



CARACTERIZAÇÃO DE BOBINA SUPERCONDUTORA PARA LIMITAÇÃO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO¹

Alexander Polasek²
Rodrigo Dias³
George Gomes Junior⁴
Daniel Brito Niedu⁵
Hélio Salim Amorim⁶
Tsuneharu Ogasawara⁷
Orsino Borges de Oliveira Filho⁸
Eduardo Torres Serra⁹

Resumo

O aumento da demanda por energia elétrica tem elevado as correntes de curto-circuito a níveis perigosos. Os limitadores de corrente supercondutores são uma solução promissora para este problema. No presente trabalho, uma bobina supercondutora de Bi-2212 empregada para limitação de corrente foi caracterizada utilizando-se diversas técnicas de análise. Amostras foram analisadas por DRX, MEV/EDS e medição da temperatura crítica (T_c). As fases foram quantificadas pelo método de Rietveld. Observaram-se frações relativamente altas da fase Bi-2212. Contudo, a T_c varia de uma amostra para outra. A variação do valor local da T_c foi atribuída à variação do teor de oxigênio da fase Bi-2212.

Palavras-chave: Limitador de corrente; Supercondutor; Bi-2212; Caracterização.

CHARACTERIZATION OF SUPERCONDUCTING COIL FOR FAULT CURRENT LIMITATION

Abstract

The increasing power demand has been raising fault currents up to dangerous levels. Superconducting fault current limiters are a promising solution for this problem. In the present work, we studied a superconducting Bi-2212 coil that is used for fault current limitation. Samples were analyzed by XRD, SEM/EDS and measurement of critical temperature (T_c). The Rietveld method was employed for phase quantification. Relatively high Bi-2212 fractions were found. However, T_c varies from a sample to another one. Variations of local T_c are attributed to variations of oxygen content in Bi-2212 phase.

Key words: Fault current limiter; Superconductor; Bi-2212; Characterization.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Pesquisador, DSc., Departamento de Tecnologias Especiais, CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro-RJ

³ Técnico, Departamento de Tecnologias Especiais, CEPEL, Rio de Janeiro-RJ

⁴ Aluno de doutorado, PEMM / COPPE / UFRJ

⁵ Pesquisador, MSc., Divisão de Laboratórios de Adrianópolis, CEPEL, Rio de Janeiro-RJ

⁶ Professor Adjunto, DSc., Instituto de Física, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ

⁷ Professor Associado, DSc., PEMM / COPPE/ UFRJ

⁸ Pesquisador, MSc., Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, CEPEL, Rio de Janeiro-RJ

⁹ Pesquisador, DSc., Diretoria Geral, CEPEL, Rio de Janeiro-RJ

1 INTRODUÇÃO

O aumento das correntes de curto-circuito tem levado à superação dos limites de proteção de dispositivos e equipamentos, elevando os riscos de danos, prejuízos e blecautes.⁽¹⁾ Em face deste problema, a utilização de limitadores de corrente apresenta-se como uma solução, prolongando a vida útil de disjuntores, barramentos e transformadores, bem como reduzindo significativamente os custos de construção de novas subestações. Os limitadores de corrente reduzem a corrente de curto-circuito a valores suportáveis pelos equipamentos da rede. Os limitadores de corrente supercondutores (LCSC's) estão entre as tecnologias emergentes mais promissoras para limitação de corrente de curto-circuito.⁽²⁾ Protótipos de LCSC's para distribuição já foram demonstrados com sucesso e protótipos para transmissão encontram-se em pleno desenvolvimento.^(2,3) No nível de distribuição de energia elétrica, esta tecnologia já está alcançando o mercado,⁽⁴⁾ embora, um dos principais desafios para o emprego comercial em larga escala esteja na otimização dos materiais supercondutores utilizados.

Há vários tipos de LCSC's, podendo-se destacar os limitadores indutivos, os resistivos e os híbridos, que são uma combinação dos dois anteriores. Atualmente, os principais protótipos e projetos de LCSC's são do tipo resistivo, pois este é mais simples e compacto do que os demais, além de causar menos impacto na rede.⁽²⁾ Os limitadores resistivos são conectados em série com o circuito a ser protegido e a sua atuação baseia-se na rápida transição do estado supercondutor para o estado normal, face a correntes muito acima de sua corrente crítica de transição (I_c). Tal transição deve-se a um comportamento intrínseco dos supercondutores, de modo que os LCSC's não requerem qualquer sistema de acionamento ou de detecção de surtos de corrente. Deste modo, o limitador de corrente resistivo apresenta impedância desprezível durante a operação normal da rede e, quando ocorre um curto-circuito, ele acrescenta uma impedância resistiva à rede. Após o curto-circuito, o limitador retorna naturalmente ao estado supercondutor. Ensaios realizados no Laboratório de Alta Corrente do CEPEL mostraram que componentes LCSC limitaram picos de corrente de 10-40 kA_{crista} a menos do que 6 kA_{crista} no primeiro meio-ciclo e abaixo de 4 kA_{crista} nos ciclos subsequentes.^(5,6) Estes componentes LCSC são do tipo resistivo e baseiam-se no supercondutor Bi-2212.

