

## EFFECTOS DEL ANCLAJE DE FLUJO MAGNÉTICO EN SUPERCONDUCTORES DE YBCO (123) DOPADOS CON Ag

## FLUX PINNING EFFECTS IN Ag-DOPED YBCO (123) SUPERCONDUCTOR

Madelen Pérez<sup>1</sup> y Alvaro Mariño<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Superconductividad y Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

### Resumen

Muestras policristalinas de YBCO (123) dopadas con Ag<sup>+</sup> ( $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_3\text{O}_{7-\delta}$ ) con  $0 \leq x \leq 0.3$  fueron preparadas por el método de reacción de estado sólido. Se observó un incremento notable en la densidad de corriente crítica ( $J_c$ ) en las muestras dopadas, las cuales presentaron un valor máximo para las muestras con un dopado nominal de Ag de  $x=0.05$ . Este incremento puede ser atribuido principalmente a un aumento de la fuerza de anclaje. Adicionalmente se observó un aumento de la temperatura de irreversibilidad ( $T_{irr}$ ) en función del contenido de Ag, con un valor máximo para  $x=0.05$ . El mayor corrimiento de la línea de irreversibilidad que se observa para la muestra dopada con  $x=0.05$ , se correlaciona bien con los mayores valores de  $J_c$ . Sin embargo, las muestras dopadas con  $x > 0.05$ , presentaron una disminución de las propiedades eléctricas (menor  $T_{irr}$ , menor  $J_c$ , mayor ancho de transición, etc.) lo cual se puede relacionar con la disminución de los tamaños de grano producida por la segregación de Ag a las fronteras de grano, lo que incrementa el número de “weak-links”.

**Palabras clave:** Fuerza de anclaje, irreversibilidad magnética, corriente crítica, superconductores dopados.

1. Alvaro Mariño: amarinoca@unal.edu.co

## Abstract

Polycrystalline samples of  $\text{Ag}^+$ -doped YBCO (123) ( $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_3\text{O}_{7-\delta}$ ) with  $0 \leq x \leq 0.3$  were produced by solid state reaction method. The  $\text{Ag}$ -doped YBCO samples showed higher critical current densities ( $J_c$ ) with a  $J_c$  maximum for samples doped with  $x=0.05$ . This behavior can be assigned to an increase of pinning forces. The irreversibility temperature ( $T_{irr}$ ), also increased in doped samples as a function of  $\text{Ag}$  content, with the highest temperature for the sample doped with  $x=0.05$ , which correlates well with the observed  $J_c$  increasing. However, samples doped with  $x>0.05$  displayed a decreasing of electrical properties (less  $T_{irr}$ , less  $J_c$ , etc.) attributed to an excess of  $\text{Ag}$  in the grain boundaries which, reduces the grain sizes and increases the number of weak-links.

**Keywords:** Pinning forces, magnetic irreversibility, critical current densities, doped superconductors.

## Introducción

Desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas una de las más importantes características de cualquier superconductor es la máxima capacidad de transportar corriente eléctrica sin disipación de energía. Esta aseveración es igualmente válida tanto para aplicaciones a gran escala tales como líneas de transmisión de energía, transformadores, etc., como para aplicaciones electrónicas a pequeña escala, por ejemplo: en dispositivos pasivos para microondas y en dispositivos basados en el efecto Josephson. En general para obtener superconductores con las mejores propiedades de irreversibilidad (densidades de corriente críticas altas ( $J_c$ ), altos campos de irreversibilidad ( $B_{irr}$ ) y pequeñas relajaciones magnéticas), en presencia de campos magnéticos externos es necesario incrementar el anclaje de vórtices en estos materiales, para lo cual es fundamental tener un mejor conocimiento del mecanismo o mecanismos de anclaje de vórtices. [1-3]

El mecanismo de anclaje dominante parece ser sin embargo dependiente del tipo de anclaje; por ejemplo, de si el anclaje es pro-

ducido por deficiencias de oxígeno o por regiones de más baja  $T_c$ , por inclusiones no superconductoras o por defectos columnares producidos por irradiación con iones pesados, etc. [1–6]

En este trabajo reportamos y analizamos los resultados de las propiedades eléctricas como temperatura crítica ( $T_c$ ), densidad de corriente crítica ( $J_c$ ), temperatura de irreversibilidad ( $T_{irr}$ ), etc., de muestras policristalinas de YBCO (123) dopadas con Ag en un rango entre  $0 \leq x \leq 0.3$ .

