

## PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MICROCOMPÓSITOS DE Cu/NbTi \*

Vivian Reis Corrêa<sup>1</sup>

Talita Gama de Sousa<sup>2</sup>

Luiz Paulo Mendonça Brandão<sup>3</sup>

### Resumo

Determinadas aplicações de magnetos pulsados ocorrem sob a ação de campos magnéticos elevados, ( $\geq 100$  T). Esses campos provocam efeitos tais como, elevadas tensões tangenciais (hoop stress) produzidas pela força de Lorentz e conversão de parte da energia elétrica em calor (efeito Joule) que deterioram o material. Assim uma combinação de alta resistência mecânica ( $> 1$  GPa) e alta condutividade elétrica (mínimo de 70% IACS International Annealed Copper Standard) é necessária por parte destes materiais. No presente trabalho, foram desenvolvidos fios condutores para possível utilização em magnetos pulsados. O cobre e a liga nióbio-titânio foram escolhidos por possuírem boa condutividade elétrica e boa resistência mecânica, respectivamente; além de serem imiscíveis na temperatura ambiente. Inicialmente foram utilizados fios de cobre puro e Cu/NbTi, os quais foram convertidos em fios por trefilação. Após o processamento, os fios foram introduzidos em tarugos de cobre OFHC (Oxygen Free High Conductivity) e reprocessados. Foram produzidos 2 compósitos variando os tratamentos térmicos. Os compósitos obtiveram uma satisfatória interação matriz/filamento, o que melhor combinou propriedades mecânicas e elétricas foi o que atingiu limite de resistência de 547,8 MPa e condutividade 85,98% IACS.

**Palavras-chave:** Alta resistência mecânica; Alta condutividade elétrica; Alta deformação plástica; microcompósitos Cu/NbTi.

### PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF Cu/NbTi MICROCOMPOSITE

#### Abstract

Determined applications of pulsed magnetic occur under action the raised magnetic fields ( $\geq 100$  T). These fields provoke effect such as, raised tangential tensions (hoop stress) produced by the Lorentz's force and conversion of part of the electric energy in heat (Joule effect) that, spoil the material. Thus a combination of ultimate tensile stress (1 GPa) and high electrical conductivity (minimum of 70% IACS - International Annealed Standard Copper) is necessary for these materials. In the present work, conductive wires for possible use in pulsed magnetic had been developed. The copper and the alloy niobium-titanium had been chosen because these materials have good electrical conductivity and good mechanical resistance respectively, besides it being immiscible in the room. Initially had been used pure copper and Cu/NbTi wires, which had been converted into wires by drawing. After the processing, the wires had been introduced in billets of OFHC copper (Oxygen Free High Conductivity) drilled. Had been produced 2 composites varying heat treatments. The composites obtained a satisfactory matrix/filament interaction, the one that best combined mechanical and electrical properties was what reached the resistance limit of 547,8 MPa and conductivity 85,98% IACS.

**Keywords:** High strength; high electrical conductivity; High plastic deformation; Cu/NbTi microcomposites.

<sup>1</sup> Engenheira Mecânica, D. Sc., Egressa do curso de Doutorado em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia – IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Química, M.Sc., Doutoranda em Ciência dos Materiais no Instituto Militar de Engenharia – IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, D.Sc; Professor associado, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia – IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil..

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de magnetos pulsados com altos campos magnéticos, 100 T ou superior, é atualmente limitado pelas características físicas dos materiais condutores. Os materiais dos fios condutores destes magnetos devem possuir simultaneamente alta resistência mecânica e elevada condutividade elétrica. A alta resistência mecânica é necessária para que as bobinas que formam o núcleo do magneto resistam às elevadas tensões tangenciais produzidas pela força de Lorentz, proveniente do campo magnético. Por sua vez, a elevada condutividade elétrica é importante para evitar um superaquecimento provocado pelo efeito Joule, decorrente da passagem de altas correntes elétricas pelas bobinas do magneto [1].

Muitos métodos de endurecimento têm sido usados para produzir fios condutores, entretanto os mecanismos responsáveis pelo aumento da resistência mecânica geralmente acarretam no decréscimo da condutividade elétrica. Um dos métodos que tem demonstrado maior eficiência é a produção de materiais compósitos altamente deformados [2,3]. Estas altas deformações geralmente produzem microestruturas de escala ultrafina que podem ser conseguidas por trefilação, forjamento rotativo ou a combinação dos dois métodos.