A Figura 1 mostra a corrente limitada e a tensão medida entre os terminais de um destes componentes LCSC. Na ausência do componente limitador, o pico de corrente atingiu 11 kA_{crista} . Quando o componente limitador foi conectado ao circuito de ensaios, a corrente foi limitada a menos de 5 kA_{crista} (valor do primeiro pico) e a menos do que 3 kA_{crista} (a partir do segundo pico).

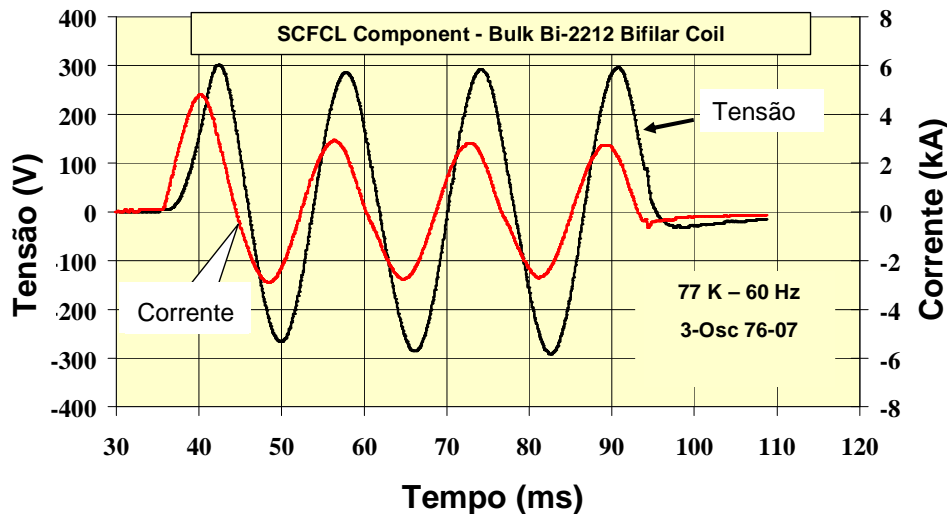


Figura 1. Oscilograma de ensaio de limitação de corrente com componente limitador supercondutor. Curva vermelha: corrente limitada; curva preta: tensão entre os terminais do limitador. Corrente de curto-circuito sem o limitador: $11 \text{ kA}_{\text{crista}}$ (ver texto).⁽⁵⁾

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente trabalho caracterizou-se uma bobina supercondutora empregada para limitação de corrente de curto-circuito. Esta bobina supercondutora faz parte de um componente limitador comercial que foi adquirido para a realização de ensaios de limitação de corrente.⁽⁵⁾ O componente limitador é produzido a partir de um tubo maciço do supercondutor de alta temperatura crítica $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212). Este material é fabricado por um processo de fundição no qual um precursor é completamente liquefeito, moldado e a peça obtida é submetida a tratamentos térmicos para a formação da fase Bi-2212.⁽⁷⁾ O tubo é posteriormente revestido com uma liga metálica e usinado na forma de bobina, a qual é revestida com material isolante. A liga metálica atua como resistência *shunt*, para a qual a corrente é desviada quando ocorre a transição da bobina supercondutora. O componente limitador tem 381 mm de comprimento (incluindo uma base com terminais elétricos de cobre), 58 mm de diâmetro externo e 35 mm de diâmetro interno. Um limitador de corrente supercondutor de escala real contém dezenas de componentes limitadores como este; os componentes são conectados em série e em paralelo a fim de se atingir a tensão e a corrente nominal desejadas para a aplicação.

A camada externa (*shunt* e isolamento) do componente limitador foi usinada de modo a expor a parte supercondutora. A Figura 2 mostra somente a parte supercondutora sem o *shunt* metálico, o isolamento externo e os terminais de cobre. O comprimento total da bobina supercondutora é de 5,4 m e a sua seção reta é de $0,24 \text{ cm}^2$. Amostras da seção transversal da bobina foram retiradas de três regiões, numeradas de 1 a 3 conforme indicado na Figura 2. Amostras para DRX também foram retiradas da seção longitudinal e da superfície externa da bobina.

