

CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE MOLIBDÊNIO NA PRODUÇÃO DE CUBOS SINCRONIZADORES PELA METALURGIA DO PÓ ¹

Pedro Augusto Mazza Rodrigues²

Roberto Lunardi³

Maria do Carmo Amorim da Silva⁴

Resumo

A Metalurgia do Pó tem se apresentado como uma alternativa tecno-econômica para a produção de componentes metálicos. O grande mercado da Metalurgia do Pó das ligas a base de ferro, sem dúvida, é a indústria automobilística. Em geral, as ligas utilizadas para a fabricação de cubos sincronizadores de transmissões contêm um alto teor de Ni para atender aos requisitos de performance exigidos daquele componente. O aumento do preço do níquel vem tornando inviável a aplicação de tais ligas em peças do mercado automotivo, caracterizado por ser altamente competitivo. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova alternativa de material onde se buscou balancear a relação custo/desempenho. Baseado em estudo preliminar, optou-se por uma variação de elementos de ligas e tratamentos térmicos para melhorar estas propriedades e diminuir o custo da matéria-prima. As ligas Astaloy 85Mo® + Cu seguidas de tratamento de sinterhardening surgem como alternativa em substituição às ligas com alto teor de Ni. Foi analisado o material pré-ligado ao Molibdênio conhecido como Astaloy 85Mo® acrescido de 0,6% de grafite e teores de cobre que variaram de 0 a 2,0%. As seguintes propriedades foram avaliadas desde o pó até o material sinterizado: densidade aparente, escoamento, compressibilidade a 600MPa, variação dimensional, microestrutura, resistência a tração, módulo de ruptura, energia de impacto, dureza HRB e resistência a fadiga.

Palavras-chave: Cubo sincronizador; *Sinterhardening*; Componentes automotivos por MP.

CHARACTERISTICS OF PRE-ALLOYED MOLYBDENUM MATERIAL FOR SYNCHRONIZING HUBS PRODUCTION BY POWDER METALLURGY

Abstract

Powder metallurgy (P/M) processing has been a techno-economical alternative for the production of metallic components. The most important market of P/M iron base alloys is the automotive industry. In general, the alloys used for synchronizing hubs have high Nickel content in order to meet the performance requirements of those components. The increase in the price of nickel has made impracticable application of such alloys in the automotive market, characterized for being highly competitive. This paper deals with an alternative material by searching low cost and good performance. Based in a previous study, different alloying systems and heat treatment was tested with the objective of improve the sintered properties with reduced raw material cost. The Astaloy 85Mo® + Cu followed by sinterhardening could be an appropriated substitute for the high Ni content alloy. Astaloy 85Mo® + 0.6C with copper additions of 0; 1; 1.5 and 2% were analysed. The following characteristics were evaluated: for the premixes – apparent density, flow, compressibility at 600MPa; and after sintering – dimensional change, microstructure, tensile strength, rupture module, impact energy, hardness HRB and fatigue limit.

Key-words: Synchronizer hub; Sinterhardening; Automotive PM components.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Hoganas Brasil, Engenheiro de Desenvolvimento*

³ *Magneti Marelli Cofap, Gerente de Engenharia*

⁴ *Magneti Marelli Cofap, Pos-doutorado Industrial*

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística é de longe o principal consumidor de componentes de aço produzidos por metalurgia do pó, representando cerca de 80% do mercado de produtos sinterizados. Os recentes avanços tecnológicos nos materiais e processos relacionados a MP permitiram o desenvolvimento de peças automotivas de altíssima performance e com controle dimensional apurado.

Dependendo da solicitação mecânica a que estas peças são submetidas, a matéria prima que constitui o material destas peças deve ser mais elaborada para atender tais solicitações.

