



Ligas nanocristalinas: histórico, desenvolvimento e aplicações eletroeletrônicas

B. A. Luciano^{1*}, W. B. de Castro²

¹Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Campina Grande

Rua Aprígio Veloso, 882, Caixa Postal 10105, CEP 58429-900, Campina Grande – Paraíba

²Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande

Rua Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-900, Campina Grande – Paraíba

(Recebido em 24/10/2011; revisado em 31/01/2012; aceito em 06/02/2012)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Baseados nas propriedades eletromagnéticas, como indução de saturação B_s , força coerciva H_c , resistividade elétrica, permeabilidade magnética μ e perdas no núcleo, neste artigo são apresentadas algumas considerações sobre o desenvolvimento e as aplicações de ligas nanocristalinas em dispositivos eletroeletrônicos, seus impactos na eficiência energética e na conservação do meio ambiente.

Palavras-chave: Liga nanocristalinas; ligas amorfas; eficiência energética.

Abstract:

Based on electromagnetic properties, such as saturation magnetic induction B_s , coercive force H_c , electric resistivity, magnetic permeability μ , and core losses, in this article are presented some considerations about the development and applications of nanocrystalline alloys and their impacts on energy efficient electromagnetic devices and the environmental conservation.

Keywords: Nanocrystalline alloys; amorphous alloys; energy efficiency.

1. Introdução

Como decorrência das pesquisas e do desenvolvimento das ligas amorfas, um novo material magneticamente mole foi obtido e reportado por Yoshizawa e seus colaboradores: a liga nanocristalina $Fe_{73,5}Si_{13,5}B_9Nb_3Cu_1$, que recebeu a denominação nanocristalina devido à sua estrutura de grãos da fase Fe(-Si) em escala nanométrica, na ordem de 1 a 100 nm [1].

Para a obtenção da citada liga, Yoshizawa e seus colaboradores utilizaram, inicialmente, fitas de ligas amorfas de composição Fe-Si-B-M (M = Cu, Nb, Mo, W, Ta), obtidas pelo método de solidificação rápida. Essas fitas tinham aproximadamente 5 mm de largura e espessura variando de 15 a 20 μ m. Em seguida, essas fitas foram enroladas sob a forma de núcleos toroidais com 19 mm de diâmetro externo e 15 mm de diâmetro interno, que foram submetidos a tratamento térmico em diferentes níveis de temperatura, variando de 673 K a 923 K, durante 1 h, sob atmosfera de gás nitrogênio. Tal tratamento térmico poderia ocorrer com a presença de um campo magnético aplicado sobre a amostra toroidal, no sentido transversal ou longitudinal. Durante estes ensaios foram determinadas características como: curva $B-H$,

permeabilidade magnética relativa, perdas no núcleo e temperatura de cristalização.

Para analisar a evolução microestrutural da liga nanocristalina, foi utilizado um equipamento chamado APFIM (*Atom Probe Field Ion Microscope*). Todo o processo teve início a partir de uma matriz amorfa, em que cada elemento componente da liga se distribui de forma homogênea na amostra. Quando esta matriz na sua forma bruta de têmpera foi recozida durante 1 h em uma temperatura abaixo da sua temperatura de cristalização (823 K), verificou-se que a liga continuava sendo amorfa, mas a análise com o APFIM revelou que teve início a formação de aglomerados com alguns nanômetros de comprimento, ricos em cobre, estruturas estas denominadas *clusters*.

A condição ótima de nanocristalização ocorreu quando o tratamento térmico foi realizado durante 1 h a uma temperatura de 823 K, condição em que a observação da amostra revelou a presença de três fases. A principal delas foi a fase cristalizada que, possuindo estruturas cúbicas de corpo centrado (ccc) de Fe-Si, é a responsável pelas propriedades ferromagnéticas da liga. Entre os grãos de Fe-Si existia ainda uma fase amorfa rica em boro e nióbio, contendo silício e uma pequena quantidade de cobre. Adicionalmente a essas duas fases, foi encontrada uma fase rica em cobre, na forma dos *clusters*, obtidos no recozimento realizado abaixo da

*Email: benedito@dee.ufcg.edu.br (B. A. Luciano)

temperatura de cristalização. Nessa fase, verificou-se a presença de cristais com estrutura cúbica de face centrada (cfc), com o cobre sendo o principal elemento, sendo encontrados, também, os demais componentes da liga. Esses cristais formam grãos com diâmetro de cerca de 5 nm que, devido à baixa concentração de ferro, não possui propriedades magnéticas.