Amostras da bobina foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) e medições de temperatura crítica de transição (T_c) através do levantamento de curvas de resistência versus temperatura (RxT). O sistema de medição de T_c consiste em um criostato com refrigeração em ciclo fechado (cryocooler) conectado a um controlador de temperatura e a um micro-ohmímetro. A medição da resistência é realizada pelo método das quatro pontas. Análises de DRX foram realizadas tanto em amostras maciças como em amostras pulverizadas. A quantificação de fases foi efetuada por refinamento pelo método de



Rietveld, empregando-se o programa FullProf.⁽⁸⁾ Amostras da superfície de fratura do núcleo do supercondutor foram obtidas mergulhando-se amostras da bobina em nitrogênio líquido e fraturando-as imediatamente para análises por MEV/EDS.



Figura 2. Foto da bobina supercondutora com etiquetas marcando as regiões 1, 2 e 3, de onde foram retiradas as amostras para o presente trabalho. A região 3 fica próxima aos contatos elétricos da bobina. O material supercondutor tem coloração negra. Entre as espiras supercondutoras observa-se o material isolante (listras azuis).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como pode ser observado na Figura 3, o valor da T_c e o comportamento das curvas $R \times T$ variam claramente em função da posição que a amostra ocupava na bobina supercondutora. Isto mostra que há variações nas propriedades de transporte de corrente ao longo da bobina. É interessante ressaltar que amostras retiradas de uma mesma região apresentaram curvas $R \times T$ muito distintas, enquanto que amostras retiradas de diferentes regiões mostraram comportamentos mais próximos. Essas variações advêm de heterogeneidades intrínsecas dos cerâmicos supercondutores de alta T_c e explicam a formação de pontos quentes durante a transição entre o estado supercondutor e o estado normal, pois as regiões que possuem menores valores de T_c transitam antes das demais.⁽⁹⁾ Isto provoca uma grande concentração de calor nesses pontos, podendo danificar o material supercondutor. Na prática, uma camada de *shunt* metálico evita este problema, permitindo que a corrente contorne os pontos quentes e facilitando a distribuição de calor, de modo a tornar a transição mais homogênea (7). Uma transição rápida e homogênea é importante para a eficácia da limitação de corrente e para a manutenção da integridade do material.

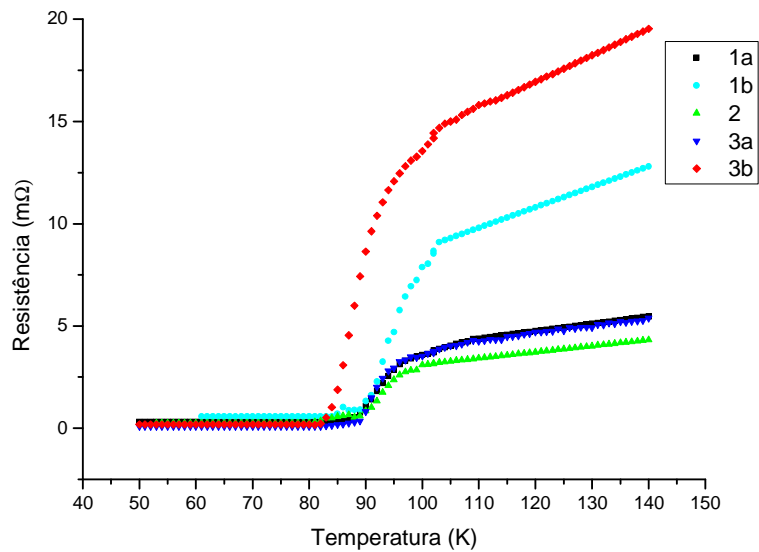


Figura 3. Curvas R x T de amostras da bobina de Bi-2212 indicando a transição do estado normal para o estado supercondutor. As amostras estão numeradas de acordo com as respectivas regiões da bobina (Figura 2).