Atualmente a maioria dos cubos sincronizadores de transmissões automotivas obtidos por metalurgia do pó, são produzidos com ligas de Fe-Ni-Mo-Cu-C com percentual de níquel que pode chegar a 5%. Recentes eventos no mercado internacional de metais, que por consequência têm provocado o aumento constante no preço do metal, vêm tornado menos atrativo o uso deste elemento de liga. O preço do níquel que em 1999 era de U\$ 4,40/Kg subiu para U\$ 15/Kg e 2004, e em 2007 chegou a ultrapassar a barreira de U\$ 50/Kg.⁽¹⁾

COMMODITY PRICES - NICKEL

LME
3 months

USD/TON

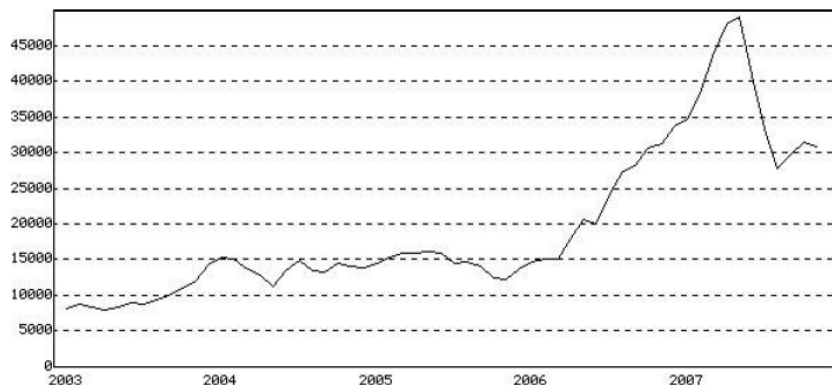


Figura 1. Evolução do preço do níquel ⁽¹⁾

Diminuir ou mesmo retirar o conteúdo de Ni do material sinterizado pode resultar em economia significativa no preço da peça, uma vez que a matéria prima neste componente chega a representar até 40% do seu custo total. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova alternativa de material e processo, buscando balancear os fatores custo/desempenho na fabricação de cubos sincronizadores.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi avaliada uma liga baseada em pó de ferro atomizado a água e pré-ligada ao molibdênio com adição de 0,6% de grafite e diferentes adições de cobre, conhecida como Astaloy 85Mo®, e seus resultados comparados com a liga pré-ligada por difusão utilizada atualmente na produção de cubos sincronizadores de transmissões conhecida como Distaloy AE®, também com a adição de grafite. A composição química de cada liga é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química das ligas. Percentagem em peso

	Ni	Cu	Mo	C	O2 máx	Fe	Lub¹
Mix1			0,85	0,60	0,09	Bal.	0,60
Mix2		1	0,85	0,60	0,09	Bal.	0,60
Mix3		1,5	0,85	0,60	0,09	Bal.	0,60
Mix4		2,0	0,85	0,60	0,09	Bal.	0,60
Distaloy AE®	4,00	1,5	0,50	0,60		Bal.	0,60

¹Lubrificante: Kenolube P11

As misturas foram preparadas em misturador tipo Y com ciclo de 15 minutos e suas propriedades de densidade aparente e escoamento foram avaliadas.

Os corpos de prova preparados para realização dos ensaios mecânicos, foram compactados a 600Mpa e de acordo com as normas da MPIF. Em seguida, foram sinterizados em forno contínuo de esteira, à temperatura de 1120°C, por 30 min, sob atmosfera 90/10 N₂/H₂ enriquecido com gás natural.

