

DETERMINAÇÃO DA CORRENTE CRÍTICA EM SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA

Márcio Antônio Sens¹, Leonardo Philippi Sens²

¹ CEPTEL/Eletróbrás, Rio de Janeiro, Brasil, sens@cepel.br

² COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, lsen-bolsista@cepel.br

Resumo: Apresentam-se as técnicas experimentais e os cuidados que se precisam tomar na determinação da corrente crítica em fitas supercondutoras de alta temperatura, utilizando-se de correntes contínua e alternada. Justifica-se esta apresentação, pelo crescente número de investigações experimentais no campo dos supercondutores e os constantes insucessos experimentados por equipes sem os devidos treinamentos em metrologia elétrica.

Palavras chave: supercondutor, medição, corrente crítica, resistência elétrica, condutividade elétrica.

1 INTRODUÇÃO

Se um fio ou uma fita supercondutora for submetido a uma corrente elétrica no sentido longitudinal, em um determinado segmento surgirá uma queda de tensão, crescente com a corrente aplicada. A intensidade da corrente que resulta em uma queda de tensão de 100 $\mu\text{V}/\text{m}$, por convenção prática, será considerada a corrente crítica do objeto sob ensaio, na temperatura de ensaio e sob o campo magnético externo aplicado^[1].

Algumas escolas de Engenharia brasileiras já aboliram a disciplina de medidas elétricas da grade curricular obrigatória^[2] e as consequências são perceptíveis entre os pesquisadores iniciantes em mestrados ou em doutorados, na condução de investigações experimentais envolvendo medidas de baixas resistências elétricas. Estes malogrados experimentos têm conduzido, em alguns casos, a interpretações errôneas dos resultados sobre a condutividade elétrica de amostras, mesmo de metais tradicionais como o alumínio e o aço e, sobretudo, de sistemas supercondutores^[4].

Os instrumentos fundamentais na determinação da corrente crítica são os nanovoltímetros, na faixa de microvolts, e ainda não encontram respaldo técnico na Rede Brasileira de Calibração para a rastreabilidade aos padrões nacionais e internacionais, na citada faixa^[3].

Para suprir a lacuna até então encontrada na verificação de instrumentos de tão alta relevância – os nanovoltímetros e atender à demanda, as técnicas experimentais utilizadas para a verificação de micro-ohmímetros podem ser facilmente adotadas pelos laboratórios usuários, com leves modificações, como apresentadas por recente publicação^[4].

O presente artigo técnico não tem intenções de apresentar técnicas experimentais inéditas e tampouco resultados de estudos inovadores em supercondutividade. Pelo contrário, o artigo mostra técnicas tradicionais e bem difundidas em livros textos que, por muitas vezes, são esquecidas quando são iniciados os experimentos por novos pesquisadores. As técnicas são tão antigas, que se encontram dificuldades de localizá-las em detalhes disponíveis na rede de Internet. Utilizou-se de amostras reais e atuais de fitas supercondutoras apenas para exemplificar as medições de correntes críticas. Ou seja, amostras com estruturas monolíticas, de seção circular e de fitas, com núcleos de óxidos compostos por mono ou multifilamentos foram testadas. Também será mostrado o comportamento de fitas supercondutoras de segunda geração, com substrato de aço inoxidável. Blocos supercondutores com metalização superficial também podem ser ensaiados pelas mesmas técnicas experimentais.

Também será mostrado um comportamento em corrente alternada de uma fita supercondutiva, com diferentes taxas de crescimento da corrente, que pode ser menos comum na literatura. A distância entre os terminais de corrente e de tomadas de potencial será enfatizada e demonstradas por técnicas simples de análise de circuitos, com objetivo didático, ilustrando que precisam-se de distâncias para a penetração total da corrente no supercondutor, já que a entrada dos terminais ocorre pela parte metálica e resistiva. Os resultados foram obtidos em planilhas de cálculo Excel, com valores discretamente programados de corrente, interagindo diretamente nas fontes e nos instrumentos, por programação em VBA-Excel, via conexão USB-GPIB com retorno dos valores de tensão sobre as planilhas e nos gráficos, automaticamente. Valores eventualmente discrepantes podem ser repetidos isoladamente em ensaio subsequente e substituídos na planilha anterior, evitando duplicação de esforços.