Os valores de $T_{c(\text{onset})}$ observados variaram entre 92-96K, faixa esta relativamente alta para a fase Bi-2212, mas relativamente próxima ao valor nominal da bobina investigada (92 K). O valor de T_c da fase Bi-2212 costuma ser menor do que 96 K e pode variar em uma faixa de dezenas de graus kelvin, dependendo da composição química efetiva da fase Bi-2212.⁽¹⁰⁾ Na realidade, o composto $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ não é estequiométrico, apresentando pequenos desvios nos teores dos cátions e do oxigênio.⁽¹⁰⁾ A concentração de portadores de carga, por sua vez, varia com o teor de oxigênio, de modo que o valor de T_c é fortemente dependente do valor de (x) na fórmula $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, estando o valor ótimo de (x) em torno de 0,2.⁽¹⁰⁾ Valores de (x) levemente superiores ou inferiores a 0,2 produzem variações significativas na T_c . Para se otimizar o teor de oxigênio, é necessária uma combinação adequada da composição nominal com tratamentos térmicos em condições otimizadas. Contudo, quanto mais extenso e volumoso for o material, mais difícil será homogeneizar a composição química e, por conseguinte, o valor da T_c em todo o material. Por isso, peças maciças tendem a ser mais heterogêneas do que fitas e filmes, ainda que estes últimos também apresentem variações consideráveis em suas propriedades locais.

Para uma dada temperatura de operação, a corrente crítica (I_c) do supercondutor é sensível a pequenas variações de T_c . Deste modo, a I_c também varia ao longo da bobina. Isto porque, quanto menor for a diferença entre a T_c e a temperatura de operação, menor será o valor de I_c naquela temperatura de operação. Portanto, o valor de I_c medido entre os extremos da bobina corresponde ao valor mínimo de I_c ao longo da mesma. Em outras palavras, a região que tiver o menor valor de I_c é o “gargalo” para o fluxo de corrente ao longo do supercondutor.

Vale notar que o valor de I_c não depende somente do valor de T_c , mas também da microestrutura. Fatores como a fração de fase supercondutora, a fração e a distribuição das fases secundárias, a textura e a conectividade entre os grãos supercondutores são fundamentais para o transporte de corrente. O alinhamento adequado dos grãos favorece o transporte de corrente, que é muito anisotrópico nos

supercondutores de alta temperatura. Os monocristais de Bi-2212 têm estrutura ortorrômbica ou “pseudo-tetragonal”, pois os eixos (a) e (b) tem valores muito próximos, enquanto o eixo (c) é bem maior.⁽¹⁰⁾ A densidade de corrente crítica ao longo do plano (ab) é muito superior à densidade de corrente crítica ao longo do eixo (c), tornando o transporte de corrente praticamente bidimensional.⁽¹¹⁾ Analogamente, o crescimento dos grãos é muito mais rápido ao longo do plano (ab) do que ao longo do eixo (c), de tal modo que os grãos adquirem a forma de plaquetas alongadas.⁽¹⁰⁾ Portanto, a textura ideal para o transporte de corrente é aquela que favorece o transporte de corrente ao longo do plano (ab). A Figura 4 mostra a seção de fratura das amostras 1b, 2 e 3b, exibindo plaquetas da fase 2212. As curvas RxT destas amostras foram apresentadas na Figura 3. Embora a texturização dos grãos não seja evidente, a observação cuidadosa indica a existência de alguma textura local, com grupos de plaquetas empilhadas, especialmente na amostra 3b. Contudo, estes grupos de plaquetas estão interconectados por contornos de alto ângulo. Empregando MEV e MET de alta resolução, Elschner et al.⁽¹¹⁾ observaram este mesmo tipo de morfologia em amostras de Bi-2212 maciças processadas do mesmo modo que o material mostrado na Figura 4. Esses autores mostraram que a textura local ocorre em uma escala de 200-300 μm e que os grupos de plaquetas texturizadas apresentavam a maior parte de seus contornos de grão aproximadamente paralelos ao plano ab. Medições de histerese magnética indicaram que o transporte de corrente é controlado pelos contornos de grão dentro dos grupos de plaquetas texturizadas e não pelos contornos de grão entre diferentes grupos de plaquetas texturizadas.⁽¹¹⁾

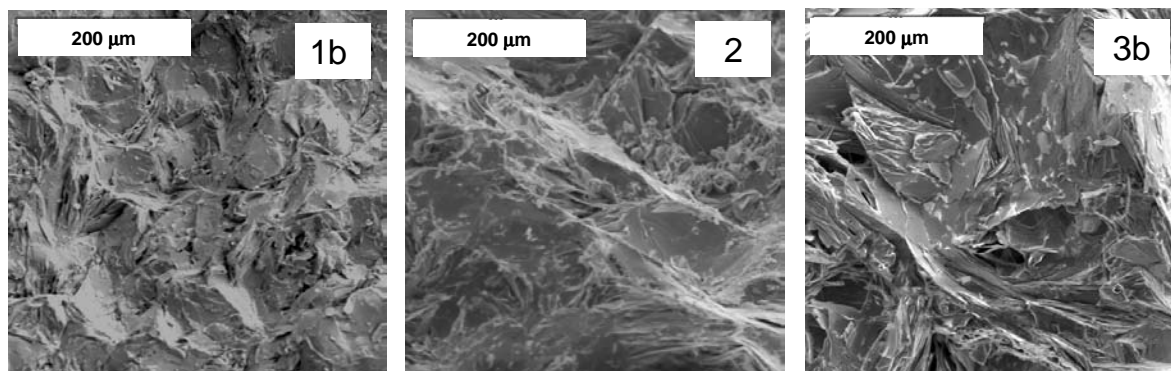


Figura 4. Imagens de MEV das amostras 1b, 2 e 3b da bobina supercondutora, mostrando as plaquetas de Bi-2212.

