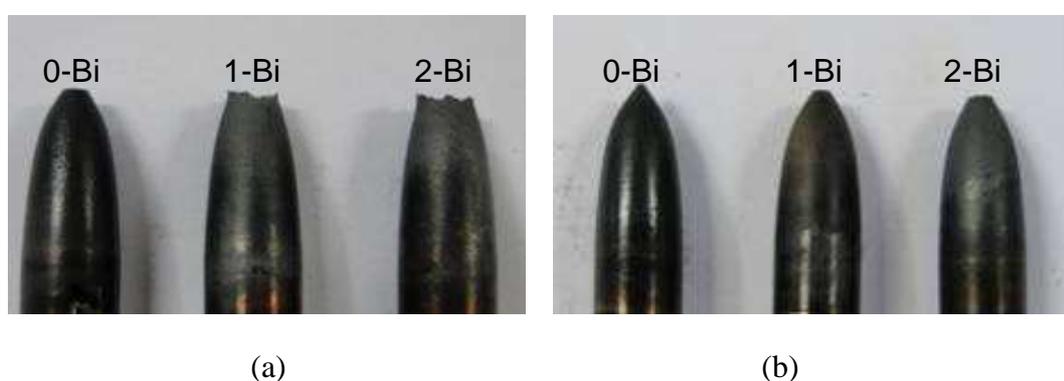


Figura 4.22 Aspecto dos corpos de prova após os ensaios de ductilidade a quente para as temperaturas de 900°C (a) e 1100°C (b).

Na fratura dúctil a deformação plástica continua até uma redução na área para posterior ruptura. Como pode ser observado na figura 4.22, redução de área diminui com o aumento do teor de bismuto, o que indica a perda de ductilidade.

Também através da análise da redução de área, percebe-se a influência da temperatura, o material ensaiado à 1100°C (figura 4.22.b) apresenta maior ductilidade que o material ensaiado à 900°C (figura 4.22.a). Quanto menos dúctil o material, menor é a energia necessária para o material colapsar, logo esta perda de ductilidade em função da adição de bismuto deve ser um ponto de atenção durante a decisão de aplicação deste material.

4.5 Ensaio de Usinagem

4.5.1 Coeficiente Volumétrico do Cavaco

A variação do coeficiente volumétrico do cavaco é mostrada no gráfico da figura 4.23. É possível identificar uma clara diferença, para baixos valores de avanço, entre as amostras. A barra 0-Bi apresenta maiores valores para o coeficiente volumétrico do cavaco em avanço de 0,066 mm/rot, resultado da formação de cavacos em fita, mostrado na figura 4.24a. Nas figuras 4.24b e 4.24c os cavacos podem ser classificados com espirais e lascas. Os menores valores de coeficiente volumétrico foram obtidos pela barra 2-Bi. As figuras 4.25 e 4.26 representam os tipos de cavacos formado na usinagem das amostras 1-Bi e 2-Bi, respectivamente.