2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Fixação da amostra

O primeiro detalhe experimental a ser observado na determinação da característica da queda de tensão com a corrente elétrica aplicada para os materiais condutores e os supercondutores está no dimensionamento e na preparação da amostra. Em princípio, quanto mais longas forem as amostras, maiores serão as quedas de tensão e maiores

sensibilidades se podem obter na medição das mesmas, para as mesmas correntes impostas. Entretanto, para desenvolvimento de supercondutores, nem sempre amostras longas, como de um metro ou mais, estarão disponíveis. Por outro lado, para ensaios de amostras sob campos magnéticos, estas devem ser coladas em uma base isolante, para minimizar efeitos de deformação mecânica.

Amostras de fitas supercondutoras de 30 a 90 mm de comprimento, no total, têm sido adotadas para a maioria das investigações e desenvolvimentos destes materiais, com medições em nitrogênio líquido. A **Figura 1** ilustra uma forma de sustentar os fios e as fitas metálicas para o levantamento de características de queda de tensão com a corrente elétrica aplicada, com a base isolante em epóxi, a qual suportou as variações de temperatura sem trincas.

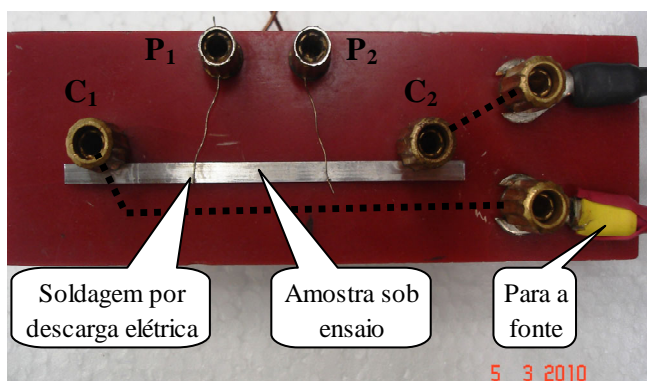


FIGURA 1 – SUPORTE PARA FITAS E FIOS SUPERCONDUTORES

Quando as amostras não suportam temperaturas maiores que 200 °C para a soldagem dos terminais, recomendam-se o uso de soldas de baixo ponto de fusão, como ligas à base de índio. Entretanto, os produtos supercondutores atuais têm sido tratados em temperaturas bem mais elevadas que o ponto de fusão de soldas à base de estanho e comprovou-se que resultados semelhantes são obtidos com soldas de terminais por ligas de índio, por ligas estanho-chumbo, e por

soldas por descargas elétricas. Esta última, recomendada e utilizada para soldagem de terminais de potencial sobre fitas ferromagnéticas, sendo prática, precisa no distanciamento e muito rápida. O uso de condutores auxiliares de reduzida seção transversais ou de soldas de elevada resistência não devem implicar resultados distintos da amostra sobre ensaio, se as técnicas experimentais corretas foram seguidas, como ilustrado na **Figura 2**. Tais deficiências implicarão, certamente, maiores potências das fontes de alimentação, e maiores dissipações térmicas no meio refrigerante.

2.2 Dimensões e distâncias entre contatos elétricos

Considerando que os compostos supercondutores de alta temperatura não são materiais metálicos, ou ligas metálicas, mas materiais cerâmicos sustentados por substratos metálicos como a prata, o cobre ou o aço inoxidável, significa que os contatos elétricos, de entrada e de saída da corrente de ensaio com a amostra, deverão ser efetuados nas partes metálicas, não supercondutoras.

Desta forma, haverá uma resistência elétrica de transferência entre o metal e o composto cerâmico, que provocará dissipação térmica com a passagem da corrente, desde o ponto de contato até a entrada total da corrente no supercondutor. Os substratos metálicos ficam em paralelo com o composto supercondutivo. Este fato implica manter distâncias mínimas entre os contatos de corrente C_1 e C_2 e os contatos que constituem as tomadas de potencial P_1 e P_2 , como mostrado na **Figura 1**. Algumas fitas supercondutoras são constituídas por substratos inferior e superior de materiais distintos e, desta forma, recomenda-se a união de ambas para a entrada e a saída da corrente, C_1 e C_2 . O suporte de amostras mostrado na **Figura 1** foi utilizado com sucesso em centenas de ensaios de amostras de 30 a 90 mm de comprimento, sob correntes de 1 a 1118 A, com dissipação de até 96 J, em corrente contínua ou em corrente alternada de 60 Hz, sob temperaturas de -196 a 90 °C, ao ar livre, imerso em nitrogênio líquido ou imerso em água.

