

# RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 18/03/2022.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

ADRIANA GUIRAO PRESOTTO

**RESPOSTA MAGNETO-ELÉTRICA DE NANOFITAS SUPERCONDUTORAS  
GRANULARES: SIMULAÇÕES UTILIZANDO O FORMALISMO DE  
GINZBURG-LANDAU DEPENDENTE DO TEMPO**

Ilha Solteira  
2020

ADRIANA GUIRAO PRESOTTO

Resposta magneto-elétrica de nanofitas supercondutoras granulares:  
simulações utilizando o formalismo de Ginzburg-Landau dependente do tempo

Magneto-electric response of granular superconducting nanofibers: simulations  
using the time-dependent Ginzburg-Landau formalism

Dissertação apresentada à Faculdade  
de Engenharia – UNESP - Campus de  
Ilha Solteira, como requisito para a  
obtenção do título de Mestre em Ciência  
dos Materiais.

Prof. Dr. RAFAEL ZADOROSNY

Orientador

Dr. ELWIS CARLOS SARTORELLI DUARTE

Coorientador

Ilha Solteira

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P934r Presotto, Adriana Guirao.  
Resposta magneto-elétrica de nanofitas supercondutoras granulares:  
simulações utilizando o formalismo de Ginzburg-Landau dependente do tempo  
/ Adriana Guirao Presotto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020  
73 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Física da Matéria  
Condensada, 2020

Orientador: Rafael Zadorosny  
Coorientador: Elwis Carlos Sartorelli Duarte  
Inclui bibliografia

1. Supercondutores granulares. 2. GTDGL. 3. Flux Flow.

*Raiane da Silva Santos*  
Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção  
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação  
CRB/8 - 9999

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

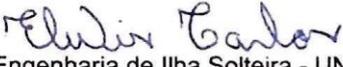
**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Resposta magneto-elétrica de nanofitas supercondutoras granulares: simulações utilizando o formalismo de Ginzburg-Landau dependente do tempo

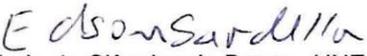
**AUTORA:** ADRIANA GUIRÃO PRESOTTO

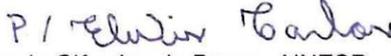
**ORIENTADOR:** RAFAEL ZADOROSNY

**COORIENTADOR:** ELWIS CARLOS SARTORELLI DUARTE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIA DOS MATERIAIS, área: Física da Matéria Condensada pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ELWIS CARLOS SARTORELLI DUARTE   
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. EDSON SARDELLA   
Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP

Prof. Dr. ANDRE LUIZ MALVEZZI P.   
Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP

Ilha Solteira, 18 de março de 2020

Dedico aos meus pais, Vera e Mário, e minha irmã Alice, pelo apoio, carinho e compreensão.

E ao meu eterno amigo Muringa, que me acompanha do céu.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e Nossa Senhora Aparecida, por terem me concedido saúde, força e sabedoria para superar as dificuldades encontradas pelo caminho.

Aos meus pais, Mário e Vera, por todo o amor, suporte e carinho. E por sempre confiarem na minha capacidade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro, sem o qual não seria possível concluir este estudo.

À CAPES - finance code 001 por permitir acesso a diversas revistas internacionais.

À FAPESP processo 2016/12390-6 pelo financiamento do projeto de pesquisa que deu suporte a este trabalho.

Ao Prof. Dr. Rafael Zadorosny e ao Dr. Elwis Carlos Satorelli Duarte, que orientaram o desenvolvimento deste trabalho com companheirismo e dedicação.

A banca examinadora, que aceitou discutir e melhorar este trabalho.

O Grupo de Supercondutividade e Materiais Avançados (GSMA) por toda parceria e discussões enriquecedoras. A Alice, por me ajudar e me incentivar em todos os momentos, e a Ana por dividir e me ajudar em todas as etapas desse processo.

As minhas amigas Ana, Beatriz, Bruna, Bruna L., Caren, Carolina, Fabricia e Jaqueline que dividem e incentivam meus sonhos e tornam meus dias mais alegres.