## Resultados y discusión

Se prepararon muestras policristalinas de  $\text{YBa}_2(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_3\text{O}_{7-\delta}$  con  $0 \leq x \leq 0.3$ . Las muestras superconductoras fueron sintetizadas por reacción de estado sólido, a partir de óxidos de alta pureza de  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{BaO}$  y  $\text{Ag}_2\text{O}$  en cantidades estequiométricas y mezclados en un molino de bolas de zirconio. La mezcla se calentó a  $900^\circ\text{C}$  durante 16 horas seguido de un molido fino. El polvo obtenido se compactó formando discos de aproximadamente 1cm de diámetro

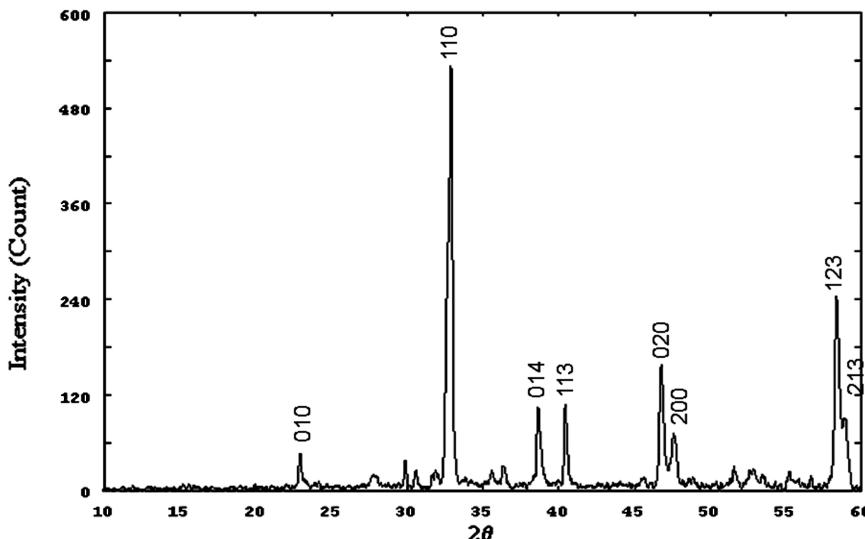


FIGURA 1. Espectro de difracción de rayos X para la muestra YBCO (123).

y 2mm de espesor y se calentó nuevamente a 900°C durante 4 horas; posteriormente se disminuyó la temperatura hasta 500°C en atmósfera O<sub>2</sub> y se mantuvo a esta temperatura por 12 horas, permitiendo luego un descenso libre hasta temperatura ambiente.