As quatro primeiras misturas foram submetidas a um resfriamento forçado denominado *sinterhardening* com taxa de resfriamento 2.5°C/s. Os corpos de prova feitos com a liga Distaloy AE® foram submetidos à sinterização convencional, com taxa de resfriamento de 1°C/s.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em trabalho anterior, apresentado no Ptech 2007, Da Silva et al. Avaliaram as propriedades de seis ligas: Distalloys AB e AE, ligas a base de Cr e ligas a base de Mo. A análise dos resultados encontrados por estes autores indicaram a possibilidade do emprego da liga Astaloy 85Mo® para a aplicação em cubos de sincronização, desde que enriquecida com algum elemento de liga ou tratamento térmico. As propriedades destas ligas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 Propriedades obtidas em trabalho anterior ⁽²⁾

Propriedade	Astaloy 85Mo®	Distaloy AE®
Densidade aparente (g/cm³)	3,25 g/cm³	3,35 g/cm³
Escoamento Seg / 50g	27	23
Resistência a verde(MPa)	~12	~15
Compressibilidade a 600MPa (gr/cm³)	~7,0	~7,0
Alongamento (%)	1,7	2
Varição dimensional (%)	~0,23 e < dispersão	~0,27 e > dispersão
Resistência a tração (MPa)	~460	~590
Modulo de ruptura (MPa)	~905	~1100
Energia de impacto(J)	~12	~40
Dureza (HBR)	~80	~82