*“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”*

*Marie Curie*

## RESUMO

Correntes de transporte interagem com os vórtices de Abrikosov nos supercondutores do tipo II via força de Lorentz ( $F_L$ ), o que pode resultar em seu movimento. Esse movimento ocorrerá se  $F_L$  suprimir a força de *pinning* (FP) [4,6], que mantém os vórtices ancorados, tais como defeitos e orifícios artificiais nas amostras. Nos casos em que  $F_L \gg FP$ , os vórtices se movem livremente e experimentam apenas resistência viscosa devido à sua interação com o condensado supercondutor. Esse estado de movimento é conhecido como *flux flow* (FF). Assim, no presente trabalho, estudamos a dinâmica dos vórtices em uma fita supercondutora com tamanhos laterais de  $10 \xi(0) \times 70 \xi(0)$ , com seis grãos espaçados por um supercondutor de menor  $T_c$ , i.e., um *weak-link* (WL). Além disso, em cada grão foram considerados quatro defeitos da mesma natureza que os WL's, simulando defeitos intrínsecos. Para tal estudos, as equações generalizadas de Ginzburg-Landau dependentes do tempo (GTDGL) foram solucionadas numericamente. Assim, foram considerados três valores diferentes de campos magnéticos externos, i.e.,  $H_{ap} = 0,1 H_{c2}(0)$ ,  $0,3 H_{c2}(0)$  e  $0,5 H_{c2}(0)$ , e densidade de correntes de transporte de intensidade que variou em passos de  $0,005 J_0$ . Observou-se que a intensidade de  $H_{ap}$ , influencia diretamente nos regimes de movimento, onde para  $H_{ap} = 0,1 H_{c2}(0)$  foi verificado apenas o FF intergranular e uma dinâmica mais duradoura. Já para  $H_{ap} = 0,3 H_{c2}(0)$  e  $0,5 H_{c2}(0)$  foram observados dois regimes de movimento, o *flux flow* (FF) inter e o intragranular, porém houve uma destruição mais rápida do supercondutor (SC). Verificou-se, ainda, que o sinal de  $V(t)$  é apresentado em forma de “pacotes” de repetições, sendo que há uma maior modulação e dissipação quando inicia-se o regime de FF intragranular. Já as frequências de oscilação são da ordem de GHz, possuindo uma dependência com  $H_{ap}$ . Isso é devido ao maior número de vórtices de Abrikosov interagindo no SC, o que causa um aumento no período de oscilação de  $V(t)$ .

## ABSTRACT

Transport currents interact with Abrikosov vortices in type II superconductors via Lorentz force ( $F_L$ ), which can result in their motion. Such movement will occur if  $F_L$  suppresses the pinning force (FP) [4,6], which keeps vortices trapped, such as defects and artificial holes in the samples. In cases where  $F_L \gg FP$ , the vortices move freely and experience only a viscous resistance due to their interaction with the superconducting condensate. This state of motion is known as flux flow (FF). Thus, in the present work, we studied the vortex dynamics a superconducting tape with lateral sizes of  $10 \xi(0) \times 70 \xi(0)$ , with six grains spaced by a smaller  $T_c$  superconductor, i.e., a weak-link (WL). In addition, in each grain, four defects of the same nature as the WL's were considered, simulating intrinsic defects. For such studies, the generalized time-dependent Ginzburg-Landau equations (GTDGL) were solved numerically. Thus, three different values for the external magnetic field were considered, i.e.,  $H_{ap} = 0.1 H_{c2}(0)$ ,  $0.3 H_{c2}(0)$  and  $0.5 H_{c2}(0)$ , and density of transport currents of intensity that varied in steps of  $0,005 J_0$ . It was observed that the intensity of  $H_{ap}$  directly influences the motion regimes, where for  $H_{ap} = 0.1 H_{c2}(0)$  it was verified only the intergranular FF and a longer dynamics. For  $H_{ap} = 0.3 H_{c2}(0)$  and  $0.5 H_{c2}(0)$ , two motion regimes were observed, the inter and intragranular FF. However, there was a faster destruction of the superconductor (SC). It was also found that the  $V(t)$  response presented a repetition "packages", with greater modulation and dissipation when the intragranular FF regime starts. The oscillation frequencies are of the order of GHz, having a dependence on  $H_{ap}$ . This is due to the greater number of Abrikosov vortices interacting in the superconductor, which causes an increase in the period of oscillation of  $V(t)$ .