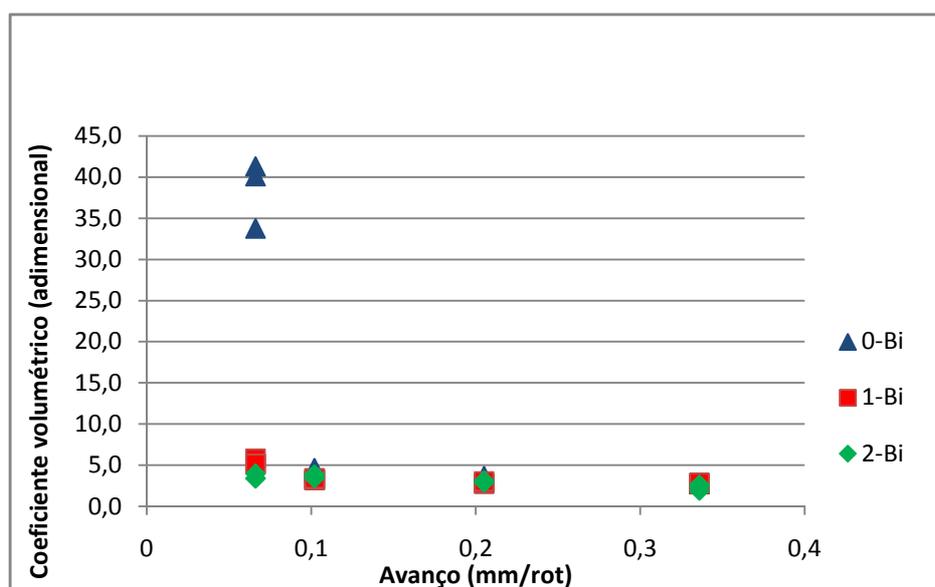


Figura 4.23 Variação do coeficiente volumétrico versus avanço.

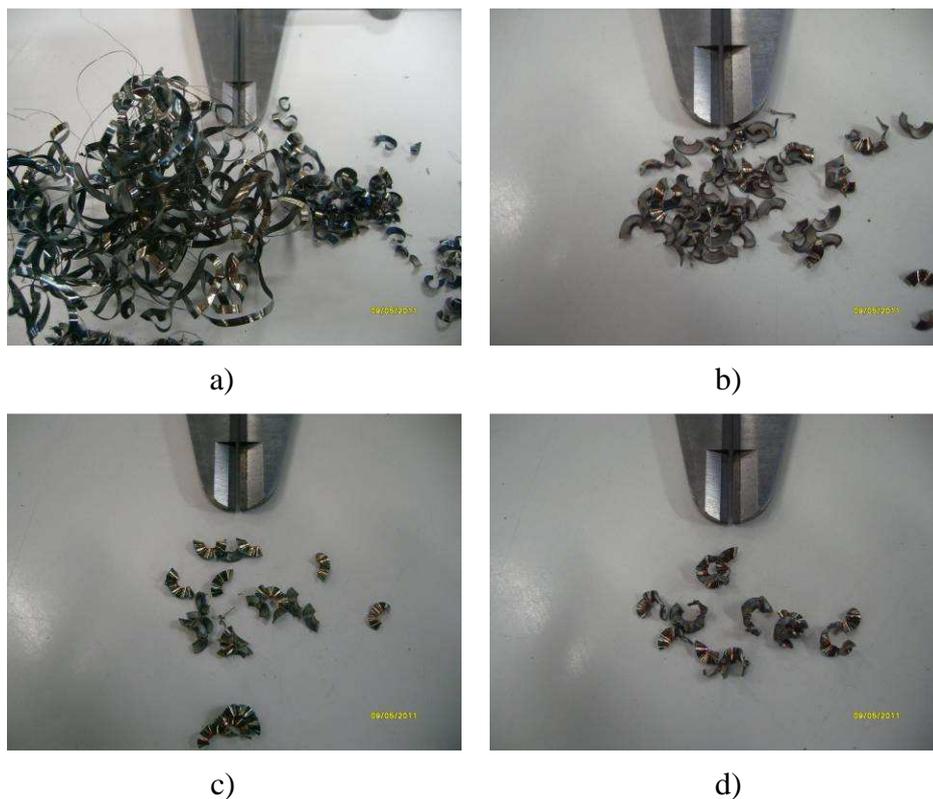


Figura 4.24 Cavacos formados nos ensaios do material 0-Bi para avanços de 0,066 mm/rot (a), 0,102 mm/rot (b), 0,205 mm/rot (c) e 0,336 mm/rot (d).