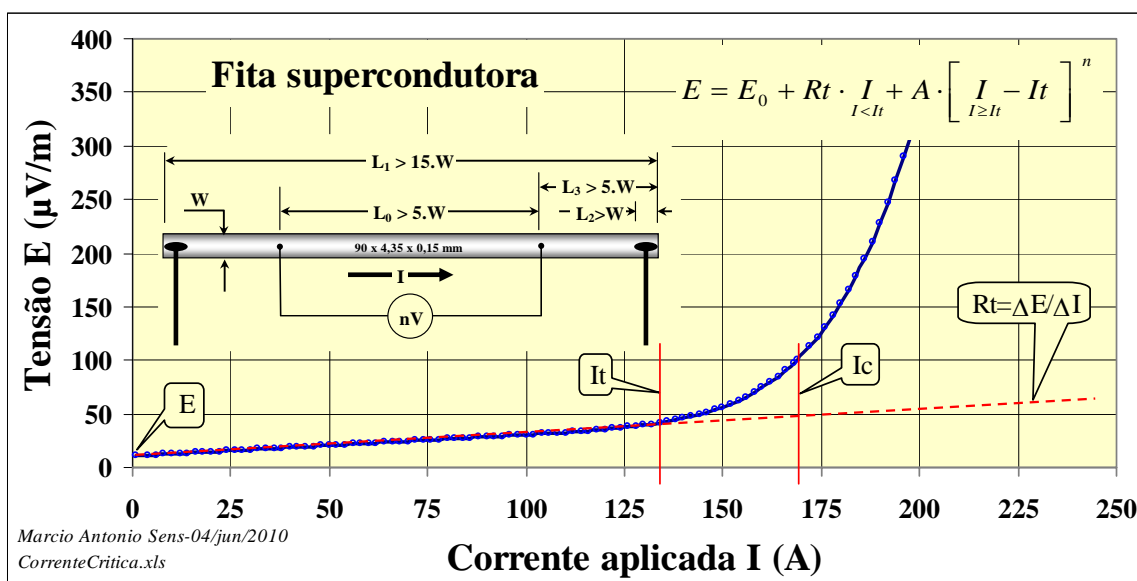


FIGURA 2 – CARACTERÍSTICA TÍPICA E DISTÂNCIAS SOBRE A AMOSTRA SUPERCONDUTORA

A **Figura 2** ilustra uma característica típica obtida para fitas supercondutoras em substrato de aço inoxidável, em ensaio efetuado em corrente contínua, pela técnica da subida em degraus, em intervalos de dois em dois segundos. Concluiu-se que a corrente crítica resultou em $I_c = 168,8$ A, conforme mostrado na **Figura 2**, onde se mostram também a definição da corrente crítica para a queda de tensão de $100 \mu\text{V/m}$, a resistência de transferência – R_T , a tensão residual - E_o , devido aos efeitos termelétricos resultantes da temperatura diferencial entre a amostra e o nanovoltímetro.

A **Figura 2** também ilustra as distâncias recomendadas e a característica dimensional da soldagem dos terminais de corrente. Para amostras supercondutivas constituídas por substratos de fitas de prata ou de cobre as soldagens dos terminais devem se estender por uma largura ou em um

diâmetro – W . Entretanto, para substratos constituídos por fios e fitas de aço, ou outro metal de baixa condutividade elétrica, a soldagem dos terminais de corrente precisa se estender pelo menos por três larguras ou diâmetros da amostra, para minimizar os efeitos de dissipação térmica.

2.3 Variação da resistência com a temperatura

Com a amostra imersa em água e suportada pelo mesmo sistema de fixação, mostrado na **Figura 1**, foram conduzidos experimentos para a determinação das características da resistividade elétrica com a temperatura, entre 5 e 90°C , cujos resultados típicos são mostrados na **Figura 3**. A técnica de medição adotada foi conforme procedimentos descritos em ^[4].