3.1 Metalografia

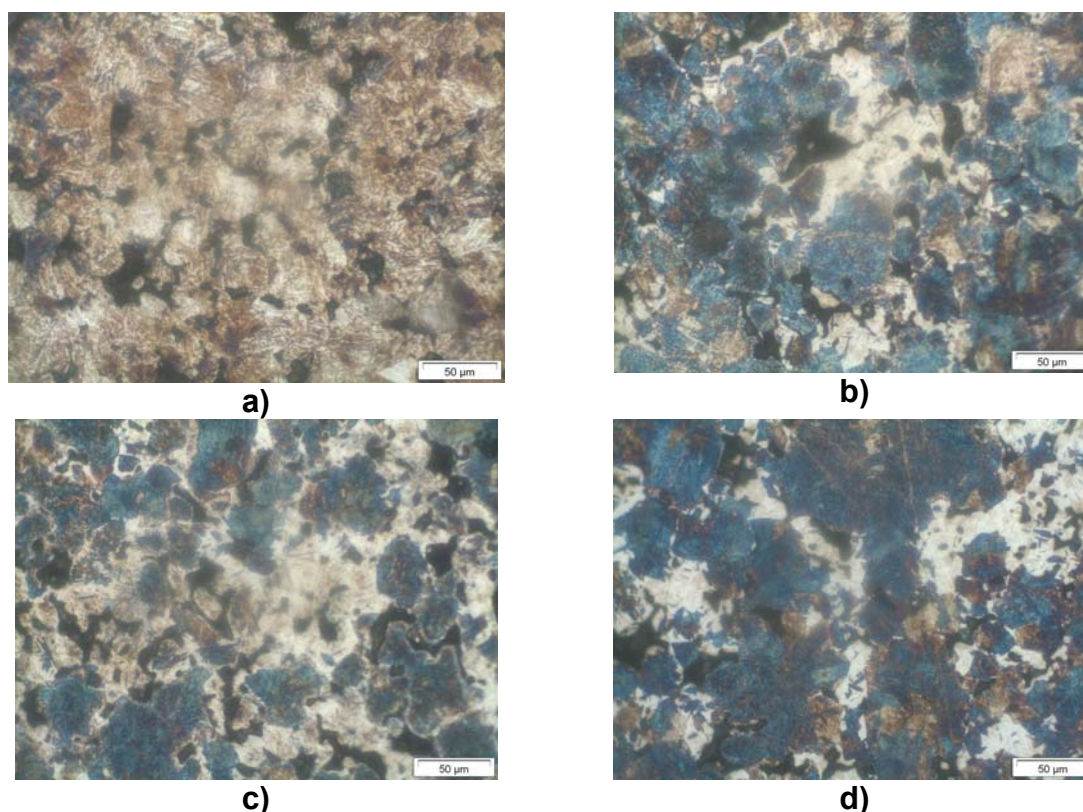


Figura 2 Metalografia óptica a) mix1, b) mix2, c) mix3, d) mix4

A microestrutura da mistura 1 (Figura 2a) mostra a distribuição homogênea da perlita e da bainita. Nas microestruturas contendo cobre (mix 2, 3 e 4), observa-se com mais evidência a formação da martensita e de perlita fina. O tratamento de sinterhardening juntamente com o cobre influencia na temperabilidade das misturas. Souza,⁽³⁾ comenta que embora o cobre não tenha efeito importante na temperabilidade dos aços, se o teor de carbono for alto ele retarda o amolecimento pelo revenimento.

3.2 Densidade Aparente e Escoamento

A densidade aparente e o escoamento são propriedades importantes durante o processamento. Quanto maior o escoamento, maior a velocidade de preenchimento da matriz de compactação e maior a garantia de um produto homogêneo e com dimensões próximas do produto final. Na Tabela 3 são apresentados os resultados de densidade aparente e escoamento para as 4 ligas.

Tabela 3. Média das densidades aparentes e escoamento das misturas

misturas	Densidade aparente (g/cm ³)	Escoamento (Seg/ 50g)
Mix1	3,24	27
Mix2	3,25	26
Mix3	3,25	26
Mix4	3,24	26

3.3 Variação Dimensional

Variação dimensional é característica fundamental para o processamento de ligas sinterizadas, pois a metalurgia do pó é uma técnica de produção de componentes na forma e dimensão final ou muito próximo da final. Porém mais importante que a variação dimensional é a consistência dimensional em torno da média. Com baixa dispersão em torno da media, podem-se garantir as propriedades dimensionais requeridas sem a necessidade de agregar muitas operações posteriores de acabamento. A Figura 3 mostra a média e a dispersão das variações dimensionais das misturas avaliadas.

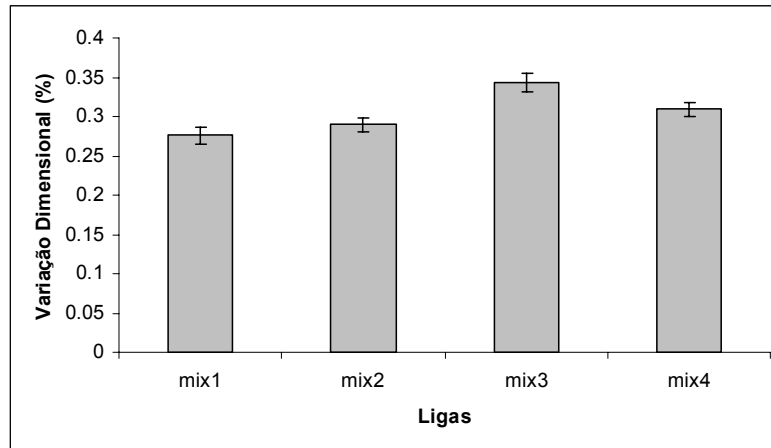


Figura 3. Variação dimensional e dispersão em torno da média para as misturas

Os resultados demonstram que embora as ligas contendo Cobre apresentem maior variação dimensional, sua dispersão permaneceu praticamente inalterada. Resultado similar foi encontrado por Silva e Lunardi⁽²⁾ no trabalho anterior, apresentado no Ptech. Segundo Lindsly e Murphy, os efeitos da variação dimensional imposta pelo cobre, "inchamento", pode ser minimizada com adição de grafite.

3.4 Resistência à Verde e Compressibilidade

A resistência a verde é a propriedade que garante que peças compactadas possam ser manuseadas com segurança entre as operações de compactação e sinterização. A melhor compressibilidade permite maiores densidades do compactado e, portanto influencia nas propriedades mecânicas após a sinterização. A Figura 4 apresenta os gráficos de resistência a verde e compressibilidade das misturas compactadas.