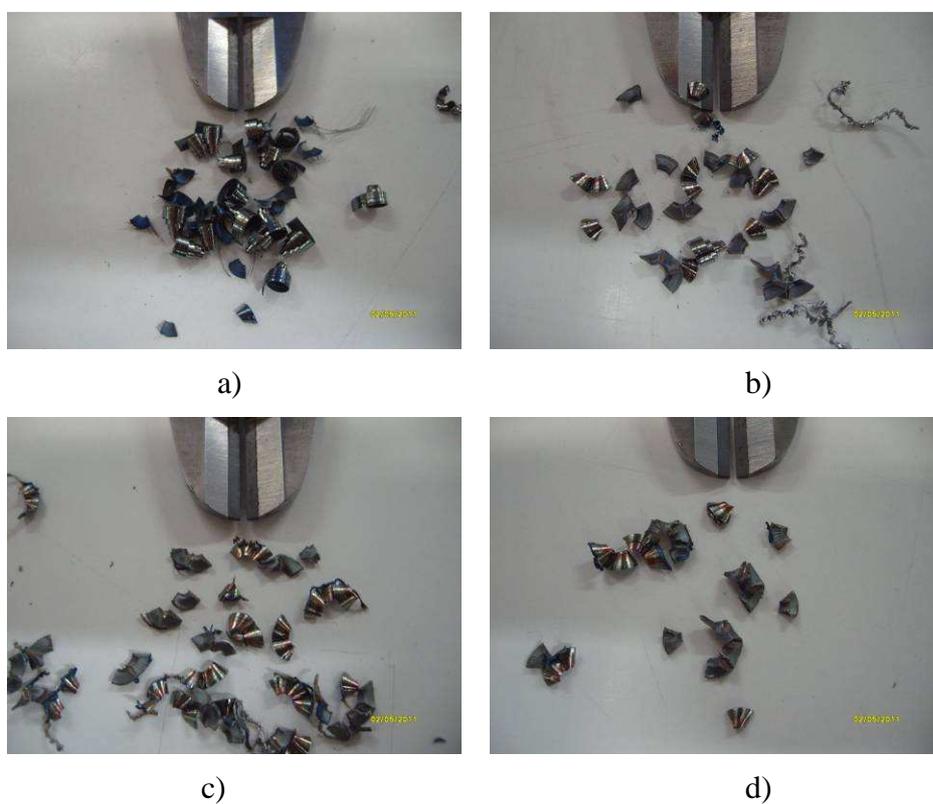


Figura 4.25 Cavacos formados nos ensaios do material 1-Bi para avanços de 0,066 mm/rot (a), 0,102 mm/rot (b), 0,205 mm/rot (c) e 0,336 mm/rot (d).

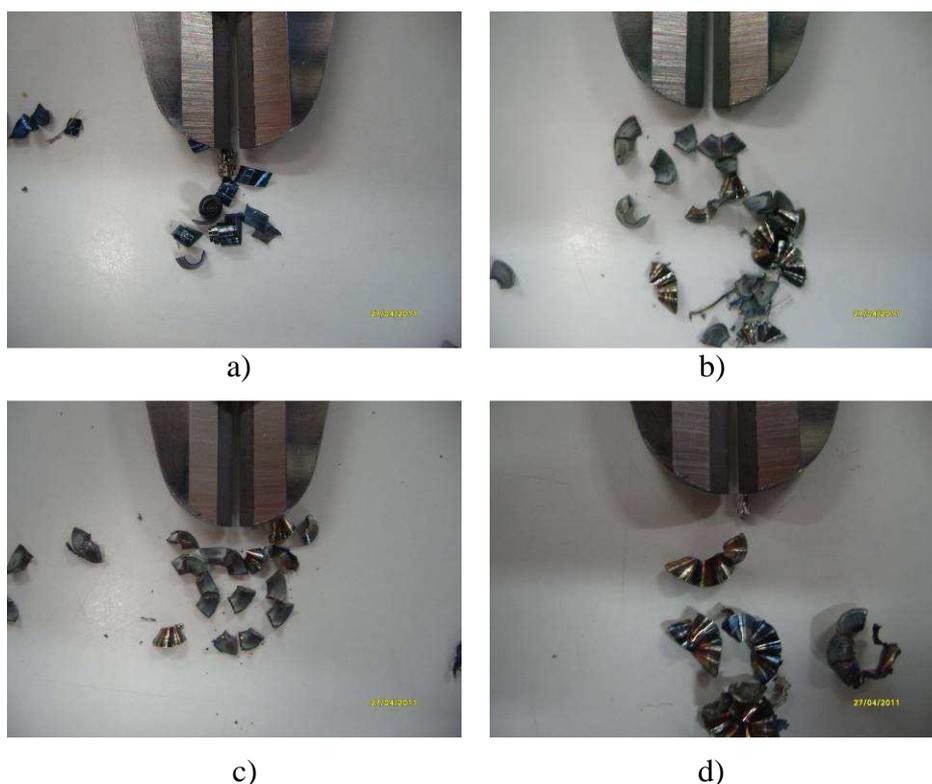


Figura 4.26 Cavacos formados nos ensaios do material 2-Bi para avanços de 0,066 mm/rot (a), 0,102 mm/rot (b), 0,205 mm/rot (c) e 0,336 mm/rot (d).