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. ESTADO DA ARTE .....	15
2.1. Revisão bibliográfica .....	15
2.2. Teorias fenomenológicas .....	20
2.2.1. Equações dos irmãos London.....	20
2.2.2. Teoria de Ginzburg-Landau .....	21
2.2.3. Comprimentos característicos.....	25
2.2.3.1. Comprimento de penetração, $\lambda_L$ .....	25
2.2.3.2. Densidade de superelétrons e Comprimento de coerência, $\xi$ ....	26
2.2.3.3. Parâmetro de Ginzburg-Landau $\kappa$ . ....	28
2.2.4. Supercondutores dos tipos I e II.....	28
2.2.5. Quantização do Fluxo .....	30
2.2.6. Supercondutores Mesoscópicos .....	31
2.2.7. Regimes de Movimentos.....	33
2.2.7.1. Flux Flow .....	34
2.2.7.2. Força <i>Pinning</i> (FP) .....	36
2.2.7.2.1. Tipos de PCs. ....	37
3. FORMALISMO TEÓRICO .....	39
3.1. Equação de Ginzburg-Landau dependente do tempo – TDGL.....	39
3.2. Equação de Ginzburg-Landau dependente do tempo generalizada – GTDGL.....	41
3.3. Campos auxiliares.....	42
3.4. Solução numérica da equação GTDGL .....	43
3.4.1. Malha de discretização.....	44
3.4.2. Condições de contorno .....	45

3.4.3. Discretização da equação GTDGL.....	46
3.4.4. Discretização da densidade de corrente .....	47
3.4.5. Discretização do potencial vetor e da voltagem .....	48
4. RESULTADOS .....	50
4.1. Curva da voltagem pela corrente .....	50
4.2. Relação entre voltagem e $ \psi $ .....	54
4.3. Frequência de oscilação .....	60
4.4. Módulo de J.....	62
5. CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS.....	70

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das áreas da física mais estudada na atualidade é a Física de materiais. Um setor de grande destaque é o dos nanomateriais e é nesta escala que se enquadra a supercondutividade mesoscópica (SC meso). Tais materiais possuem tamanhos que são da ordem dos comprimentos característicos dos supercondutores, i.e., da profundidade de penetração  $\lambda(T)$  e/ou do comprimento de coerência  $\xi(T)$  [1]. Por causa das dimensões pequenas, os vórtices e as correntes no material sofrem grande influência da superfície do material, devido aos efeitos de confinamento. Assim, é de grande interesse teórico e prático o estudo de supercondutores mesoscópicos, seu comportamento sob campos magnéticos externos e correntes de transporte.

Em 1950, Vitaly Ginzburg e Lev Landau propuseram a teoria de Ginzburg-Landau (teoria GL) [2,3]. Tal teoria explica, por meio de variáveis termodinâmicas, a transição da fase normal para o estado supercondutor. Ela, ainda, explica a existência de dois tipos de supercondutores, os do tipo I (SCI) e os do tipo II (SCII). Sendo que os SCI possuem uma transição abrupta do estado normal para o estado supercondutor. Enquanto que nos SCII, há a presença de um estado misto quando imerso em um campo magnético, ou seja, torna-se energeticamente favorável a penetração de fluxo magnético em seu interior.

Foi o físico Alexei Abrikosov que estudou, pela teoria GL, o estado misto propondo, ainda, a existência de vórtices magnéticos (aqui denominados por vórtices de Abrikosov) em SCII. Quando da presença de correntes de transporte, os vórtices se movem devido à força de Lorentz ( $F_L$ ) que age sobre eles. Com isso, um estado resistivo aparece e é caracterizado por uma resistividade não nula, porém menor que do estado normal, levando a uma diferença de potencial finita no material. Os vórtices podem ser aprisionados em defeitos do material, os chamados centros de ancoramento (pinning centers, PC). Quando a força que os aprisionados (*pinning force*, PF) é maior que a  $F_L$ , os vórtices podem se mover em grupos (pacotes) guiados pelos centros de aprisionamento do material. Como o vórtice está aprisionado, é necessária a interação com outros para que possa se mover; esse movimento é conhecido por *flux creep* (FCr) [4-6]. No modelo do FCr a dinâmica desse sistema é regida por dois parâmetros,  $\alpha$  e  $B_0$ , onde  $\alpha = J(H + B_0)$  e  $B_0 = \Phi_0/d^2$ , sendo  $d$  a distância percorrida pelo pacote de vórtices [7].