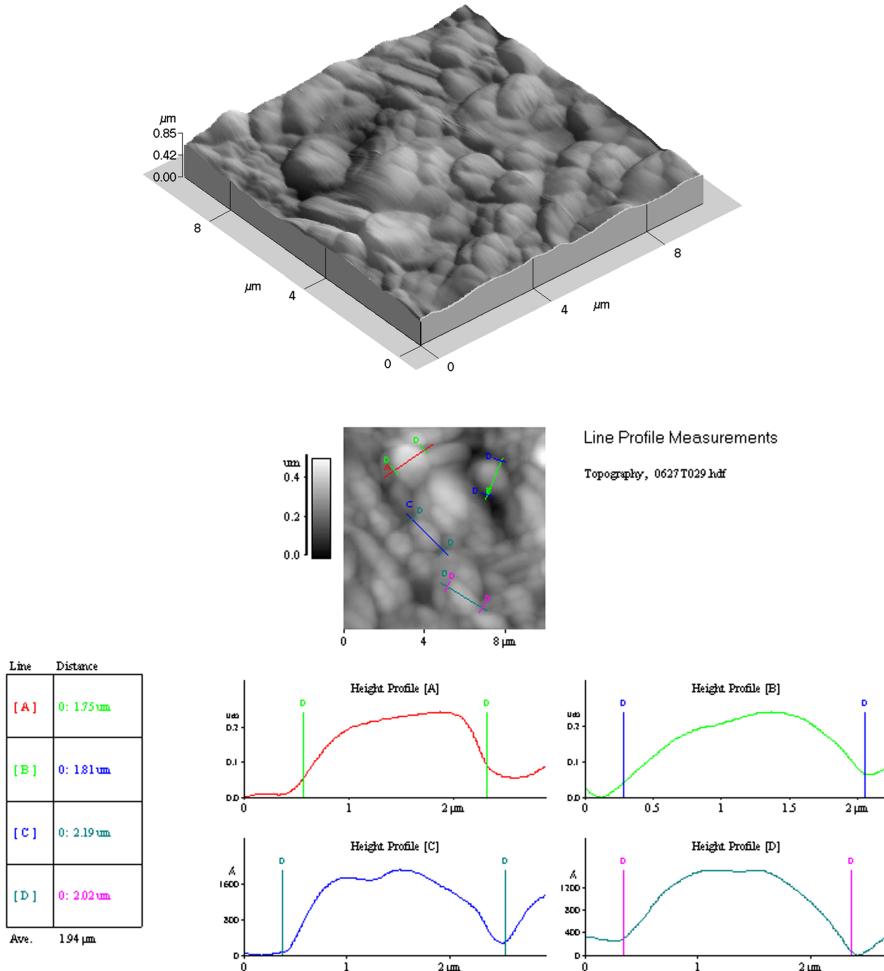


FIGURA 2. Micrografía y medida del tamaño de grano para el YBCO. Los perfiles A, B, C y D corresponden a diferentes regiones de la muestra.

Los espectros de difracción de rayos x (DRX) de las muestras sin dopar, presentaron principalmente los picos y relaciones de intensidad entre ellos característicos de la fase superconductora 123, con

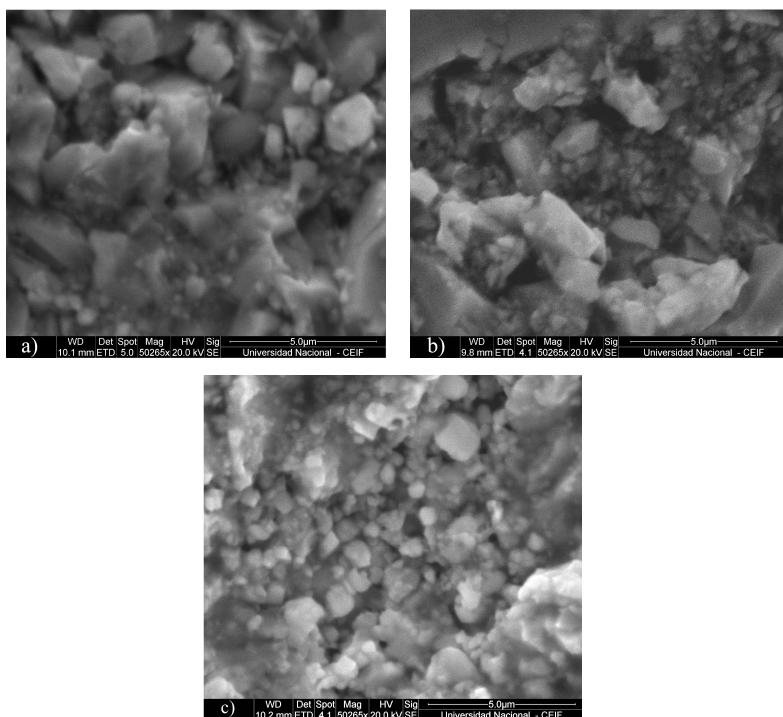


FIGURA 3. Micrografías SEM para YBCO a)  $Ag^+ x=0.05$ , b)  $Ag^+ x=0.10$  y c)  $Ag^+ x=0.30$  tomadas a  $5\mu m$ .

parámetros de red  $a=3.8208$ ,  $b=3.8838$  y  $c=11.6845$ , determinados con el programa PowderX (ver figura 1). Se observa la presencia de otras fases no superconductoras aunque en pequeñas cantidades.