Quanto maior for o avanço, maior será a tendência da formação de cavacos tipo lascas, resultado esperado de acordo com a literatura (17), para avanços maiores que 0,102 mm/rot, todos os cavacos encontrados são classificados como lascas segundo a norma ISO 3685/1993.

4.5.2 Desgaste de Flanco

Os gráficos das figuras 4.27 a 4.29 mostram os resultados de desgaste de flanco das brocas para as regiões de núcleo, meio raio e periferia da barra. Podemos observar que em todas as posições, meio raio, núcleo e periferia os aços com bismuto apresentaram melhor desempenho. Este comportamento pode ser atribuído a uma maior concentração das microinclusões contendo bismuto nas regiões de meio raio e núcleo.

Comparando o desempenho do aço 0-Bi nas três diferentes posições, vemos que os melhores resultados foram encontrados no núcleo, o que se deve à maior quantidade de inclusões de MnS nesta região (ver tabela 4.4).

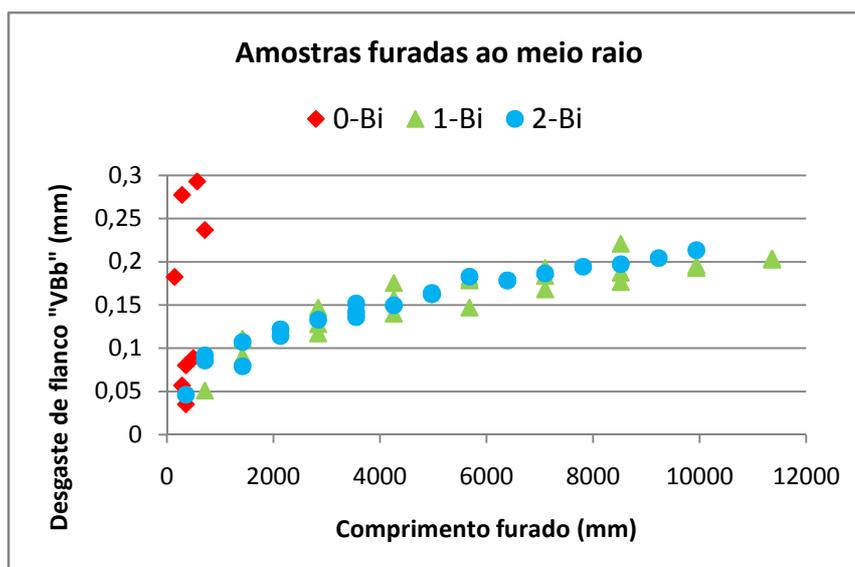


Figura 4.27 Desgaste de flanco de brocas helicoidais avaliado na região do meio raio.

