

## Desenvolvimento de sensores nanocristalinos Fe-Si-Cu-Nb-B para magnetômetros fluxgate

Perez, G. e Benyosef, L. C. C. , Observatório Nacional

Copyright 2006, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do I SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.*

### Resumo

Este trabalho é parte do projeto de desenvolvimento e construção de sensores magnéticos do tipo fluxgate, utilizando materiais nanocristalinos, para equipar os magnetômetros construídos no Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional (LDSM/ON). Desde 1998 o LDSM/ON constrói e desenvolve magnetômetros fluxgate equipados com sensores convencionais cristalinos e amorfos. Neste projeto o material nanocristalino é obtido através de tratamento termomagnético, a partir de materiais magnéticos amorfos. É parte também deste trabalho a seleção do material, o estudo e a execução do tratamento térmico apropriado que otimizará as propriedades magnéticas do núcleo sensor. Após a montagem do núcleo do sensor são avaliados sua resolução e nível de ruídos. Este projeto visa obter sensores com taxa de ruído abaixo de 60 pT (rms, no intervalo 0.05 a 2.0 Hz) o que o torna compatível com os similares construídos com materiais amorfos e cristalinos comerciais e de alta performance. Os testes de simulação estão sendo realizados utilizando um magnetômetro de circuito aberto desenvolvido para esta finalidade no LDSM/ON.

### Introdução

No desenvolvimento de fluxgate com resolução abaixo de 0.1 nT é necessária atenção especial na escolha do material que irá compor o núcleo do sensor, sendo esta escolha fundamental especialmente para reduzir ruídos tais como o Barkhausen, que limita a sensibilidade e precisão do instrumento.

Os primeiros magnetômetros deste tipo foram construídos com ligas cristalinas de níquel-ferro, denominadas mu-metal ( $\text{Ni}_{77}\text{Fe}_{16}\text{Cr}_2\text{Cu}_5$ ). Posteriormente, surgiram outras opções de materiais cristalinos que permitiam maior estabilidade, resolução e menor nível de ruído. A melhor liga conhecida foi desenvolvida pela marinha americana conhecida como 6-81 Mo-Permalloy ( $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{13}\text{Mo}_6$ ), que ainda é amplamente aplicada no programa espacial da NASA. Devido ao seu caráter

estratégico, a venda dessas ligas é controlada e sua obtenção extremamente difícil.

Nos anos 80, um grupo do Instituto de Pesquisas Espaciais da Dinamarca, iniciou o estudo de novos materiais para compor o núcleo dos magnetômetros a partir de vidros metálicos amorfos. Na seqüência, vários trabalhos mostraram que algumas fitas de vidro metálico amorfo apresentam excelentes propriedades para aplicação em magnetômetros do tipo fluxgate.

A tabela abaixo mostra a comparação entre parâmetros que determinam a funcionalidade do sensor, como a força coerciva, permeabilidade e temperatura de Curie.

Núcleo	Hc (Oe)	$\mu_{\text{max}}$	T <sub>C</sub> (°C)
Ferrite	0,09	90.000	450
Mumetal	0,05	100.000	460
Permalloy	0,05	100.000	460
Amorfos	0,005	130.000	250

Na tabela acima vê-se comparativamente que os materiais amorfos, usados atualmente nos sensores fluxgate do LDSM/ON, apresentam maior desempenho, por possuírem campo coercitivo reduzido, alta permeabilidade magnética e menor temperatura de Curie que os demais.

Em meados dos anos 90' surgiu um novo tipo de material que tem ainda atraído especial atenção, os nanocristalinos com os quais é possível obter sensores fluxgate com alta sensibilidade, baixo nível de ruídos, além de menores custos.

### Metodologia

Os núcleos dos sensores fluxgate neste projeto têm geometria toroidal (ring-core) considerando que este formato é preferido para várias aplicações onde seja requerida alta exatidão e estabilidade. Uma das vantagens é a redução mecânica do ruído offset ajustando o núcleo sensor em relação a bobina sensora. Usualmente os núcleos no LDSM/ON são montados a partir de fitas com larguras entre 1.0 e 1.5 mm dispostas entre 9 e 12 camadas ao redor de um suporte não magnético. O material amorfo que está sendo usado neste projeto foi obtido com estrutura inicial amorfa por um processo de solidificação rápida denominado "melt-spinnig".

