

# Influência do bismuto nas propriedades mecânicas do aço rápido AISI M2 sinterizado

## *Influence of the bismuth on mechanical properties of high speed steel AISI M2 sintered*

**Adriana Miwa Aso**

Eng<sup>a</sup>. Metalúrgica, Laboratório de Transformação Mecânica, Dept. de Metalurgia, UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia  
91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
mia\_diana@hotmail.com

**Fábio Luis Knewitz**

Msc. Eng<sup>o</sup>. Metalúrgico. Laboratório de Transformação Mecânica, Dept. de Metalurgia, UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia  
91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
fabio.knewitz@ufrgs.br

**Vinícius Martins**

Tec<sup>g</sup> em Fabricação Mecânica, mestrando. Laboratório de Transformação Mecânica, Dept. de Metalurgia, UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia  
91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
viniciushiper@yahoo.com.br

**Wilson Corrêa Rodrigues**

Eng<sup>o</sup>. Metalúrgico, mestrando. Laboratório de Transformação Mecânica, Dept. de Metalurgia, UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia  
91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
wilson.rodrigues@ufrgs.br

**Alexandre da Silva Rocha**

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Laboratório de Transformação Mecânica, Dept. de Metalurgia, UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia  
91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil  
alexandre.rocha@ufrgs.br

**Lirio Schaeffer**

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup>. Laboratório de Transformação Mecânica, Dept. de Metalurgia, UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia  
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil  
schaeffer@ufrgs.br

---

## Resumo

A adição de bismuto em uma liga de aço AISI M2 produzida por metalurgia do pó foi avaliada, buscando melhorar a usinabilidade e as propriedades mecânicas deste material. Para este estudo, foram analisadas as amostras de aço rápido AISI M2 com os seguintes teores de bismuto: 0.1%, 0.3%, 0.5% e 1%. O processo de conformação do pó realizou-se através da compactação uniaxial a 600 MPa e sinterização sob atmosfera protetora de 95%N<sub>2</sub> + 5%H<sub>2</sub>. A temperatura de sinterização utilizada foi de 1.130°C. As amostras apresentaram um aumento proporcional da porosidade com o acréscimo percentual de bismuto. No ensaio de desgaste e de compressão a amostra de 0,3% de bismuto apresentou menor resistência mecânica. No ensaio de usinabilidade as amostras de M2 e a M2 com 1% de bismuto

## Abstract

The addition of bismuth in an alloy steel AISI M2 produced by powder metallurgy, has been evaluated aiming to improve the machinability and mechanical properties of this material. For this study, were analyzed samples of AISI M2 steel quick with the following levels of bismuth: 0.1%, 0.3%, 0.5% and 1%. The process of shaping the powder was carried out by uniaxial compaction at 600 MPa and sintering in protective atmosphere of 95% N<sub>2</sub> + 5% H<sub>2</sub>. The sintering temperature used was 1130 ° C. The samples showed a proportional increase of porosity with increasing percentage of bismuth. In the test of wear and compression of the sample of 0.3% of bismuth showed lower mechanical strength. Machinability testing of the samples of M2 and M2with 1% of bismuth sintered obtained chips shear (in the form of needle) and chip block (as arcs), respectively.

sinterizado obtiveram cavacos cisalhados (forma de agulha) e cavaco lamelados (na forma arcos), respectivamente.

**Palavras-chave:** *aço rápido, bismuto, metalurgia do pó, usinagem.*

**Key words:** *high speed steel, bismuth, powder metallurgy, machining.*

## 1. Introdução

A indústria competitiva é aquela que atende as condições de mercado, sendo seus produtos de alta qualidade e possuindo grande produtividade. A engenharia busca o desenvolvimento de processos com alta velocidade, mínima refrigeração ou lubrificação, novas geometrias, materiais e revestimentos para ferramentas de usinagem, visando a melhor relação custo – benefício (Schneider Jr., 2002).