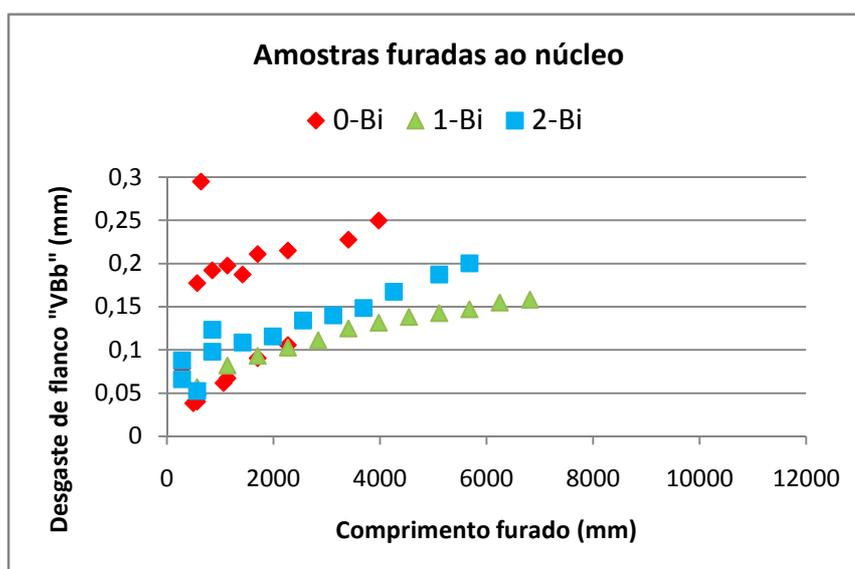


Figura 4.28 Desgaste de flanco de brocas helicoidais avaliado na região do núcleo.

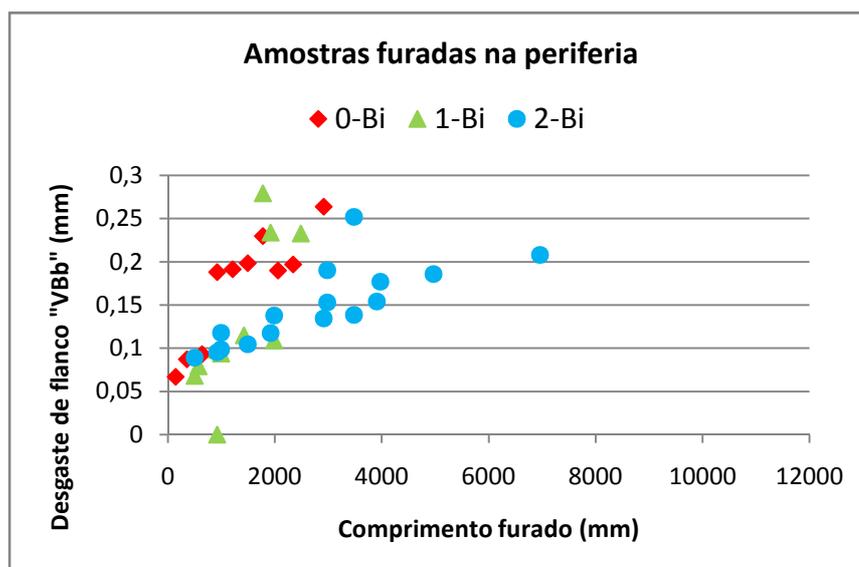


Figura 4.29 Desgaste de flanco de brocas helicoidais avaliado na região da periferia..

A Tabela 4.10 mostra o índice de usinabilidade encontrado para cada aço. Este cálculo considerou o aço 0-Bi como referência. Percebe-se uma grande diferença entre os índices na região do meio raio o que significa que o desempenho, dos aços 1-Bi e 2-Bi foi consideravelmente superior ao do aço 0-Bi. Nas demais regiões esta diferença diminui, porém os aços 1-Bi e 2-Bi ainda apresentaram melhor usinabilidade.

Tabela 4.10: Índice de Usinabilidade.

Índice de Usinabilidade (Referência Amostra 0-Bi)			
Amostra	Periferia	Meio Raio	Núcleo
0-Bi	1	1	1
1-Bi	2,8	18,9	4,24
2-Bi	9,2	17,4	3,18

O índice de usinabilidade do aço 1-Bi nas regiões do núcleo e meio raio é maior que o índice do aço 2-Bi, mesmo parecendo contraditório, deve-se considerar que, o fato das microinclusões se concentrarem nestas regiões é apenas uma tendência e, a distribuição destas microinclusões, que é de grande importância para a usinabilidade do aço, pode ser extremamente heterogênia.

4.5.3 Ensaio de Campo

Em praticamente todas as etapas que foram acompanhadas durante o processo de fabricação de esferas de articulação, verificou-se o melhor desempenho do aço com adição de bismuto como pode ser observado na tabela 4.11. Os ganhos observados, em alguns casos, ultrapassam 50%, valor este com grande expressão quanto à custo e produtividade.

