

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 05/02/2020.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**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**

ELWIS CARLOS SARTORELLI DUARTE

*Ilha Solteira-SP
5 de Fevereiro de 2018.*

“Universidade Estadual Paulista - UNESP”

“Departamento de Física e Química”

“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”

“Elwis Carlos Sartorelli Duarte”

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência dos Materiais - Área: Física da Matéria Condensada/Supercondutividade.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Zadorosny

“Ilha Solteira”, “5 de Fevereiro” de “2018”.

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

D812p Duarte, Elwis Carlos Sartorelli.
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 / Elwis Carlos Sartorelli Duarte. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
190 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Física da Matéria Condensada, 2018

Orientador: Rafael Zadorosny
Inclui bibliografia

1. Estado resistivo. 2. Supercondutores mesoscópicos. 3. Teoria de Ginzburg-Landau.


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 TESE: 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

AUTOR: ELWIS CARLOS SARTORELLI DUARTE

ORIENTADOR: RAFAEL ZADOROSNY

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIA DOS MATERIAIS, área: FÍSICA DA MATERIA CONDENSADA pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RAFAEL ZADOROSNY

Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. EDSON SARDEILA

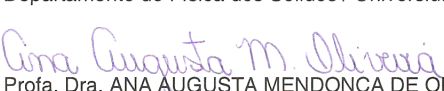
Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru


Prof. Dr. ANDRE LUIZ MALVEZZI

Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru


Prof. Dr. MAURO MELCHIADES DÓRIA

Departamento de Física dos Sólidos / Universidade Federal do Rio de Janeiro


Profa. Dra. ANA AUGUSTA MENDONÇA DE OLIVEIRA

Ensino Básico, Técnico e Tecnológico / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Ilha Solteira, 05 de fevereiro de 2018

*Este trabalho é dedicado com muito amor e carinho aos meus pais,
Aparecida Antônia Sartorelli Duarte e Luiz Carlos Duarte.*

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, luz que ilumina o caminho e me ajuda a seguir.

“Tudo é possível para aquele que crê” (Mc 9:23)

“Tudo posso naquele que me fortalece” (Fp 4:13)

Aos meus pais *Aparecida Antônia Sartorelli Duarte* e *Luiz Carlos Duarte* pelo apoio integral ao longo de toda essa jornada. A todos os meus familiares, em especial, a tia Maria que me acompanhou mais de perto.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Zadorosny, pela dedicação, paciência, liberdade concebida para desenvolver essa pesquisa e pela “fé depositada” em mim para a realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Edson Sardella, por nos fornecer o alicerce no qual foi possível estruturar essa pesquisa.

Queria agradecer também aos meus amigos, companheiros e companheiras do DFQ, em especial, aos meus “irmãos de batalha” dos grupos GSMA/GDAM. No qual, ao longo desse tempo, menciono Danilo, Alice, Vinícius, Gisele, “Tata” (Atair), Maiara, Mariana, Vivian, Alexsander, Thiago, Maycon, Maicon e “Regi” (Regiane) que me acompanharam com maior proximidade.

A todos(as) meus amigos da “Gapira” (Álvares Florence) e de Ilha Solteira (Pá rá pá pá, fica mais um pouquinho), em especial, Bruno, Jana, Marina, Thais e Luana que viram mais de perto minha trajetória. Aos meus amigos da Rep Papo 10, Fita (Arthur), Cauby (César), Ameba (Fernando), Lu (Luis Felipe), Gerino (Eduardo), Docinho (Caique), Anão (Felipe), Mari e Jani pela convivência diária e por acompanharem de perto meus passos nesta jornada.

Aos meus professores e amigos da graduação na UNIFEV, pelo apoio e por me fornecerem a base para que eu pudesse seguir meu caminho na Física. Ao Pirica (Michael) que me incentivou desde o ensino médio a seguir essa profissão.

Agradeço a CAPES pela bolsa de estudo e prometo honrar cada centavo que recebi, contribuindo para o avanço de pesquisa em Física na nossa Pátria Amada, Brasil.

Gostaria de agradecer ao DFQ e PPGCM que ajudaram a viabilizar minha participação em diversos científicos. Ao IIP pelo patrocínio para “Vortex 2017”, onde conheci diversos pesquisadores de renome que possibilitou valiosas trocas de experiência.

A todos(as) que de maneira direta ou indireta contribuíram nessa jornada, meu muito obrigado.