Los valores obtenidos para el parámetro  $c$ , indican de acuerdo a lo reportado en la literatura, un contenido de  $O_2 > 6.92$  [7, 8]. Los patrones de difracción para las muestras dopadas presentaron un leve corrimiento de los picos característicos del YBCO, atribuible al mayor radio iónico de  $Ag^+$ .

La morfología de las muestras a partir del análisis con microscopía de fuerza atómica (AFM) y microscopía electrónica de barrido (SEM) ponen de presente claramente el carácter granular del material como se muestra en las figuras 2 y 3.

Sin embargo, el tamaño de los granos presenta diferencias dependiendo del contenido de Ag; el cual aparentemente incrementa

con el contenido de Ag hasta dopados nominales de  $x=0.05$ . Para concentraciones de Ag  $>0.05$  se observa una tendencia a disminuir el tamaño de grano, como resultado de la posible segregación de Ag a las fronteras de grano (ver figura 3).

La figura 4) muestra los resultados de las medidas de resistencia vs temperatura utilizando el método resistivo de cuatro puntas de muestras dopadas y sin dopar. Todas las muestras presentan transición al estado superconductor con un leve incremento de la  $T_c$  para las muestras dopadas con Ag. Se observa en general un mejoramiento de las propiedades eléctricas (ancho de transición, resistencia residual, etc) de las muestras dopadas respecto de las muestras puras. Un valor óptimo de  $T_c = 89.8 \pm 0.1\text{K}$  y de las propiedades eléctricas se observa para la muestra dopada con  $x=0.05$  (ver figuras 5 a y b, 6).

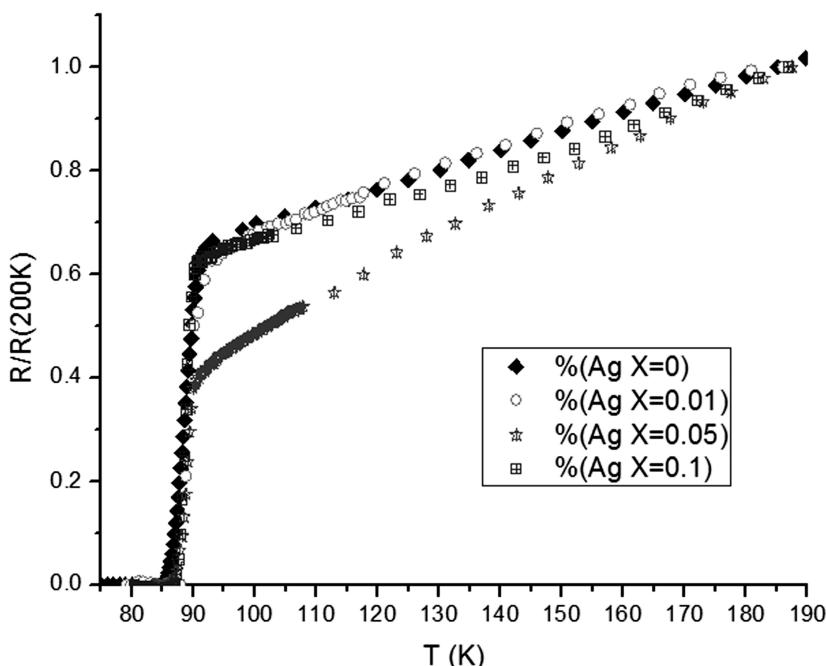


FIGURA 4. Resistencia normalizada en función de la Temperatura para las muestras superconductoras de YBCO y de YBCO dopadas con Ag<sup>+</sup>.