Os aços rápidos têm seu uso extremamente difundido para a fabricação de ferramentas de corte, ferramentas de conformação e peças resistentes ao desgaste. Juntamente com a fabricação de peças automotivas, devido as suas propriedades mecânicas e a resistência a abrasão, o aço rápido continua a ganhar mercado. Porém, as peças feitas com aço rápido são difíceis de usinar devido as suas propriedades mecânicas (Ferraresi, 1970; Várez *et al.*, 2001).

Atualmente, fatores econômicos e principalmente ambientais têm favorecido pesquisas nos processos de usinagem. Isso se deve pela necessidade de redução de custos, pela segurança ao operador, pela alta produção do processo e também pela agressividade dos fluídos de corte ao meio ambiente que exigem tratamentos especiais para serem descartados (*The inland steel corp.*, 1980). Essas pesquisas envolvem técnicas, que variam desde um controle apurado do processo de fabricação e transformação do aço, passando pela adição de elementos químicos que promovam a fragilização do cavaco. Estudos sobre a lubrificação do processo de usinagem também estão sendo pesquisados (Chang *et al.*, 2001).

Tradicionalmente, tem-se usado o chumbo como um dos principais elementos para melhoria de usinabilidade dos aços. Devido a questões de caráter ambiental, o uso do chumbo vem sofrendo restrições ao longo dos últimos anos e este fato tem intensificado as pesquisas no sentido de encontrar alternativas de menor impacto ambiental. Uma dessas alternativas utilizadas é o desenvolvimento da adição de bismuto para a substituição do chumbo (Bismuth Institute, 1984; Baptista, 2002).

As partículas de bismuto atuam de modo similar às partículas de chumbo, isto é, lubrificando a interface da ferramenta e o cavaco, reduzindo o atrito, adicionalmente atuam como fragilizante do cavaco. Boa usinabilidade indica bom acabamento e integridade superficial da peça, baixa força e potência de usinagem e diminuição de desgaste da ferramenta. Como o aço é o material mais importante na engenharia, sua usinabilidade tem sido estudada extensivamente (Nunes, 2003; Jesus, 2006). A usinabilidade não depende somente das condições intrínsecas do material, mas também das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema máquina-dispositivo de fixação-peça-ferramenta e do tipo de trabalho executado pela ferramenta. Este trabalho tem como principal objetivo avaliar o comportamento do bismuto no processo de fabricação de peças de aço rápido AISI M2 sinterizadas.

## 2. Materiais e Métodos

O pó de M2 com a composição química dada na Tabela 1, serviu como matéria-prima. A Figura 1 mostra partículas de pó de M2, fornecido pela Powdrex®. O pó foi produzido por atomização à água e possui a seguinte granulometria: <150 mesh: 90%, >150 mesh: 10%. À liga foi adicionado dissulfeto de molibdênio, grafite e bismuto sendo misturados, durante o tempo de 15 minutos, em um misturador tipo "Y" a 24 rpm. As misturas do pó de M2 com as variações de bismuto são mostradas na Tabela 2.

Tabela 1: Composição química do pó de M2.

C.Q.	Fe	C	W	Mo	Cr	V	Mn	Co	Si	S	P
%	Balanco	0,75-0,90	5,75-6,75	4,50-5,50	3,75-4,50	1,60-2,20	0,20-0,40	0,27	0,27	0,0014	0,0019

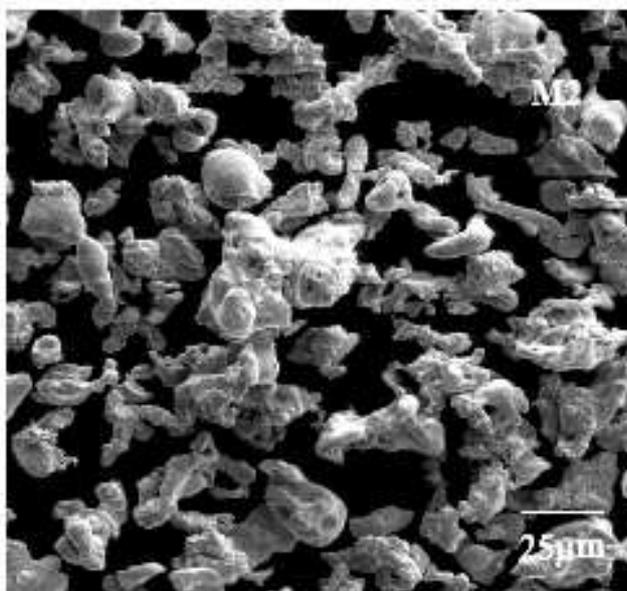


Figura 1: Partículas do pó de M2 observadas no M.E.V.