“Make Superconducting State Great Again”

Quem é correto nunca fracassará e será lembrado para sempre - Salmo 112:6

Penso noventa e nove vezes e nada descubro; deixo de pensar, mergulho em profundo silêncio - e eis que a verdade se me revela... Aprender é o início da riqueza. Procurar e aprender é onde começa todo o processo de milagre. O grande avanço na sua vida vem quando você percebe que você pode aprender qualquer coisa que você precisa para aprender a realizar qualquer objetivo que você estabeleceu para si mesmo. Isso significa que não há limites sobre o que você pode ser, ter ou fazer - Albert Einstein.

Resumo

Este trabalho está estruturado em duas partes. A primeira, envolve o estudo do estado de vórtices e comportamento magnético de um supercondutor mesoscópico submetido a um gradiente térmico. Foi verificado que a influência de um gradiente térmico altera o estado de vórtice gigante e pode levar a magnetização a ter um comportamento anômalo, o qual depende do parâmetro κ e das temperaturas nas regiões “quente” e “fria”. Na segunda parte, abordamos o estado resistivo durante o movimento de um vórtice e durante a dinâmica de par vórtice-antivórtice (V-AV) para os tipos de Abrikosov e Cinemáticos. Estudamos quais parâmetros afetam as propriedades do não equilíbrio e os mecanismos de dissipação presentes no processo de difusão térmica. Para os processos envolvendo vórtice ou V-AV de Abrikosov, os mecanismos de dissipação devido à processos de relaxação contribuem para a maior parte da potência total dissipada e, conseqüentemente, exercem uma grande contribuição para a variação de temperatura. Por outro lado, para o caso de V-AV cinemáticos, os elétrons normais aparecem como principal mecanismo de dissipação, todavia os processos de relaxação tem uma contribuição considerável para esse caso. Para realizar tais estudos, utilizamos o teorema da energia livre e as equações de Ginzburg-Landau generalizadas.

Abstract

This work is structured in two parts. In the first one, the vortices states and the magnetic behavior were studied for a mesoscopic superconductor under a thermal gradient. It was verified that the thermal gradient changes the giant vortex state and could lead a exotic behavior of the magnetization curve, depending on the κ parameter and the temperature of the “hot” and the “cold”. In the second part, the focus was the resistive state during one vortex motion and during the annihilation process of a vortex-antivortex (V-AV) pair both with Abrikosov and Kinematic types. We defined which parameters affect the nonequilibrium proprieties and the dissipative mechanisms present in the thermal diffusion processes. For the cases involving a vortex or an Abrikosov’s V-AV pair, the dissipative mechanisms due to the relaxation process have the major contribution for the total power dissipated power and consequently, exert great contribution on the temperature variation. On the other hand, for the case of kinematic V-AV, the normal eletrons risied as the main dissipative mechanism, however relaxation process has a considerable contribution for this case. To realize such studies, we used the free energy theorem and the generalized Ginzburg-Landau equations.

Conteúdo

Introdução	4
1 O Estado supercondutor	6
1.1 Introdução	6
1.2 Teoria B.C.S	6
1.2.1 O Par de Cooper	7
1.2.2 Ground State	9
1.2.3 Estados excitados	18
1.3 Teoria de Ginzburg-Landau	25
1.3.1 Teoria de transições de fase de Landau	25
1.3.2 Equações de Ginzburg-Landau	28
1.3.3 Densidade de superelétrons e comprimento de coerência	29
1.3.4 Profundidade de penetração e vorticidade	30
1.3.5 Análise microscópica das equações GL	33
2 Supercondutividade do não equilíbrio	37
2.1 Teoria de Ginzburg-Landau dependente do tempo	37
2.2 Teoria generalizada de Ginzburg-Landau dependente do tempo	42
2.3 Teorema da energia livre	45
2.4 Equação de difusão térmica	50
3 Solução numérica da equação GTDGL para processos envolvendo difusão térmica	57
3.1 Solução numérica do parâmetro de ordem	57
3.1.1 Condições de contorno	63
3.2 Solução numérica do potencial vetor	64
3.2.1 Cálculo da magnetização, voltagem e condições de contorno	67
3.3 Solução numérica do potencial escalar	70
3.4 Solução numérica da temperatura	77
3.4.1 Condições de contorno e energia livre	79
3.4.2 Critério de estabilidade e condições iniciais	80