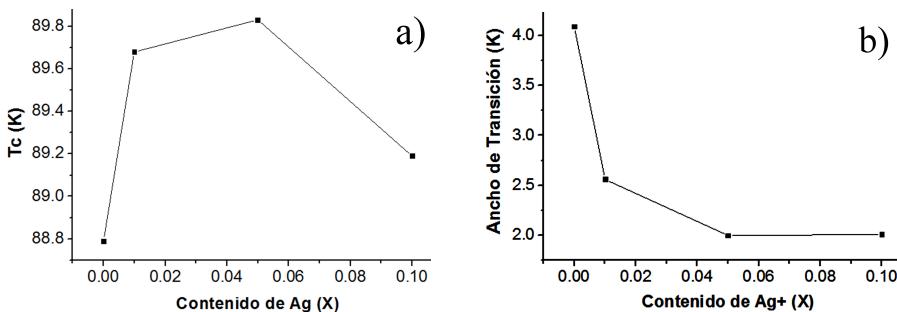


FIGURA 5. Variación de la a)  $T_c$  y b)  $\Delta T$  en función del contenido de  $\text{Ag}^+$ . (la línea continua es sólo una ayuda visual).

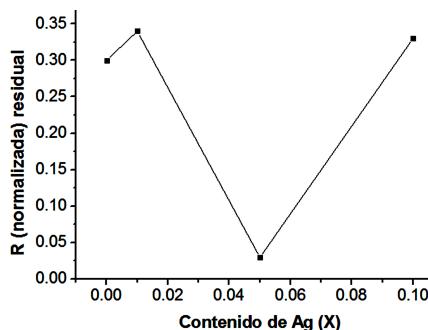


FIGURA 6. Resistencia (normalizada) residual en función del contenido de  $\text{Ag}^+$ . (la línea continua es sólo una ayuda visual).

El decrecimiento de las propiedades eléctricas en muestras dopadas con  $x > 0.05$  podría estar relacionado con la segregación de Ag a las fronteras de grano, que impide su crecimiento, dando como resultado un aumento de las fronteras de grano y el consiguiente aumento en el número de “Weak-links”. [8–10]

Las mediciones de la densidad de corriente crítica ( $J_c$ ) realizadas utilizando el criterio de  $10 \mu\text{V}$  en medidas resistivas presentan el comportamiento típico en función de la temperatura, como se muestra en la figura 7.

Los valores de  $J_c$  a  $T=80\text{K}$  muestran un incremento notable para las muestras dopadas con Ag, con un máximo de  $J_c$  (80K)  $\approx 187.5 \pm 0.5 \text{ A/cm}^2$  para la muestra con  $x=0.05$  (ver tabla 1).

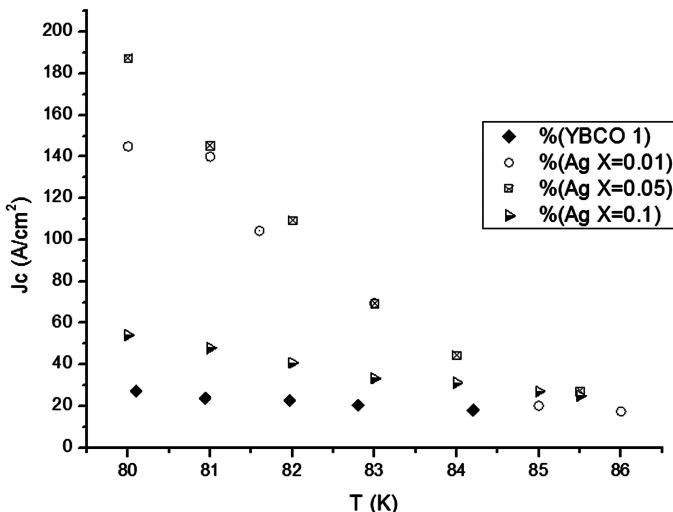


FIGURA 7. Comportamiento de la densidad de corriente crítica ( $J_c$ ) en función de la temperatura para muestras dopadas y sin dopar.

MUESTRA	$J_c$ (A/cm <sup>2</sup> ) (T=80K)
YBCO	$27.2 \pm 0.5$
Ag-0.01	$144.9 \pm 0.5$
Ag-0.05	$187.5 \pm 0.5$
Ag-0.10	$54.2 \pm 0.5$

TABLA 1. Corriente crítica en función de la temperatura para la muestra pura (YBCO) y dopadas con diferentes concentraciones de  $\text{Ag}^+$ .