Os métodos de confecção desse tipo de compósito ainda hoje é considerado laborioso e de alto custo, o que vem promovendo o desenvolvimento de várias pesquisas focadas na otimização de metodologias da sua fabricação [4].

Neste trabalho foram fabricados fios condutores para possível utilização em magnetos pulsados. O compósito de estudo foi formado pelo o cobre puro e pela liga nióbio-titânio, escolhidos por possuírem boa condutividade elétrica e boa resistência mecânica, respectivamente; além de serem imiscíveis em temperatura ambiente. Esta imiscibilidade é importante, pois permite que os materiais mantenham suas propriedades quando unidos na fabricação dos compósitos, pois a formação de uma solução sólida diminui condutividade elétrica.

A fabricação dos fios compósitos envolveu dois estágios. No primeiro estágio foram utilizadas barras de cobre puro e Cu/NbTi que foram convertidas em fios através da trefilação. No segundo estágio foram utilizados os tarugos de cobre perfurados, onde foram introduzidos os fios produzidos no primeiro estágio. Esta montagem foi reprocessada por uma intensa deformação plástica.

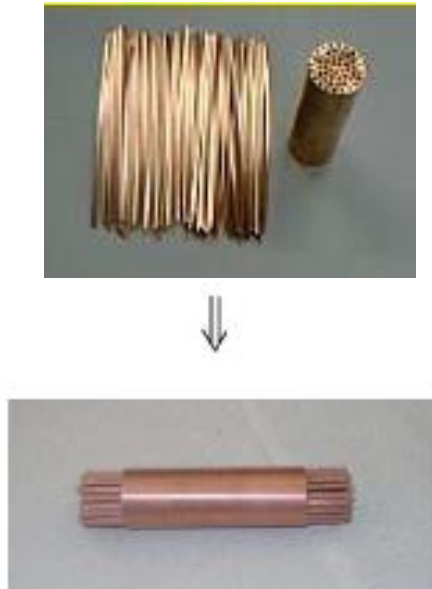
Foi também parte importante do objetivo desta pesquisa, a caracterização desses compósitos em relação à resistência mecânica e condutividade elétrica. Como resultados, foram obtidos compósitos com uma satisfatória interação matriz/filamento e bom balanço de combinação entre as propriedades mecânicas e elétricas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais de partidas utilizados para a fabricação dos compósitos foram: (i) barras de Cu/Nb1%Ti de diâmetro 9,3 mm fornecidas pela Oxford Instruments Inc., NJ., (ii) barras de cobre puro OFHC de diâmetro 9,6 mm; e (iii) tarugos de cobre OFHC de diâmetro 25,4 mm e comprimento de 76,2 mm que foram perfurados com 51 furos de diâmetro de 2,07 mm via usinagem por descarga elétrica (EDM).

A fabricação dos compósitos envolveu dois estágios. O estágio 1 que consistiu na preparação dos fios de cobre puro e Cu/Nb1%Ti. Para isso as barras foram convertidas em fios de 2,02 mm de diâmetro através do processo de trefilação, utilizando um banco de trefilação da marca FENN, modelo D51710.

No segundo estágio foram utilizados os tarugos de cobre com 25,4 mm de diâmetro, perfurados com furos de 2,07 mm e 76,2 mm de comprimento. Nos furos foram introduzidos os fios de 2,02 mm obtidos no primeiro estágio. A Figura 1 apresenta um esquema da fabricação dos compósitos, onde se têm a foto dos fios e do tarugo com 51 furos e a seguir a foto do compósito montado.



**Figura 1:** Esquema da fabricação dos compósitos.

Uma vez formados, os compósitos foram tratados termomecanicamente, onde sofreram forjamento rotativo, utilizando uma máquina modelo 6297 da marca FENN, obtendo barras com diâmetros de até 13,25 mm. Depois foi utilizada uma forjadora menor (modelo 10-33, marca Torrington) para barras finais. Em seguida as barras foram trefiladas em fios com diâmetro final de 2,02 mm.

O primeiro compósito, nomeado de C1, foi fabricado com o tarugo de cobre de 51 furos, onde foram introduzidos 21 fios de cobre puro e 30 fios de Cu/NbTi. Os fios de cobre puro foram introduzidos na camada de furos mais externa e os fios de Cu/NbTi nos furos internos.