Tabela 2. Composição química das amostras.

	% M2	% Bi
Amostra 1	100	0
Amostra 2	99,90	0,1
Amostra 3	99,70	0,3
Amostra 4	99,50	0,5
Amostra 5	99,00	1,0

As amostras foram compactadas uniaxialmente numa matriz de aço, possuindo suficiente integridade para serem manuseadas. A pressão de compactação utilizada foi de 600MPa obtendo corpos de prova de formato cilíndrico, com diâmetro de 13mm e altura de 12mm. Utilizou-se uma prensa hidráulica, com capacidade máxima de 30 toneladas, mostrada na Figura 2. A sinterização foi realizada em uma atmosfera de 95%N<sub>2</sub> + 5% H<sub>2</sub> em volume, em temperatura de 1.120°C. O perfil térmico de sinterização está representado na Figura 3.

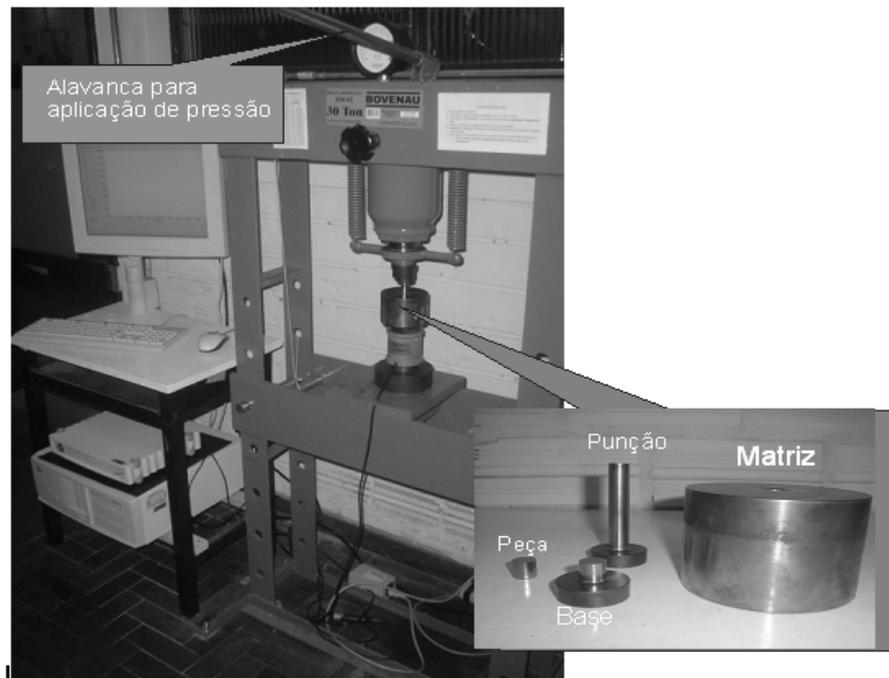


Figura 2: Prensa hidráulica utilizada na obtenção dos corpos de prova.