4	Supercondutor submetido a um gradiente térmico	83
4.1	Introdução	83
4.2	Resultados	84
4.2.1	Estado de vórtices	85
4.2.2	Magnetização Anômala	87
4.2.3	Discussão dos Resultados	91
5	Estado resistivo do movimento de vórtices de Abrikosov	93
5.1	Introdução	93
5.2	Resultados	105
5.2.1	Influência de impurezas e efeitos de confinamento no estado resistivo	105
5.2.2	Estado resistivo durante o movimento de um vórtice em um super- condutor <i>gapless</i>	109
5.2.3	Estado resistivo durante o movimento de um vórtice em um super- condutor com <i>gap</i>	112
5.2.4	Discussão dos Resultados	116
6	Estabilidade e dinâmica de pares de vórtice e antivórtice de Abrikosov	123
6.1	Introdução	123
6.1.1	Formação e estabilidade de estruturas V-AV	123
6.1.2	Dinâmica de V-AV	131
6.2	Resultados	134
6.2.1	Estado resistivo durante o processo de aniquilação de um par de V-AV em um supercondutor <i>gapless</i>	135
6.2.2	Estado resistivo durante o processo de aniquilação de um par de V-AV em um supercondutor com <i>gap</i>	140
6.2.3	Discussão dos resultados	146
7	Dinâmica de vórtice e antivórtice Cinemáticos	152
7.1	Introdução	152
7.1.1	A “Phase Slip Center”	152
7.1.2	Phase Slip Line	158
7.2	Resultados	162
7.2.1	Mecanismos de dissipação e difusão térmica envolvendo V-AV cinemáticos	162
7.2.2	Influência do substrato no estado resistivo	169
7.2.3	Discussão dos resultados	172
	Conclusão	178
	Apêndice A Demonstração da equação 2.42	180

Apêndice B Demonstração da equação 2.48	181
Apêndice C Demonstração das equações 2.49 e 2.50	183
Apêndice D Lei de Wiedemann-Franz para o estado resistivo	186
Apêndice E Publicações e apresentações em eventos científicos	189

Introdução

Em 1944 V. Ginzburg criou as bases para o estudo de supercondutores sob gradientes térmicos envolvendo efeito termoelétricos. A posteriori, o efeito de gradiente térmico também foi utilizado para estimar o cálculo do coeficiente de viscosidade em regime de *flux flow*. No entanto, a influência de gradientes térmicos no estado de vórtices, é ainda uma área não explorada. Neste sentido, nós verificamos que a influência do gradiente térmico altera o processo de formação de estado de vórtice gigante e, sob certas condições, altera as propriedades magnéticas em supercondutores mesoscópicos. Observamos que as curvas da magnetização em função do campo magnético externo, $M(H)$, apresentam um comportamento exótico quando o supercondutor entra no estado misto, ou seja, não é verificado o comportamento característico da $M(H)$ tal como apresentado por supercondutores mesoscópicos sob temperatura homogênea. Esse tópico consiste na primeira parte de nossa pesquisa.

Na segunda parte, abordamos diversos aspectos que caracterizam o estado resistivo devido a dois processos distintos. O primeiro deles, trabalhos pioneiros na área começaram no início da década de 1960, em situações nas quais os vórtices presentes no mar supercondutor não estão em equilíbrio, ou seja, estão em movimento. Assim, durante a década de 1960 procurou-se entender o estado resistivo devido a dois tipos de movimento dos vórtices, o *flux creep* e o *flux flow*. Nas décadas seguintes, diversas grandezas físicas tal como condutividade, viscosidade e os mecanismos de dissipação que surgem do estado resistivo, foram estudadas tanto do ponto de vista teórico quanto do experimental. Contudo, temos a carência de um estudo mais amplo e detalhado dos processos de difusão térmica e do comportamento de outras grandezas físicas que surgem nesse estado de não equilíbrio. Assim, em nossa pesquisa, mostramos como o comportamento das curvas da magnetização e da voltagem em função do tempo nos auxiliam a monitorar a dinâmica de um vórtice e o processo de aniquilação de par de vórtice-antivórtice (V-AV) em supercondutores mesoscópicos. Observamos que fatores como concentração de impurezas, efeitos de confinamento, velocidade do vórtice e relaxação do sistema afetam um ou mais dos mecanismos de dissipação que, por sua vez, afetam o processo de difusão térmica durante o movimento de um vórtice e ao longo de um processo de aniquilação do par V-AV.