El incremento significativo de  $J_c$  con el contenido de Ag podría estar relacionado con un efecto real de anclaje de flujo magnético (incremento de las fuerzas de anclaje), producido por la incorporación de Ag en la red del YBCO. El decrecimiento posterior de  $J_c$  para concentraciones  $x > 0.05$  podría correlacionarse con el aumento del número de “Weak-links.<sup>a1</sup> incrementar el número de fronteras de grano por la segregación de plata a sus fronteras.[11–13].

Las medidas de  $R$  vs  $T$  para diferentes campos magnéticos aplicados perpendicularmente a la superficie de las muestras se presentan en las figuras 8 a y b y 9 a y b correspondientes a muestras sin dopar y dopadas respectivamente.

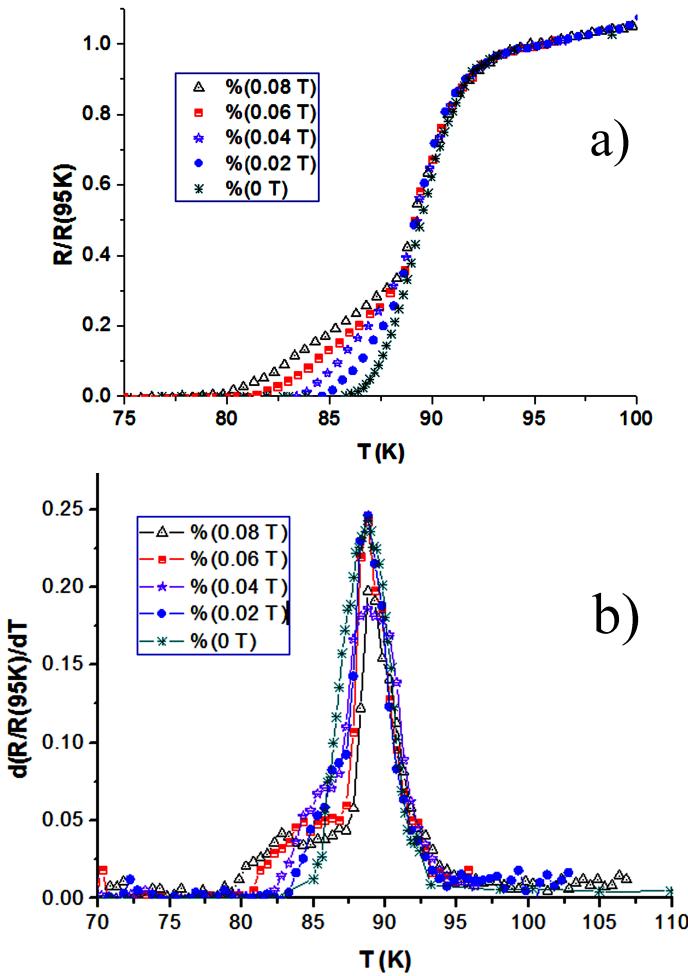


FIGURA 8. Resistencia vs Temperatura para la muestra YBCO a) Para diferentes campos magnéticos y b) Derivada respectiva

Se observa un ensanchamiento apreciable de la transición superconductora la cual se incrementa con la magnitud del campo magnético aplicado. Este ensanchamiento es, sin embargo, más pronunciado en las muestras sin dopar. El ensanchamiento de la transición superconductora así como el decrecimiento en la densidad de corriente crítica ( $J_c$ ), observado también en estas muestras, en presencia de un campo magnético ha sido asociado con el carácter granular de los HTSC, específicamente con el debilita-