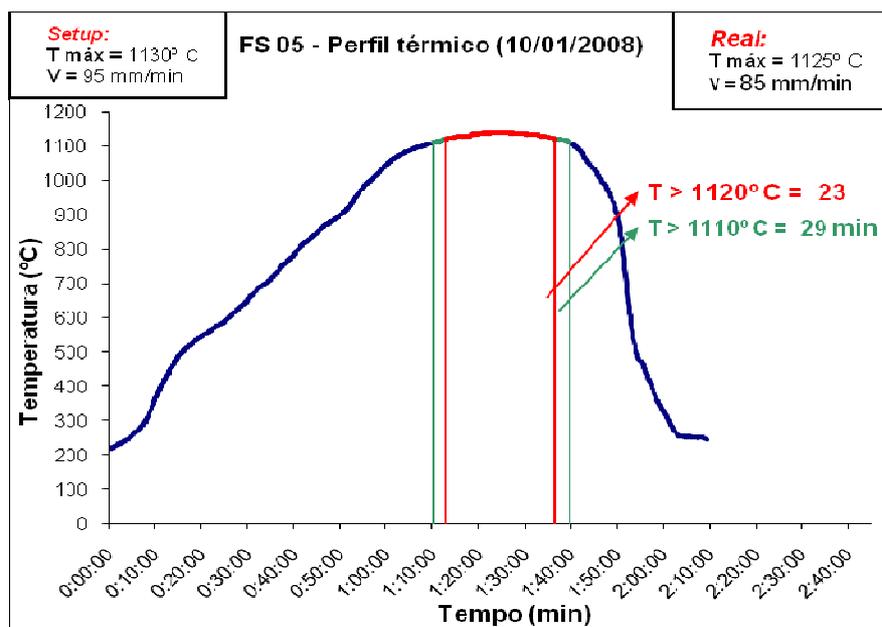


Figura 3: Ciclo térmico de sinterização.

Para análise de desgaste foi utilizado ensaio qualitativo, na qual há um disco de freio em ferro fundido cinzento em posição fixa e com rotação de 1.600rpm. Os corpos de provas foram fixados através de um suporte em uma posição ortogonal ao disco, conforme está representado na Figura 4, sendo submetidos em tempos de 10, 20, 30 e 60 minutos para cada tipo de amostra. Foi avaliado o desgaste através da perda de massa dos corpos de prova.

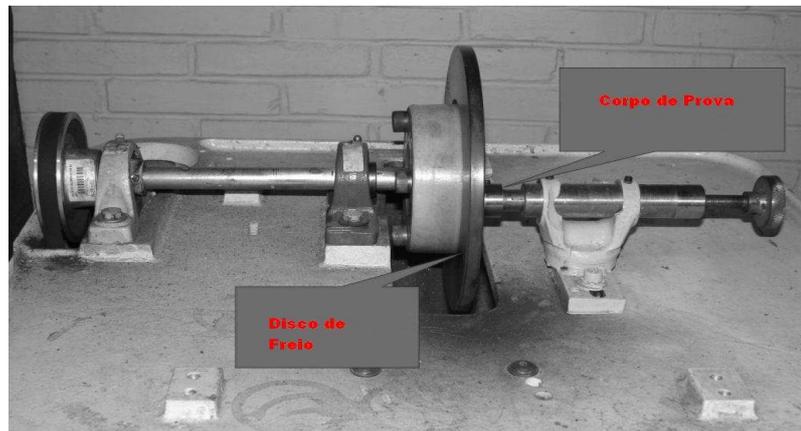


Figura 4: Equipamento utilizado no ensaio de desgaste.

Para o ensaio de compressão os corpos de prova foram usinados em um tamanho padrão: diâmetro 2/3 da altura. Desta forma, os corpos de provas ficaram com, aproximadamente, 11,90mm de altura por 7,90mm de diâmetro. O equipamento utilizado para este ensaio foi uma prensa hidráulica manual com capacidade de 3.000kN de força, conforme mostra a Figura 5.



Figura 5. Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão.

Para o ensaio de usinagem foi avaliado o formato do cavaco obtido em cada amostra. Utilizou-se de um torno semi-automático, onde a profundidade de corte, avanço e a velocidade foram mantidos constantes, com valores de 0,4mm, 0,1 mm/rot e 100 m/min, respectivamente. Foi utilizada uma ferramenta intercambiável com suporte para pastilha MTJNR 2020 K16GL.