Em um outro caso envolvendo o estado resistivo, novos estudos foram iniciados no final da década de 1960 e começo da década de 1970, onde apareceram transições resistivas em supercondutores quasi unidimensionais, as quais, posteriormente, ficaram conhecidas como *phase slip center* (PSC). Nas décadas seguintes, foram observadas observaram essas mesmas transições em filmes supercondutores. Então, para esse caso, foram chamadas de *phase slip lines* (PSL). No começo da década de 1990, A. Andronov e colaboradores utilizaram o termo vórtices cinemáticos para caracterizar o comportamento da PSL, que é devido à dinâmica de um par de vórtice e antivórtice cinemático. Diversos trabalhos desde então fizeram um mapeamento mais detalhado sobre diversas grandezas físicas que estão presentes no estado resistivo (decorrentes da formação e movimentação de pares de V-AV cinemáticos). Todavia, há poucos trabalhos que abordam os processo de difusão térmica e o comportamento oscilatório do potencial. Então, verificamos que a variação de temperatura durante o processo de difusão térmica altera a amplitude e a frequência do potencial, e que um ou mais dos mecanismos de dissipação presentes são afetados pela variação da corrente elétrica e mudanças na relaxação do sistema, levando, assim, a alterações no processo de difusão térmica. Em 2016, D. Halbertal e colaboradores publicaram um trabalho sobre uma técnica de mapeamento térmico em nanomateriais. Com isso, nossos estudos envolvendo processos de difusão térmica fornecem uma base teórica para que tal técnica seja utilizada para mapear a dinâmica de vórtices ou pares de V-AV em supercondutores mesoscópicos.

Esse trabalho está estruturado da seguinte forma: No Capítulo 1, apresentamos as propriedades do equilíbrio de estado supercondutor por meio das teorias BCS e Ginzburg-Landau (GL); No Capítulo 2, temos as generalizações das equações GL e a equação de difusão térmica, onde, para se obter os mecanismos de dissipação, generalizamos o teorema da energia livre apresentado por A. Schmid em 1966; No Capítulo 3, resolvemos numericamente a equação de Ginzburg-Landau dependente do tempo generalizada (GTDGL) acoplada à equação de difusão térmica; No Capítulo 4, abordamos a influência do gradiente térmico no estado de vórtices e nas propriedades magnéticas; No Capítulo 5, abordamos o estado resistivo durante o movimento de um vórtice em um supercondutor *gapless* e com *gap*; No Capítulo 6, estudamos o estado resistivo durante um processo de aniquilação de V-AV de Abrikosov em um supercondutor *gapless* e com *gap*; No Capítulo 7, foi dedicado ao mesmo estudo para a dinâmica de V-AV cinemáticos. No início de cada capítulo há, uma introdução, onde fazemos uma revisão “físico-historiográfica” referente aos assuntos pertinentes à pesquisa presente em cada um deles.

Bibliografia

- [1] R. D. Parks and R. P. Groff, Phys. Rev. Letters **18**, 342 (1967).
- [2] J. S. Langer and V. Ambegaokar, Phys. Rev. **164**, 498 (1967).
- [3] W. W. Webb e R. J. Warburton, Phys. Rev. Letters **20**, 461 (1968).
- [4] D. E. McCumber and B. I. Halpern, Phys. Rev. B **1** 1054 (1970).
- [5] J. E. Lukens, R. J. Warburton and W. W. Webb Phys. Rev. Letters **25**, 1180 (1970).
- [6] J. R. Tucker and B. I. Halperin, Phys. Rev. B **3**, 3769 (1971).
- [7] G. E. Churilov, V. M. Dmitriev, and A. P. Beskorsyi, JETP Lett. **10**, 146 (1969).
- [8] L. P. Gor'kov, JETP Lett **11**, 32 (1970).
- [9] V. I. Galaiko, V. M. Dmitriev and G. E. Churilov JETP Lett. **18**, 213 (1973).
- [10] T. J. Rieger, D. J. Scalapino, and J. F. Mercereau, Phys. Rev. B **6**, 1734 (1972).
- [11] J. Meyer and G. V. Minnigerode, Phys. Lett. A **38**, 529 (1972).
- [12] W.J. Skocpol, M.R. Beasley, M. Tinkham, J. Low Temp. Phys. **16**, 145 (1974).
- [13] L. N. Smith, J. Low Temp. Phys. **38**, 553 (1980).
- [14] A. Schmid and G. Schon, J. Low Temp. Phys. **20**, 207 (1975).
- [15] G. J. Dolan and L. D. Jackel, Phys. Rev. Lett. **39**, 1628 (1977).
- [16] A .M. Kadin, W. J. Skocpol, M. Tinkham, J. Low Temp. Phys. **33** 481 (1978).
- [17] B. I. Ivlev and N. B. Kopnin Sov. Phys. JETP **51**, 986 (1980).
- [18] B. I. Ivlev and N. B. Kopnin, Sov. Phys. Usp. **27**, 206 (1984).
- [19] S. M. Goiberg, N. B. Kopnin and M. N. Tribelsky, Sov. Phys. JETP **94** 289 (1988).
- [20] W. J. Yeh, Y. D. Dai and Y. H. Kao, J. Low Temp. Phys. **52**, 247 (1983).