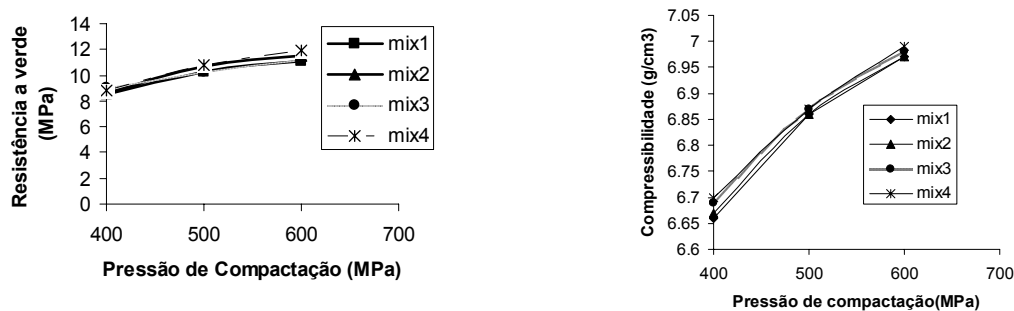


Figura 4. a) Curvas de resistência a verde e b) compressibilidade das misturas compactadas

Uma resistência a verde em torno de 12 MPa é considerada satisfatória como resistência a verde de trabalho e as 4 ligas atendem a este requisito. Para avaliação da compressibilidade dos pós tomou-se como base a pressão de 600MPa que é a pressão de compactação adotada em geral no processo de fabricação de sinterizados. A compressibilidade das quatro misturas estudadas está no mesmo patamar sendo alcançadas densidades próximas a 7.0 g/ cm³. Este resultado já foi obtido no trabalho de Silva e Lunardi⁽²⁾ para as ligas Distaloy AE® e Astaloy 85Mo®. Em geral, a compressibilidade dos pós pré-ligados com Molibdênio é menor que a do Distaloy AE®, devido a solução de endurecimento, como se pode observar na figura 4a. As misturas 3 e 4 porém, apresentam uma leve melhora de compressibilidade, devido à adição de cobre, material bastante mole, que auxilia na compactação.

3.5 Alongamento e Dureza

Alongamento expressa a medida de ductilidade do material. Ela representa uma medida do grau de deformação plástica sofrido pelo material quando da fratura. Portanto é uma característica importante não só quando se tem uma peça trabalhando sob esforço mecânico, mas também para evitar que falhas possam ocorrer na montagem do cubo em seu eixo. A propriedade que se opõe ao alongamento é a dureza. Quanto mais duro o material, mais frágil. No entanto, quando uma peça é submetida a atrito, como no caso dos cubos de sincronização, a medida de dureza também é importante, pois melhora a resistência ao desgaste. No projeto da peça, busca-se o melhor compromisso entre estas duas propriedades.