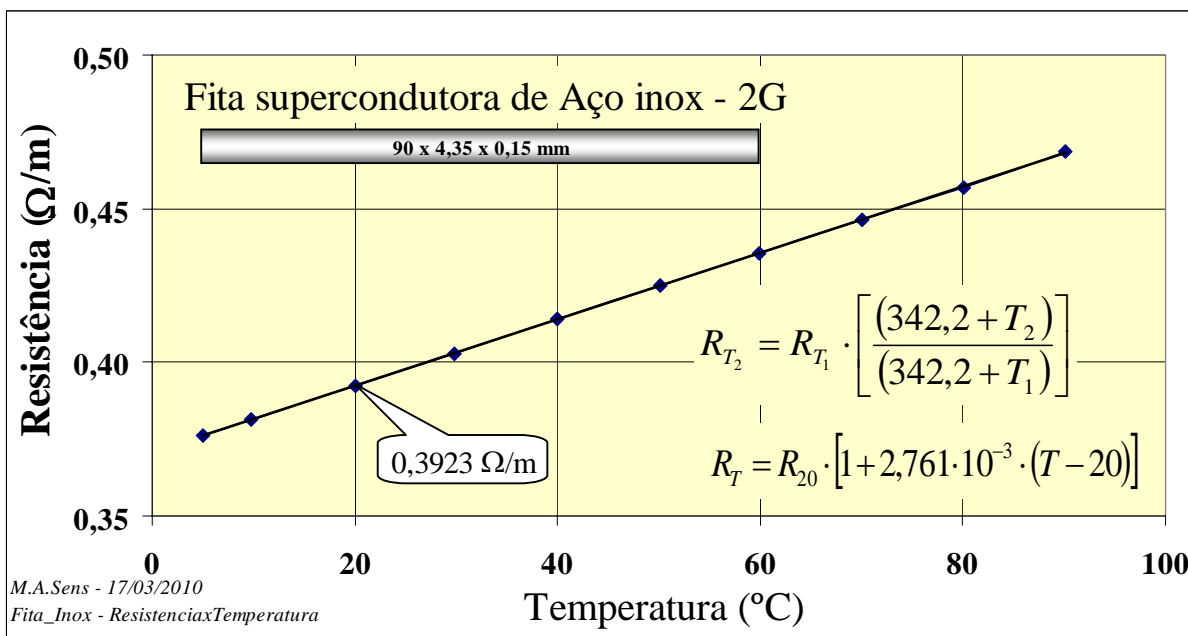


FIGURA 3 – COMPORTAMENTO DE UMA FITA SUPERCONDUTIVA EM AÇO INOXIDÁVEL COM A TEMPERATURA

2.4 Preservação da integridade da amostra

Tanto nos ensaios em corrente contínua, quanto nos ensaios em corrente alternada, cuidados especiais devem ser tomados para a preservação da integridade das amostras em correntes de intensidades superiores à corrente crítica. A energia total dissipada pelas amostras deve ser limitada, seja pela amplitude da tensão entre tomadas de potenciais, ou pela duração do pulso de corrente, para limitar a temperatura máxima da amostra, caso contrário poderá ocorrer a delaminação ou a fusão da mesma. Nos ensaios programados em planilha Excel e utilizados neste trabalho, como usual, adotou-se o limite de 70 vezes o valor da queda de tensão limite para o critério de corrente crítica como limitador. Ou seja, o sistema de ensaio é automaticamente interrompido quando a tensão nas tomadas de potencial resultar maior que **70 vezes** a tensão de $100 \mu\text{V/m}$.

Nos ensaios em corrente alternada a amostra foi preservada pela limitação do tempo de ensaio em $\frac{1}{2}$ ciclo, ou seja, em 8,3 milissegundos.

2.5 Efeitos do posicionamento das entradas de corrente

Em fitas supercondutivas compostas, onde existem distintas camadas metálicas e um filme supercondutor, o posicionamento da entrada e da saída da corrente deve ser cuidadosamente escolhido, inclusive quanto à face da fita, pois influenciam nos resultados de queda de tensão com a corrente aplicada, pelo efeito da transferência, como descrito em 2.2. Uma simulação computacional demonstrou que o uso de distintas posições dos contatos de corrente (C_1 e C_2) em relação às tomadas de potencial (P_1 e P_2) resultam em distintos valores de tensão, para a mesma corrente de ensaio sobre uma fita composta. O circuito para a simulação é mostrado na **Figura 4** e os resultados na **Figura 5**.

2.6 Comportamento em corrente contínua

Uma amostra de fita supercondutora de segunda geração, constituída por um filme supercondutivo entre fitas metálicas, ferromagnéticas, foi ensaiada adotando-se os procedimentos descritos neste trabalho, em corrente

contínua bipolar, resultando no comportamento mostrado na **Figura 6**. A corrente foi programada para subir automaticamente até o critério de máxima corrente segura e decrescer suavemente até o mesmo valor de polaridade inversa, objetivando a identificação de possível histerese no comportamento do material. Nos resultados obtidos com a

amostra ensaiada, mostrados na **Figura 6**, não foi identificado significativo efeito de histerese, ou seja, a queda de tensão repetiu os valores tanto para correntes crescentes quanto decrescentes de mesmas intensidades. A corrente crítica resultou em ± 70 A.

