

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA**

GRAZIELE FERNANDA FARINELA DA SILVA

**ESTUDO DA IMPEDÂNCIA NUMA AMOSTRA SUPERCONDUTORA
DE $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ SINTERIZADA**

**PORTO ALEGRE
2016**

GRAZIELE FERNANDA FARINELA DA SILVA

**ESTUDO DA IMPEDÂNCIA NUMA AMOSTRA SUPERCONDUTORA
DE $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ SINTERIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como pré-requisito parcial para Conclusão de Curso e obtenção do Título de Bacharel em Física.

Orientador: Prof^o Dr. Paulo Pureur Neto

PORTO ALEGRE

2016

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus e à Virgem Maria, pelo amor incondicional, por sempre ouvirem minhas preces e me proporcionarem o amparo que sempre pedi e fui atendida.

TODAS as pessoas, sem exceção, que passaram pela minha vida durante o período de graduação, contribuíram de alguma forma no meu crescimento pessoal e profissional. A todos, MUITO OBRIGADO!

Porém, há pessoas que merecem um agradecimento mais que especial pela importância que tiveram durante esses anos de curso e pelo imenso carinho que tenho por todas elas. Sou imensamente grata:

- a meus pais, Wanda e Albino;
- aos meus irmãos, Jonathan e Davi Augusto;
- ao Meu Amor, Gustavo;
- ao meu afilhado, Luís Gustavo;
- aos meus amigos Marlon, Paula Azambuja, Jênifer e Amanda;
- ao meu Professor/Orientador Paulo Pureur.

A vocês, dedico este trabalho!

RESUMO

O $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (onde δ representa o desvio à estequiometria ideal para o oxigênio) é um composto supercondutor de alta temperatura crítica. A temperatura de transição da fase normal para a fase supercondutora, chamada de temperatura crítica (T_C) é de aproximadamente 92 K. Este trabalho tem por objetivo estudar as propriedades de transporte elétrico AC em uma amostra cerâmica de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ nas proximidades da T_C por impedanciometria. É importante salientar que esse sistema não foi detalhadamente estudado com essa técnica. A amostra em estudo foi confeccionada no Laboratório de Supercondutividade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde testes foram realizados para comprovar a supercondutividade da amostra. Em uma experiência de impedanciometria, a amostra é submetida a um campo elétrico alternado e a diferença de potencial entre dois pontos de sua superfície é medida. Esta diferença de potencial tem uma componente real, devida à resistência, e uma parte imaginária, associada à reatância. O estudo foi realizado variando-se a frequência da corrente AC (37 à 30kHz) e a temperatura (80K e 140K). Com os resultados experimentais, obtém-se informações sobre os efeitos da frequência da corrente AC nas propriedades eletrônicas do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ nas proximidades de T_C . Os resultados indicam que, em altas frequências, uma reatância indutiva pode ser identificada. Em geral, investigam-se os efeitos da frequência nas partes real e imaginária da impedância no regime de aproximação ao estado de resistência nula.

Palavras-chave: Supercondutividade; sistema $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$; impedância; reatância indutiva.

ABSTRACT

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (where δ represents the deviation to the optimal stoichiometry for oxygen) is a superconducting compound of high critical temperature. The transition temperature from the normal phase to the superconducting phase, termed as critical temperature (CT), is approximately 92 K. This work has the objective of studying the AC electrical transport properties in a ceramic sample of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ at levels close to CT by impedanciometry. It is worth highlighting that this system was not deeply studied with this technique. The sample in question was prepared in the Superconductivity Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul, where tests were performed to prove the superconductivity of the sample. In an impedanciometric experiment, the sample is submitted to an alternating electric field and the difference in potential between two points of its surface is measured. This potential difference has a real component, due to resistance, and an imaginary part, which is associated with reactance. The study was held by varying the frequency of the AC current (from 37 to 30kHz) and the temperature (80K and 140K). With the experimental results, we can obtain information about the effects of the frequency of the AC current in the electronic properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ at levels close to CT. The results have indicated that, at high frequencies, an inductive reactance can be identified. Generally, we investigate the effects of frequency on the real and imaginary parts of the impedance in the regime approaching the zero-resistance state.

Keywords: Superconductivity; $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ system; Impedance; Inductive reactance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curvas de resistividade em função da temperatura em filme fino de YBCO, com diferentes campos magnéticos aplicados perpendicularmente ao plano do filme.....	13
Figura 2 – Contribuição dos elétrons de condução ao calor específico de um metal supercondutor, comparada com o calor específico eletrônico do mesmo metal no estado normal.....	14
Figura 3 – Efeito Meissner. (a) Em temperaturas superiores a T_C , um campo magnético aplicado externamente permeia um material supercondutor. (b) Em temperaturas inferiores a T_C , a indução magnética é expulsa do interior da amostra supercondutora	15
Figura 4 – Diagrama de fases B - T para um supercondutor do tipo II.....	16
Figura 5 – Evolução cronológica da temperatura crítica dos materiais supercondutores.....	19
Figura 6 – Estrutura ortorrômbica do $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	20
Figura 7 – Diagrama de fases do composto $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	21
Figura 8 – Circuito em série consistindo em um resistor, um indutor e um capacitor conectados a uma fonte AC	22
Figura 9 – Relações de fase entre os fasores tensão e corrente para um resistor, um indutor e um capacitor.....	23
Figura 10 – Ilustração esquemática do efeito pelicular em um condutor, onde J indica a corrente no condutor, B o campo magnético e E o campo elétrico.....	26
Figura 11 – Etapas do processamento das amostras.	28
Tabela 1 – Cálculo estequiométrico dos reagentes precursores para a obtenção da amostra na fase Y123	29
Figura 12 – Rampa do tratamento térmico para a calcinação da fase Y123.....	29
Figura 13 – Diagrama de tratamento térmico para a sinterização de amostras policristalinas de $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	30
Figura 14 – Demonstração do corte feito na pastilha supercondutora de $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	31
Figura 15 – Esquema da amostra com os 4 contatos elétricos e suas dimensões. ...	31
Figura 16 – Diagrama em blocos do equipamento utilizado para a realização das medidas de impedância..	32

Figura 17 – Imagem da superfície da amostra policristalina de YBCO obtida por MEV.	34
Figura 18 – Imagem da região cross section da amostra policristalina de YBCO obtida por MEV.....	35
Figura 19 – Imagem de MEV com as regiões da superfície da amostra em que foram feitas as análises EDS (pontos 1 e 2 na micrografia).....	36
Figura 20 – Imagem de MEV com as regiões cross section da amostra em que foram feitas as análises EDS (pontos 1 e 2 na micrografia).....	37
Figura 21 – Curvas da resistência elétrica em função da temperatura para uma amostra supercondutora YBCO, com as freqüências de corrente AC indicadas	38
Figura 22 – Curvas da impedância em função da temperatura para a amostra supercondutora YBCO, obtidas com as freqüências indicadas da corrente AC.....	39
Figura 23 – Ampliação das curvas de impedância em função da temperatura nas proximidades de T_c	40
Figura 24 – Gráfico da impedância em função da frequência para as temperaturas de 110 K e 130 K.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVO	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Supercondutividade: Propriedades Gerais	12
3.1.1 Calor Específico	13
3.1.2 Efeito Meissner	14
3.1.3 Supercondutores Tipo I e II	15
3.1.4 Teoria BCS	16
3.1.5 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	17
3.1.6 O YBCO	19
3.1.6.1 <i>Propriedades Estruturais</i>	19
3.1.6.2 <i>Propriedades Eletrônicas</i>	20
3.2 Impedância	21
3.2.1 Conceito	21
3.2.2 Reatâncias Indutiva e Capacitiva	24
3.2.3 Efeito Pelicular (Skin Effect)	25
3.2.4 Impedância de um Cilindro Condutor Longo	26
4 METODOLOGIA	28
4.1 Preparação das Amostras	28
4.2 Equipamentos e Métodos de Medida	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Caracterização da Amostra: MEV e EDS	34

5.2 Resistência Elétrica e Impedância.....	38
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da supercondutividade foi observado pela primeira vez em 1911, enquanto se estudava a variação da resistividade do metal mercúrio em temperaturas muito baixas, próximas do zero absoluto. Em 1986, a supercondutividade a uma temperatura superior a 30 K foi observada em um composto óxido contendo La, Ba, Cu e O. A partir de então, começou a busca por supercondutores de temperaturas críticas mais altas e, em 1987, descobriu-se o composto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, também conhecido como YBCO, com T_C acima dos 90 K. Até hoje, o sistema YBCO é um dos mais estudados, embora já se tenha descoberto compostos com T_C superiores.

O sistema YBCO possui simetria ortorrômbica e uma estrutura cristalina complexa, característica dos materiais supercondutores óxidos, a qual é constituída por planos atômicos de cobre-oxigênio que se repetem regularmente em toda estrutura. Esta característica estrutural confere uma forte anisotropia planar ao YBCO. Em uma amostra policristalina desse composto, é grande o número de defeitos e imperfeições. Entre os possíveis defeitos, destacam-se as vacâncias de oxigênio, discordâncias, defeitos de empilhamentos, precipitados, poros e contorno de grão. Geralmente esses defeitos se somam à distribuição aleatória dos grãos supercondutores e afetam diretamente o caráter do estado supercondutor que se estabelece na amostra.

Dentre os fatores que influenciam a transição supercondutora estudada através de medidas de resistividade elétrica estão a presença de um campo magnético, a intensidade da corrente elétrica aplicada e, em medidas AC, a frequência da corrente alternada que percorre o supercondutor. A presença de um campo magnético tende a produzir uma diminuição na temperatura crítica, podendo até suprimir o estado supercondutor, dependendo da intensidade do campo. A supercondutividade também poderá ser suprimida se a intensidade da corrente elétrica aplicada no supercondutor exceder um dado valor. Do mesmo modo, se a frequência da corrente aplicada exceder a largura do “gap” supercondutor, pares de Cooper serão destruídos e o estado supercondutor pode colapsar.

O objetivo deste trabalho é a investigação dos efeitos da frequência da corrente alternada aplicada em uma amostra supercondutora granular de YBCO pela

técnica da impedanciometria. O estudo é feito no limite de baixas frequências. Queremos estudar os efeitos da frequência na resistência e na impedância total do supercondutor nas proximidades de T_C . Chama-se a atenção para o fato de que esse tipo de estudo é praticamente inédito, já que não se encontrou na literatura especializada relatos de investigações experimentais focadas no estudo da impedância dos supercondutores cerâmicos de alta temperatura crítica, tanto na fase normal quanto no estado supercondutor.

No capítulo de Revisão Bibliográfica é abordado o tema da supercondutividade e suas propriedades gerais, como o calor específico e o Efeito Meissner. Uma descrição mais detalhada do material supercondutor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ também é apresentada. Também, nesse capítulo, é feita uma revisão conceitual sobre o tema da impedância.

No capítulo Metodologia, são descritas as etapas de preparação da amostra, assim como os equipamentos utilizados para realizar as medidas de impedância e o método usado.

No capítulo Resultados e Discussão, são apresentadas as caracterizações da amostra preparada através de MEV e EDS. Após, são apresentadas as medidas de resistência e da impedância em função da temperatura para algumas frequências da corrente AC aplicada na amostra. Os resultados são analisados e discutidos com base na teoria de Landau-Lifshitz para a impedância de um condutor longo, no limite de baixas frequências.

Por fim, nas Considerações Finais, um breve resumo dos resultados obtidos e as perspectivas futuras desse trabalho são apresentados.