Após isso, este compósito montado foi colocado imediatamente no forno para ser tratado termicamente. Este primeiro tratamento térmico foi realizado a uma temperatura de 500°C por aproximadamente 5 horas. Em seguida, o material sofreu um forjamento rotativo, reduzindo o seu diâmetro de 25 mm para 17,78 mm. Após este forjamento, realizou-se um segundo tratamento térmico, desta vez por 12 horas na mesma temperatura. Na sequência, o material foi forjado até o diâmetro de 13,25 mm. Em seguida, o material sofreu um terceiro tratamento térmico, dessa vez de 20 horas na mesma temperatura, procedido por um forjamento que reduziu o diâmetro até 9,23 mm. Um novo tratamento térmico foi realizado com o tempo de 18 horas. Por fim, a peça foi forjada até o diâmetro de 5,2 mm e trefilada até o diâmetro de 2,02 mm.

Um segundo compósito foi fabricado e nomeado de C2. Esse foi fabricado com a mesma quantidade e distribuição de preenchimento de furos do compósito C1. A diferença é que os fios de Cu/NbTi foram submetidos a um tratamento térmico de 2 horas a temperatura de 500°C, antes de serem colocados no tarugo de cobre furado.

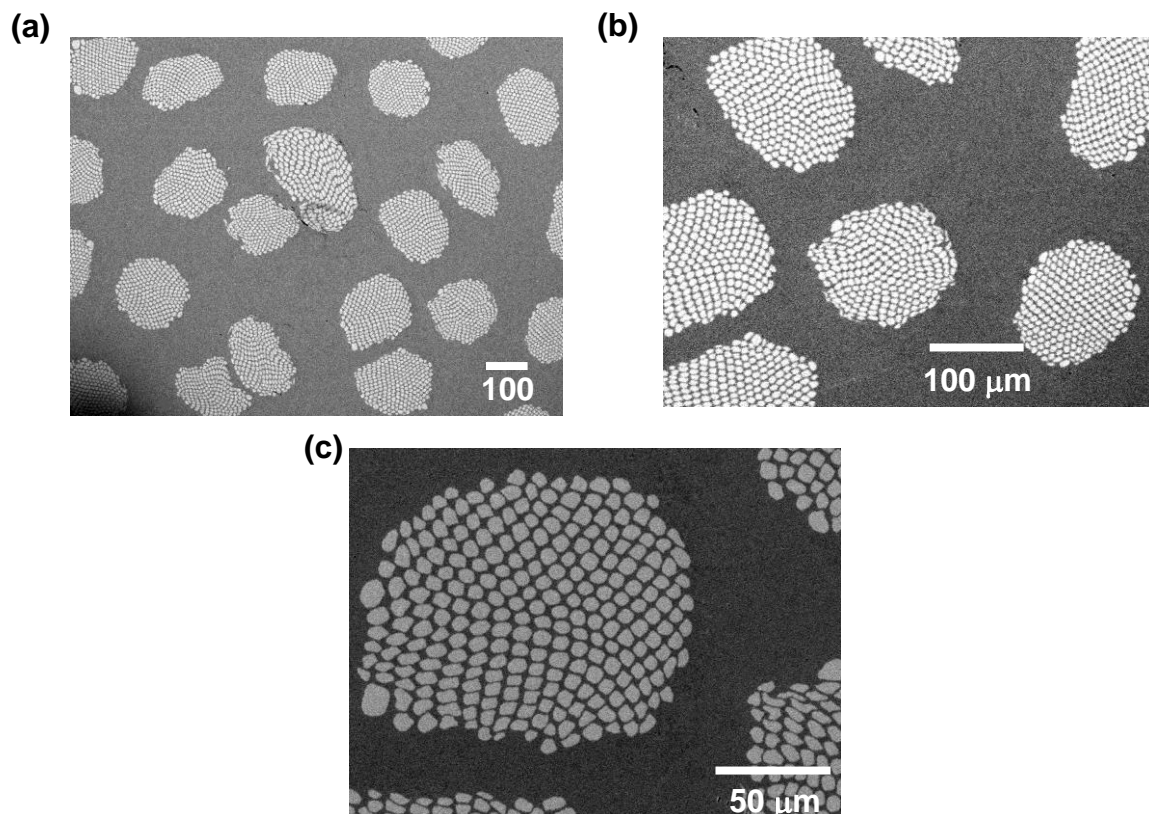
Após a montagem o compósito C3 foi reduzido por forjamento até o diâmetro de 17,78 mm. Sofreu um tratamento térmico de 18 horas a 700°C. Novamente o material foi forjado até um diâmetro de 13,25 mm e submetido em seguida por outro tratamento térmico de 6 horas a uma temperatura de 700°C. Por fim, foi forjado até o diâmetro de 9,23 mm e depois trefilado até 2,02 mm.