Análises de DRX de amostras maciças e na forma de pó (Figura 5) mostram variações no tamanho relativo dos picos (0,0,c) que podem ser atribuídas a efeitos de textura. De fato, a morfologia dos grãos da fase Bi-2212 faz com que ocorra uma pequena texturização, mesmo em amostras pulverizadas. Estudos por DRX e Rietveld mostraram o mesmo efeito de texturização em amostras pulverizadas do supercondutor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ (Bi-2223).⁽¹²⁾ Os grãos da fase Bi-2223 apresentam a mesma morfologia que a dos grãos da fase Bi-2212. O baixo grau de textura do material analisado no presente trabalho é coerente com a sua relativamente baixa densidade de corrente crítica, da ordem de 10^3 A/cm^2 a 77 K. Este valor de densidade de corrente crítica é típico para o supercondutor Bi-2212 na forma maciça. Em comparação, o supercondutor Bi-2212, na forma de fitas e filmes, apresenta densidades de corrente mais altas ($>10^4 \text{ A/cm}^2$) na mesma temperatura, pois os processos de fabricação e a pequena espessura das fitas e filmes permitem alto grau de texturização. Por outro lado, a maior área da seção reta



de peças maciças permite que a I_c atinja valores da mesma ordem que aqueles encontrados em fitas e filmes. A bobina estudada no presente trabalho atinge $I_c = 300$ A a 77 K e $I_c = 850$ A a 65 K, atendendo muito bem à aplicação em limitadores de corrente.^(5,9) O valor máximo de corrente nominal que pode ser atingido no limitador durante a operação normal da rede dependerá do valor de I_c . No presente caso, de acordo com o fabricante, a máxima corrente nominal é de cerca de 200 A_{rms} a 77 K e 600 A_{rms} a 65 K. Vale notar que a I_c é medida em corrente contínua, enquanto que a corrente nominal é referida em corrente alternada.

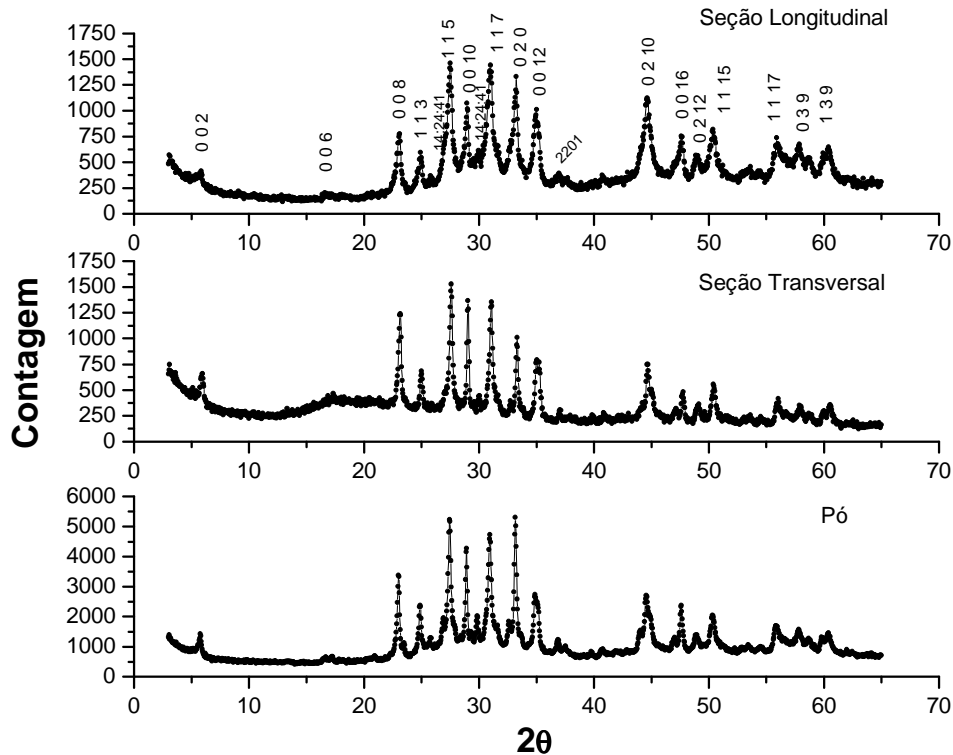


Figura 5. Difratomogramas de amostras da bobina supercondutora. Os picos identificados correspondem à fase Bi-2212.