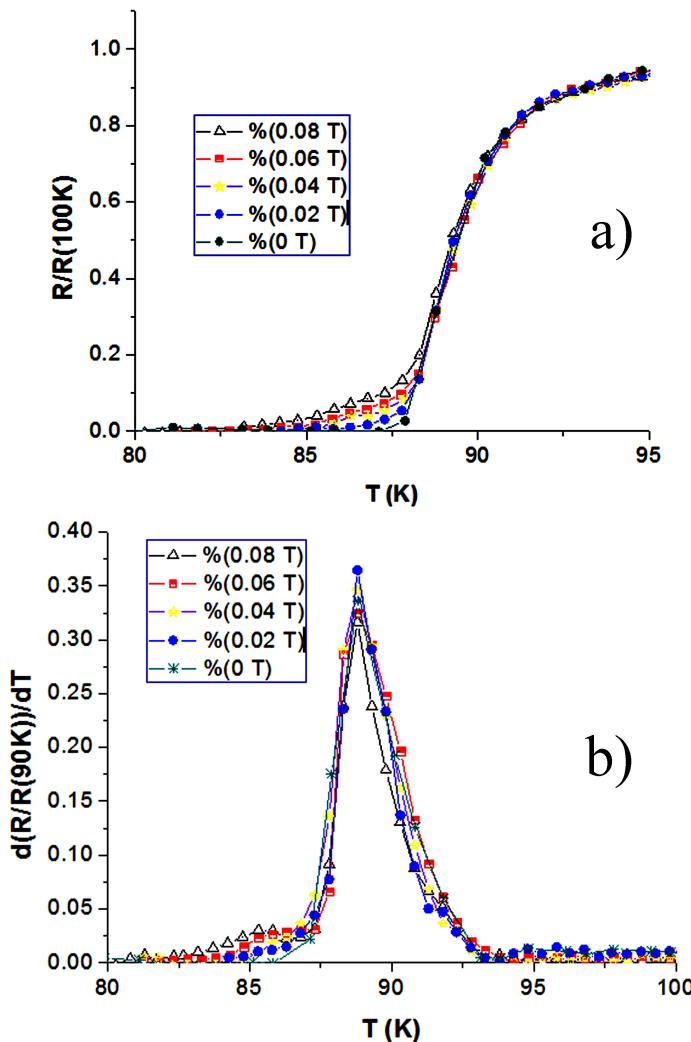


FIGURA 9. Resistencia vs Temperatura para la muestra YBCO dopada con Ag,  $X=0.01$  a) Para diferentes campos magnéticos y b) Derivada respectiva.

miento de la energía de acoplamiento entre granos superconductores (medio Josephson) debido a la presencia de “Weak-links”.

Como se observa en las figuras 8 b y 9 b, la parte de la transición correspondiente al medio intragranular (medio Abrikosov) permanece prácticamente invariante para los campos utilizados ( $H \ll 1\text{ T}$ ).

Por otra parte, el menor ensanchamiento de la transición resistiva observado en las muestras dopadas podría asociarse con un mejoramiento efectivo del medio intergranular lo cual se debe reflejar en un aumento de  $J_c$  respecto a las muestras sin dopar, como efectivamente se observa (ver figura 7).

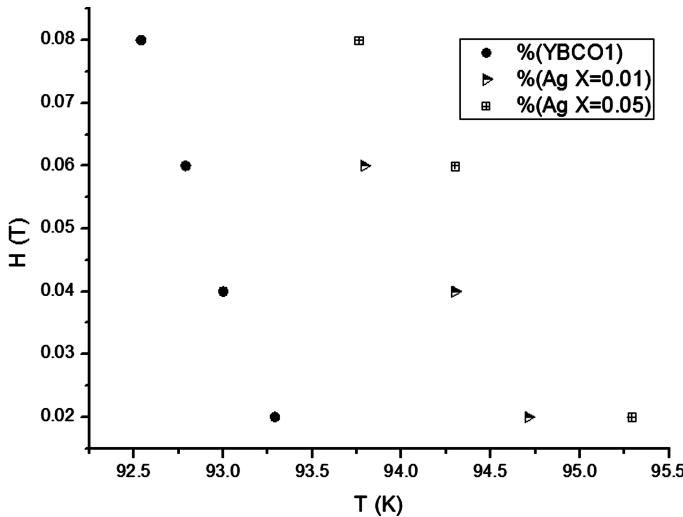


FIGURA 10.  $T_{irr}$  vs  $H$  para las muestras YBCO1, Ag  $X=0.01$  Y Ag  $X=0.05$ .