2 OBJETIVO

Estudar as propriedades de transporte elétrico AC em uma amostra cerâmica de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ nas proximidades da T_C por impedanciometria.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Supercondutividade: Propriedades Gerais

A resistividade elétrica de um material expressa a dificuldade oferecida pelo material à passagem de uma corrente elétrica em seu interior. A definição desta propriedade é feita através da conhecida lei de Ohm, que pode ser pensada como uma relação entre estímulo e resposta. Segundo esta lei fenomenológica, a aplicação de um campo elétrico (estímulo) a um material condutor resulta numa densidade de corrente (resposta) linearmente proporcional ao campo, ou seja,

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (1)$$

onde \vec{E} é o campo, \vec{J} é a densidade de corrente e a função resposta ρ é denominada de resistividade, a qual é uma propriedade do material condutor.

Um dos mais espetaculares fenômenos da física dos materiais sólidos é a supercondutividade. Nos sistemas supercondutores, a resistência à passagem de uma corrente elétrica contínua é total e abruptamente suprimida quando o material é resfriado abaixo de uma temperatura bem definida, denominada de temperatura crítica (T_C) (PUREUR, 2012). Em termos mais precisos, a resistividade elétrica do supercondutor torna-se nula em $T < T_C$.

A presença de um campo magnético tende a produzir uma diminuição na temperatura crítica, conforme ilustra a figura a seguir.

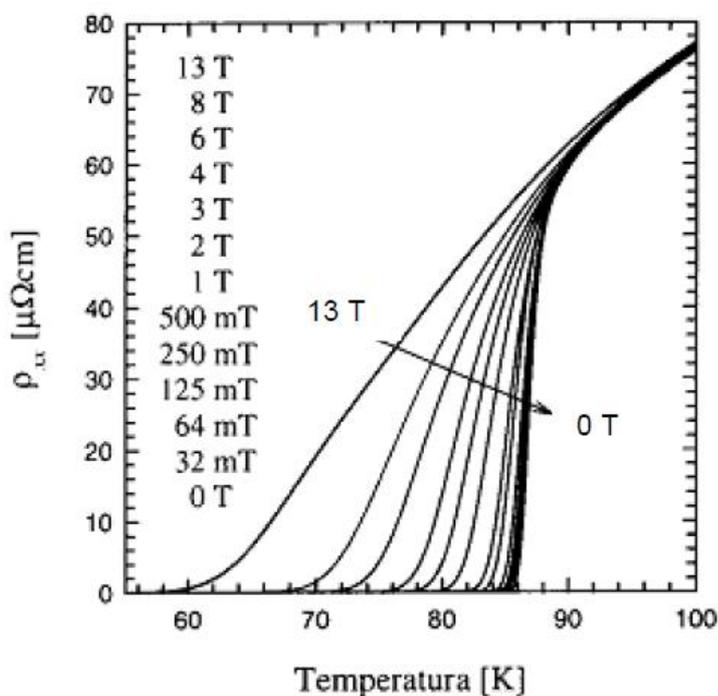


Figura 1 – Curvas de resistividade em função da temperatura em filme fino de YBCO, com diferentes campos magnéticos aplicados perpendicularmente ao plano do filme. Figura modificada.

Fonte: Lang et al., 2000, p.1830.

Se a magnitude do campo magnético exceder um dado valor característico, denominado campo magnético crítico (B_C) o estado supercondutor é suprimido e o material passa a apresentar um comportamento resistivo normal. Além disso, se a corrente elétrica que percorre o supercondutor exceder uma dada intensidade, denominada de corrente crítica, a supercondutividade também será suprimida (PUREUR, 2012).

Muitas outras propriedades físicas revelam a presença de supercondutividade, dentre elas estão o calor específico e o efeito Meissner.

3.1.1 Calor Específico

A contribuição dos elétrons de condução ao calor específico de um supercondutor apresenta um comportamento peculiar, conforme mostrado na figura esquemática abaixo.

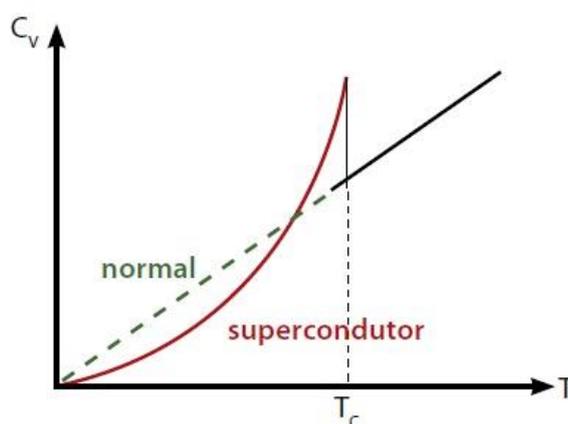


Figura 2 – Contribuição dos elétrons de condução ao calor específico de um metal supercondutor, comparada com o calor específico eletrônico do mesmo metal no estado normal.

Fonte: Pureur, 2012, p.144.

Na temperatura crítica, o calor específico eletrônico sofre uma variação abrupta e, em baixas temperaturas, tende a zero segundo uma lei exponencial. O comportamento observado nas vizinhanças de T_c é conhecido como anomalia do tipo lambda, em razão da semelhança com a letra grega de mesmo nome.

Contrastando com este comportamento, num metal normal, o calor específico eletrônico é uma função linear da temperatura. Como o calor específico é uma propriedade de equilíbrio termodinâmico, a anomalia lambda observada na temperatura crítica assinala a ocorrência de um fenômeno de transição de fase envolvendo o sistema eletrônico do material supercondutor, ou seja, pela transição da fase normal para o estado supercondutor.

3.1.2 Efeito Meissner

Outra propriedade muito importante do estado supercondutor é o efeito Meissner (Figura 3).

O painel (a) dessa figura mostra que um campo magnético aplicado permeia totalmente um material supercondutor quando este se encontra no estado normal. Porém, se a temperatura for diminuída, observa-se a expulsão abrupta das linhas de indução do campo do interior do material durante a transição ao estado supercondutor em $T = T_c$. Esta configuração permanece estável em $T < T_c$, tal como mostra o painel (b).

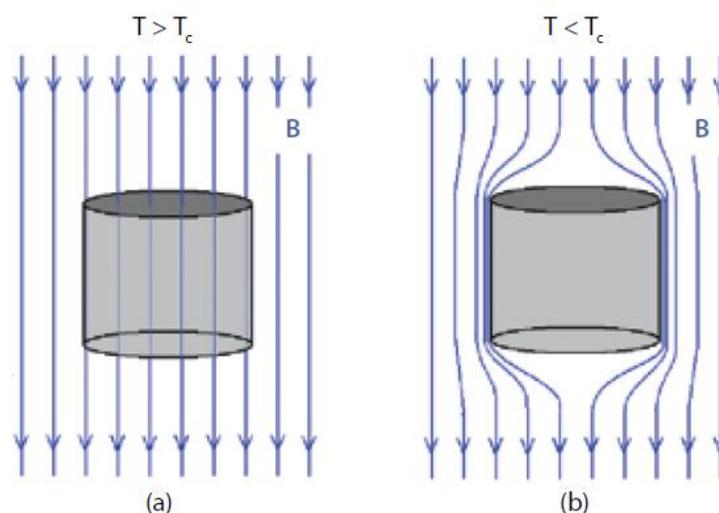


Figura 3 - Efeito Meissner. (a) Em temperaturas superiores a T_c , um campo magnético aplicado externamente permeia um material supercondutor. (b) Em temperaturas inferiores a T_c , a indução magnética é expulsa do interior da amostra supercondutora.

Fonte: Pureur, 2012, p.145.

O efeito Meissner é responsável pelo fenômeno da levitação de um pequeno ímã sobre uma peça de material supercondutor. A expulsão do campo do interior do supercondutor é acompanhada pela geração de “supercorrentes” superficiais ao material, que produzem uma magnetização cujo sentido é oposto ao do campo magnético externo. Assim, uma interação repulsiva é estabelecida entre o supercondutor e o material magnético. Essa interação é sempre repulsiva, independentemente do sinal do pólo magnético próximo ao supercondutor, e pode ser suficientemente forte para compensar a força gravitacional e produzir levitação (PUREUR, 2012).

3.1.3 Supercondutores Tipo I e II

O comportamento magnético dos supercondutores permite a classificação desses sistemas em dois tipos. Nos supercondutores do tipo I, o efeito Meissner é completo, ou seja, o fluxo magnético é totalmente expulso do interior da amostra, como se observa no painel (b) da Figura 3. Essa situação permanece até que o valor do campo aplicado atinja o valor crítico B_c . Então, a supercondutividade é suprimida bruscamente, o efeito Meissner cessa, e o campo volta a penetrar livremente no material.

A grande maioria dos supercondutores é do tipo II. Nesse caso, há dois valores críticos para o campo magnético. A expulsão total do fluxo ocorre somente se a magnitude do campo aplicado for menor que o campo crítico inferior, característico do material, e denotado como B_{C1} . O campo magnético penetra parcialmente na amostra, sem destruir o estado supercondutor, se seu valor for superior a B_{C1} e inferior ao campo crítico superior B_{C2} (ver Figura 4). Se o campo magnético externo tiver intensidade igual ou superior a B_{C2} , o estado supercondutor é destruído (PUREUR, 2012).

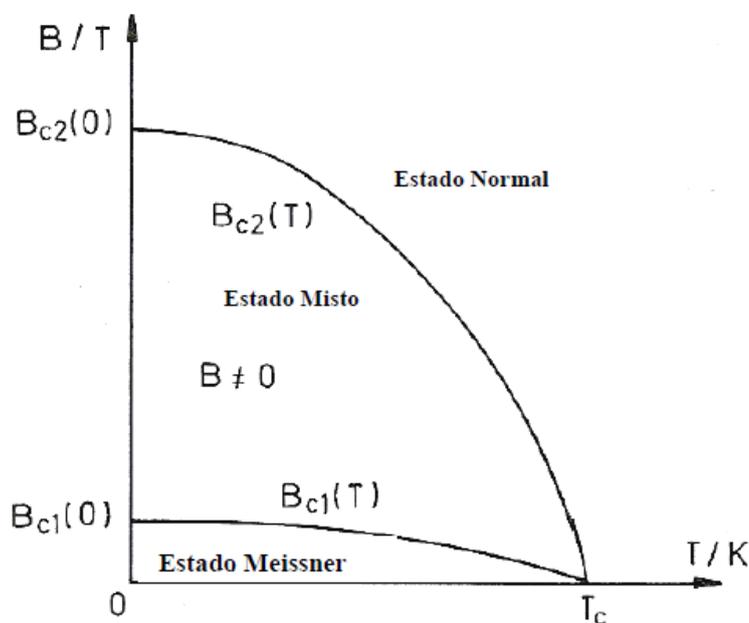


Figura 4 – Diagrama de fases B - T para um supercondutor do tipo II. Figura modificada.

Fonte: Cyrot; Pavuna, 1992, p.32.

3.1.4 Teoria BCS

A teoria BCS foi proposta para explicar o fenômeno da supercondutividade. Esta teoria propõe que não é adequado descrever o movimento dos elétrons de condução nos supercondutores segundo a concepção válida para os metais clássicos, em que tais partículas podem ser descritas como elétrons independentes e quase livres.

A ideia fundamental da teoria BCS consiste na suposição de que os elétrons de condução mais energéticos se associam em pares com velocidades opostas e

spins (momento magnético intrínseco da partícula) também opostos. A associação dos elétrons em pares, chamados de **pares de Cooper**, se dá em razão de uma interação efetivamente atrativa entre os componentes do par. Tal atração, que deve superar a repulsão natural entre partículas de mesma carga elétrica, é mediada pelas vibrações da rede cristalina. Esse processo indireto de atração entre elétrons é que leva à formação de pares fracamente ligados, os quais ocupam extensas regiões no interior do sólido. Assim, o volume espacial ocupado por um par de Cooper contém os centros de massa de um número muito grande de outros pares de Cooper. Isso significa que os pares de Cooper, embora formados por elétrons de condução, não podem ser considerados como entidades isoladas.