### **3. Resultados e Discussão**

Com base nos objetivos propostos são apresentados os resultados alcançados. As variações dimensionais nos compactados ocorreram durante a sinterização e estão diretamente relacionadas a mudanças de suas densidades. A massa se altera devido às reações entre a massa sob sinterização e a atmosfera. As possíveis causas das variações dimensionais e/ou da massa das amostras são as reações

químicas entre a grafita e o oxigênio ou entre o hidrogênio da atmosfera de sinterização da massa sob sinterização que levam a expansão. Durante a solidificação do bismuto, ocorre uma expansão de 3,2% em volume conforme suas características físicas, aliado ao processo da sinterização e a perda de bismuto por vaporização, que auxiliaram a variação dimensional. A Tabela 4 consta a média das três amostras. Percebe-se, quanto maior o teor de bismuto menor é a densidade do sinterizado.

Tabela 4: Variações dimensionais.

	<b>Amostra</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>M2</b>	<b>à verde</b>	10,021	1,577	6,35
	<b>Sinterizada</b>	10,009	1,581	6,33
	<b>Variação (%)</b>	-0,124	0,239	-0,36
<b>0,10% Bi</b>	<b>à verde</b>	9,929	1,555	6,39
	<b>Sinterizada</b>	9,901	1,566	6,32
	<b>Variação (%)</b>	-0,278	0,762	-1,03
<b>0,30% BI</b>	<b>à verde</b>	9,978	1,564	6,38
	<b>Sinterizada</b>	9,931	1,581	6,28
	<b>Variação (%)</b>	-0,744	1,083	-1,54
<b>0,50% Bi</b>	<b>à verde</b>	9,988	1,569	6,37
	<b>Sinterizada</b>	9,820	1,581	6,21
	<b>Variação (%)</b>	-1,680	0,758	-2,42
<b>1% Bi</b>	<b>à verde</b>	9,957	1,581	6,29
	<b>Sinterizada</b>	9,791	1,595	6,14
	<b>Variação (%)</b>	-1,674	0,898	-2,48

No ensaio de dureza foram obtidos resultados com pouca variação entre as amostras com 0,1%, 0,3% e 0,5% de bismuto em relação ao M2. Para a amostra de 1% de bismuto a dureza ficou abaixo das demais, isso se deve ao nível de porosidade que foi maior do que nas outras amostras.

Tabela 5: Ensaio de dureza em (HRB).

<b>Posição na Amostra</b>	<b>M2</b>	<b>0,1% Bi</b>	<b>0,3% Bi</b>	<b>0,5% Bi</b>	<b>1% Bi</b>
<b>em cima</b>	99	100	98	98	96
<b>meio</b>	86	89	87	87	73
<b>em baixo</b>	98	99	97	98	97

No ensaio de desgaste pode-se observar (Figura 6) que as amostras tiveram pouca diferença entre si, exceto pela amostra de 0,3% de bismuto. Pela análise da porosidade, quanto maior a porcentagem de bismuto, maior a porosidade; deduz-se que no ensaio de desgaste esperava-se um comportamento crescente conforme o aumento de teor de bismuto. Outra variável que pode ter influenciado nos resultados é que a temperatura em que os corpos de provas alcançaram no ensaio devido ao atrito. Como o ponto de

fusão do bismuto é baixo, 271°C, as amostras com maiores concentrações de bismuto podem ter se beneficiado da ação lubrificante do mesmo.

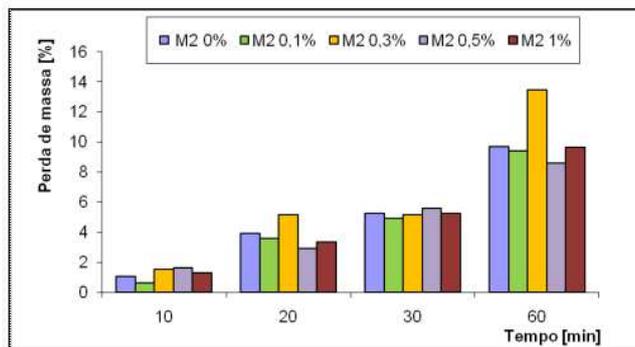


Figura 6: Desgaste das amostras.