Adicionalmente se realizaron medidas de resistividad en función de la temperatura con y sin campo magnético aplicado (Zero field cooling ZFC y Field cooling FC) para determinar la línea de irreversibilidad magnética. Las curvas de  $T_{irr}$  vs  $H_{ap}$  para muestras dopadas y sin dopar se muestran en la figura 10. Se observa un corrimiento de la línea de irreversibilidad hacia temperaturas más altas para las muestras dopadas con Ag. El mayor corrimiento se observó para la muestra dopada con  $x=0.05$ , lo que se correlaciona bien con los mayores valores de  $J_c$ . El comportamiento de  $T_{irr}$  vs  $H_{ap}$  de todas las muestras sin embargo, se ajusta bien a una ley de potencias del tipo Almeida-Thouless, lo cual sería un indicativo de que en estas muestras existe una preponderancia de la dinámica de fluxoides Josephson (flujo intergranular) en la región de bajos campos magnéticos ( $H < 1$  T).

## Conclusiones

- Muestras policristalinas de YBCO (123) dopadas con  $\text{Ag}^+$  ( $0 \leq x \leq 0.3$ ) y sin dopar presentaron un comportamiento metálico antes de la transición superconductora. La  $T_c \approx 89.0 \pm 0.1 \text{ K}$  aumentó levemente con el contenido de Ag.
- La densidad de corriente crítica ( $J_c$ ) aumentó notablemente con el contenido de  $\text{Ag}^+$ , con un valor máximo de  $J_c$  (80K)  $\approx 187.5 \pm 0.5 \text{ A/cm}^2$  para muestras con un dopado nominal  $x=0.05$ , lo cual puede atribuirse principalmente a un aumento de la fuerza de anclaje.
- La adición de  $\text{Ag}^+$  produce en general un mejoramiento del medio Josephson intergranular que se manifiesta en un mejoramiento de las propiedades del superconductor como: disminución del ancho de transición, disminución de la resistencia residual, etc.
- La línea de irreversibilidad se corrió hacia temperaturas más altas en función del contenido de Ag, presentando un máximo corrimiento para la muestra dopada con  $x=0.05$ .

## Referencias

- [1] D. Dew-Hughes, Low Temperature Physics **27**, 713 (2001).
- [2] T. Matsushita, Supercond. Sci. Tech. **13**, 730 (2000).
- [3] T. Matsushita, *Flux Pinning in Superconductors* (Springer, 2010).
- [4] T. Mochida, N. Chikumoto, and M. Murakami, Phys. Rev. B **62**, 1350 (2000).
- [5] C. P. J. Poole, H. A. Farach, and R. J. Creswick, *Superconductivity* (Academic Press, 1995).
- [6] G. Burns, *High-temperature superconductivity: an introduction* (Academic Press, 1992).
- [7] L. Tejeda and J. Fierro, *Properties and Applications of Perovskite-Type Oxides*, Chemical Industries (Taylor & Francis, 1992) pp. 47–91.

- [8] L. Liu, C. Dong, J. Zhang, H. Chen, and L. Chen, *Physica C*. **383**, 17 (2002).
- [9] R. Cogollo, A. Mariño, and H. Sanchez, *IEEE T. Appl. Supercon.* **13**, 2789 (2003).
- [10] H. Martínez, A. Mariño, and J. Rodríguez, *Physica C*. **408-410**, 568 (2004).
- [11] G. Plesch, F. Hanic, A. Cigáň, J. Maňka, A. Buculiaková, and Š. Buchta, *Int. J. Inorg. Mater.* **3**, 537 (2001).
- [12] S. Hoste, I. V. Driessche, E. Bruneel, G. Plesch, A. Cigáň, J. Maňka, and V. Zrubec, *Int. J. Inorg. Mater.* **3**, 453 (2001).
- [13] A. A. Gallitto and M. L. Vigni, *Physica C: Superconductivity* **259**, 365 (1996).

(Recibido: 03/2010. Aceptado: 07/2010)