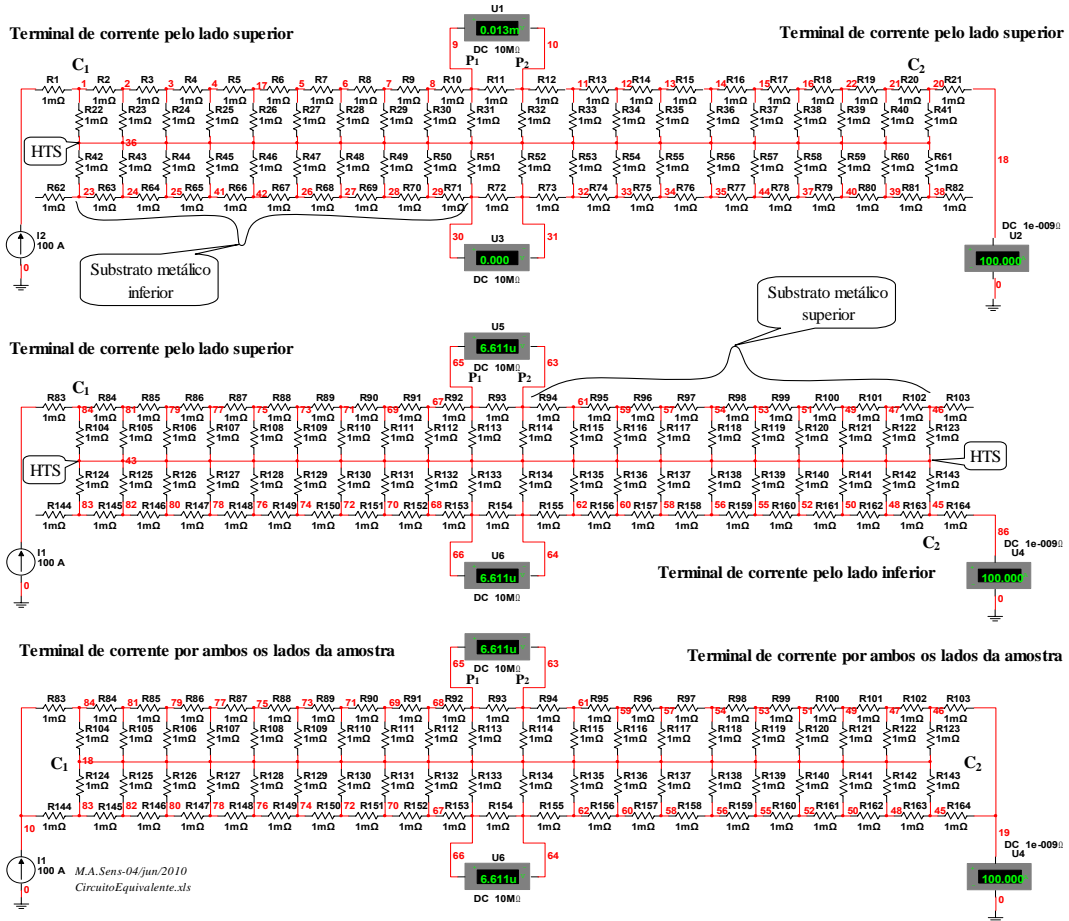


FIGURA 4 – CIRCUITO EQUIVALENTE AO DA FITA SUPERCONDUTORA COMPOSTA

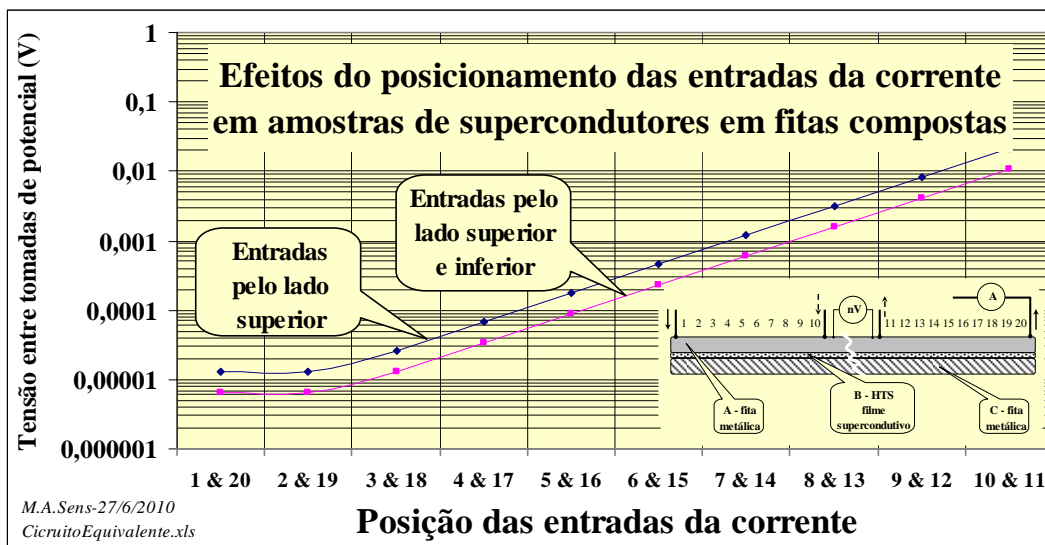


FIGURA 5 – EFEITOS DO POSICIONAMENTO DOS CONTATOS DE CORRENTE SOBRE A AMOSTRA

A **Figura 6** também ilustra que houve limitação da corrente de ensaio após ultrapassar o valor de 70 vezes a tensão limite para a corrente crítica.

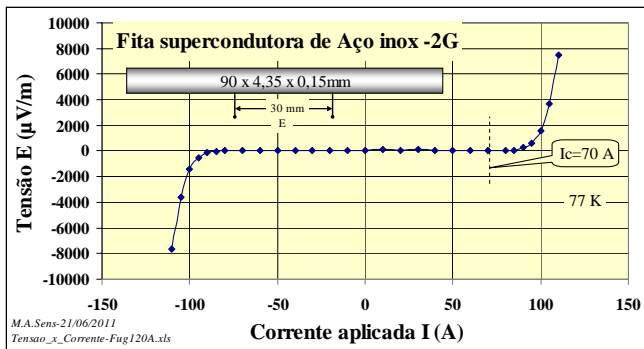


FIGURA 6 – CORRENTE CRÍTICA DE UMA AMOSTRA DE FITA SUPERCONDUTORA 2G

2.7 Comportamento em corrente alternada

A configuração de medição da característica da queda de tensão com a corrente aplicada de fios e fitas supercondutoras em corrente alternada não difere da montagem para corrente contínua. A diferença entre elas está apenas na instrumentação e na sensibilidade. De um modo geral, a sensibilidade da instrumentação para corrente alternada é menor, por se tratar de efeitos transitórios e assimétricos.

Num ensaio da mesma fita supercondutora 2G, na temperatura de **77 K** em corrente alternada, com duração máxima de 4 ciclos, na frequência de 60 Hz, observou-se que após atingir a corrente crítica a amostra se aquece, elevando a resistência elétrica, baixando a corrente aplicada e elevando a queda de tensão