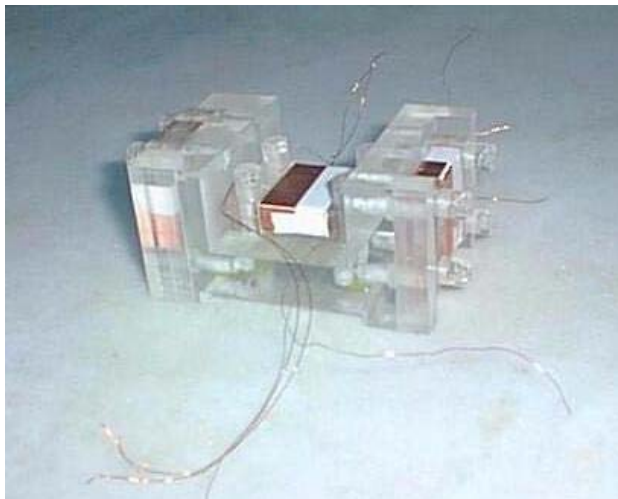


Figura 1 – Sensor fluxgate de geometria toroidal, triaxial desenvolvido no LDSM/ON.

Neste método, a fusão da liga é feita em um cadinho constituído por um tubo de quartzo transparente com um vazante linear para saída do material.

O aquecimento até a fusão do material é conseguido por efeito Joule, o material fundido é lançado sobre uma roda em movimento de rotação. A ejeção do material se dá pela aplicação de uma pressão de Nitrogênio ou Argônio ultrapuro, pela parte superior do cadinho.

O contato do material com o disco provoca uma solidificação rápida pela troca térmica entre os dois corpos. Uma vez obtida a fita amorfa esta será submetida a tratamento térmico. Este tem como objetivo provocar o aparecimento de cristais nanoscópicos, os nanocristais, a partir das ligas em estado amorfo produzidas.

O tratamento térmico típico para este tipo de ligas é feito geralmente a uma temperatura próxima de 550°C durante o tempo de 1 h de duração.

Estas ligas nanocristalinas apresentam excelentes propriedades magnéticas moles; alta permeabilidade, baixo campo coercivo e magnetostricção próxima de zero. Obtendo desta forma maior resolução com menor nível de ruídos.

Estes magnetômetros serão testados em trabalhos de campo uma vez montados e comparados seus resultados com os dos sensores comerciais.

## Resultados

Os resultados deste trabalho estão sendo obtidos em etapas de acordo com a cronologia do desenvolvimento que será totalmente finalizado em março do próximo ano. Inicialmente estão sendo caracterizadas as ligas obtidas antes e depois do tratamento térmico. Posteriormente serão feitos testes com os magnetômetros já montados e calibrados, estes últimos resultados serão comparados com os testes feitos com os magnetômetros de núcleos comerciais.

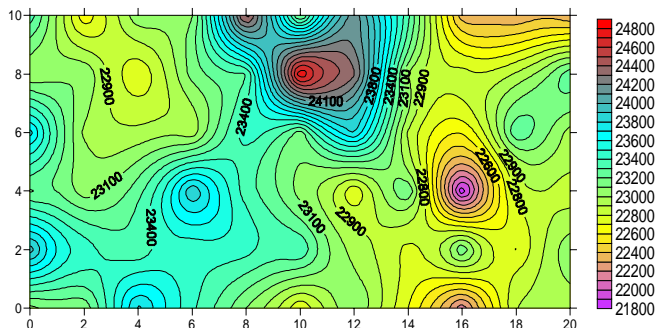


Figura 2 – Levantamento magnético realizado com um magnetômetro fluxgate de núcleo amorfo produzido no LDSM/ON

A caracterização magnética da liga que compõe o núcleo será feita com um traçador de curvas de histerese onde como resultado esperamos um ciclo de histerese fechado, com pequeno campo coercivo  $H_c$  e uma permeabilidade magnética bastante alta. Este ciclo de histerese deve apresentar uma curva suave e ser bem estreito, a diferença dos ciclos obtidos com outras ligas, que apresentam forma quadrada, o que não seria bom, pois estes ciclos quadrados geram um nível de ruídos maior.

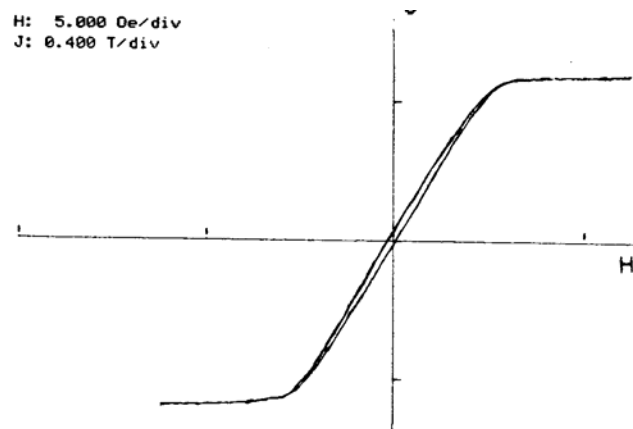


Figura 3 – Ciclo de histerese obtida de um núcleo de material nanocristalino.

Em relação aos resultados esperados das medições feitas com os magnetômetros. Podemos esperar que as medições feitas com os magnetômetros feitos com a nova liga nanocristalina sejam de maior resolução em torno de 0,1 nT, já que os magnetômetros atualmente utilizados pelo ON é em torno de 1 nT tesla de resolução. Nestes resultados também será analisado o nível de ruídos, esperamos que o nível de ruídos dos novos núcleos atinja um valor inferior a 60 pT.