No ensaio de compressão (Figura 7), as amostras apresentaram resultados decrescentes em relação a percentagem de bismuto, exceto pela amostra de 0,3%. O comportamento inicial das curvas é resultante da compactação dos poros. As amostras de 0,3 e 1% obtiveram resultados bem inferiores dos demais. No caso da amostra de 1%, possivelmente seu comportamento se deva ao nível de porosidade e de bismuto. As amostras M2, M2 com 0.1% Bi e 0.5% de Bi apresentaram curva de material frágil. Já as amostras 0.3% e 1% apresentaram comportamento levemente dúctil comparado com as demais amostras.

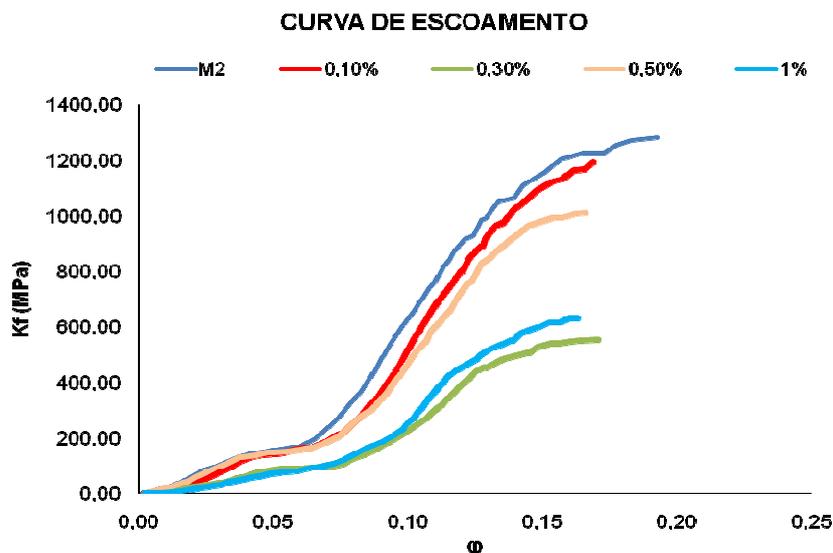


Figura 7: Resultado do ensaio de compressão das amostras.

Os ensaios de usinagem foram realizados em um torno semi-automático. No primeiro ensaio os parâmetros utilizados foram retirados da literatura (Ferraresi, 1970), profundidade de corte = 0,4mm; avanço, 0,1mm/rot e velocidade de corte, 100 m/min. Nesse ensaio foram obtidos cavacos com forma de agulha para todas as amostras. No segundo teste, aumentamos a profundidade de corte para 0,8 para obter um cavaco mais espesso. Assim, obteve-se cavacos tipo ruptura para todas as amostras. A única diferença foi um aumento no tamanho do cavaco para a amostra com 1% de Bi em relação ao M2. Cavacos com forma de agulha podem ser tanto pelo tipo de material, que nesse caso é duro e frágil segundo Ferraresi (1970).

O ruído está relacionado com a força de usinagem, logo, para essas duas amostras a força foi menor para usiná-las. Como ferramenta auxiliar para a identificação do bismuto foi preparada uma amostra contendo apenas ferro, dissulfeto de molibdênio e bismuto, devido a dificuldade em identificá-los nas amostras em estudo. Desta forma obtiveram-se as identificações através do EDS conforme as Figuras 8 e 9.

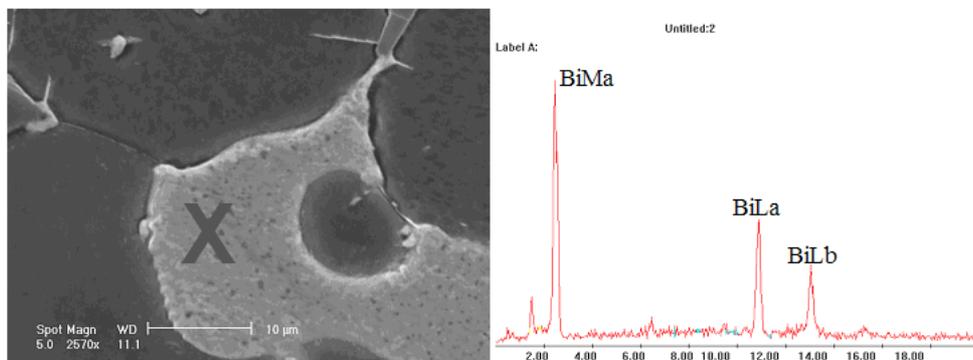


Figura 8: Mostra imagem obtida no M.E.V, EDS aplicado no (X).