Nesse processo, os *clusters* ricos em cobre aparecem na matriz amorfa antes do início da cristalização do Fe-Si. Esses aglomerados também alteram a distribuição do elemento ferro na amostra, provocando a segregação do cobre e do ferro. Devido à alta concentração do ferro em determinadas áreas da matriz, a nucleação de estruturas cúbicas de corpo centrado de Fe-Si é fortemente favorecida. Como o nióbio e o boro são insolúveis na fase Fe-Si, à medida que esta última vai se formando, os primeiros elementos vão enriquecendo a fase amorfa remanescente.

No decorrer do processo de recozimento, os grãos de Fe-Si vão crescendo. Como o aumento da concentração de nióbio e boro na matriz amorfa acaba por estabilizar esta fase, o crescimento dos grãos na fase Fe-Si termina por cessar. A concentração de cobre nos *clusters* acaba por aumentar com o decorrer do processo de cristalização, causando um empecilho ao crescimento dos grãos de Fe-Si. Com isto, os grãos dos *clusters* vão crescer até por volta de 5 nm de diâmetro e a presença de cobre pode atingir cerca de 60 % ou mais. Essa fase pode eventualmente tornar-se paramagnética à temperatura ambiente, mas, como seus grãos são de tamanho muito pequeno, relativamente à espessura das paredes dos domínios, a presença dessa fase não afeta as propriedades ferromagnéticas da liga. Assim sendo, dois fatores principais acabam por favorecer a formação de grãos nanométricos durante este processo de fabricação. O primeiro é o aumento dos pontos de nucleação dos grãos de Fe-Si, processo esse favorecido pela formação dos *clusters* de cobre; a lógica é que quanto mais pontos iniciais de cristalização houver na matriz, a tendência é a formação de grãos cada vez menores. Outro fator é a presença da fase amorfa circundando os grãos ferromagnéticos, o que acaba por dificultar o crescimento dos mesmos; e a redução do tamanho do grão é o ponto chave para as propriedades magneticamente moles dos materiais nanocristalinos, abrindo possibilidades de emprego das ligas nanocristalinas em dispositivos eletroeletrônicos.

Neste artigo, tomando como base as propriedades eletromagnéticas, como indução de saturação B_s , força coerciva H_c , permeabilidade magnética μ e perdas no núcleo, em W/kg, são apresentadas algumas considerações sobre o desenvolvimento e as aplicações de ligas nanocristalinas em dispositivos eletroeletrônicos, seus impactos na eficiência energética e sustentabilidade ambiental.

2. Desenvolvimento das ligas nanocristalinas magneticamente moles

Melhorarias nas propriedades das ligas nanocristalinas tem sido relatadas por diversos autores. Na Tabela 1 é apresentado um levantamento amostral sobre

desenvolvimento de algumas dessas ligas, num recorte temporal que vai de 1988 a 2011.