O condensado resultante se comporta como um coletivo quântico que se estende por escalas de tamanho macroscópico. Assim, quando posto em movimento pela ação de um campo elétrico, o condensado supercondutor avança sem ser detido por eventos que, embora capazes de degradar a propagação de elétrons independentes, não possuem energia suficiente para afetar o condensado globalmente. Dessa forma, pode-se entender por que, num supercondutor, uma corrente elétrica se propaga sem encontrar resistência (PUREUR, 2012).

3.1.5 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

Durante mais de setenta anos, o fenômeno da supercondutividade ficou restrito ao domínio das temperaturas muito baixas, até que, em 1986, K. Alex Müller e J. Georg Bednorz reportaram a observação de supercondutividade em temperaturas superiores a 30 K num composto óxido contendo lantânio (La), bário (Ba), cobre (Cu) e oxigênio (O). O sistema precursor, de fórmula química La_2CuO_4 , é um isolante elétrico, como geralmente são os compostos óxidos no estado sólido. Porém, a substituição parcial de La por Ba torna o sistema um condutor elétrico e, mais do que isso, um supercondutor, com temperatura crítica $T_C = 36$ K. Todavia, quando os resultados foram reproduzidos e melhorados por pesquisadores japoneses, fortaleceu-se o interesse científico pelo tema da supercondutividade. O trabalho pioneiro de Müller e Bednorz foi reconhecido através da concessão do prêmio Nobel de 1987.

No início de 1987, um grupo de pesquisadores das universidades de Houston (Texas) e do Alabama, reportou a observação de supercondutividade num sistema

contendo ítrio (Y), bário (Ba), cobre (Cu) e oxigênio (O), no qual a temperatura crítica alcançava 91 K (WU et al., 1987). A ideia que produziu esse resultado foi somente a substituição do La por Y na composição do sistema investigado por Müller e Bednorz.

O material descoberto por essa equipe, cuja fórmula química é $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, popularmente conhecido como YBCO, ou ybacuo, tornou-se um dos sistemas mais estudados de todos os tempos. A razão da tremenda excitação causada por sua descoberta estava relacionada ao fato de que a temperatura crítica do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ excede a temperatura de ebulição do nitrogênio líquido (77 K). Isso significava que, pela primeira vez, dispunha-se de um material cujo estado supercondutor podia ser alcançado com métodos incomparavelmente mais simples e com menos custo que os necessários para resfriar os materiais metálicos convencionais, hoje ditos supercondutores clássicos (PUREUR, 2012).

Num curto intervalo de tempo, diversos outros materiais supercondutores de alta temperatura crítica foram descobertos (ver Figura 5). O recorde alcançou $T_C = 133$ K, num composto de estrutura cristalina complexa contendo mercúrio (Hg), bário (Ba), cálcio (K), cobre (Cu) e oxigênio (O). O traço comum desses óxidos, chamados de cupratos supercondutores, é a presença de planos atômicos formados por Cu e O, na proporção Cu-O₂. (PUREUR, 2012). Essas camadas se repetem periodicamente e constituem o “coração eletrônico” do sistema.

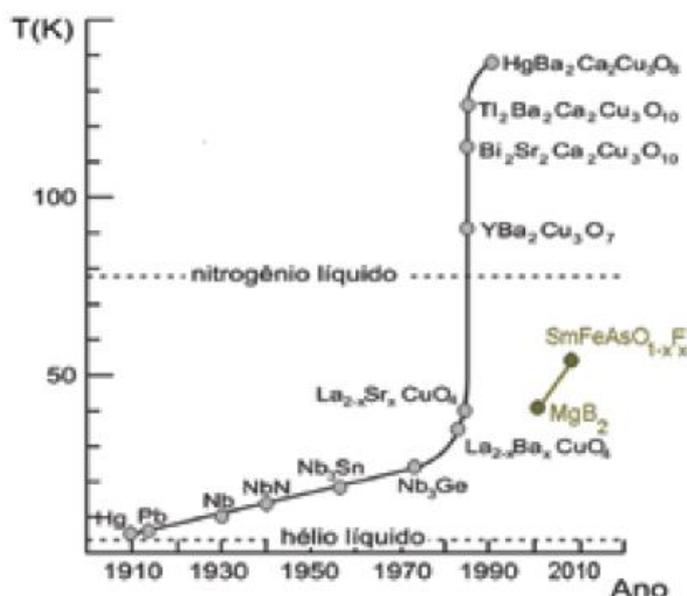


Figura 5 - Evolução cronológica da temperatura crítica dos materiais supercondutores.

Fonte: Pureur, 2012, p.151.

3.1.6 O YBCO

3.1.6.1 Propriedades Estruturais

O sistema $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ possui uma estrutura cristalina complexa, característica dos materiais supercondutores óxidos, a qual é constituída por planos de cobre-oxigênio que se repetem em toda estrutura. Nesse composto, os planos de Cu-O_2 ocorrem em pares que são separados por planos atômicos de Y. As estruturas de duplos planos de Cu-O_2 são intercaladas por outras camadas atômicas, que atuam como reservatórios de cargas, os quais liberam partículas portadoras de carga para os planos condutores. Os planos metal-oxigênio são responsáveis pela forte anisotropia no sistema, a qual é evidenciada tanto no estado normal como no estado supercondutor (AZAMBUJA, 2008; PUREUR, 2012).

A estrutura do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (Figura 6) possui simetria ortorrômbica e parâmetros de célula unitária $a=3,82 \text{ \AA}$, $b=3,89 \text{ \AA}$ e $c=11,68 \text{ \AA}$ (BENO et al., 1987).

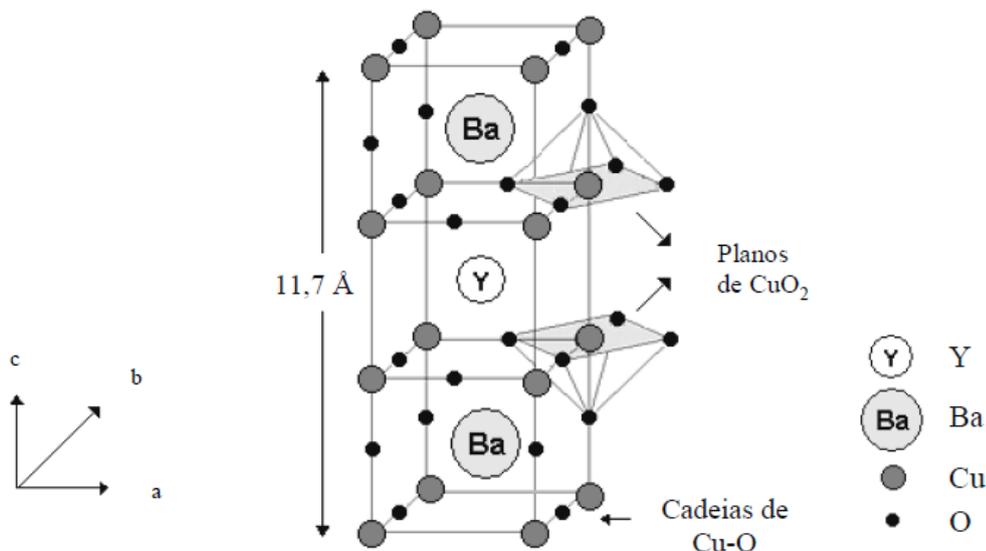


Figura 6 - Estrutura ortorrômbica do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.
Fonte: Azambuja, 2008, p.4.

Nesta estrutura, os íons de bário estão ligados aos íons de oxigênio, formando assim os seguintes planos sucessivos: $\text{Cu}(2)\text{O}_2$ - BaO - $\text{Cu}(1)\text{O}$ - BaO - $\text{Cu}(2)\text{O}_2$, ao longo do eixo c . O íon ítrio separa cada uma das células e intercala entre planos atômicos de CuO_2 (AZAMBUJA, 2008).

Os defeitos existentes na estrutura cristalina do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ afetam diretamente as suas propriedades supercondutoras. Esses defeitos são classificados em três escalas: a microscópica, a mesoscópica e a macroscópica. Na escala microscópica, os principais defeitos presentes são as vacâncias de oxigênio. Na mesoscópica, as maclas, as discordâncias e os defeitos de empilhamento constituem os principais defeitos estruturais. Já na escala macroscópica, os defeitos característicos são os contornos de grãos, precipitados e poros.

Nas amostras policristalinas é grande o número de defeitos e imperfeições, o que é consequência da distribuição aleatória dos grãos supercondutores. Amostras policristalinas apresentam grãos com dimensões variando entre $1 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$ (RODRIGUES, 1994).

3.1.6.2 Propriedades Eletrônicas

Uma característica peculiar ao composto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ é a possibilidade de se comportar como um material isolante. Isso ocorre devido à alteração na concentração de oxigênio (δ), o que implica em mudanças na estrutura cristalina.

Para garantir a supercondutividade do composto, a concentração do oxigênio deve variar de tal modo que $0 \leq \delta < 0,4$, sendo que para valores de δ maiores que 0,4 o comportamento do material passa a ser isolante. A figura abaixo representa um diagrama de fases do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ em função da concentração do oxigênio (AZAMBUJA, 2008).

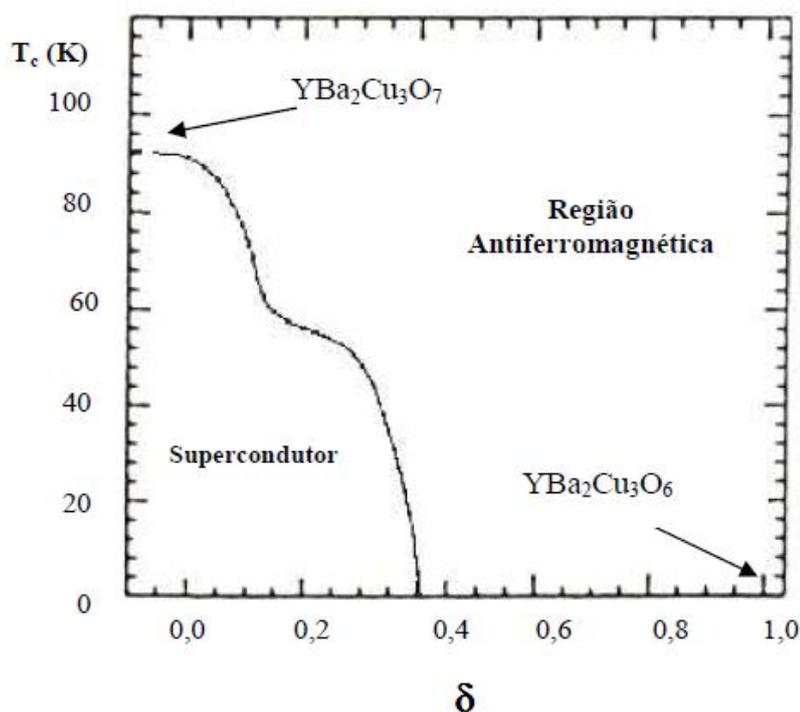


Figura 7 - Diagrama de fases do composto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Figura modificada.
Fonte: Cyrot; Pavuna, 1992, p.172.

3.2 Impedância

3.2.1 Conceito

Para explicar o que é a impedância, vamos considerar um circuito que contém uma combinação de elementos: um resistor, um indutor e um capacitor conectados em série a uma fonte de tensão alternada (Figura 8), conforme Serway (2011).