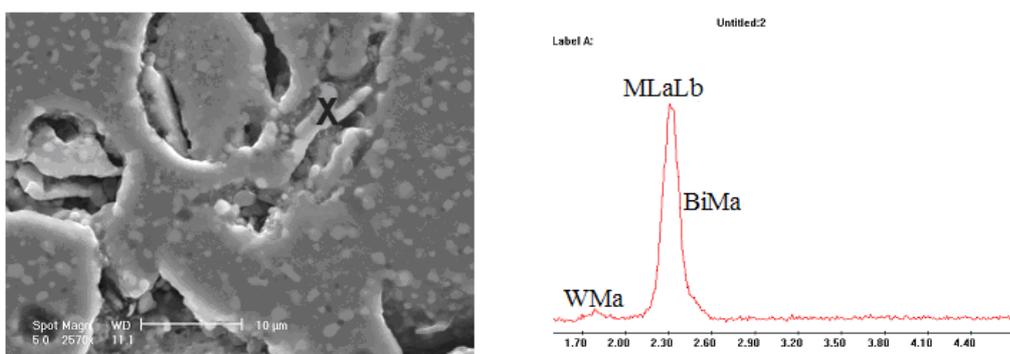


Figura 9: MEV e EDS do ponto X para a amostra de 1% de bismuto.

As Figuras 10 a 14 mostram que o nível de porosidade aumenta com o teor de bismuto. A amostra de 0.1% apresentou uma distribuição de poros semelhantes a da amostra de M2. A amostra de 0,5% de bismuto apresentou um teor mais elevado de porosidades se comparado com as outras amostras, enquanto que a amostra com a adição de 1% de bismuto apresentou uma porosidade menor que a amostra anterior, só que apresentando poros maiores.



Figura 10: Amostra sinterizada de M2 sem ataque químico (100 X.)



Figura 11: Amostra sinterizada de M2 com 0,1% de bismuto (100X).



Figura 12: Amostra sinterizada de M2 com 0,3% de bismuto (100 X.)

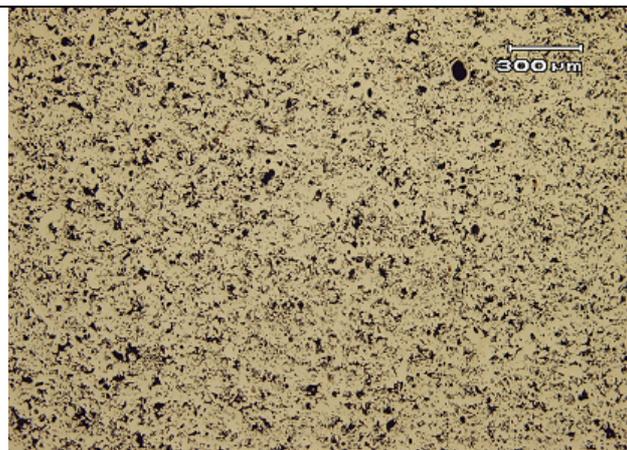


Figura 13: Amostra sinterizada de M2 com 0,5% de bismuto (100 X.)

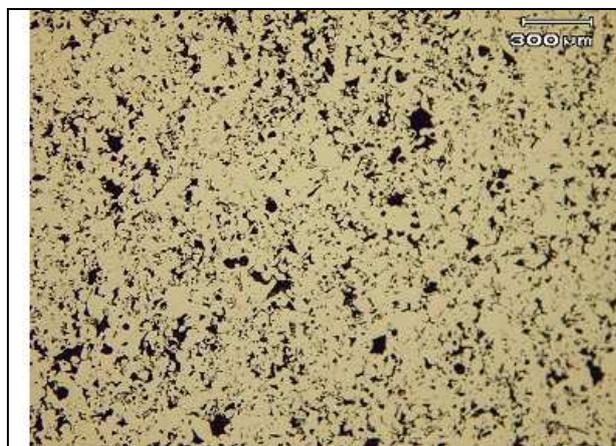


Figura 14: Amostra sinterizada de M2 com 1,0% de bismuto (100 X.)