Tabela 1. Desenvolvimento das ligas nanocristalinas, de 1988 a 2011

Ano	Liga nanocristalina	Referências
1988	Fe-Si-B-M [M: Cu, Nb, Mo, W, Ta etc].	Y. Yoshizawa <i>et al</i> [1].
1989	Co-M-C [M: Hf, Zr, Ta, etc] Fe-M-C [M: Hf, Zr, Ta, etc]	N. Hasegawa e M. Saito [2]
1989	Fe-Au-Nb-Si-B	N. Kataoka <i>et al.</i> [3]
1990	Fe-M-N [M: Hf, Zr, Ta, etc]	K. Nakanishi <i>et al.</i> [4]
1990	Fe-M-B [M: Hf, Zr, Nb, etc]	K. Suzuki <i>et al.</i> [5]
1990	Fe-Cu-P-C-Ge	Y. Fujii <i>et al.</i> [6]
1991	Fe-Zr-B-Cu	A. Makino <i>et al.</i> [7]
1991	Fe-Cu-Nb-Si-B	P. Allia <i>et al.</i> [8]
1992	Fe-Cr-Cu-Nb-Si-B	A. Ślawska-Waniewska <i>et al.</i> [9]
1993	Fe-Ga-Si-Nb-B	T. Tomida [10]
1994	Fe-Cu-Nb-Sb-Si-B Fe-Cu-W-Si-B	J. Degro <i>et al.</i> [11]
1995	Fe-B-Nb-Cu	J. S. Lee <i>et al.</i> [12]
1996	Fe-Al-Nb-B-Cu	J. Y. Park <i>et al.</i> [13]
1997	Fe-Zr-B-Cu	Y. Naitoh <i>et al.</i> [14]
1998	Fe- Co-Zr-B-Cu	M. A. Willard <i>et al.</i> [15]
1999	Fe- Co-M-B-Cu (M: Zr, Hf, Nb, etc)	M. A. Willard <i>et al.</i> [16]
2000	Fe-Cu-M-Si-B (M: Nb, V)	N. S. Mitrovic <i>et al.</i> [17]
2001	Fe-Co-Si-B-Cu-Nb	J. M. Borrego <i>et al</i> [18].
2002	Co-Fe-Zr-B-Cu	A. Makino <i>et al</i> [19]
2002	Fe-Zr-B	M. Hasiak <i>et al.</i> [20]
2003	Fe-Nb-B-P-Cu	A. Makino e T. Bitoh [21]
2004	Fe-Co-Cu-M-Si-B (M: Nb, Zr)	Y. Yoshizawa <i>et al.</i> [22]
2005	Fe-Co-Cu-Nb-Si-B	Yoshizawa e Ogawa [23]
2006	Fe-Zr-B-Cu	J. C.-h. Shih <i>et al.</i> [24]
2006	Fe-Si-Ni	A. Bahrami <i>et al.</i> [25]
2007	Fe-Nb-B-P-Cu	A. Makino <i>et al.</i> [26]
2008	Fe-Ge-Nb-B-Cu	Muraca <i>et al.</i> [27]
2009	Fe-Si-B-P-Cu	A. Makino <i>et al.</i> [28]
2010	Fe-Co-Ni-Zr-B	A. Gonzáles <i>et al.</i> [29]
2011	Fe-Si-B-P-Cu	F. Kong <i>et al.</i> [30]

As primeiras ligas nanocristalinas foram desenvolvidas por Yoshizawa *et al.* e Inoue *et al* [15]. A liga $Fe_{73,5}Si_{13,5}B_9Nb_3Cu_1$, obtida por Yoshizawa *et al.* recebeu o nome comercial FINEMET e a liga $Fe_{88}Zr_7B_4Cu_1$, obtida por

Inoue *et al.* recebeu a designação NANOPERM. Essas ligas, embora apresentem características magneticamente moles interessantes como baixas forças coercivas (0,6 a 2,5 A/m), elevados valores de permeabilidade magnética relativa (até 200.000), elas apresentam valores de indução de saturação magnética B_s inferiores (1,2 a 1,35 T) aos das ligas amorfas à base de ferro (1,56 T).

No entanto, essa limitação relativa à densidade de saturação começa a ser superada com o desenvolvimento de novas ligas nanocristalinas com valores de B_s superiores a 1,8 T [28, 30].

Na Tabela 2 são apresentados valores comparativos dessas novas ligas nanocristalinas face às ligas de Fe-Si e a liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$.

Tabela 2. Propriedades magnéticas [31]

Composição	B_{800} (T)	H_c (A/m)
$Fe_{85}Si_2B_8P_4Cu_1$	1,82	5,8
$Fe_{86}Si_1B_8P_4Cu_1$	1,85	2,8
Fe3% Si GNO	1,51	26
Fe3%Si GO	1,78	10
$Fe_{78}B_{13}Si_9$	1,49	2,6

Adicionalmente, deve-se registrar que a liga $Fe_{85}Si_2B_8P_4Cu_1$ apresenta perda magnética ativa em torno de 0,2 W/kg a 50 Hz sob indução de 1,5 T.