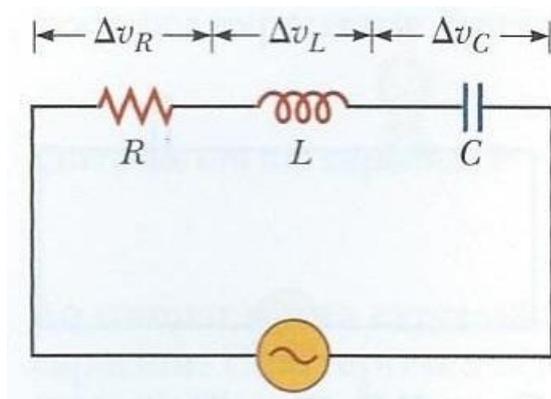


Figura 8 - Circuito em série consistindo em um resistor, um indutor e um capacitor conectados a uma fonte AC.

Fonte: Serway, 2011, p. 296.

Se a tensão aplicada ($V_{m\acute{a}x}$) variar senoidalmente com o tempo, a tensão instantânea v será

$$\Delta v = \Delta V_{m\acute{a}x} \sin \omega t \quad (2)$$

onde ω é a frequência da tensão (AC) aplicada.

Já a corrente i varia com

$$i = I_{m\acute{a}x} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

onde φ é o ângulo de fase entre a corrente e a tensão aplicada. Em um circuito RLC, a corrente geralmente não está em fase com a tensão.

Como os elementos estão em série, a corrente deve ser a mesma em todos os locais do circuito e em qualquer instante, isto é, a corrente em todos os pontos de um circuito em série tem a mesma amplitude e fase. Porém, quando estudamos o resistor, o indutor e o capacitor individualmente em um circuito AC, sabemos que a tensão em cada elemento tem amplitude e fases diferentes. Em particular, a tensão no resistor está em fase com a corrente, a tensão no indutor adianta-se em relação à corrente em 90° , e a tensão no capacitor se atrasa em relação à corrente em 90° , como ilustra a figura 9.

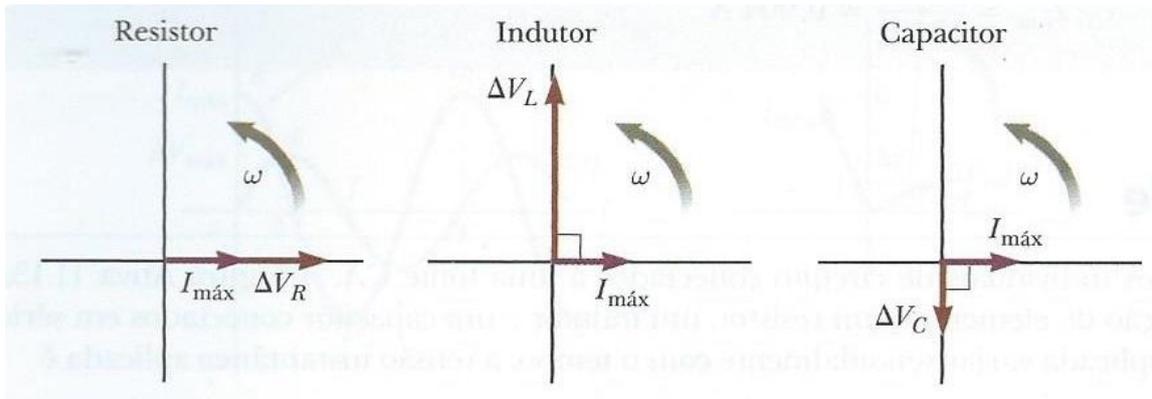


Figura 9 – Relações de fase entre os fasores tensão e corrente para um resistor, um indutor e um capacitor.
Fonte: Serway, 2011, p. 296.

Utilizando essas relações de fase, podemos expressar as tensões instantâneas nos três elementos do circuito como:

$$\Delta v_R = I_{máx} R \sin \omega t = \Delta V_R \sin \omega t \quad (4)$$

$$\Delta v_L = I_{máx} X_L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \Delta V_L \cos \omega t \quad (5)$$

$$\Delta v_C = I_{máx} X_C \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -\Delta V_C \cos \omega t \quad (6)$$

onde v_R , v_L e v_C são, respectivamente, as tensões instantâneas da resistência, do indutor e do capacitor, X_L é a reatância indutiva e X_C a reatância capacitiva. Adiante, será detalhada a definição das reatâncias indutiva e capacitiva.

A soma dessas três tensões deve ser igual à da fonte AC, mas é importante reconhecer que, como as três tensões têm relações de fase diferentes com a corrente, não podem ser adicionadas diretamente. Um cálculo simples mostra que podemos expressar a corrente máxima como

$$I_{máx} = \frac{\Delta V_{máx}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (7)$$

O denominador da fração em (7) é chamado **impedância** Z do circuito, ou seja,

$$Z \equiv \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (8)$$

Observa-se que a impedância tem unidades de ohms no sistema SI.

O ângulo de fase φ entre a corrente e a tensão também é facilmente encontrado, e é dado por

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right) \quad (9)$$

Quando $X_L > X_C$ (que ocorre em frequências altas), o ângulo da fase é positivo, o que significa que a corrente se atrasa em relação à tensão aplicada. Dizemos, então, que o circuito é *mais indutivo que capacitivo*. Quando $X_L < X_C$, o ângulo de fase é negativo, o que significa que a corrente se adianta em relação à tensão aplicada, e o circuito é *mais capacitivo que indutivo*. Quando $X_L = X_C$, o ângulo de fase é zero e o circuito é *puramente resistivo* (SERWAY, 2011).

Como as componentes reativas e a componente resistiva estão fora de fase, é conveniente representar genericamente a impedância como uma função complexa do tipo

$$Z = R + i(X_L - X_C) \quad (10)$$

3.2.2 Reatâncias Indutiva e Capacitiva

No circuito da Figura 8, $\Delta v_L = -L(di_L/dt)$ é a tensão instantânea autoinduzida no indutor de indutância L e $\Delta v_C = q/C$ é a queda de tensão instantânea no capacitor de capacitância C . Usando-se as equações (2), (4), (5) e (6), obtém-se que

$$X_L = \omega L \quad (11)$$

é a **reatância indutiva**, e

$$X_C \equiv 1/\omega C \quad (12)$$

é a **reatância capacitiva**. A frequência da corrente é determinada pela frequência da fonte de tensão que alimenta o circuito (SERWAY, 2011).

3.2.3 Efeito Pelicular (Skin Effect)

Quando uma corrente elétrica constante flui em um fio condutor homogêneo, de seção transversal não negligenciável, ela se distribui uniformemente nesta seção. O mesmo não se pode dizer quando a corrente é alternada. Esta não se distribui uniformemente e a distribuição depende da frequência, do campo elétrico, da condutividade elétrica, das dimensões e da forma geométrica do condutor. No caso de um condutor de seção transversal circular a densidade de corrente varia ao longo do raio, sendo máxima na superfície e mínima sobre o eixo. A concentração de corrente próxima à superfície do condutor chama-se efeito pelicular (Skin Effect) (ROBERT, 2000).

A resistência elétrica efetiva do condutor aumenta em relação à resistência medida em corrente constante. Consequentemente, haverá maior perda sob forma de calor (efeito Joule), por unidade de comprimento de condutor, que se o mesmo fosse percorrido por uma corrente elétrica constante. A reatância indutiva interna do condutor é igualmente modificada.

O efeito pelicular depende do campo elétrico \vec{E} , da sua frequência angular ω e da condutividade σ do condutor (CASIMIR; UBBNIK, 1976). É comum medir o efeito pelicular por uma grandeza métrica δ chamada de espessura pelicular (skin depth) a qual diminui com o aumento da frequência e da condutividade. Em teorias simples a condutividade σ do condutor é proporcional ao livre caminho médio l dos elétrons de condução. Quando $\delta < l$, a densidade de corrente em um dado ponto não será determinada simplesmente pela intensidade de campo local e pela condutividade estática. Nestas condições a teoria clássica do efeito pelicular não mais se aplica, e esta situação é chamada de efeito pelicular anômalo (ROBERT, 2000).

É possível dar uma explicação qualitativa de como ocorre o efeito pelicular. Considere a Figura 10 onde se mostra um condutor percorrido por uma corrente I tal

que $dI/dt > 0$. Esta corrente gera um campo de indução \vec{B} , cujas linhas de campo são circunferências, e cuja magnitude cresce linearmente com a distância radial numa dada secção transversal do fio. Segundo a lei de Faraday, a variação temporal de \vec{B} produz um campo elétrico \vec{E} , que obedece à relação

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t \quad (13)$$

O campo elétrico assim gerado tende a reforçar a corrente próximo à superfície e enfraquecê-la no centro.

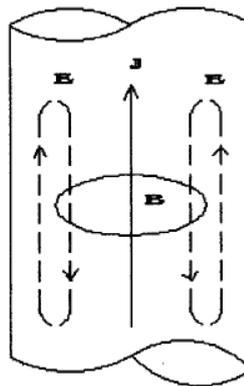


Figura 10 – Ilustração esquemática do efeito pelicular em um condutor, onde \mathbf{J} indica a corrente no condutor, \mathbf{B} o campo magnético e \mathbf{E} o campo elétrico.

Fonte: Robert, 2000, p.286

3.2.4 Impedância de um Cilindro Condutor Longo

No estudo da impedância de fios condutores na forma de cilindros de secção transversal uniforme, é conveniente fazer a análise dos resultados com base na expressão derivada por Landau e Lifshitz (1960), ou seja

$$Z = R_{DC} ka \left[\frac{J_0(ka)}{J_1(ka)} \right] \quad (14)$$

onde R_{DC} é a resistência elétrica da amostra medida com corrente contínua (DC), a é o raio do cilindro, J_0 e J_1 são funções de Bessel, $k = (1 + i)/\delta$ e i é a corrente. A espessura pelicular δ , como foi dito, descreve o decaimento radial da corrente AC ao penetrar no interior do condutor. Esta espessura característica é dada por

$$\delta = \left(\rho / \pi f \mu \mu_0 \right)^{1/2} \quad (15)$$

onde ρ é a resistividade da amostra, f é a frequência de oscilação da corrente AC, μ é a permeabilidade relativa do meio e μ_0 é a permeabilidade do vácuo. Dado que a permeabilidade é $\mu = 1 + \chi$, onde χ é a susceptibilidade magnética do material, espera-se que num material paramagnético $\mu = 1$. Num supercondutor do tipo I, no qual o fluxo magnético é totalmente excluído da amostra e $\chi = -1$, espera-se que $\mu = 0$, ou seja, a espessura pelicular torna-se infinita. Num supercondutor do tipo II, em que há penetração parcial do fluxo magnético, deve-se ter $-1 < \chi < 0$ e, conseqüentemente, $0 < \mu < 1$.

No limite de baixas frequências [$(a/\delta) \ll 1$], pode-se escrever as partes real e imaginária da impedância como (FRAGA; PUREUR; BRANDÃO, 2002)

$$R = R_{DC} \left[1 + \left(\frac{1}{48} \right) \left(\frac{a}{\delta} \right)^4 + \dots \right] \quad (16)$$

$$X_L = R_{DC} \left[\left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{a}{\delta} \right)^2 - \left(\frac{1}{384} \right) \left(\frac{a}{\delta} \right)^6 + \dots \right] \quad (17)$$

No limite de altas frequências [$(a/\delta) \gg 1$], obtém-se (MESQUITA et al., 2015)

$$Z = \left(\frac{a R_{DC}}{2} \right) \left(\frac{2 \pi f \mu \mu_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad (18)$$

4 METODOLOGIA

4.1 Preparação das Amostras

As amostras foram preparadas pelo método de reação em estado sólido, que consiste na mistura dos três compostos precursores: Y_2O_3 , $BaCO_3$ e CuO . Quando estes compostos são combinados na estequiometria correta e submetidos a um tratamento térmico adequado, ocorre a formação da fase supercondutora do $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, chamada de fase Y123 (AZAMBUJA, 2008).