As medidas de resistividade elétrica foram realizadas por meio da técnica de prova de quatro pontos. A resistência mecânica foi investigada através dos testes de tração realizados em uma máquina MTS, com controle digital, capacidade de 100 KN e com velocidade de deslocamento do atuador de 0,5 mm/min.

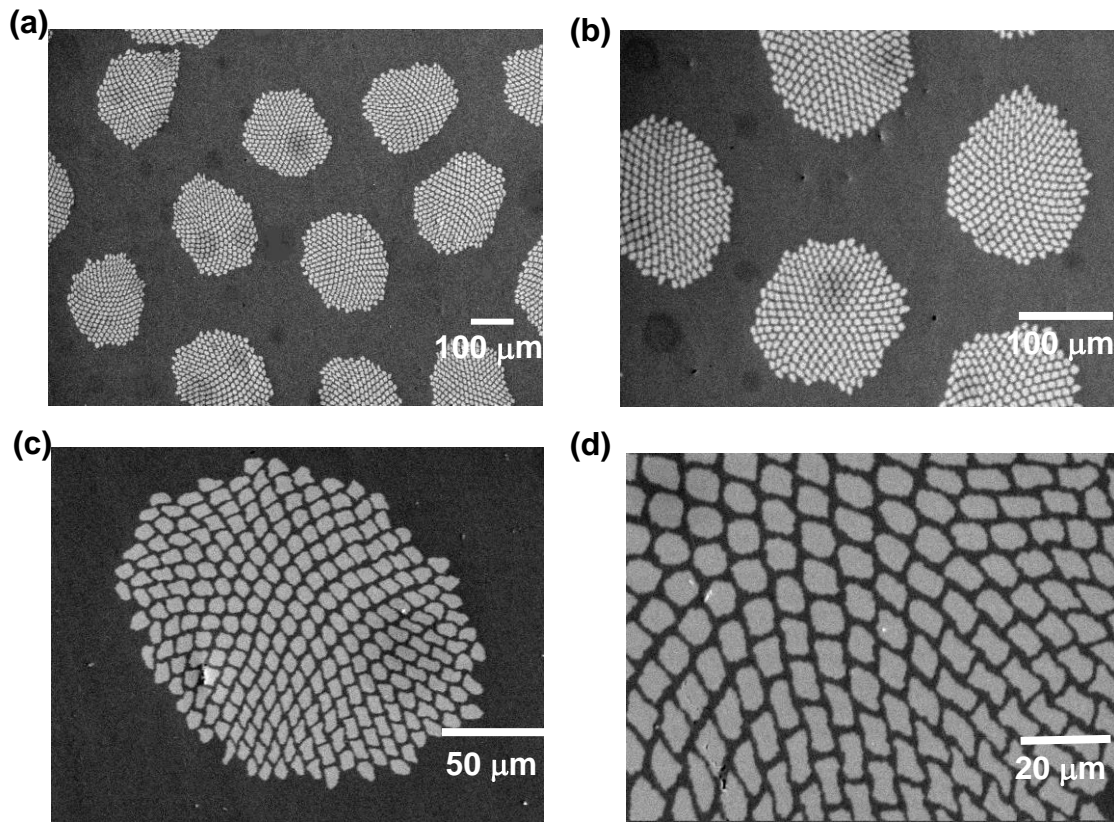
As micrografias foram obtidas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca JEOL e modelo 58000LV. A voltagem utilizada na investigação foi de 20 kV.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 e 3 apresentam as micrografias da seção transversal dos compósitos C1 e C2.