Tabela 4.11: Resultado comparativo do desempenho do aço com e sem adição de bismuto em campo.

	Aço sem Bi	Aço com Bi
FERRAMENTAS	Número de Peças/aresta	Número de peças/aresta
Broca T.máx Ø19,00 Sandvik	300	450
Broca T.máx Ø19,0 Sandvik	400	700
Ferramenta de tornear interno	400	500
Ferramenta de Acabamento	400	500
Ferramenta de desbaste	800	1000
Ferramenta de Acabamento	160	160
Ferramenta de desbaste	250	280

Em relação ao cavaco, à semelhança dos testes de laboratório, observou-se a formação de cavacos tipo fita em maior quantidade para o aço DIN-20MnCr5 e de cavacos tipo lascas para o aço DIN-20MnCr5 com bismuto (figura 4.31).



(a)



(b)

Figura 4.30 Cavacos observados em ensaios de campo, aço DIN-20MnCr5 (a) e aço DIN-20MnCr5 com bismuto (b).

5. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foram discutidos diversos aspectos referentes à usinabilidade, propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço DIN-20MnCr5 e DIN-20MnCr5 com bismuto, assim como o desgaste de ferramentas de corte utilizadas para usinagem destes materiais. A partir dos resultados apresentados e da bibliografia pesquisada, é possível concluir que:

- 1) Os dois aços com bismuto não apresentaram diferenças significativas, em relação ao aço base, nas propriedades mecânicas, como limite de escoamento, redução de área, resistência a tração, alongamento, dureza e impacto Charpy.
- 2) O bismuto provoca perda da ductilidade à quente do material, o que oferece limitações para os processos laminação a quente, principalmente em faixas de temperaturas compreendidas entre 900°C e 1100°C, sendo o mais indicado laminar em temperaturas acima de 1100°C.
- 3) No processo de torneamento, para pequenos avanços, o melhor resultado para coeficiente volumétrico do cavado foi para o material com maior teor de bismuto, segundo pelo material com teor de bismuto médio e, por último, o material sem adição de bismuto.
- 4) Tanto o aço com teor de bismuto médio quanto o material com maior teor de bismuto apresentaram a formação do cavaco tipo lascas para todos os avanços testados durante o torneamento, o que significa que se pode utilizar um menor teor de bismuto para se obter praticamente os mesmos ganhos.

- 5) As inclusões de bismuto tendem a se acumular nas regiões próximas ao núcleo e meio raio.
- 6) Os aços com bismuto apresentaram os menores desgastes de ferramentas sendo o maior ganho encontrado na região de meio raio.
- 7) Embora as inclusões de bismuto se encontrem em maior quantidade na região de núcleo e meio raio, o efeito de fragilização do cavaco ainda é claramente percebido em processos de torneamento.
- 8) Os testes de campo mostram que aços com teores de bismuto próximos a 0,016% conferem ganhos consideráveis na usinabilidade do material.
- 9) A adição de bismuto foi benéfica a usinabilidade do aço DIN-20MnCr5 sem alterar de forma significativa suas propriedades mecânicas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Das perspectivas apertas durante a realização deste trabalho, podemos citar as seguintes sugestões:

- Verificar o comportamento do aço com adição de bismuto no processo de lingotamento contínuo;
- Verificar a influência do bismuto na resistência à fadiga;
- Testar outros teores de bismuto no aço;
- Testar o desgaste de ferramentas no processo de torneamento;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gerdau. Gerdau. [Online] Gerdau. [Citado em: 20 de Outubro de 2011.] <http://www.gerdau.com.br/media-center/espaco-multimidia.aspx>.
2. BAPTÍSTA, A. L. B. **Aspectos Metalúrgicos na Avaliação da Usinabilidade de Aços**. Rev. Esc. Minas, vol.55, no.2 Ouro Preto, Apr. 2002.
3. BARRETOS, M. S. **Influência das Inclusões Metálicas de Bismuto na Tenacidade e Fadiga de um Aço SAE 1045 com Usinabilidade Melhorada**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
4. BORK, C. A. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. USFC. Florianópolis, 1995.
5. CAVALCANTE, F. J. N. **Análise de Utilização de Broca Escalonada de Canal Reto no Processo de Furação em uma Liga de Alumínio Utilizada na Indústria Automotiva**. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
6. CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**, 6.ed. São Paulo: ABM, 1988.
7. DAROIT, C. **Análise da Influência de Parâmetros de Processo no Desgaste de Insertos de Corte Utilizados para o Descascamento de Barras Laminadas**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
8. DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 4a ed. São Paulo: Artliber Ltda. 2003.