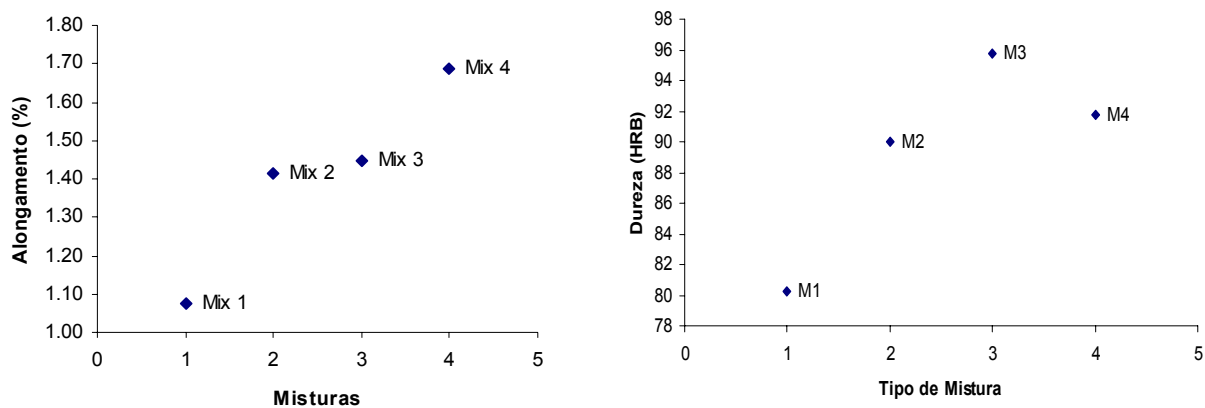


Figura 5. a) Valores médios de alongamento e b) Valores médios de dureza (HBR)

Conseguiu-se neste experimento, um ganho significativo na dureza (HRB) em relação ao trabalho apresentado por Silva e Lunardi.⁽²⁾ O Astaloy 85Mo® que no trabalho anterior apresentava dureza da ordem de 76 (HRB) alcançou uma dureza de 95 (HRB) para a liga com 1,5% de Cu, contra 87 (HRB) da liga Distaloy AE®. Controlando-se a taxa de resfriamento a microestrutura pode ser manipulada para produzir a propriedade exigida conforme trabalho de Causton e Fulmer.⁽⁵⁾ Neste trabalho o aumento na dureza é atribuído ao tratamento térmico de *sinterhardening* que proporciona uma dureza superficial ao material ao mesmo tempo em que mantém o núcleo dúctil garantindo as propriedades de alongamento.

3.6 Resistência à tração e Módulo de ruptura

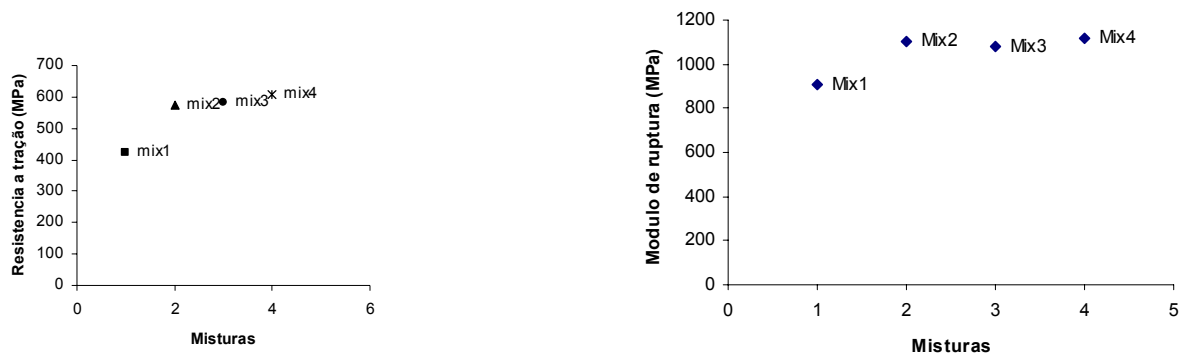


Figura 6. a) Resistência à tração e b) Módulo de ruptura

Como era esperado, as medidas de resistência à tração e módulo de ruptura seguem a mesma tendência. Obteve-se um ganho de pelo menos 10% em relação aos valores de resistência das ligas Distaloy AE® publicadas no trabalho Ptech. Os resultados de resistência e dureza em geral se contrapõem. Nossos resultados, no entanto, não mostram esta tendência. Este fato pode ser explicado pela correlação entre adição de cobre e tratamento de sinterhardening. Ligas que contêm cobre têm a tendência de mover a curva TTT para a direita, permitindo que a transformações de fases ocorra a taxas de resfriamento mais baixas. O sinterhardening é um tratamento térmico menos agressivo que a têmpera, mas ainda assim consegue transformar grandes proporções de austenita em martensita. Devido ao percentual de Cu, no entanto, ilhas de perlita também são formadas (FiguraS 2 b,c e d). Essa mescla de martensita, perlita e bainita na microestrutura modificam os valores de resistência e dureza, melhorando as propriedades do sinterizado.