As etapas que compreendem o procedimento experimental para o processamento das amostras supercondutoras são apresentadas na figura a seguir.

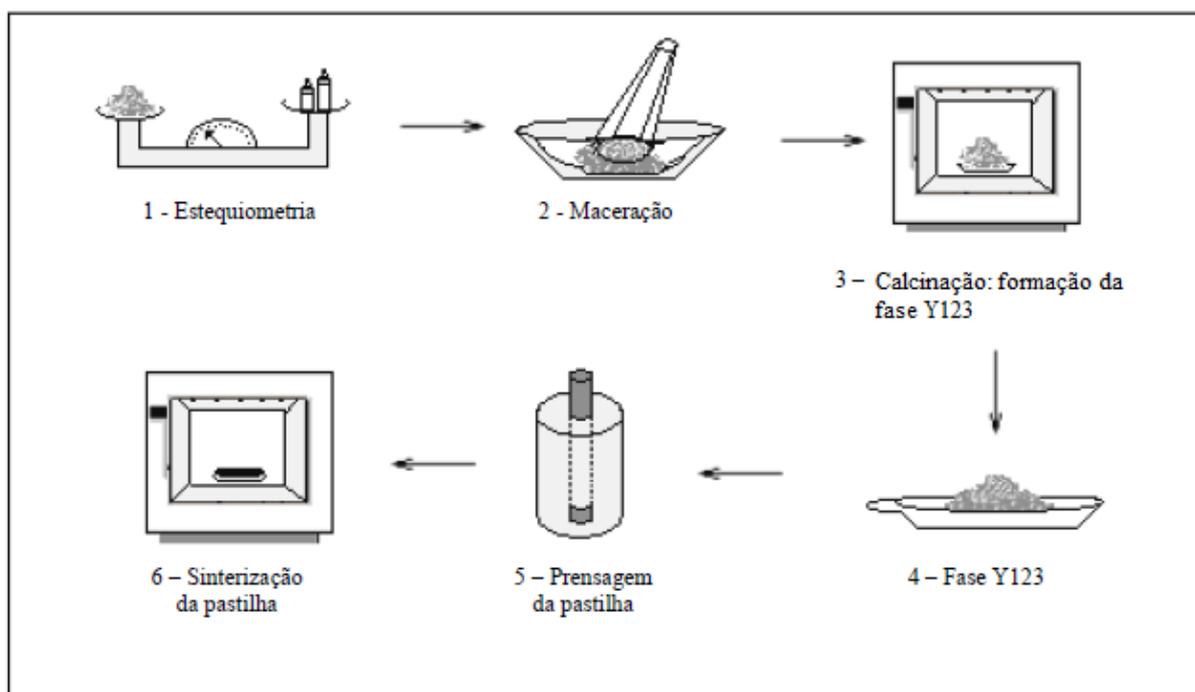


Figura 11 – Etapas do processamento das amostras.

Fonte: Azambuja, 2008, p.38.

Primeiro, é feito o cálculo estequiométrico dos reagentes, na proporção $1Y:2Ba:3Cu$. A tabela abaixo apresenta o cálculo estequiométrico para a obtenção de uma massa de 1,0 grama da fase Y123.

Moles – óxido	Massa molar (mg)	Fator x Massa molar (mg)
Y ₂ O ₃	225,8082	151,3011561
4BaCO ₃	789,3974	528,9300355
6CuO	477,2364	319,7688084
	1492,442	1000 mg = Massa total

Tabela 1 – Cálculo estequiométrico dos reagentes precursores para a obtenção da amostra na fase Y123.

Fonte: Autoria própria, 2016.

O fator de correção, pelo qual multiplicamos a massa molar de cada composto precursor para obter 1,0 g de massa total, é de 1,492442.

Determinada a estequiometria dos reagentes precursores, fazemos a pesagem dos compostos em uma balança analítica de precisão, a fim de obter a concentração ideal da massa molar de cada componente. Feita a pesagem, misturamos e maceramos os reagentes precursores, dessa forma obtendo uma homogeneização da mistura e uma redução do tamanho de grão. Em seguida, é feito um tratamento térmico da mistura. É nesse tratamento térmico, que chamamos de calcinação, que é formada a fase supercondutora Y123. A figura abaixo ilustra as etapas do tratamento térmico da calcinação:

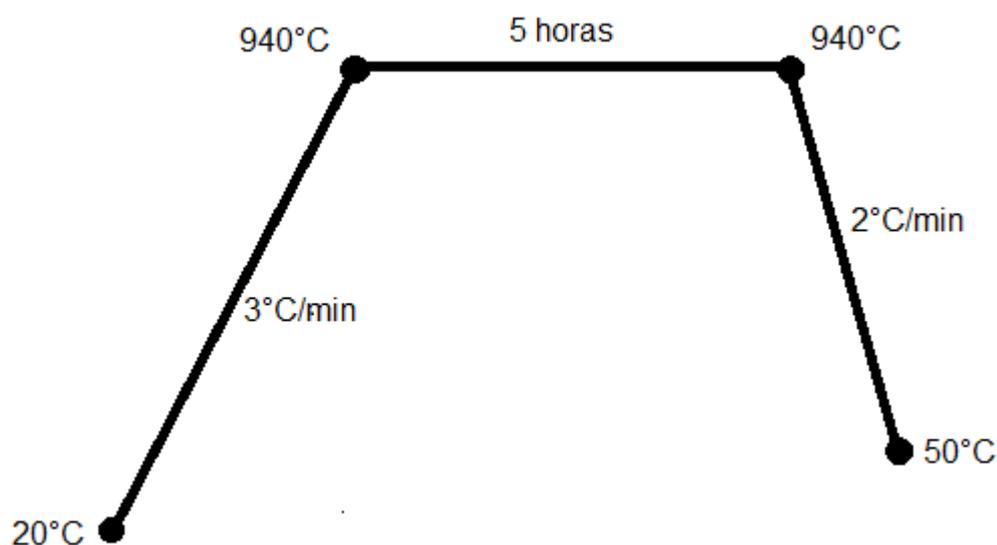


Figura 12 – Rampa do tratamento térmico para a calcinação da fase Y123.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Concluído o processo de calcinação, a fase Y123 é macerada até reduzir-se a um pó muito fino.

Para a obtenção das amostras na forma de pastilhas, o pó resultante da maceração foi depositado num pastilhador cilíndrico e submetido a uma pressão da ordem de 300 kgf/cm^2 . Uma vez compactada a pastilha, esta é submetida a um novo tratamento térmico (Figura 13), esse para a sinterização da amostra. É durante o processo de sinterização que ocorre o crescimento e acoplamento dos grãos supercondutores.

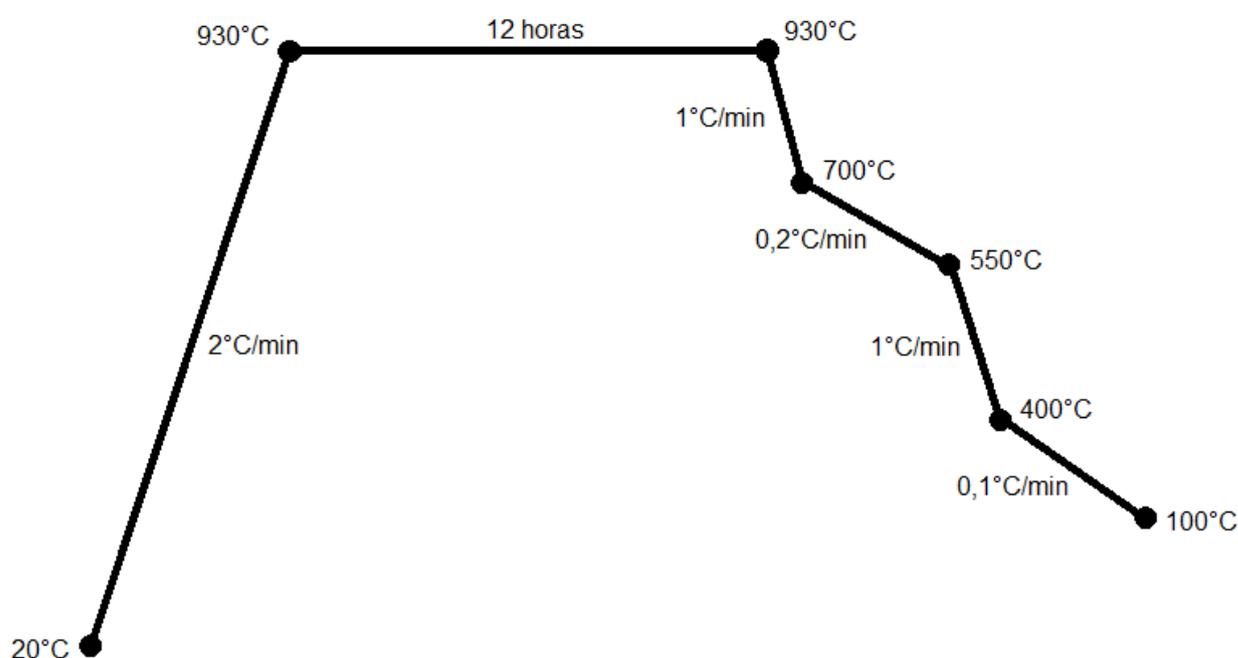


Figura 13 – Diagrama de tratamento térmico para a sinterização de amostras policristalinas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.
Fonte: Autoria própria, 2016.

4.2 Equipamentos e Métodos de Medida

Com a pastilha cerâmica supercondutora de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ pronta, a amostra é preparada para, então, serem efetuadas as medidas. A forma geométrica de um cilindro é a que favorece a análise dos resultados para o efeito peculiar. Como não foi possível chegar nessa forma geométrica, a pastilha foi cortada na forma de um paralelepípedo de seção transversal quadrada (Figura 14), tentando, dessa forma, se aproximar de uma seção transversal circular. As dimensões da amostra após o corte estão dispostas na Figura 15.



Figura 14 – Demonstração do corte feito na pastilha supercondutora de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Figura modificada.
Fonte: Azambuja, 2008, p. 42.

Para efetuar as medidas de impedância, é necessário que se faça os contatos elétricos na amostra. Os contatos elétricos foram confeccionados a partir da deposição de cola prata sobre a superfície da amostra na forma de quatro tiras paralelas, duas em cada extremidade da amostra, conforme mostra a ilustração a seguir. Procurou-se fazer os contatos de tensão o mais distante possível um do outro, a fim de obter um melhor sinal da resistência e da reatância.

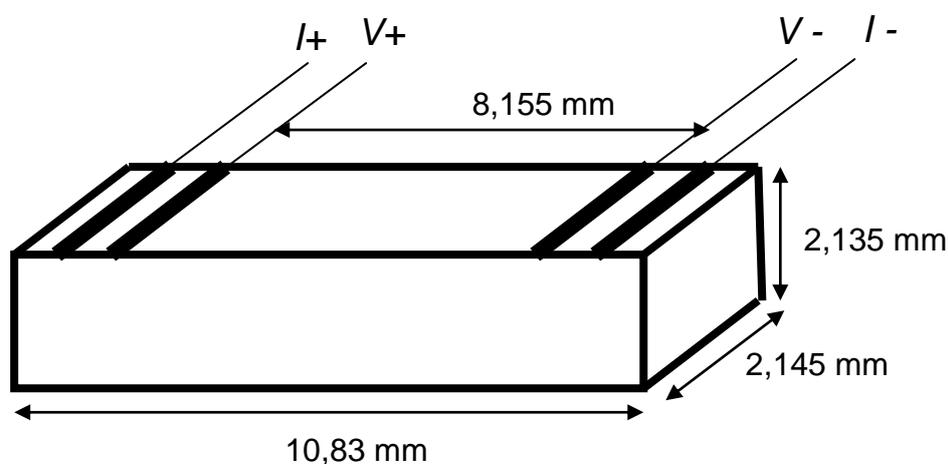


Figura 15 – Esquema da amostra com os 4 contatos elétricos e suas dimensões.
Fonte: Autoria própria, 2016.