**Figura 2.** Micrografias do compósito C1 com aumentos de: (a) 100X, (b) 200X e (c) 450X.



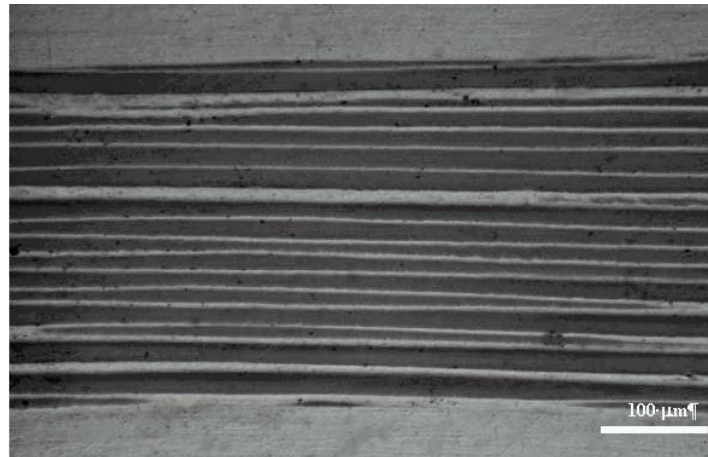
**Figura 3.** Micrografias do compósito C2 com aumentos de: (a) 100x, (b) 200 x, (c) 450 x e (d) 950 x.

Através das Figuras 2 e 3 é possível observar que os compósitos C1 e C2 apresentam um excelente contato entre a matriz e o fio, pois não mostrou nenhuma linha de separação entre eles. Além disso, nota-se que a deformação ocorreu de maneira aproximadamente homogênea em toda a seção transversal dos compósitos. Esse resultado satisfatório, foi obtido após a análise e reformulação da metodologia adotada por Kalu et al, 2000 [4]. Isso justifica a colocação do cobre puro em toda a borda do compósito para impedir assim as trincas superficiais e a realização de alguns tratamentos térmicos intermediários para aumentar a ductilidade do NbTi e a interação entre este e a matriz de cobre.

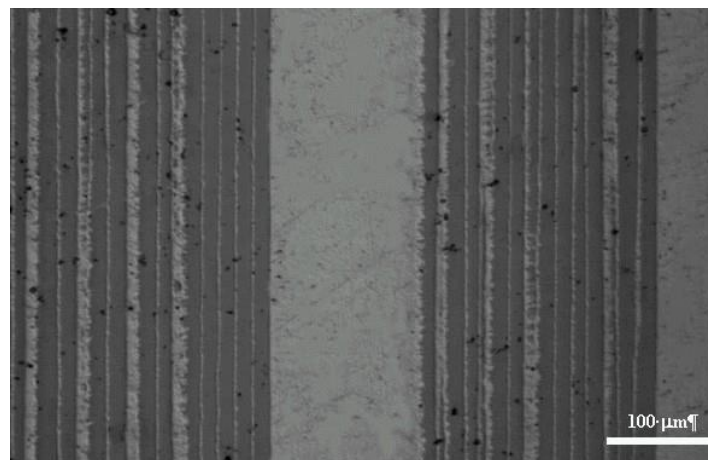
Na Figura 2(a), também é possível analisar que os fios de Cu/NbTi no compósito C2 estão distribuídos aleatoriamente. Já nas Figuras 2(b) e (c) observa-se que os fios de NbTi estão uniformemente distribuídos na matriz de Cu e que apresentam uma forma quase equiaxial e homogênea.

Através das Figuras 3(a) e (b) podem ser observados que os fios inseridos apresentam uma distribuição homogênea. Nas Figuras 3(c) e (d) nota-se que os fios de NbTi exibem formas e distribuições heterogêneas.

As Figuras 4 e 5 mostram as seções longitudinais dos compósitos C1 e C2. Todos apresentam morfologias semelhantes, com os fios de Cu/NbTi alinhados na direção de trefilação e com distribuição regular.



**Figura 4.** Micrografia do compósito C1 com aumento de 200 x.



**Figura 5.** Micrografia do compósito C2 com aumento de 200 x.

Os limites de resistência à tração ( $\sigma_{MAX}$ ) dos compósitos C1 e C2 são apresentados na Tabela 1, onde é possível observar um aumento da resistência do compósito C2 em relação ao C1.

**Tabela 1.** Limite de resistência dos compósitos C1 e C2.

Compósitos	$\sigma_{MAX}$ (MPa)
C1	487,3 ± 19,52
C2	547,8 ± 16,33

A quase ausência do aumento da resistência mecânica do Cu diante de altas deformações, atribuída à ocorrência dos mecanismos de recuperação [5], leva-se a considerar que o NbTi presente no compósito Cu/NbTi foi o responsável pelo endurecimento deste compósito. A diferença entre os valores de resistência mecânica entre os compósitos C1 e C2 deve-se aos tratamentos térmicos distintos que cada um foi submetido.