No âmbito do Brasil, estudos e pesquisas sobre as ligas nanocristalinas vêm sendo realizados por pesquisadores de diversas universidades e dentre essas se destacam: UFSCar, USP, Unicamp, UFRJ, UFES, UFRGS e UFCG. Muito desses trabalhos têm sido apresentados em periódicos e eventos científicos, nacionais e internacionais, tais como: CBECIMAT, NANOMAT, International Conference on Rapidly Quenched & Metastable Materials - RQ, International Symposium on Metastable, Amorphous and Nanostructured Materials – ISMANAM.

3. Aplicações eletroeletrônicas

O elevado valor da permeabilidade magnética, da resistividade elétrica, baixa força coerciva, boa estabilidade térmica e indução de saturação superior a 1,20 T, conferem às ligas nanocristalinas diferentes possibilidades de aplicações em dispositivos eletroeletrônicos, tais como: sensores de corrente para sistemas de proteção, núcleos enrolados para atenuação de interferência eletromagnética, transformadores de pulso, componentes para fontes chaveadas, conversores de frequência para acionamento de máquinas elétricas, indutores, reatores saturáveis, cabeçotes magnéticos e transformadores de corrente [32].

Em aplicações de sensores de corrente para monitoramento da corrente de fuga em pára-raios de óxido de zinco, utilizados na proteção de sistemas elétricos (60 Hz), a característica mais importante da liga nanocristalina a ser empregada é a linearidade da curva de magnetização para valores de intensidade de campo magnético correspondentes a correntes elétricas da ordem de microampères.

Na Figura 1a são apresentados um protótipo do medidor de corrente de fuga em pára-raios de óxido de zinco e alguns núcleos toroidais de ligas nanocristalinas testados como elemento sensor de corrente.

Na Figura 1b é apresentado o sistema de monitoramento desenvolvido por pesquisadores dos laboratórios LIMC (Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas) e LAT (Laboratório de Alta Tensão) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande [33].



(a)



(b)

Figura 1. Sistema de monitoramento da corrente de fuga em pára-raios de óxido de zinco

Para frequências na ordem de kHz, 20 kHz/0,2 T, por exemplo, as perdas na excitação do núcleo de liga nanocristalina $Fe_{80,5}Cu_{1,5}Si_4B_{14}$ são cerca de 60% menores que as perdas apresentadas por núcleos de liga amorfa à base de ferro, largamente utilizados na eletrônica de potência [34].

Em transformadores de corrente (TC) empregados em sistemas de medição de energia elétrica para fins de faturamento a principal contribuição da liga nanocristalina utilizada no núcleo do TC é a redução do erro de fase [35].

Embora, quando comparadas com as ligas de Fe-Si de grãos orientados, as ligas nanocristalinas apresentem permeabilidades magnéticas mais elevadas, baixas perdas ativas (W/kg) e baixos valores de força coerciva no processo cíclico de magnetização e desmagnetização do núcleo, elas não são adequadas ao emprego em transformadores de sistemas de distribuição de energia elétrica. O motivo principal é que, depois do processo de nanocristalização, as ligas nanocristalinas se tornam quebradiças, que torna impraticável a montagem e desmontagem mecânica das bobinas primárias e secundárias do transformador em torno do núcleo.

4. Eficiência energética e sustentabilidade ambiental

Atualmente, ligas amorfas e ligas nanocristalinas magneticamente moles têm sido empregadas em diversas aplicações eletroeletrônicas, desde baixas frequências até frequências mais elevadas, na ordem de kHz.

Porém, conforme comentado no item 3, as espessuras reduzidas das ligas nanocristalinas, produzidos em forma de fitas muito delgadas e quebradiças, impõem dificuldades durante a montagem eletromecânica dos núcleos, implicando numa abordagem específica para a definição do projeto e em cuidados especiais na montagem dos dispositivos eletroeletrônicos.