9. KLUJSZO, A. C.; SOARES, R. B. **Elementos que Melhoram a Usinabilidade de Aços**. Congresso de Usinagem, São Paulo, SP, outubro, 2004.
10. KÖNIG, W. und KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren**. Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1997.
11. EVANGELISTA LUIZ, N. **Usinabilidade do Aço de Corte-Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14 com Diferentes Níveis de Elementos Químicos Residuais (Cromo, Níquel e Cobre)**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.
12. EVANGELISTA LUIZ, N. **Tecnologias de Melhoria da Usinabilidade dos Aços –Uma Revisão**. 9o Colóquio de Usinagem LEPU/FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2003
13. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1977.
14. OJEBUOBOH, F. K. 1992. Bismuth – Production, Properties and Applications. **Extractive Metallurgy**, p. 46-49.
15. OSÓRIO, W. R.; PEIXOTO, L. C.; GARCIA, A. Efeitos da agitação mecânica e de adição de refinador de grão na microestrutura e propriedade mecânica de fundidos da liga Al-Sn. **Revista Matéria** vol.14 no.3 2009 <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11063/>. [Citado em: 20 de Outubro de 2011].
16. PRAY, H. PEOPLES, R. S., FINK, F. W. **Addition of Bismuth for Producing Free-Machining Stain Steel**. Proc. ASTM, 41 (1941) p. 646-675 and U.S Patent 2,273,731 Feb. 17, 1941.
17. SMITH, G. T. **Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology**. IFS Publications, 1989.
18. SOUZA, A. J. **Processos de Fabricação por Usinagem Parte 2**. Apostila ENG03343 - UFRGS, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011, Disponível em http://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte2.pdf. Acessado em 10 de setembro de 2011.
19. SOMEKAWA. M; KAISO M; MATSUSHIMA, Y. Free Cutting Non-lead Steels. **Kobelco Technology Review**, n° 24, oct 2001.

20. SANTOS, G. R. **Caracterização de Filme DLC e Avaliação dos Esforços de Usinagem em Incertos Revestidos no Torneamento de Ligas Al-Si**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR. Brasil. 2006
21. STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem - Desgaste de Ferramentas**. Disponível em <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-05-U-2007-1-desgaste.pdf>. Acessado em 09 de setembro de 2011.
22. STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem - Desgaste de Ferramentas**. Disponível em <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-27-U-2007-1-superficies.pdf>. Acessado em 09 de setembro de 2011.
23. STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem - Desgaste de Ferramentas**. Disponível em <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-02-U-2007-1-Cavacos.pdf>. Acessado em 09 de setembro de 2011.
24. Library & Information Science: Citation Guides for Electronic Documents. International Federation of Library Associations. <http://www.ifla.org/I/training/citation/citing.htm> Acesso em 9 Nov. 1998
<http://www.maxiforja.com.br/produtos.do>
25. TRENT, E. M., WRIGHT, O. K. **Metal Cutting** – 4th Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
26. TSUNNEKAGE, n.; KOBAYASHI, K.; TSUBAKINO, H. Machinability and Mechanical Properties of Ferrite-Pearlite Type Microalloyed Steels Containing Sulfur-Calcium-Hexagonal Boron Nitride or Bismuth-Boron. **Proceedings of The International Conference on Steel and Society (ICSS 200)**, Osaka, Japan, The Iron and Steel Institute of Japan.
27. ZEILMANN, R. P.; VACARO, T. **Aplicação de brocas de aço-rápido na usinagem a seco do aço AISI P20**. Estudos Tecnológicos – Vol. 4, n°3, 2008.