Em situações onde o potencial efetivo de pinning não é muito maior que a energia térmica, ou  $F_L \gg PF$ , os vórtices estão livres para se movimentar e experimentam, efetivamente, apenas uma resistência viscosa devida à sua interação

com o mar supercondutor. Em tais condições, temos um regime de *flux flow* (FF). Tal situação é caracterizada por um comportamento linear na voltagem em função de  $\alpha$ . Y. B. Kim e colaboradores [8] descreveram experimentalmente esse comportamento e diferenciaram os dois regimes de movimento dos vórtices, i.e., o FCr e FF com relação à velocidade dos mesmos.

Para valores muito pequenos de  $\alpha$ , as amostras apresentaram um comportamento de FCr devido à ancoragem de vórtice por defeitos residuais [9]. Dessa forma, na época dessas publicações, houve grande interesse em mapear o estado resistivo de supercondutores no regime de FF. A. R. Strnad e co-autores [10] mensuraram o valor da resistividade em tal regime ( $\rho_f$ ), onde  $\rho_f$  é obtido em termos da resistividade do estado normal ( $\rho_n$ ). Mostraram que a relação  $\rho_f/\rho_n$  é dependente do campo (H) e da temperatura (T), e, ainda, (i) quando  $T \ll T_c$ ,  $\rho_f(H)$  é linear e, (ii) em  $T = 0$  e na presença de H,  $\rho_f$  não é nulo.

Em 2007, D. Y. Vodolazov e F. M. Peeters usando as equações generalizadas de Ginzburg-Landau (GTDGL), estudaram a dinâmica de vórtices em regime de *flux flow instability* (FFI), que é o movimento desordenado dos vórtices dentro do supercondutor, causado pela não homogeneidade da densidade de corrente, em amostras mesoscópicas [11]. Há um valor mínimo de corrente acima do qual há alterações na rede de vórtices e estes passam a se mover em linha.

Adicionalmente, avanços da nanotecnologia tem despertado grande interesse no estudo do comportamento de materiais supercondutores em escalas submicro e nanométricas. Destaque pode ser dado aos *single photon detectors* (SPDs) [12-14] e, algumas previsões consideram a aplicação de nanofios como bits quânticos [2,3], detectores de micro-ondas [15] e sensores [16]. Recentemente, foi demonstrado que pode se tornar factível a fabricação de dispositivos para padrão de corrente (*current standarts*) [17-19] por conta do comportamento dual entre *phase slips* e junções Josephson [17, 20-22].

Nesses materiais diminutos, efeitos de confinamento são responsáveis por alterar sobremaneira a dinâmica de vórtices e, conseqüentemente, novos comportamentos são descritos para o estado supercondutor. Como os efeitos de confinamento são devidos a uma grande influência da superfície, já que as correntes de blindagem passam a permear toda a amostra, os vórtices começam a se arranjar de acordo com a simetria das mesmas. Dessa maneira, surgem estados de multivórtices [23,24] e vórtices gigantes [24], sendo esses últimos caracterizados por um único vórtice contendo mais de  $1\Phi_0$  (quantum de fluxo magnético  $\Phi_0 = h/2e = 2,07 \times 10^{-15}$  Webber) em seu núcleo.