Para fixar os contatos elétricos, colocamos a amostra em alta temperatura para que os solventes da cola-prata evaporem. Neste caso, deixamos a amostra cerca de 12 horas embaixo de uma lâmpada, onde a temperatura é em torno de 70 – 80°C. Após, fixa-se a amostra em uma placa de cobre, eletricamente isolada, e colam-se os fios de cobre sobre os contatos elétricos com a mesma cola-prata com

que foram feitos os contatos. Os fios de cobre são previamente lixados, para retirar a capa de verniz isolante, e cobertos com estanho.

Os contatos elétricos mais externos são os contatos de corrente, e os internos são os contatos de tensão, conforme mostra a Figura 15.

O equipamento utilizado para realizar as medidas de impedância está representado no diagrama de blocos a seguir:

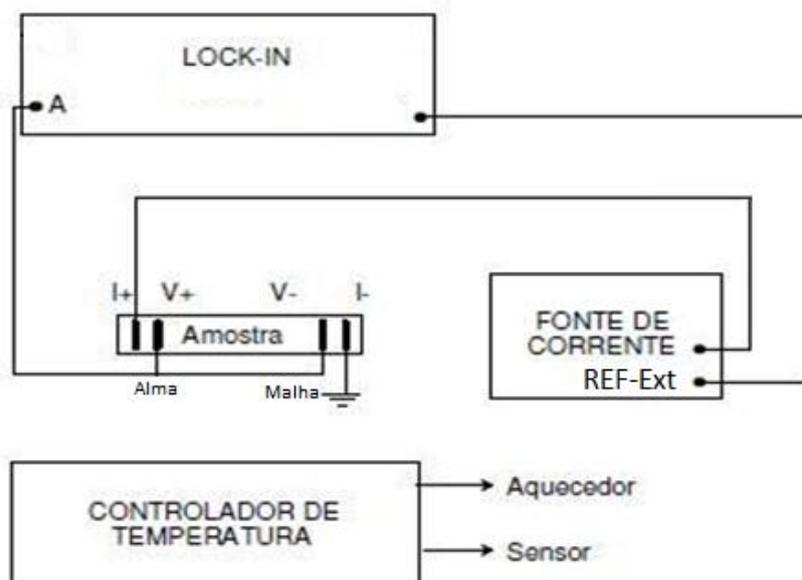


Figura 16 – Diagrama em blocos do equipamento utilizado para a realização das medidas de impedância.

Fonte: Autoria própria, 2016.

O experimento funciona da seguinte forma: a fonte de corrente envia uma corrente AC para a amostra e para o amplificador síncrono (lock-in). Uma diferença de potencial, entre os terminais de tensão da amostra, é lida pelo lock-in e comparada com um sinal de referência enviado pela fonte de corrente. Registrando os sinais em fase e fora de fase no lock-in é possível separar as partes real (resistência) e imaginária (reatância) da impedância. Dessa forma, medimos a impedância em função da temperatura para as frequências constantes de 37 Hz, 1 kHz, 10 kHz e 30 kHz.

Para se chegar à temperaturas abaixo da temperatura crítica do YBCO, utiliza-se um criorefrigerador de ciclo fechado, fabricado por ARS Inc, que funciona à base de compressão e expansão de gás hélio. Este sistema permite a operação em temperaturas entre 18 K e 300 K. A amostra é instalada no interior de uma cana e fica em atmosfera de He. A cana, por sua vez, fica no interior de um “insert” de temperatura variável.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da Amostra: MEV e EDS

A análise da topologia superficial da amostra foi feita através de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 17 é uma imagem da superfície da amostra estudada (onde foram depositados os contatos), enquanto que a Figura 18 é uma imagem da lateral da amostra, onde foi feito o corte transversal (chamarei essa região de cross section).

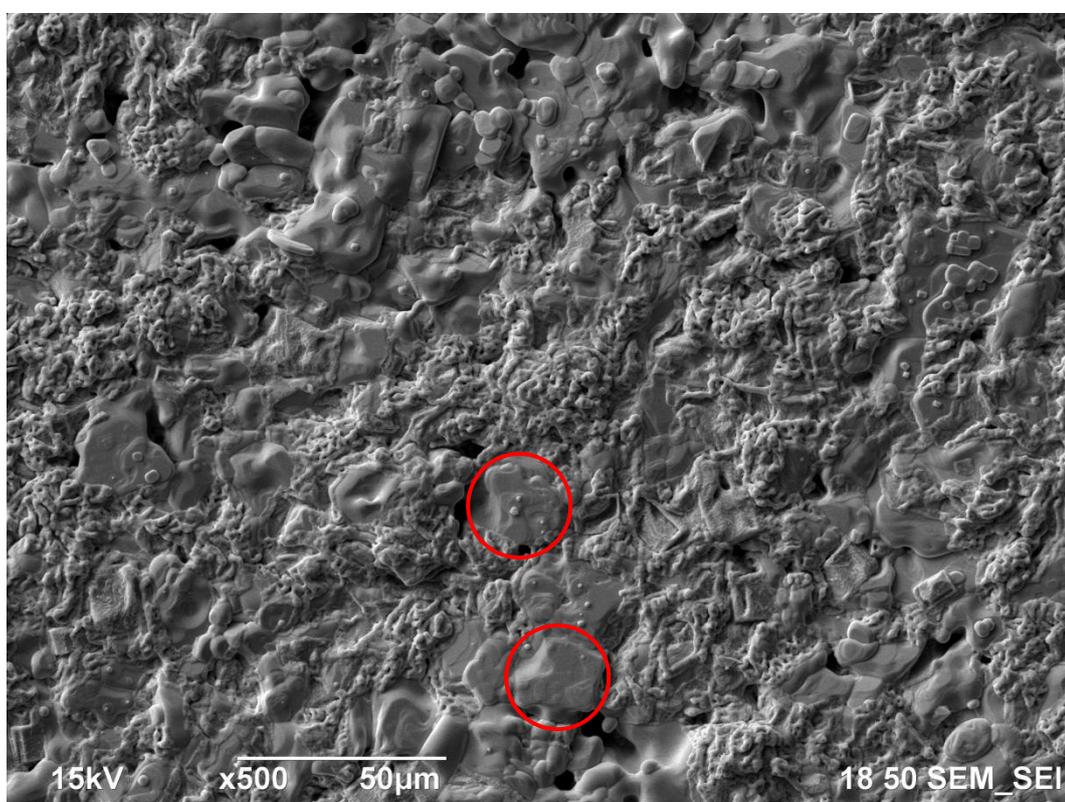


Figura 17 – Imagem da superfície da amostra policristalina de YBCO obtida por MEV.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Através dessa imagem, observa-se que a amostra policristalina de YBCO possui grãos com tamanhos variando, aproximadamente, entre 5 e 20 μm (em destaque na imagem um grão de 20 μm) e poucos poros. Observa-se também a presença de precipitados na superfície da amostra.

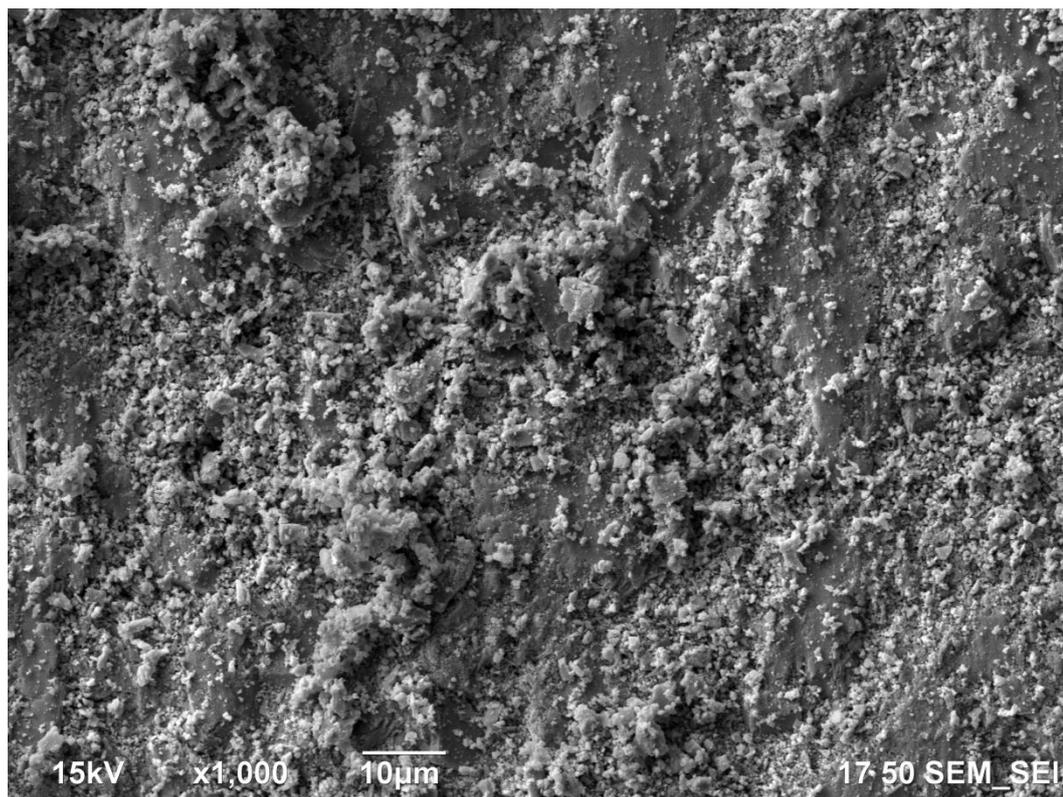


Figura 18 – Imagem da região cross section da amostra policristalina de YBCO obtida por MEV.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Observa-se, na Figura 18, um particulado de pequeno tamanho na superfície lateral da amostra. Isso porque, após cortada a amostra, nenhuma preparação foi feita para obter a imagem e o “pó” formado pela pastilha durante o corte ficou ali depositado. Mesmo assim, nota-se uma superfície com poucos poros sob o particulado.

Para possibilitar a identificação da composição química de regiões pré-determinadas na amostra, foram realizadas análises com auxílio de EDS (energy-dispersive X-ray spectroscopy). As imagens abaixo ilustram os resultados dessa análise.