O valor da corrente limitada também depende do valor de corrente crítica. Durante a transição do supercondutor para o estado normal, a resistência do material varia não-linearmente de acordo com a equação abaixo:⁽¹³⁾

$$R = \frac{E_c l}{I_c} \left(\frac{|I|}{I_c} \right)^{n-1} \quad (1)$$

Nesta equação, $E_c = 1\mu V/cm$, l é o comprimento do supercondutor e I é a corrente que passa pelo supercondutor. O expoente n é aproximadamente 9 para o material da bobina supercondutora.⁽⁹⁾ A equação (1) indica que a limitação de corrente só se torna efetiva para $I \gg I_c$. Quanto maior for o valor de I_c , menor será a resistência para um dado valor de I .

Portanto, o valor de I_c deve ser ajustado de acordo com um compromisso entre a corrente nominal (ausência de curto-circuito) e o pico de corrente limitada que se deseja. Os valores de corrente nominal e de corrente limitada dependem do ponto e da configuração da rede elétrica onde será instalado o limitador. O valor de I_c pode ser ajustado em função da seção reta e da geometria da bobina supercondutora. Vale ressaltar que o primeiro pico limitado corresponde à transição do supercondutor para o estado normal. Esta transição completa-se após o primeiro meio-ciclo, quando toda a corrente passa então para o shunt metálico, de modo que os picos subsequentes são menores do que o primeiro pico (Figura 1).

A Figura 6 mostra imagens de MEV/EDS de amostras das regiões 1, 2 e 3. A matriz constitui-se da fase Bi-2212, enquanto que as fases secundárias pertencem ao sistema Ca-Sr-Cu-O, tais como a $(Ca,Sr)_{14}Cu_{24}O_x$ (14:24) e a $(Ca,Sr)_2CuO_x$ (2:1). Essas fases secundárias resultam do próprio processamento por fusão. A rápida solidificação do material fundido produz uma mistura multifásica envolvendo a fase 2201 e fases secundárias.⁽¹⁴⁾ Através de um recozimento posterior em atmosfera adequada, promove-se formação da fase 2212 a partir da reação da fase 2201 com fases secundárias.⁽¹⁴⁾

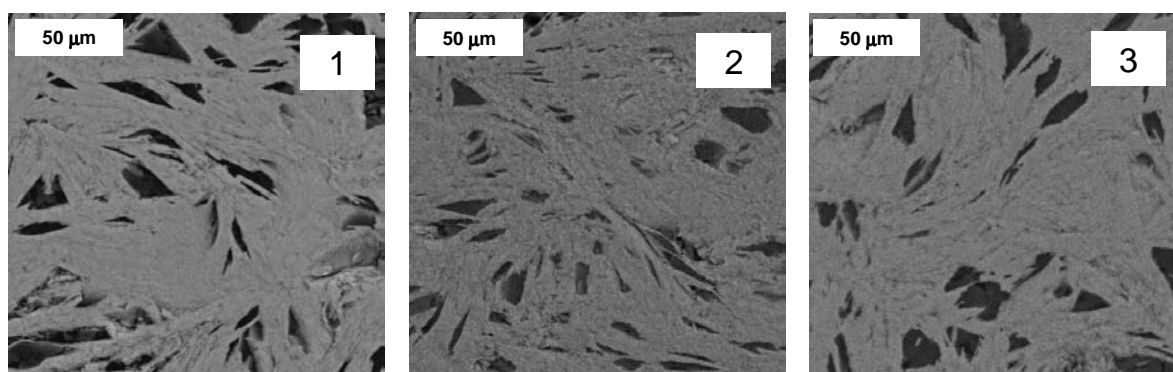


Figura 6. Imagens de MEV/EDS das regiões 1, 2 e 3 da bobina supercondutora. Matriz: Bi-2212; Fase secundárias escuras: 14:24 e 2:1.