com o tempo de ensaio, como ilustrado na **Figura 7**. Conclui-se, portanto, que a duração do ensaio resultou demasiada e pode danificar a amostra, se intensidades de correntes superiores fossem aplicadas.

Repetindo-se os ensaios anteriores, com duração de apenas $\frac{1}{2}$ ciclo, para variadas taxas de elevação da corrente, na frequência de 60 Hz, observou-se que a amostra mantém-se supercondutiva em mais altas correntes, ou seja, com correntes críticas mais elevadas, para maiores taxas de elevação da corrente aplicada, como mostrado na **Figura 8**.

A **Figura 9** ilustra a determinação do limite máximo suportado por uma amostra nos ensaios em corrente alternada, onde ocorreu a fusão da mesma em nitrogênio líquido com a aplicação de corrente alternada de 60 Hz, em um pulso de apenas 8,3 milissegundos, com dissipação de **96 J**, aproximadamente. A corrente máxima aplicada foi de **1118 A** e a tensão resultante foi superior a **80 V** entre tomadas de potencial distanciadas de **30 mm**. Isto significa que a amostra foi submetida à energia de **356 kJ/m²** e ao campo elétrico de **2,67 kV/m**. No ensaio anterior a amostra suportou 430 mil vezes a tensão equivalente à corrente crítica em corrente contínua, sem danos.