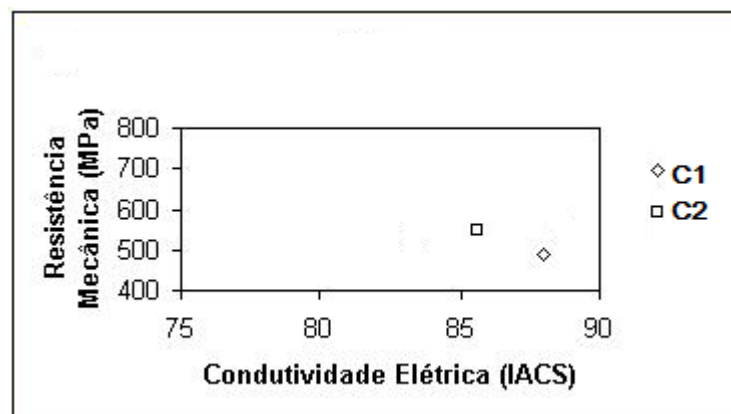
A Tabela 2 apresenta os resultados da condutividade elétrica dos compósitos C1 e C2. Nota-se que ocorreu uma sutil diferença das medidas entre os compósitos.

**Tabela 2.** Resistividade e condutividade elétrica dos compósitos C1 e C2 fabricados.

Compósitos	$\rho$ (n $\Omega$ .m)	IACS (%)
C2	19,59 $\pm$ 0,03	87,98
C3	20,05 $\pm$ 0,05	85,98

A resistividade elétrica em fios microcompósitos a base de Cu altamente deformado é principalmente devido ao espalhamento de elétrons que ocorrem nas interfaces Cu-Nb [6].

O gráfico da Figura 6 mostra o limite de resistência versus condutividade elétrica dos compósitos produzidos neste trabalho. Observa-se que o compósito C1 apresentou o menor limite de resistência, enquanto o compósito C2 obteve um desempenho melhor.

**Figure 6:** Limite de resistência X condutividade elétrica dos compósitos produzidos.

#### 4 CONCLUSÃO

Da análise e discussões dos resultados experimentais obtidos neste trabalho pode-se inferir as seguintes conclusões:

- O processamento utilizado neste trabalho para a produção de compósitos de Cu/NbTi, que empregou a técnica de preencher com filamentos de Cu-Nb/Ti tarugos de cobre perfurados via EDM, mostrou-se uma alternativa economicamente e tecnicamente viável, que pode ser realizada em qualquer outro centro de pesquisas razoavelmente equipado;
- O sucesso adquirido no contato matriz/filamento dos compósitos produzidos foi devido ao método adotado de inserir o cobre puro nas bordas e a realização dos tratamentos térmicos intermediários;
- Além disso, os resultados mostraram a necessidade de se estudar mais profundamente a influência dos diferentes tratamentos termomecânicos nas propriedades mecânicas e elétricas dos compósitos produzidos via alta deformação plástica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem CAPES ao National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL) pela assistência e o suporte laboratorial, ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e a Oxford Instruments pelo fornecimento das barras de Cu-Nb/Ti.

## REFERÊNCIAS

- 1 Embury JD, Han K. Conductor materials for high field magnets. *Current opinion in solid state e materials science*. 1998; 3:304-308.
- 2 Huang JS; Yao DW; Meng L. Microstructure and properties of heavily drawn Cu-Ag-Fe composites. *Metals and Materials International*. 2013; 19:225-230.
- 3 Spitzig WA. Strengthening in heavily deformation processed Cu-20%Nb. *Acta Metallurgica et Materialia* 1991; 39:1085-1090.
- 4 Kalu PN, Brandao L, Corrêa VR, Van Sciver S. Low cost drilled billet production method for Cu-Nb composite wire. *IEEE Transactions on applied superconductivity*. 2000; 10: 1288-1291.
- 5 Kalu PN, Waryoba DR, Van Sciver S, Brandao L. Restoration mechanisms in highly deformed Cu-based conductor wire. *IEEE Transactions on applied superconductivity*. 2000; 10: 1296-1299.
- 6 Heringhaus F, Schneider-Muntau HJ, Gottstein G. Analytical modeling of the electrical conductivity of metal matrix composites: application to Ag-Cu and Cu-Nb. 2003; 347: 9-20