As Figuras 4 e 6 mostram que diferentes regiões da bobina supercondutora apresentam características microestruturais semelhantes. Contudo, essas imagens não permitem uma correlação clara com as propriedades supercondutoras da bobina (T_c e I_c). As microestruturas e morfologias observadas são típicas de amostras maciças do supercondutor Bi-2212. A considerável fração volumétrica de fases secundárias não-supercondutoras não significa que o material terá mal desempenho. Pelo contrário, por vezes microestruturas com melhor aparência podem apresentar propriedades supercondutoras inferiores.⁽¹⁵⁾ Isto pode ser atribuído tanto ao papel das fases secundárias no ancoramento de vórtices magnéticos⁽¹⁶⁾ quanto ao efeito do teor de oxigênio e da composição efetiva da fase 2212 no valor da T_c . Os supercondutores de alta T_c pertencem à classe de supercondutores do tipo II, nos quais ocorre um estado misto de fase supercondutora e fluxos magnéticos quantizados. Estes fluxos tendem a ser arrastados pela ação da força oriunda do produto entre o campo magnético e a corrente, o que gera efeitos de histerese e dissipação no material. O ancoramento dos fluxos magnéticos em defeitos e fases secundárias evita esta dissipação, aumentando o valor de I_c para um dado campo magnético.⁽¹⁶⁾ O efeito do teor de oxigênio e da composição da fase 2212 na T_c já foi mencionado anteriormente.

As amostras 1b, 2 e 3b (Figuras 3 e 4) foram pulverizadas e analisadas por DRX para quantificação de fases pelo método de Rietveld. A Figura 7 mostra o resultado do refinamento de uma das amostras indicando uma concordância razoável entre o padrão experimental e o calculado.

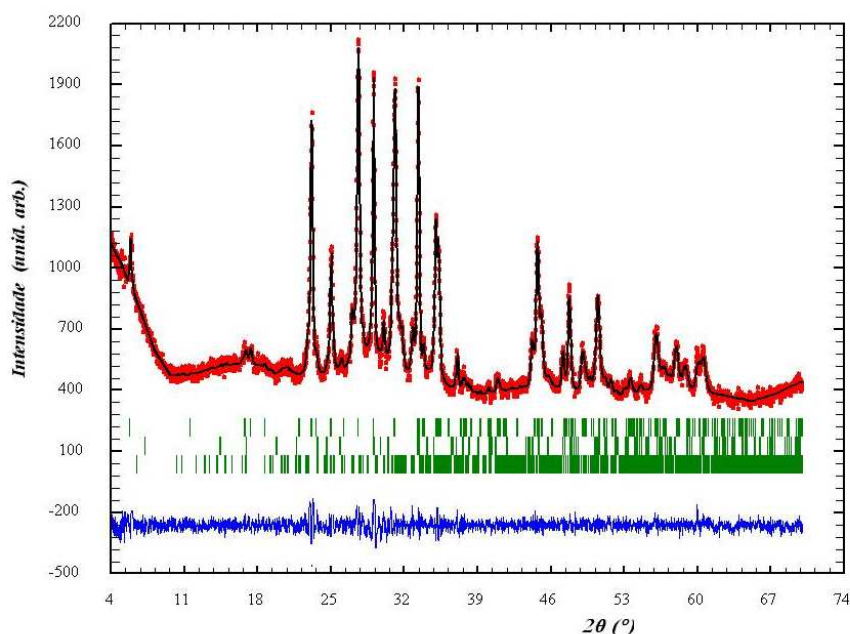


Figura 7. Comparação entre difratograma experimental (preto) e calculado por Rietveld (vermelho) para a amostra 3b. A linha azul indica a diferença entre os dois difratogramas.

A Tabela 1 apresenta os resultados de quantificação de fases presentes pelo método de Rietveld. Os valores de χ^2 para cada refinamento foram: 1,75 para a amostra 1b, 1,73 para a amostra 2 e 1,62 para a amostra 3b. Esses valores indicam uma concordância razoável entre os padrões experimentais e os calculados.

Tabela 1 – Fração em peso de fases presentes em amostras da bobina de Bi-2212

FASES	Amostra 1b	Amostra 2	Amostra 3
Bi-2212	96,42% ± 0,26%	95,25% ± 0,35%	95,89% ± 0,28%
Bi-2201	1,38% ± 0,38%	1,66% ± 0,59%	1,62% ± 0,61%
14:24	2,20% ± 0,64%	3,09% ± 0,48%	2,49% ± 0,84%

A fração em peso da fase 2212 nestas amostras é relativamente alta (>95%) tendo em vista que não se consegue obter amostras policristalinas de Bi-2212 monofásica, dado o complexo equilíbrio multifásico do sistema Bi-Sr-Ca-Cu-O.⁽¹⁰⁾ As frações observadas da fase 2212 concordam com a fração informada pelo fabricante. Além disso, uma certa fração de fases secundárias pode ser benéfica para o ancoramento de fluxos magnéticos. No entanto, o papel destas fases no ancoramento de fluxos magnéticos em supercondutores de alta Tc ainda não foi bem elucidado.