Dentre esses cuidados, é recomendável o uso de luvas, para evitar a oxidação acelerada do material magnético. Outra recomendação é o encapsulamento do núcleo para que ele possa absorver tensões mecânicas externas, sem que isto implique em dificuldades de dissipação térmica das inevitáveis perdas associadas ao processo de conversão de energia.

Observados esses cuidados, verifica-se que a combinação das excelentes propriedades magnéticas, elétricas e térmicas [16] faz das nanocristalinas fortes concorrentes das ligas permalloys, ferrites Mn-Zn e ligas amorfas em diversas aplicações eletroeletrônicas, nas quais a eficiência energética seja a figura de mérito preponderante.

Entretanto, deve-se ressaltar que embora o emprego das ligas amorfas e das ligas nanocristalinas em equipamentos eletroeletrônicos esteja associado à eficiência energética e à conservação de energia, estudos mais detalhados precisam ser realizados e publicados, particularmente no tocante a dois aspectos: a influência desses materiais na qualidade da energia elétrica e os eventuais impactos ambientais decorrentes do descarte desses materiais após a sua vida útil, preocupações essas postas em prática atualmente no tocante aos transformadores com núcleo de liga amorfa instalados nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

4. Conclusões

Neste artigo foram apresentadas algumas considerações sobre o desenvolvimento e as aplicações de ligas nanocristalinas em dispositivos eletroeletrônicos, seus impactos na eficiência energética e conservação do meio

ambiente. As conclusões obtidas são apresentadas, de forma sumária, a seguir:

(1) A principal motivação para o desenvolvimento das ligas nanocristalinas é a demanda crescente por materiais magneticamente moles mais eficientes voltados para aplicações em dispositivos eletroeletrônicos.

(2) Desde a primeira liga nanocristalina desenvolvida, vários pesquisadores tem envidado esforços para a obter novas ligas com propriedades superiores às ligas tradicionalmente aplicadas em dispositivos eletroeletrônicos, tais como permalloys, ferrites Mn-Zn e ligas amorfas.

(3) As propriedades que tornam as ligas nanocristalinas magneticamente moles competitivas são: baixos valores de força coerciva (inferiores a 2,5 A/m), permeabilidade magnética relativa elevada (na ordem de 200.000), baixas perdas ativas (0,2 W/kg, por exemplo), e indução de saturação superior a 1,8 T.

(4) Ligas nanocristalinas à base de FeSiBPCu, devido a ausência de metais raros em sua composição, são de baixo custo e energeticamente eficientes, pois além das baixas perdas ativas, apresentam valores elevados de indução magnética (entre 1,82 e 1,85 T), quase comparáveis aos dos aços de grãos orientados, valores baixos de força coerciva (entre 5,8 e 2,8 A/m) e coeficientes de magnetostricção (entre $2,3 \times 10^{-6}$ e $2,4 \times 10^{-6}$).

Referências

- [1] Yoshizawa, Y.; Oguma S.; Yamamuchi, K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *J. Appl. Phys.*, vol. 64, p. 6044-6046, 1988.
- [2] Hasegawa, N.; Saito, M. Soft magnetic properties of microcrystalline Co-M-C (M: group IVA approximately VIA elements) films with high thermal stability, *Journal of the Japan Institute of Metals*, vol. 54, p. 1270-1278, 1990.
- [3] Kataoka, N.; Matsunaga, T.; Inoue, A.; Masumoto, T. Soft magnetic properties of bcc Fe-Au-X-Si-B (X = early transition metal) alloys with fine grain structure, *Transactions on the Japan Institute of Metals*, vol. 30, p. 947-950, 1989.
- [4] Nakanishi, K.; Shimizu O.; Yoshida, S. Magnetic Properties of Fe-X-N (X=Zr, Hf, Nb, Ta) Films, *Journal of Magnetic Society of Japan*, vol. 15, p. 371-374, 1991.
- [5] Suzuki, K.; Kataoka, N.; Inoue, A.; Makino, A.; Masumoto, T. High saturation magnetization and soft magnetic properties of bcc Fe-Zr-B alloys with ultrafine grain structure, *Mater. Trans. JIM*, vol. 31, p.743-746, 1990.
- [6] Fujii, Y.; Fujita, A.; Seki, A.; Tomida, T. Magnetic properties of fine crystalline Fe-P-C-Cu-X alloys, *J. Appl. Phys.*, vol. 70, p. 6241-6243, November, 1991.
- [7] Makino, A.; Suzuki, K.; Inoue, A.; Masumoto, T. Low core loss of a bcc Fe₈₆Zr₇B₆Cu₁ alloy with nanoscale grain size, *Materials Transactions, JIM*, vol. 32, No. 6, p. 551-556, 1991.
- [8] Allia, P.; Beatrice, C.; Vinai, F.; Knobel, M.; Turtelli, R. Suppression of the magnetic-permeability relaxation in

- nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$, *Applied Physics Letters*, No. 59, p. 2454-2456, 1991.
- [9] Ślawska-Waniewska, A.; Gutowski, M.; Lachowicz, H. K. Superparamagnetism in a nanocrystalline Fe-based metallic glass, *Phys. Rev. B*, vol. 46, 14594-14597, 1992.
- [10] Tomida, T. Crystallization of Fe-Si-B-Ga-Nb amorphous alloy, *Materials Science and Engineering: A*, A179/A180, p. 521-525, 1994.
- [11] Degro, J.; Vojtanik, P.; Konc, M.; Zentko, A.; Csach, K.; Ocelik, V. Magnetic properties of nanocrystalline FeCuNb(Sb/W)SiB alloys, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, No. 2, pp.499-501, 1994.
- [12] Lee, J. S.; Kim, K. Y.; Noh, T. H.; Kang, I. K.; Yoo, Y. C. The Magnetic Properties of Ultrathin FeBNbCu Nanocrystalline Alloy. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, No. 6, p. 3901-3903, 1995.
- [13] Park, J. Y.; Kim, K.Y.; Noh, T. H.; Suh, S. J. The Magnetic Properties of Ultrathin Fe-Al-Nb-B-Cu Nanocrystalline Alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, No. 5, 1996.
- [14] Naitoh, Y.; Bitoh, T.; Hatanai, T.; Makino, A.; Inoue, A.; Masumoto, T. Applications of nanocrystalline soft magnetic Fe-M-B (M=Zr, Nb) alloys. *NanoStructured Materials*, vol. 8, No. 8, p. 987-995, 1997.
- [15] Willard, M. A.; Laughlin, M., D. E.; McHenry, M. E.; Thoma, D.; Sickafus, K.; Cross, J. O.; Harris, V. G. Structure and magnetic properties of $(\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{88}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}_1$ nanocrystalline alloys, *Journal of Applied Physics*, vol. 84, No. 12, p. 6773-6777, 1998.
- [16] Willard, M. A.; Huang, M. -Q.; Laughlin, D. E.; McHenry, M. E.; Cross, J. O.; Harris, V. G.; Franchetti, C. Magnetic properties of HITPERM (Fe, Co) $_{88}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}_1$ magnets, *Journal of Applied Physics*, vol. 85, No. 8, p. 4421-4423, 1999.
- [17] Mitrovic, N. S.; Djukic, S. R.; Djuric, S. B. Crystallization of the Fe-Cu-M-Si-B (M= Nb, V) amorphous alloys by direct-current joule heating, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, No. 5, p.3858-3862, 2000.
- [18] Borrego, J. M.; Conde, C. F.; Conde A.; Grenèche, J. M. Crystallization of Co-containing Finemet Alloys, *Journal of Non-Crystalline Solids*, No. 287, p. 120-124, 2001.
- [19] Makino, A.; Claassen, J. H.; Stroud, R. M.; Harris, V. G. Structure and magnetic properties of (Co,Fe)- based nanocrystalline soft magnetic materials, *Journal of Applied Physic.*, vol. 91, No. 10, p. 8420-8422, 2002.
- [20] Hasiak, M.; Miglierini, M.; Yamashiro, Y.; Ciurzynska, W. H.; Fukunaga, H. Microstructure and magnetic properties of nanocrystalline Fe-Zr-B alloy, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, No. 239, p. 506-508, 2002.
- [21] Makino, A.; Bitoh, T. As-quenched and nanocrystallized structure for Nb-poor Fe-Nb-B-P-Cu soft magnetic alloys melt spun in air, *Journal of Applied Physics*, vol. 93, No. 10, p. 6522-6524, 2003.