- [21] V. I. Kuznetsov and V. A. Tulin, Sov. Phys. JETP **86**, 745 (1998).
- [22] D. Y. Vodolazov, F. M. Peeters, L. Piraux, S. Matefi-Tempfli and S. Michotte, Phys. Rev. Lett. **91**, 157001 (2003).
- [23] S. Michotte, S. Matefi-Tempfli, L. Piraux, D. Y. Vodolazov, and F.M. Peeters, Phys. Rev. B **69**, 094512 (2004).
- [24] A. Falk, M. M. Deshmukh, A. L. Prieto, J. J. Urban, A. Jonas, and H. Park, Phys. Rev. B **75**, 020501 (2007).
- [25] A. K. Elmurodov, F. M. Peeters, D. Y. Vodolazov, S. Michotte, S. Adam, F. de Menten de Horne, L. Piraux, D. Lucot, and D. Mailly, Phys. Rev. B **78**, 214519 (2008).
- [26] V. G. Volotskaya, I. M. Dmitrenko, L. E. Musienko, and A. G. Sivakov Sov. J. Low Temp. Phys. **7**, 188 (1981).
- [27] S. V. Lempitskiĭ, Sov. Phys. JETP **63**, 462 (1986).
- [28] A. Weber, L. Kramer, J. Low Temp. Phys. **84**, 289 (1991).
- [29] A. Andronov, I. Gordion, V. Kurin, I. Nefedov, and I. Shereshevsky, Physica C **213**, 193 (1993).
- [30] A. B. Agafonov, I.V. Zolochevkii, E.V. Khristenko, and V.M. Dmitriev, Low Temp. Phys. **27**, 686 (2001).
- [31] V. M. Dmitriev and E. V. Khristenko, Sov. J. Low Temp. Phys. **4**, 821 (1978).
- [32] A. G. Sivakov et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 267001 (2003).
- [33] D. Y. Vodolazov, B. J. Baelus, and F. M. Peeters, Physica C **404**, 400 (2004).
- [34] G. R. Berdiyrov, A. K. Elmudorov, F.M. Peeters, D.Y. Vodolazov, Phys. Rev. B **79**, 174506 (2009).
- [35] G. R. Berdiyrov, M. V. Milosēvić and F. M. Peeters, Phys. Rev. B **79**, 184506 (2009).
- [36] G. R. Berdiyrov, M. V. Milosēvić and F. M. Peeters, Phys. Rev. B **80** 214509 (2009).
- [37] G. R. Berdiyrov, M. V. Milosēvić and F. M. Peeters, Physica C **470**, 946 (2010).
- [38] D. Y. Vodolazov, F. M. Peeters, M. Morelle, V. V. Moshchalkov, Phys. Rev. B **71**, 184502 (2005).

- [39] R. Tidecks and T. Werner, J. of Low. Temp. Phys. **65** 151 (1986).
- [40] L. Kramer and R. Rangel, J. of Low. Temp. Phys. **57** 391 (1984).
- [41] B. Damaschke and R. Tidecks, J. of Low. Temp. Phys. **79** 117 (1990).
- [42] S. B. Kaplan, C. C. Chi and D. N. Langenberg, Phys. Rev. B **14** 4854 (1976).
- [43] M. Tinkham, J. U. Free, C. N. Lau and N. Markovic, Phys. Rev.B **68**, 134515 (2003).
- [44] M. Stuivinga, T. M. Kiapwijk, J. E. Mooij and A. Bezuijnt, J. of Low. Temp. Phys. **53**, 673 (1983).
- [45] Ž. L. Jelić, M. V. Milosević and A. V. Silhanek, Scientific Reports **6**, 35687 (2016).
- [46] D. Halbertal et al, Nature, **539**, 407 (2016).