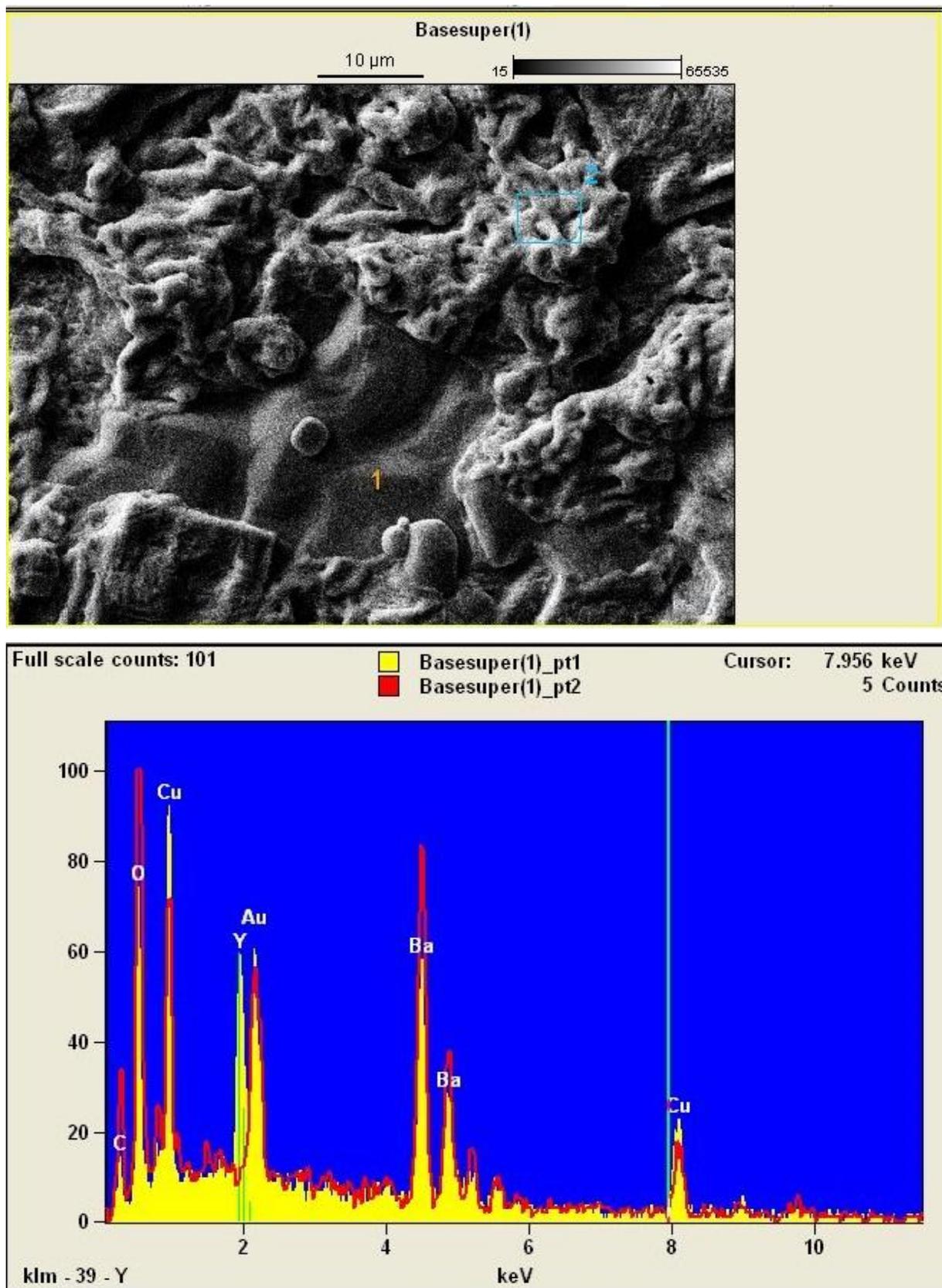


Figura 19 – Imagem de MEV com as regiões da superfície da amostra em que foram feitas as análises EDS (pontos 1 e 2 na micrografia).

Fonte: Autoria própria, 2016.

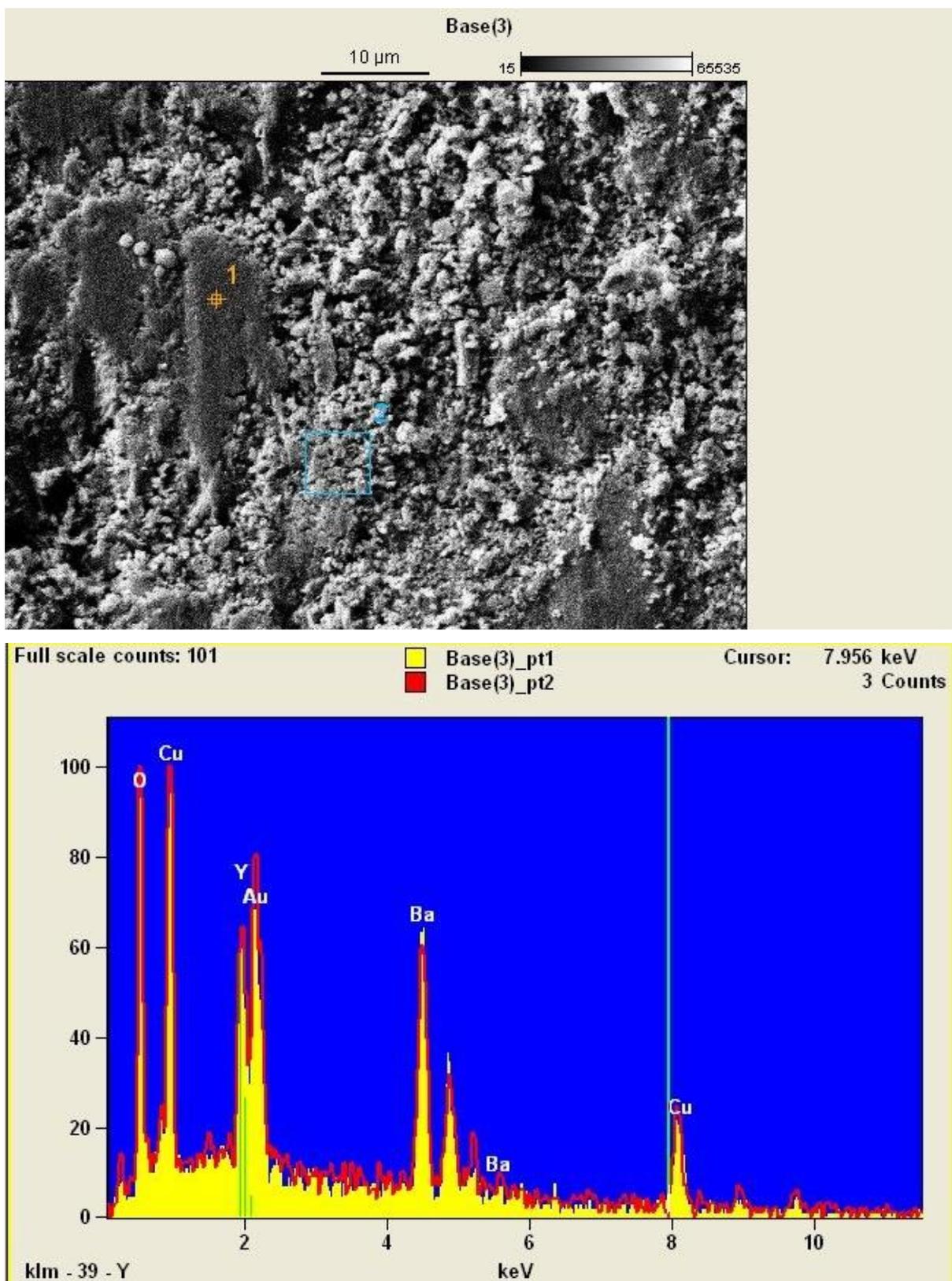


Figura 20 – Imagem de MEV com as regiões cross section da amostra em que foram feitas as análises EDS (pontos 1 e 2 na micrografia).

Fonte: Autoria própria, 2016.

Os resultados de EDS para a superfície da amostra e para a região cross section mostram que ambas as regiões são compostas por Y, Ba, Cu e O. Observa-se também a presença de Au na composição, pois a amostra estudada foi metalizada com este elemento para se obter uma melhor imagem MEV.

5.2 Resistência Elétrica e Impedância

A figura a seguir apresenta os resultados das medidas da resistência elétrica (parte real da impedância) obtidos para a amostra de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, com corrente AC aplicada nas frequências de 37Hz, 1 kHz, 10 kHz e 30 kHz.

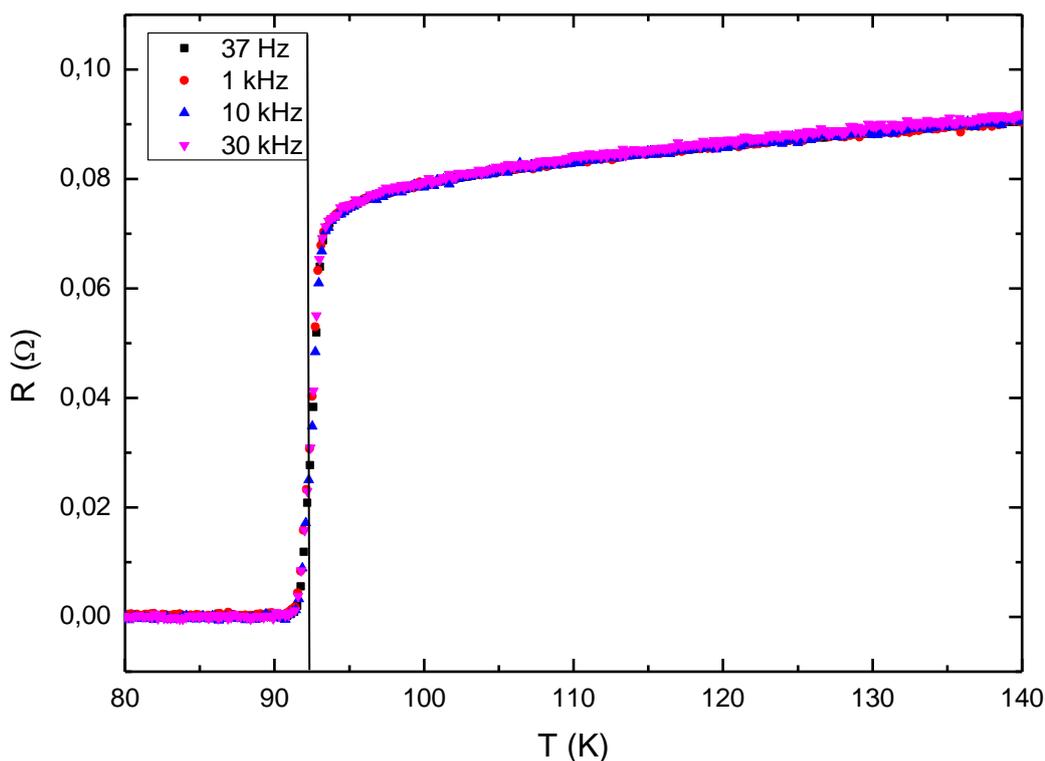


Figura 21 – Curvas da resistência elétrica em função da temperatura para uma amostra supercondutora YBCO, com as frequências de corrente AC indicadas.
Fonte: Autoria própria, 2016.

Analisando as curvas da resistência em função da temperatura, observamos que a amostra possui temperatura crítica $T_C = 92.4$ K. A posição de T_C está assinalada com o traço vertical na figura. Também observamos que a frequência da

corrente AC aplicada não tem efeito apreciável sobre a resistência acima de T_C (fase normal). Isto mostra que as frequências aplicadas correspondem ao limite de baixas frequências dado pelas Equações (16) e (17). Este resultado é consistente com a forte resistividade ($\rho = 4,4 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$) da amostra granular estudada.

Porém, efeitos da frequência da corrente AC aplicada são observados na impedância total do sistema, como mostra a figura a seguir.