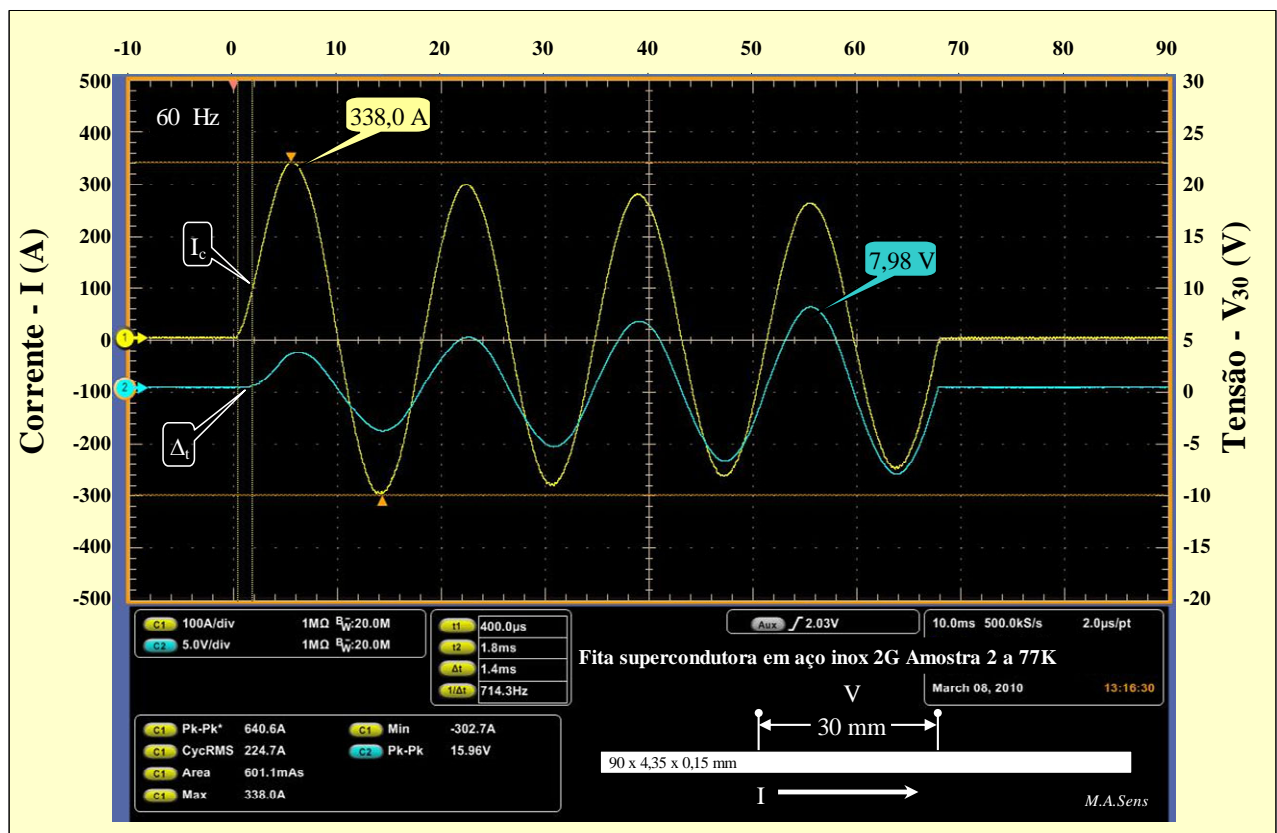


FIGURA 7 - COMPORTAMENTO DA FITA SUPERCONDUTORA 2G EM CORRENTE ALTERNADA

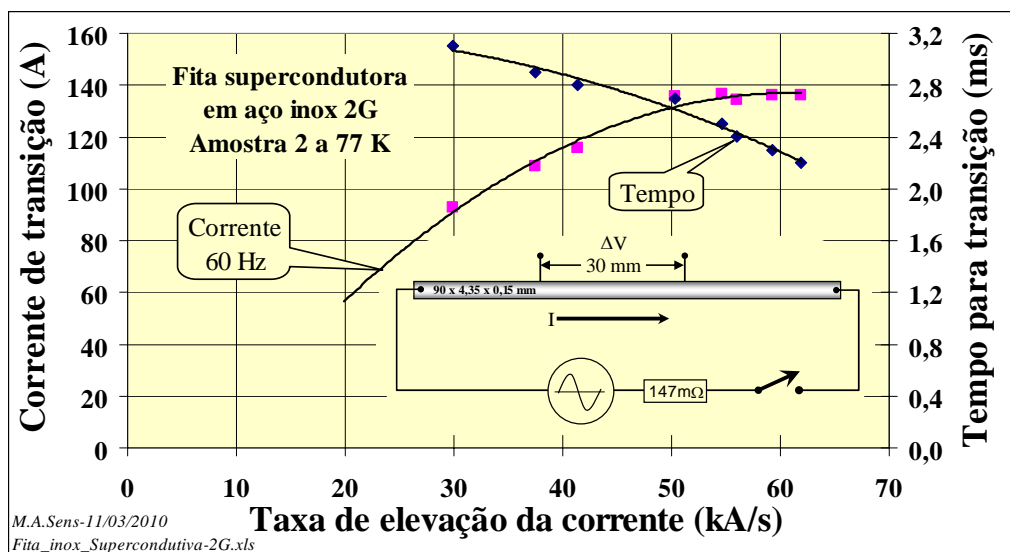


FIGURA 8 – CORRENTE CRÍTICA DA FITA 2G EM CORRENTE ALTERNADA

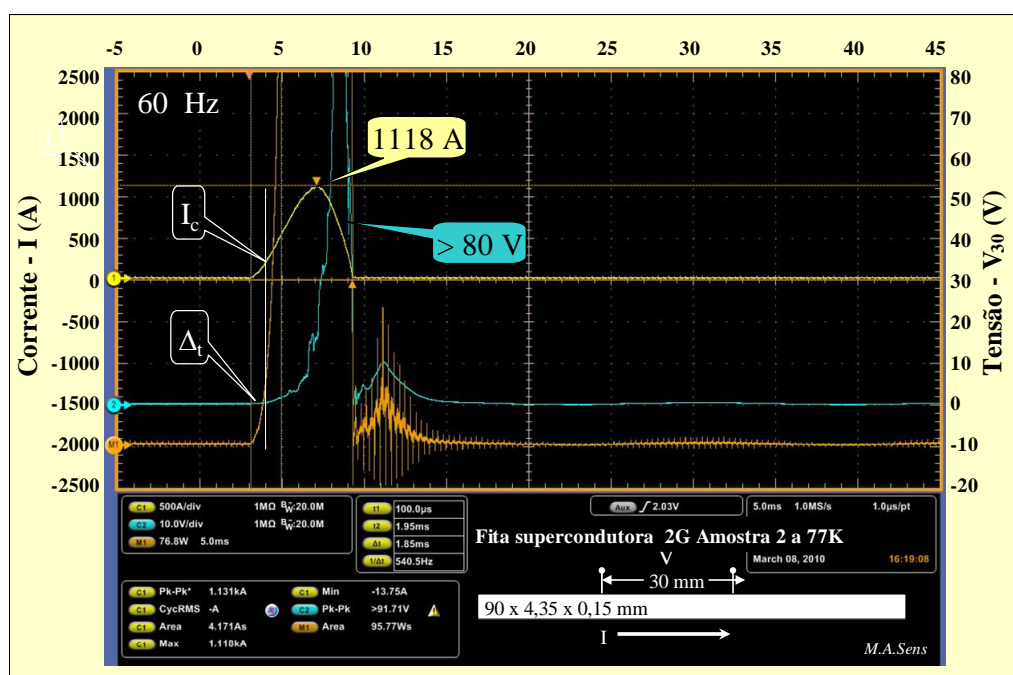


FIGURA 9 - FUSÃO DA FITA SUPERCONDUTORA 2G EM CORRENTE ALTERNADA

3 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais, utilizados como exemplos, mostraram que a amostra de fita supercondutiva teve corrente crítica em torno de 70 A em corrente contínua e também em corrente alternada, sendo que para taxas mais elevadas de subida da corrente, de 60 kA/s, a corrente crítica resultou duas vezes o valor encontrado em corrente contínua. Observou-se também que para taxas mais elevadas de subida da corrente ocorre uma saturação do valor da corrente crítica e que o tempo para a transição decresce continuamente com a taxa de elevação da corrente. O mesmo suporte de amostras, em epóxi, foi utilizado por centenas de vezes sem danos, em ensaios em água quente,

ou em nitrogênio líquido, sob correntes de até 1118 A, este último com duração de apenas 8,3 milissegundos.

4 REFERÊNCIAS

- [1] IEC 61788-3/2006-04 International Standard Superconductivity – Part 3.
- [2] <https://www.siga.ufrj.br>, acesso em 2/07/2009.
- [3] Inmetro – Lares – Laboratório de Resistência – 8060, <http://www.inmetro.gov.br/labor...>, acesso em 4/7/09.
- [4] Sens, Márcio Antônio, Verificação da Exatidão e da Linearidade na Medição de Baixas Resistências Elétricas, V Congresso Brasileiro de Metrologia, 9 a 13 de novembro de 2009. Salvador, Bahia – Brasil.