Conclusões

O gradiente térmico é responsável por interações não usuais entre os vórtices. Assim o estado de multi-vórtices e vórtice gigante é diferente daqueles que ocorrem em amostras sob condição de temperatura homogênea. O comportamento anômalo na $M(H)$ ocorre somente quando temos uma variação muito grande de temperaturas (de $0,1T_c$ a $0,9T_c$, no nosso caso) e baixos κ , pois os vórtices ficam alojados na região “quente”, fazendo com que a distribuição de $\mathbf{J}_s$ não seja afetada nas regiões mais “frias”.

Para os estudos envolvendo estados resistivos, as conclusões são as que seguem. Durante o processo de nucleação de vórtices para uma determinada amostra, a resposta de Mxt apresenta pouca sensibilidade às variações de u . Por outro lado, Vxt e os mecanismos de dissipação apresentam fortes mudanças quantitativas. Assim, para um supercondutor *gapless*, $u = 12$ é requerido em tais estudos. Na região de transição meso-macroscópico, os efeitos de confinamento são pouco influentes, com isso, verificamos uma tendência de saturação no comportamento dos mecanismos de dissipação.

Durante a dinâmica de expulsão de um vórtice e o processo de aniquilação V-AV de Abrikosov, a curva Vxt apresentou uma mudança no sinal para ambos os casos e o instante de tempo no qual ocorre tal mudança é o mesmo do valor de pico na curva Mxt . Esses comportamentos foram verificados para supercondutores *gapless* e com *gap*. Para ambas as dinâmicas e tipos de supercondutores, W_ψ é o principal mecanismo de dissipação. Contudo, quando resolvemos o teorema generalizado da energia livre, i.e., para um supercondutor com *gap*, obtivemos um novo mecanismo de dissipação associado à processos de relaxação, o qual denominamos por W_γ . Assim, de uma maneira geral, a contribuição total dos mecanismos de dissipação devido à relaxação é proeminente em tais sistemas. Por outro lado, W_A contribui consideravelmente para a potência total dissipada. Analisando individualmente a sensibilidade dos mecanismos de dissipação em relação às variações de diversos parâmetros, como a velocidade (v), tamanho lateral (L), densidade de corrente (J) e o fator (γ). Para o caso do movimento de um vórtice, temos que: $W_A(v)$; $W_\psi(v, \gamma)$ e $W_\gamma(\gamma)$. Já no processo de aniquilação V-AV de Abrikosov, encontramos $W_A(L)$; $W_\psi(L, \gamma)$ e $W_\gamma(\gamma)$. Com relação à difusão térmica, ΔT apresentou um maior valor em um supercondutor *gapless* do que com *gap*, para os casos onde temos o movimento de um vórtice

quanto para aqueles processos de aniquilação V-AV de Abrikosov.

No estado resistivo devido à dinâmica de V-AV cinemáticos, W_Φ é o principal mecanismo de dissipação. Por outro lado, W_ψ tem uma contribuição considerável no regime $J_{c1} < J \ll J_{c2}$, porém muito pequena para $J \gg J_{c1}$. W_γ é extremamente baixo para qualquer valor de $J > J_{c1}$, portanto pode ser negligenciado. Notamos que os mecanismos de dissipação são sensíveis a variações de parâmetros tais que: $W_\Phi(J)$; $W_\psi(J, \gamma)$ e $W_\gamma(\gamma)$. Verificamos que a difusão térmica altera quantitativamente o comportamento da voltagem. Assim, a eficiência na taxa de remoção de calor do substrato contribui para controlar a frequência e a amplitude da oscilação da voltagem.

Genericamente, temos que os gradientes térmicos nos possibilitaram a observação comportamento não usual no estado de vórtices e da magnetização em supercondutores mesoscópicos. Nos estudos envolvendo o estado resistivo, o comportamento de Mxt e Vxt nos fornece uma assinatura da dinâmica de vórtice ou V-AV. Já nos processos de difusão térmica, obtivemos uma faixa de variação de temperatura (utilizando um substrato com taxa de remoção de calor intermediária) entre $\Delta T = 10^{-3} - 10^{-4}T_c$. Isso possibilita o uso da técnica de imageamento térmico em nanoescala tal como aquela apresentada por D. Halbertal e colaboradores, para mapear as dinâmicas de vórtices ou V-AV de Abrikosov e V-AV cinemáticos em supercondutores mesoscópicos. Portanto, temos que a equação GTDGL acoplada com a equação de difusão térmica em conjunto com o teorema generalizado da energia livre, nos fornece uma base teórica sólida e uma ferramenta poderosa para descrever processos de difusão térmica em supercondutores mesoscópicos.