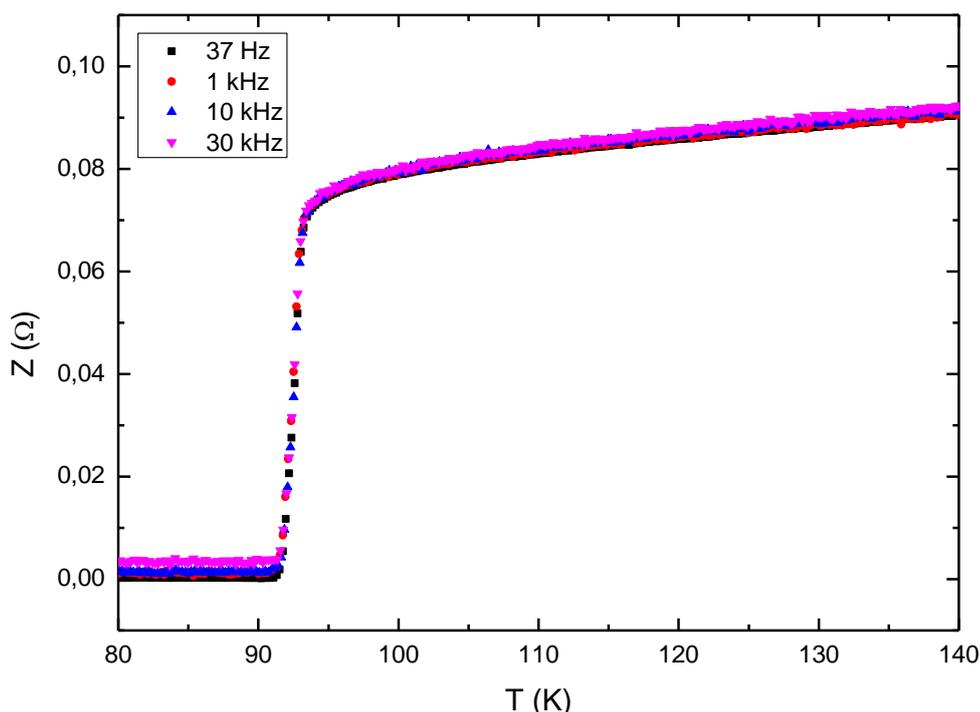


Figura 22 – Curvas da impedância em função da temperatura para a amostra supercondutora YBCO, obtidas com as frequências indicadas da corrente AC.
Fonte: Autoria própria, 2016.

Abaixo de T_C , é observado um aumento da impedância com o aumento da frequência da corrente AC aplicada (Figura 23). Como a frequência não afeta a resistência da amostra, poderia-se concluir que o efeito observado é contribuição da reatância indutiva, já que este é proporcional à frequência da corrente AC aplicada. Porém, dado que as frequências aplicadas encontram-se no limite de baixas frequências $[(a/\delta) \ll 1]$, espera-se que na fase supercondutora a reatância indutiva dada pela Equação (17) permaneça praticamente nula. Assim, é mais provável que o sinal observado na Figura 23 seja originado pela denominada “contribuição reativa externa” à impedância, a qual se deve à montagem

experimental. No caso de nosso experimento, espera-se que esta contribuição extrínseca à impedância seja pronunciada em razão do uso nas experiências de um criostato confeccionado em aço inox, que é um bom condutor elétrico.

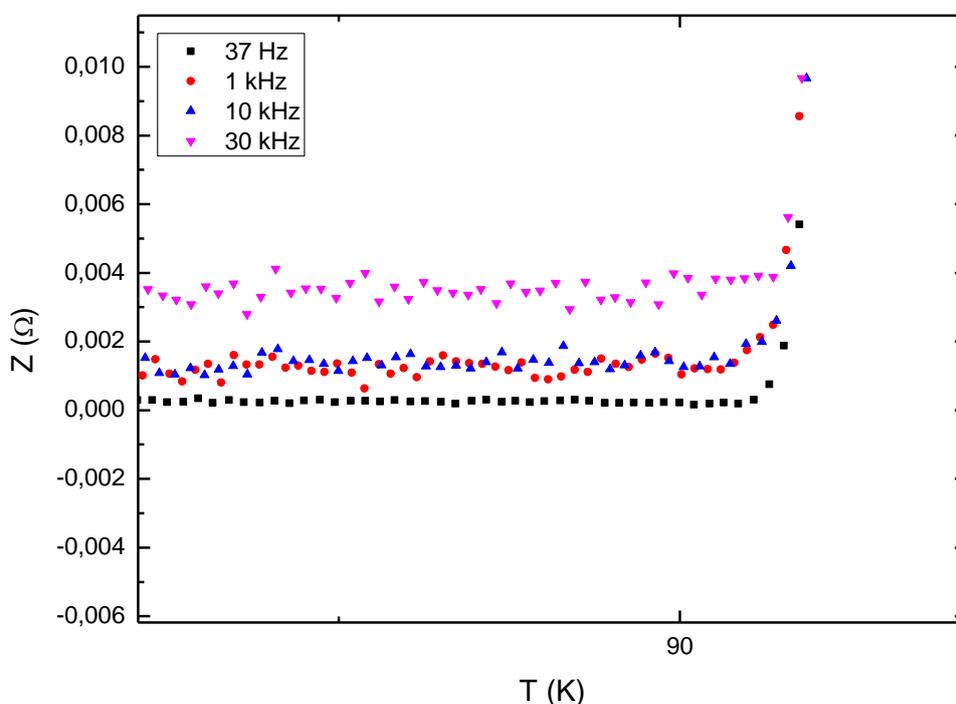


Figura 23 – Ampliação das curvas de impedância em função da temperatura nas proximidades de T_C .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Mais interessante é, neste estágio da investigação, a análise dos resultados na fase normal. Na Figura 24, mostra-se a impedância em função da frequência nas temperaturas fixas $T = 110$ K e $T = 130$ K, que são suficientemente afastadas de T_C . Nestas temperaturas, a principal componente da impedância é a resistiva e o efeito externo, numa primeira aproximação, pode ser ignorado.

Usando as Equações (16) e (17), obtém-se a impedância no limite de baixas frequências, ou seja,

$$Z = R_{DC} \left[1 + \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{a}{\delta} \right)^2 + \dots \right] \quad (19)$$

Substituindo a Equação (15) na Equação (19), obtém-se

$$Z = R_{DC} \left[1 + \left(\frac{\pi a^2 \mu_0}{4\rho} \right) f \right] \quad (20)$$

Portanto, supondo a validade da aproximação de baixas frequências, espera-se que Z varie linearmente com a frequência, conforme mostra a Equação (20) e o gráfico obtido (Figura 24).

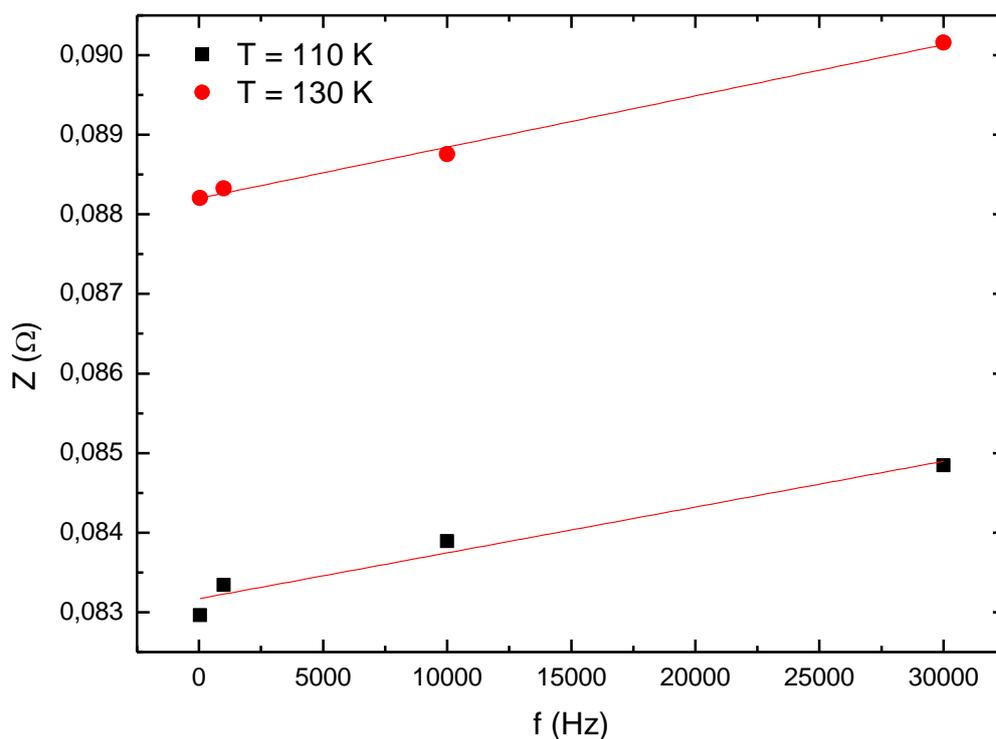


Figura 24 – Gráfico da impedância em função da frequência para as temperaturas de 110 K e 130 K.

Fonte: Autoria própria, 2016.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram realizadas a preparação e caracterização com MEV e EDS de uma amostra supercondutora, com morfologia granular, do sistema YBCO. Nesta amostra foram realizadas medidas de impedância elétrica em função da temperatura, tanto na fase normal quanto na fase supercondutora. Frequências de corrente AC entre 37 Hz e 30.000 Hz foram aplicadas.

Destas medidas obtivemos a resistência em função da temperatura para algumas frequências de corrente AC. Desses dados foi possível determinar a temperatura crítica de transição da fase normal para a fase supercondutora, T_C . Observamos que a T_C não varia dentro da faixa de frequência estudada. Também podemos verificar um aumento linear da impedância na fase normal com a frequência da corrente AC aplicada. Este resultado corrobora a hipótese de que as frequências aplicadas estão no limite de baixas frequências no caso do sistema YBCO granular, o qual tem resistividade elevada.

Temos, como perspectivas futuras, realizar novas medidas a fim de monitorar a componente externa da impedância. Importante também é a aplicação de frequências mais elevadas de modo que se possa atingir o limite de frequências elevadas, em que a espessura pelicular tem forte influência nos resultados. Também se incluem nessas perspectivas a realização de novas medidas com a aplicação de campo magnético na orientação paralela à corrente, com o objetivo de fazer um estudo da magneto-impedância em materiais supercondutores.

REFERÊNCIAS

- AZAMBUJA, P. **Processamento e caracterização de compósitos supercondutores $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ / Ag**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008.
- BENO, M. A. et al. Structure of the single-phase high-temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-d}$. **Applied Physics Letters**, New York, v. 51, n. 1, p. 57-59, 1987.
- CASIMIR, H. B. G.; UBBNIK, J. The skin effect. **Phillips Technical Review**, Toronto, v. 28, n. 9, p. 271-283, 1976.
- FRAGA, G. L. F.; PUREUR, P.; BRANDÃO, D. E. Spontaneous magnetoimpedance in the Heusler compounds Pd_2MnSn and Pd_2MnSb near the Curie temperature. **Solid State Communications**, New York, v.124, p. 7–10, 2002.
- LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. **Electrodynamics of the Continuous Media**. Oxford: Pergamon, 1960. p. 260–266.
- MESQUITA, F. et al. Spontaneous Magneto-Impedance in YCo_12B_6 and $GdCo_12B_6$ Intermetallic Compounds. **IEEE Magnetics Letters**, Sendai, v. 6, p. 1-4, 2015.
- PUREUR. Supercondutividade: cem anos de desafios. **Revista USP**, São Paulo, n. 92, p. 142-156, 2012.
- ROBERT, R. Efeito Peculiar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v.22, n.2, p. 285-289, 2000.
- RODRIGUES JR, P. **Irreversibilidades magnéticas e flutuações na condutividade elétrica do $YBa_2Cu_3O_{7-d}$** . 1994. 108 f. Tese (Doutorado em Ciências)-Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- SERWAY, R. A. **Física para cientistas e engenheiros**. Cengage Learning: São Paulo, 2011.
- WU, M. K. et al. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambiente Pressure. **Physical Review Letters**, New York. v. 58, n. 9, p. 908-910, 1987.