Assim, no presente trabalho descrevemos o estudo da dinâmica de vórtices em nanofios simulados usando o formalismo de Ginzburg-Landau. Os estados dinâmicos dos vórtices, tal como possíveis regimes de *flux flow*, rearranjos da rede e suas consequências nas funções-resposta (magnetização e voltagem induzida em função do tempo) e da corrente aplicada foram analisadas. As amostras escolhidas foram fitas retangulares contendo seis grãos espaçados por um supercondutor de menor  $T_c$  (*weak-link*). Em cada grão foram inseridos quatro defeitos da mesma natureza que a dos *weak-links*.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho analisamos, de forma geral, os regimes de movimentos em fitas supercondutoras granulares. As amostras foram simuladas de forma a apresentar seis grãos, separados por WL's, e cada grão contendo quatro defeitos da mesma natureza dos WL's. Verificamos a influência do campo magnético e da corrente nas respostas dos supercondutores. Comparando as três amostras simuladas para os  $H_{ap} = 0,1 H_{c2}(0)$ ,  $0,3 H_{c2}(0)$  e  $0,5 H_{c2}(0)$ , notamos que a dinâmica é mais curta conforme o  $H_{ap}$  possui maior intensidade. O que foi possível verificar nos gráficos de  $V(J)$ , onde a dinâmica de maior extensão de correntes ocorre para o campo  $H_{ap} = 0,1 H_{c2}(0)$ . Outra diferença observada neste gráfico é a divisão do regime de movimentos de FF em dois para os campos  $H_{ap} = 0,3 H_{c2}(0)$  e  $H_{ap} = 0,5 H_{c2}(0)$ , onde acima de um certo  $J_c$  ocorre a formação do regime de FF misto, ou seja, a ocorre os regimes de FF no inter e no intragrão concomitantemente.

Verificamos, também, que o sinal apresentado nos gráficos de  $V(t)$  possui uma repetição em forma de “pacotes”, onde os máximos ocorrem no momento que os vórtices penetram na amostra, e os mínimos quando os vórtices interagem com os demais que já estavam no SC. Nos gráficos de  $V(t)$ , pudemos observar que para ambos campos,  $H_{ap} = 0,3 H_{c2}(0)$  e  $H_{ap} = 0,5 H_{c2}(0)$ , o sinal possui uma maior amplitude quando inicia o regime de FF intragranular, tal diferença se deve ao movimento assimétrico dos vórtices em cada WL da amostra. Essa diferença fica ainda maior quando os vórtices dos grãos começam a se mover. Podemos também notar que há uma maior dissipação no regime de FF intragranular, pois este regime ocorre em uma região de supercondutividade mais forte, a movimentação dos vórtices gera uma maior dissipação e, com isso, a amplitude de  $V(t)$  é maior. Essa repetição em forma de “pacotes” é pouco discutida na literatura, principalmente para amostras com parâmetros mais reais como estudamos. Existe o trabalho de Vodolazov [11] que estuda uma amostra homogênea, e o de Berdiyrov [52] no qual é considerado apenas um defeito central no SC, sendo assim, nosso trabalho é pioneiro no estudo de regimes de FF mais complexos.

Calculando a frequência de oscilação, obtemos resultados em torno de GHz, e pudemos verificar que a frequência possui uma dependência com o  $H_{ap}$ , pois quanto maior a intensidade de  $H_{ap}$ , menor foram os valores obtidos para a mesma. É possível, também, observar que na proximidade da mudança de regime de movimento há um decréscimo na oscilação, ou seja, devido ao maior número de vórtices de Abrikosov interagindo no SC e a maior inhomogeneidade na distribuição das correntes a frequência é menor. Por fim, observamos que as correntes de blindagem do supercondutor evitam os WL's, fazendo uma circuitação em torno dos grãos, e se concentram na parte