## Discussão e Conclusões

Considerando nível de ruídos e a resolução, pode-se dizer que os novos magnetômetros a serem montados, utilizando sensores construídos com materiais nanocristalinos, devem apresentar desempenho no mínimo compatível com os demais construídos com materiais amorfos. Entretanto estes resultados dependem também da composição química do material e da sua estrutura atômica. Também os processos de tratamento térmico, responsável pela nanocristalização e otimização das propriedades magnéticas são fundamentais.

Depois do material devidamente tratado a opção pela geometria é decisiva. Na figura 4 temos o ciclo de histerese do material já tratado termicamente, onde podemos observar as características já descritas anteriormente. O nível de ruído obtido no sinal é da ordem de pT, como podemos ver na figura 4. No gráfico inferior temos o sinal do sensor, e o seu análise FFT no gráfico superior. Este resultado foi obtido utilizando o sensor amorfo colocado dentro da blindagem magnética, ou seja, com campo externo nulo.

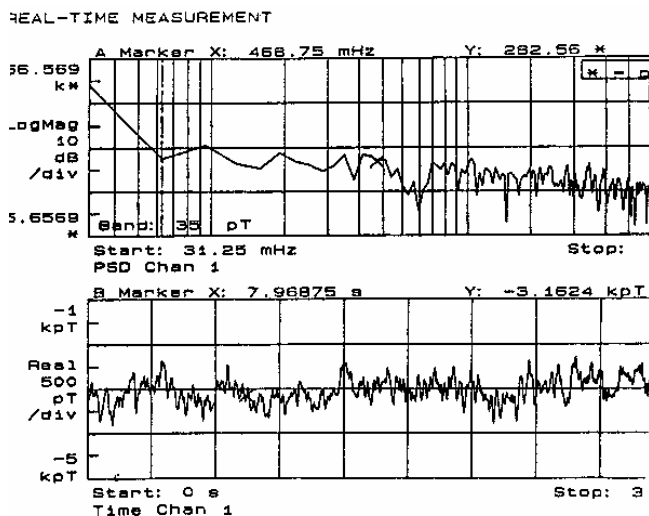


Figura 3 – Análise de ruído realizado com campo nulo

## Agradecimentos

A FAPERJ por financiar parte do projeto e a UFRJ/COPPE pelo apoio. Também queremos agradecer aos colegas Júlio Vaz e Leonardo Abeid pela permissão em publicar os resultados do levantamento por eles realizado utilizando um magnetômetro fluxgate do LDSM/ON construído com materiais magnéticos amorfos.

## Referências

Benyosef, L.C.C. – 1995 – Improvements with nanocrystalline ribbons to be applied as fluxgate sensor cores, . Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica e Conferência da União Latino-Americana de Geofísica - Rio de Janeiro

Benyosef, L.C.C.; Teodósio, J.R.; Taranichev, V.E. and Jalnin, B.V. - 1995 – Improvements on CoFeSiB amorphous ribbon for fluxgate sensor cores - Scripta Metallurgica et Materialia, Volume: 33 (9) – pp.1451-1454

Benyosef, L.C.C. e Novak, M. A. – 1996 - Magnetômetros de Núcleos Saturados - Revista de Instrumentação e de Física Aplicada, Sociedade Brasileira de Física. Vol. 11, Núm. 3, págs. 131-137.

Benyosef, L.C.C.; Teodósio, J.R.; Taranichev, V.E.; Zalnin, B.V. and Nemova, O. Yu. - 1996 - Effect of Stress on the Magnetic Properties of Amorphous Ribbons for Fluxgate Magnetometers - Journal of Advanced Materials, Num. 3 (2) pags. 140-143.

Perez, G. e Benyosef L. C. C. – 2006 – Nanocrystalline Alloys applied to Fluxgate Sensors, III Workshop on Metastable and Nanostructured Materials, Nanomat 2006.

Nielsen, O. V.; Petersen, J. R.; Hernando, B.; Gutierrez, J. and Primdahl, F. – 1990 – Metallic Glasses for Fluxgate Applications, Soft Magnetic Materials 9, Anales de Física B-86, 271.

Nielsen, O. V.; Petersen, J. R.; Fernandez, A.; Hernando, B.; Spisak, P.; Primdahl, F. and Moser, N. – 1991 – Analysis of a Fluxgate Magnetometer Based on Metallic Glass Sensors, Meas. Sci. Technol. No. 2, pp. 435-440.

Shirae, K. – 1984 – Noise in Amorphous Magnetic Materials, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20 No. 5, pp. 1299-1301.

Yoshizawa, S. Oguma, and K. Yamauchi - 1988 - New Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure ; Y.. J.Appl. Phys. 64 (10).