#### 4. Conclusão

A maior porosidade mostrada nas metalografias sugere a inexistência de bismuto na superfície. Além disso, com o aumento do teor de bismuto as amostras apresentaram maior porosidade, o que sugere a vaporização deste elemento durante a sinterização. A variação volumétrica deve-se a expansão do volume do bismuto na solidificação de 3,2% em contra ponto com a sinterização do material.

No ensaio de desgaste as amostras apresentaram pouca diferença nos resultados, exceto para a amostra de 0,3% que perdeu mais massa do que as outras. As amostras com menores teores de bismuto (abaixo de 0,3%) obtiveram maior resistência ao desgaste, devido a sua maior resistência mecânica. Nas amostras contendo teores acima de 0,3% de bismuto agiu com material de lubrificação, formando um filme sobre o material. No ensaio de compressão todas as amostras resultaram comportamento frágil. Houve uma queda significativa de tensão de ruptura com o aumento do teor de bismuto. A amostra de 0,3% obteve comportamento semelhante à amostra de 1%, ou seja, levemente dúctil.

No ensaio de usinabilidade, pelo método de avaliação do cavaco, na primeira tentativa com torno semi-automático, as amostras de M2 e de M2 com 1% de bismuto apresentaram resultados satisfatórios, ou seja, M2 com cavacos na forma de agulhas e a amostra de 1% na forma de arco segundo Ferraresi (1970). Devido às diretrizes européias atuais regulando fortemente os níveis de emissões aliadas às composições químicas dos combustíveis, os níveis de desgaste nos componentes de contato, como podem citar os guias e acentos de válvulas, dentro da câmara de combustão estão sofrendo uma solicitação cada vez maior. Com isso, são fabricadas ligas de extrema resistência a quente que prejudicam as linhas de usinagem. Um ganho na vida útil da ferramenta significa para a indústria automotiva a melhor relação custo benefício.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao LdTM e a Escola de Engenharia da UFRGS, pelo o uso dos laboratórios e da infra-estrutura da universidade. Agradecem também ao CNPq, CAPES, pelo apoio financeiro e investimento na área de pesquisa.

## **Referências**

- SCHNEIDER JR, G. 2002. Machinability of metals. *In*: G. SCHNEIDER JR; *Cutting tool applications*. New Jersey, Prentice Hall, p. 4-10.
- FERRARESI, D. 1970. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo, Edgard Blucher, vol. 1, 751 p.
- CHANG, C.; SMITH, G.; LITTLEFAIR, G. 2001. Machinability of sintered distaloy HP-1 components. *Sae Transactions: Journal of materials and manufacturing*, **110**:267-274.
- BAPTISTA, A.L.B. 2002. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. *Revista da Escola de Minas*, **55**(2):103-109.
- BISMUTH INSTITUTE. 1984. The Bulletin of Bismuth Institute. Nº 43. Bismuth Institute Safety Data – Information Center, p. 4-5.
- NUNES, R. A. 2003. Caracterização do Pó. DCMM-PUC-RIO. Notas de aulas da disciplina Conformação de Materiais, PUC-RIO. Disponível em: <http://www.dema.puc-rio.br/~ranunes/org/introducao-2003.pdf>  
Acesso em: 04/05/2009.
- JESUS, E.S. 2006. *Processamento, Usinagem e Desgaste de Ligas Sinterizadas para Aplicações Automotivas*. São Paulo, SP. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares, 162 p.
- THE INLAND STEEL CORP. 1980. New free machining steel with bismuth. *Mech. Work. Steel Process*. p. 15-45.
- VÁREZ, A.; PORTUONDO, J.; LEVENFELD, B.; TORRALBA, J.M. 2001. Processing of P/M T15 High Speed Steels by Mould Casting Using Thermosetting Binders, *Materials Chemistry and Physics*, **67**:43-48.

Submissão: 23/09/2009

Aceite: 01/12/2009