superior e nos extremos laterais da amostra. Uma menor densidade de corrente flui pelos WL's e pela parte inferior da amostra devido à competição entre a  $J_t$  e à de blindagem devido ao  $H_{ap}$ . Devido a maior blindagem dos grãos o regime de FF intergranular sempre começa primeiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. ZADOROSNY, E. SARDELLA, A. L. MALVEZZI, P. N. LISBOA-FILHO and W. A. ORTIZ. Crossover between macroscopic and mesoscopic regimes of vortex interactions in type-II superconductors. *Phys.Rev.B*, New York, v. 85, n. 21, p. 214511, (2012).
- [2] V. L. GINZBURG and L D. LANDAU, *ZH EKSPERIM. iTeor, Fiz.*20, 1064 (1950).
- [3] M. TINKHAM. *Introduction to Superconductivity*. Dover Publications, Inc. New York, USA, ed. 2 (2004)
- [4] J. C. GORTER. *Phys. Letters* 1, 69 (1962).
- [5] J. C. GORTER. *Phys. Letters* 2, 26 (1962).
- [6] P.W. ANDERSON. *Phys. Rev. Lett* 9, 309 (1962).
- [7] P.W. ANDERSON and Y.B. KIM. *Rev. of Mod. Phys* 36, 39 (1964).
- [8] Y. B. KIM, C. F. HEMPSTEAD and A. R. STRNAD. *Rev. Mod. Phys.* 36, 43 (1964).
- [9] C. F. HEMPSTEAD and Y. B. KIM. *Phys. Rev. Letters* 12, 145 (1964).
- [10] A.R. STRNAD, C.F. HEMPSTEAD and Y.B. KIM. *Phys. Rev. Lett* 13, 794 (1964).
- [11] D.Y. VODOLAZOV and F.M. PEETERS. *Phys. Rev. B* 76, 014521 (2007).
- [12] F. J. OWENS and C. P POOLE. *The New Superconductors*. New York: Plenum Press, (1996).
- [13] JR. POOLE, C. P. POOLE, et al. *Superconductivity*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, (2007).
- [14] J. B. KETTERSON and S. N. SONG. *Superconductivity*. Cambridge University Press, First Edition, Northwestern University, (1999).
- [15] V. L. GINZBURG and E. A. ANDRYUSHIN. *SUPERCONDUTIVITY*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Revised Edition, Russia, (2004).
- [16] J. BARDEEN, L. N. COOPER and J. R. SCHRIEFFER. *Phys. Rev.* 108, 1175 (1957).
- [17] A. A. ABRIKOSOV. *SOV. Phys. – JETP* 5, 1174 (1957).

- [18] C. P. POOLE, H. A. FARACH and R. J. CRESWISK. Superconductivity. San Diego: Academic Press, (2007).
- [19] T. OKA, K. YOKOYAMA, Y. ITOH, H. IKUTA, U. MIZUTANI, H. OKADA, K. KATAGIRI and K. NOTO. Construction of a Strong Magnetic Field Generator With Use of Melt-Processed Bulk Superconductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 13, no. 2, June (2003).
- [20] E. DANIELI, J. PERLO, B. BLUMICH and F. CASANOVA. Highly Stable and Finely Tuned Magnetic Fields Generated by Permanent Magnet Assemblies. Phys. Rev. Lett. 110, 180801 (2013).
- [21] G. M. ANDROES and W. D. KNIGHT. Nuclear Magnetic Resonance in Superconducting Tin. Phys. Rev. 121, no. 3, (1961).
- [22] A. VINANTE, G. WIJTS, O. USENKO, L. SCHINKELSHOEK and T.H. OOSTERKAMP. Magnetic resonance force microscopy of paramagnetic electron spins at millikelvin temperatures. NATURE COMMUNICATIONS | 2:572 | DOI: 10.1038/ncomms1581. (2011).
- [23] V. R. MISKO, V. M. FOMIN, J. T. DEVREESE and V. V. MOSHCHALCOV. Stable Vortex-Antivortex Molecules in Mesoscopic Superconducting Triangles, Phys. Rev. Lett. 90, 147003 (2003).
- [24] L. F. CHIBOTARU, A. CEULEMANS, V. BRUYNDONCX and V.V. MOSHCHALCOV. Vortex Entry and Nucleation of Antivortices in a Mesoscopic Superconducting Triangle, Phys. Rev. Lett. 86, 1323 (2001).
- [25] F. OSTERMANN and P. PUREUR. Supercondutividade, São Paulo: Editora Livaria da Física, (2005)
- [26] L. D. LANDAU and E. M. LIFSHITZ. Statistical Physics, Parte 1, 3ª edição, Pergamon Press (1980); Parte 2, Pergamon Press (1980).
- [27] M. MOTTA. Inhomogeneidades estruturais em amostras nanoscópicas de supercondutores de alta temperatura crítica. Dissertação Mestrado, UNESP Bauru, (2009).
- [28] R. ZADOROSNY. Interação da matéria de vórtices com estruturas de defeitos: Detecção das primeiras penetrações. Tese de doutorado, São Carlos, (2009).