Por fim, vale notar que a inspeção visual e as imagens de MEV sugerem que o material é denso, com baixa porosidade. Isto resulta do processo de fundição empregado na fabricação da bobina. Uma alta densidade é importante para a conectividade intergranular e para o transporte de corrente.



4 CONCLUSÕES

A bobina de Bi-2212 apresentou boas propriedades supercondutoras e um ótimo desempenho na limitação de corrente de curto-circuito, em conformidade com as informações fornecidas pelo fabricante, podendo-se concluir que:

- a fração em peso de Bi-2212 (>95%) e a microestrutura do material estão, no mínimo, em condições suficientes para a devida atuação do limitador;
- as heterogeneidades intrínsecas mostradas pelas curvas RxT (Figura 3) não constituem um problema para a operação do LCSC devido a presença do “shunt” metálico no componente limitador que promove a homogeneidade da transição para o estado normal, evitando e/ou contornando pontos quentes no supercondutor;
- uma caracterização mais abrangente do material da bobina supercondutora requer o emprego de outras técnicas como medição da susceptibilidade magnética e análises por microscopia eletrônica de transmissão, bem como a determinação da composição química efetiva através de fluorescência de raios-X, buscando-se correlacionar a composição química local com o valor de T_c local.

REFERÊNCIAS

- 1 CIGRE WG A3.10: Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems, CIGRE, Technical Brochure, No. 239, 2003.
- 2 NOE, M.; STEURER, M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications and development status, *Superconductor Science and Technology*, v. 20, n. 3, p. R15-R29, 2007.
- 3 NEUMUELLER, H-W; et al., Development of Resistive Fault Current Limiters based on YBCO Coated Conductors, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, vol. 19, n. 3, p. 1950-1955, 2009.
- 4 DOMMERQUE, R.; et al., First commercial medium voltage superconducting fault-current limiters: production, test and installation, *Superconductor Science Technology*, v. 23, n. 3, 034020, 2010.
- 5 POLASEK, A.; SENA, C. V.; DIAS, R.; SERRA, E. T.; RIZZO, F. C. Testing of a resistive fault current limiter component based on Bi-2212 bulk superconductor, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, vol. 19, n. 3, p. 1823-1826, 2009.
- 6 POLASEK A.; DIAS, R.; SERRA, E.T., FILHO, O. O.; NIEDU, D *Journal of Applied Physics Conference Series*, accepted to be published.
- 7 ELSCHNER, S. et al Manufacturing and Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 13, n. 2, p. 1980- 1983, 2003.
- 8 RODRÍGUEZ-CARVAJAL, J. An Introduction to the Program FullProf 2000, Laboratoire Léon Brillouin, France, 2001.
- 9 Elschner, S.; Breuer, F.; Wolf, A.; Noe, M.; Cowey, L.; Bock, J. Characterization of BSCCO 2212 Bulk Material for Resistive Current Limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 11, n. 1, p. 2507-2510, 2001.
- 10 Majewski, P. Materials aspects of the high-temperature superconductors in the system Bi₂O₃-SrO-CaO-CuO, *Journal of Materials Research*, v. 15, n. 4, p. 854-870, 2000.

- 11 Elschner S.; Bock, J.; Bestgen, H. Influence of Granularity on the critical current density in melt cast processed $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$, Superconductor Science and Technology, v. 6, n. 6, p. 413-420, 1993.
- 12 Gomes Jr., G.G. REFINAMENTO DE RIETVELD APLICADO A CERÂMICAS SUPERCONDUTORAS DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA, Dissertação de Mestrado, PEMM/COPPE/UFRJ, 2009.
- 13 Lázaro, F. da Silva ESTUDO E SIMULAÇÕES DO DISPOSITIVO LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTOCIRCUITO SUPERCONDUTOR (DLCCS), Projeto de Graduação, DEE/UFRJ, 2009.
- 14 J. Bock, H. Bestgen, S. Elschner and E. Preisler, Large shaped parts of melt cast BSCCO for applications in electrical engineering, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, v. 3, n. 1, p. 1659-1662, 1993.
- 15 A Polasek, C V de Sena, E T Serra and F Rizzo Partial Melt Processing of High-Tc Bulk Bi-2212 Starting from different precursor powders, Journal of Physics Conference Series, v. 1, p. 1-4, 2008.
- 16 Sheahen, T. P., Introduction to High-Temperature Superconductivity, Plenum Press, Nova York, 1994.