3.7 Energia de Impacto

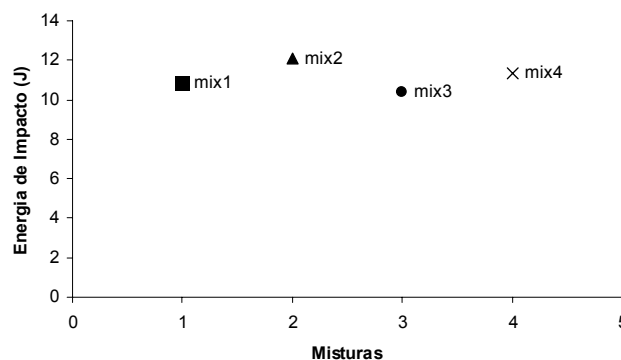


Figura 7. Energia de Impacto das misturas

A adição de Cu e o tratamento de sinterhardening não afetou a propriedade “energia de impacto”.

3.8 Ensaio de Fadiga

Fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes, e acreditamos ser esta a propriedade mais importante para a

boa performance de cubos de sincronização. Ensaio de fadiga foram realizados em amostras das mesmas ligas, na sede da Höganäs, Suécia. Utilizou-se 2 milhões de ciclos como referência (Tabela 4).

Tabela 4. Média de resistência a fadiga

Amostra	Resistência a fadiga (MPa)
Distaloy AE®	230
Astaloy 85Mo + 2% Cu	280

O melhor resultado de fadiga dos Astalloys 85Mo® com Cu em relação ao Distaloy AE® pode ser explicado observando a microestrutura. Enquanto que a microestrutura do Distaloy AE® é bastante heterogênea, apresentando uma matriz ferrítica, ver artigo PTECH 2007,⁽²⁾ os Astalloys 85Mo® com cobre têm uma microestrutura mais homogênea, com partículas de segunda fase mais finas. Esta fase mais fina serve como barreira de propagação de trinca e dessa forma aumenta a resistência à fadiga.

4 CONCLUSÕES

1 As ligas Astaloy 85Mo® com adição de cobre se apresentam como alternativa economicamente atraente quando comparadas com as ligas da família Distaloy.

2 As ligas Astalloys 85Mo® com teores de cobre acima de 1% e processadas em sinterhardening se apresentam como alternativa tecnicamente viável na fabricação pela MP de cubos de sincronização de transmissões, onde tanto a consistência dimensional quanto as propriedades mecânicas de alongamento, dureza, e limite de fadiga são requisitos fundamentais para o bom desempenho da peça.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Höganäs Brasil Ltda e a Magneti Marelli Cofap pelo apoio na execução do trabalho. Maria do Carmo Amorim agradece ao CNPq pela bolsa de pós-doutorado industrial concedida.

REFERÊNCIAS

- 1 London Metal Exchange <http://www.lme.co.uk/nickel.asp> acessado em 05/03/08 as 14:30hs.
- 2 Silva, Maria do Carmo Amorim, Lunardi Roberto.- Characteristics of alloys containing Mo and Cr in the production of synchronizer hubs produced by powder metallurgy, PTECH 6ª Conferência Latino-Americano de Tecnologia do Pó. Búzios (Brasil). 2007.
- 3 Souza, Sergio Augusto, Composição química dos aços, Ed. Edgard Blücher, Ltda, São Paulo, 1989.
- 4 Lindsley, B.; Murphy, T. Dimensional control in Cu-Ni containing ferrous pm alloys, Hoeganaes Corporation, 2007.
- 5 Causton R.J. and Fulmer, J.J., Sinterhardening low alloy steels, advances in Powder metallurgy and particulate materials –1992, vol 5-Metal powder industries federation, Princeton, N.J.