- [29] H. F. HESS, R. B. ROBINSON, R. C. DYNES, J. M. VALLES and J. V. WASZCZAK. Phys. Rev. Lett. 62, 214, (1989).
- [30] P. E. GOA, et al. Supercond. Sci. Technol, 14, 729-731, (2001).
- [31] B. J. BAELUS and F. M. PEETERS. Phys. Rev. B 65, 104515, (2002).
- [32] K. VERVAEKE, K. DE KEYSER, M. MENGHINI, C. CARBALLEIRA, G. BORGHS and V. V. MOSHCHALOV. Phys. Rev. B 76, 184506, (2007).
- [33] F. LONDON and H. LONDON. The electromagnetic equations of the superconductor. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 149 (866):71, (1935).
- [34] J. R. REITZ, F. J. MILFORD and R. W. CHRISTY. Fundamentos Da Teoria Eletromagnética. Campus, Rio de Janeiro, 9ª edição, 516 p,(1982).
- [35] C. COHEN-TANNOUDJI, B. DIU and F. LALOE. Quantum Mechanics. John Wiley & Sons, Paris, 2a edição, v.1. 898p, (1977).
- [36] L. P. GORKOV. Microscopic derivation of the Ginzburg-Landau equations in the of superconductivity. Soviet Physics JETP-USSR, 9:1364, (1959).
- [37] E. C. S. DUARTE. Processos térmicos e estado resistivo em supercondutores mesoscópicos: dinâmica de vórtices e gradiente e difusão térmica estudados usando o teorema da energia livre e o formalismo de Ginzburg-Landau. Tese de doutorado, UNESP Ilha Solteira, (2018).
- [38] J. R. TAYLOR. Mecânica Clássica. Bookman, Porto Alegre, 804p, (2013).
- [39] E. SARDELLA, et. al. Phys. Rev. B 74, 014512, (2006).
- [40] B. XU, et. al. Phys. Rev. Lett. 107,057002, (2011).
- [41] V. A. SCHWEIGERT, et, al. Phys. Rev. Lett. 81, 2783, (1998).
- [42] A. PRESOTTO, E. SARDELLA and R. ZADOROSNY. Phys. C 492, 75-72, (2013)
- [43] J. BARDEEN and M. J. STEPHEN. Phys. Rev. 140, A1197, (1965).
- [44] M. MURAKAMI, M. MORITA, K. DOE and K. MIYAMOTO. J. Appl. Phys. Japão, 28, 1189. (1989)
- [45] L. CIVALE et al. Phys. VER. Lett. 67, 648 (1991).

- [46] A. SCHMID. *Physik Kondensierter Materie* 5, 302, (1996).
- [47] M. J. de OLIVEIRA. *Termodinâmica*. São Paulo: Livraria da Física, 365 p, (2005).
- [48] L. KRAMER E R. J. WATTS-TOBIN. *Phys. Rev. Lett.* 40, 1041 (1978).
- [49] R. J. WATTS-TOBIN, Y. KRÄHENBUHL, E L. KRAMER. *J. Low Temp. Phys.* 42, 459, (1981).
- [50] W. D. GROPP, H. G. KAPER, G. K. LEAF, D. M. LEVINE, M. PALUMBO and V.M. VINOKUR. *J. of Comp. Phys* 123, 254 (1996).
- [51] C. SCHERER. *Métodos Computacionais da Física*. Livraria da Física, São Paulo, 1ª ed. (2005).
- [52] G. R. BERDIYOROV, A. R. DE C. ROMAGUERA, M. V. MILOSEVIC, M. M. DORIA, L. COVACI and F. M. PEETERS. *Eur. Phys. J. B* 85,130, (2012).
- [53] L. EMBON, Y. ANAHORY, Z. L. JELIĆ, E. O. LACHMAN, Y. MYASOEDOV, M. E. HUBER, G. P. MIKITIK, A. V. SILHANEK, M. V. MILO, A. GUREVICH and E. ZELDOV. *Nat. Commun* 8, 85, (2017).