- [22] Yoshizawa, Y.; Fujii, S.; Ping, D. H.; Ohnuma, M.; Hono, K. Magnetic properties of nanocrystalline Fe-Co-Cu-M-Si-B alloys (M: Nb, Zr), *Materials Science and Engineering A* 375-377, p.207-212, 2004.
- [23] Yoshizawa, Y.; Ogawa, Y. Magnetic properties of high B_s nanocrystalline FeCoCuNbSiB alloys, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, No. 10, p.3271-3273, 2005.
- [24] Shih, J. C.-h.; Bourgeois, L.; Suzuki, K.; Garitaonandia, J. S. Grain growth process of two-phase nanocrystalline soft magnetic materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, No. 304, p. 693-696, 2006.
- [25] Bahrami, A.; Madaah-Hosseini, H. R.; Abachi, P.; Miraghaei, S. Structural and soft magnetic properties of nanocrystalline $\text{Fe}_{85}\text{Si}_{10}\text{Ni}_5$ powders prepared by mechanical alloying, *Materials Letters*, No. 60, p. 1068-1070, 2006.
- [26] Makino, A.; Bingo, M.; Teruo, T.; Yubuta, K.; Inoue, A. Improvement of soft magnetic properties by simultaneous addition of P and Cu for nanocrystalline FeNbB alloys, *Journal of Applied Physics*, vol. 101, p. 1-3, 2007.
- [27] Muraca, D.; Cremaschi, V.; Moya, J.; Sirkin, H. FINEMET type alloy without Si: Structural and magnetic properties, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, No. 320, p. 1639-1644, 2008.
- [28] Makino, A.; Men, H.; Kubota, T.; Yubuta, K.; Inoue, A. New excellent soft magnetic FeSiBPCu nanocrystallized alloys with high B_s of 1.9 T from nanohetero-amorphous phase, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, p. 4302-4305, 2009.
- [29] González, A.; Escoda, L.; Suñol, J. J.; Shao, G.; Arcondo, B.; Bruna, P. Thermal and structural study of nanocrystalline Fe(Co)NiZrB alloys prepared by mechanical alloying, *Journal of Material Science*, No. 45, p. 557-561, 2010.
- [30] Kong, F.; Wang, A.; Fan, X.; Men, H.; Shen, B.; Xie, G.; Makino, A.; Inoue, A. High B_s $\text{Fe}_{84-x}\text{Si}_4\text{B}_8\text{Cu}_x$ (x=0-1.5) nanocrystalline alloys with excellent magnetic softness. *Journal of Applied Physics*, 109, 07A303, 2011.
- [31] Makino, A.; Kubota, T.; Yubuta, K.; Inoue, A.; Urata, A.; Matsumoto, H.; Yoshida, S. Low core losses and magnetic properties of $\text{Fe}_{85-86}\text{Si}_{1-2}\text{B}_8\text{P}_4\text{Cu}_1$ nanocrystalline alloys with high B for power applications (invited) , *Journal of Applied Physics* 109, 07A302, 2011.
- [32] Yoshizawa, Y. Magnetic properties and microstructure of nanocrystalline Fe-based alloys, *Materials Science Forum*, vol. 307, p.51-62, 1999.
- [33] Macedo, E. C. T. ; Lira, J. G. A.; Costa, E. G.; Freire, R. C. S.; Luciano, B. A.; Maia, M. J. A. Inductive current sensor based on nanocrystalline alloys, In: *Anais XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, Lisboa, p. 840-843, 2009.
- [34] Hasegawa, R. Advances in amorphous and nanocrystalline materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (submetido).
- [35] Luciano, B. A.; Freire, R. C. S.; Castro, W. B. TC com núcleo toroidal: influência do material magnético sobre o ângulo de fase. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, p. 172-181, 2005.