

**Figura 4-10** Comportamento da parte real (R) e da parte imaginária (X) da impedância da amostra S2 (Finemet 5000 Å).

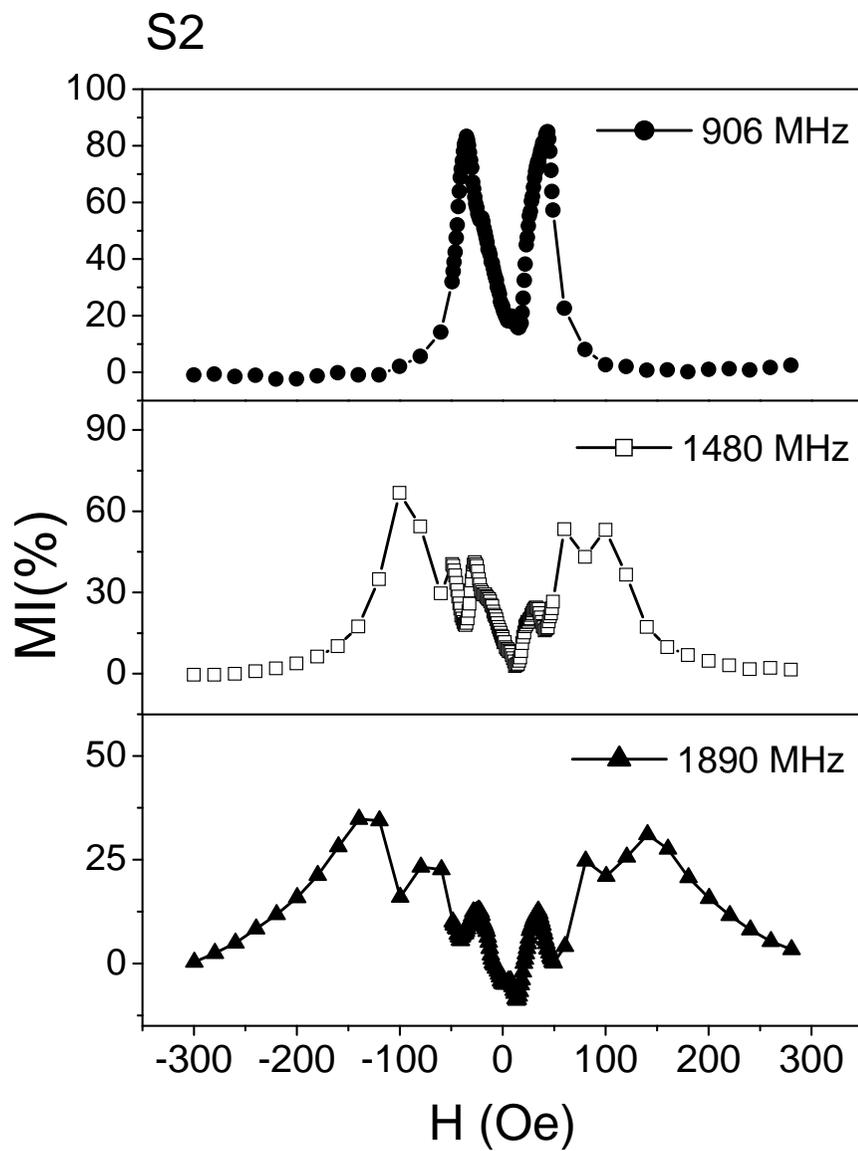


Figura 4-11 Variação percentual do efeito da Magnetoimpedância para a amostra S2

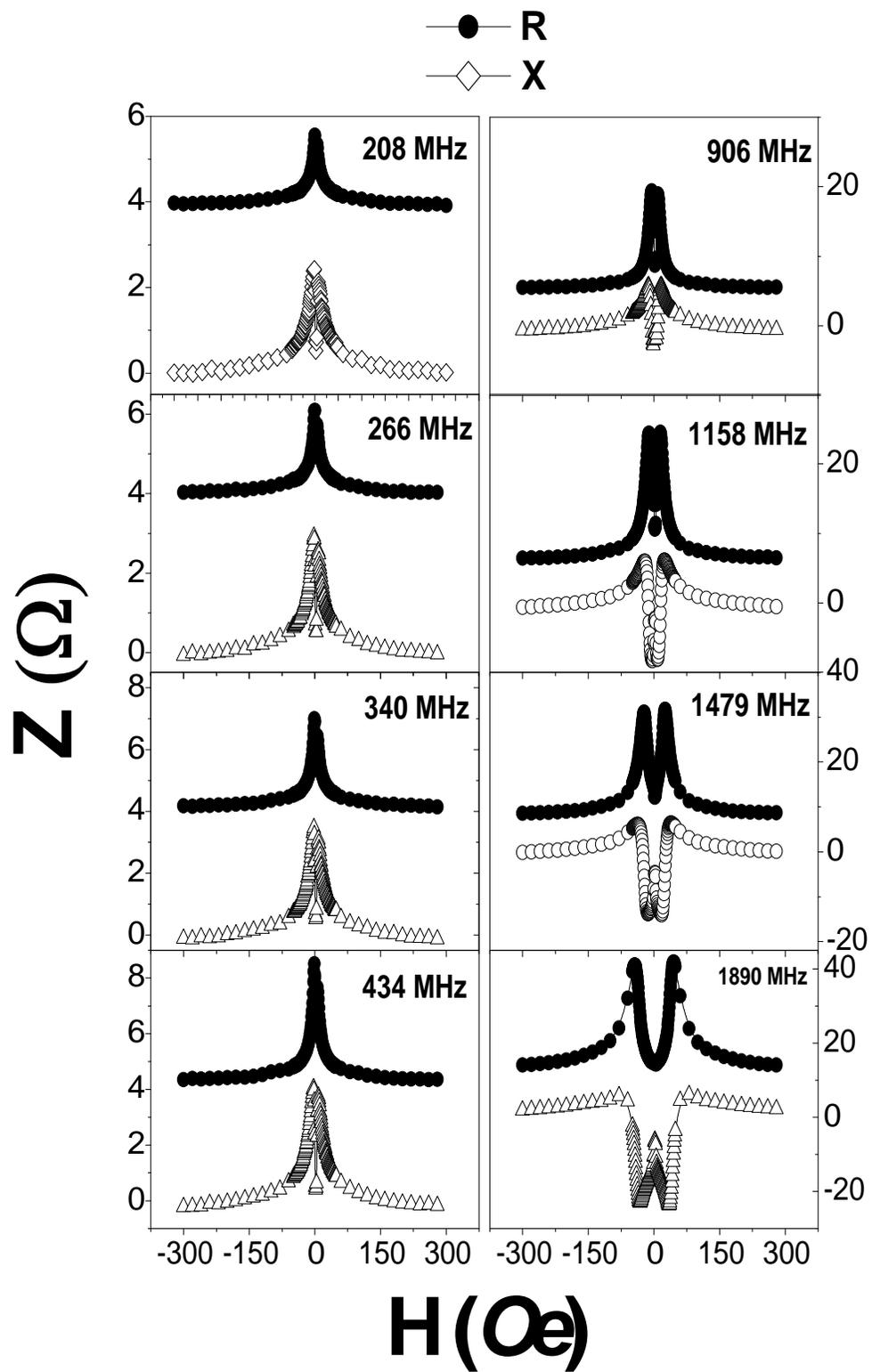
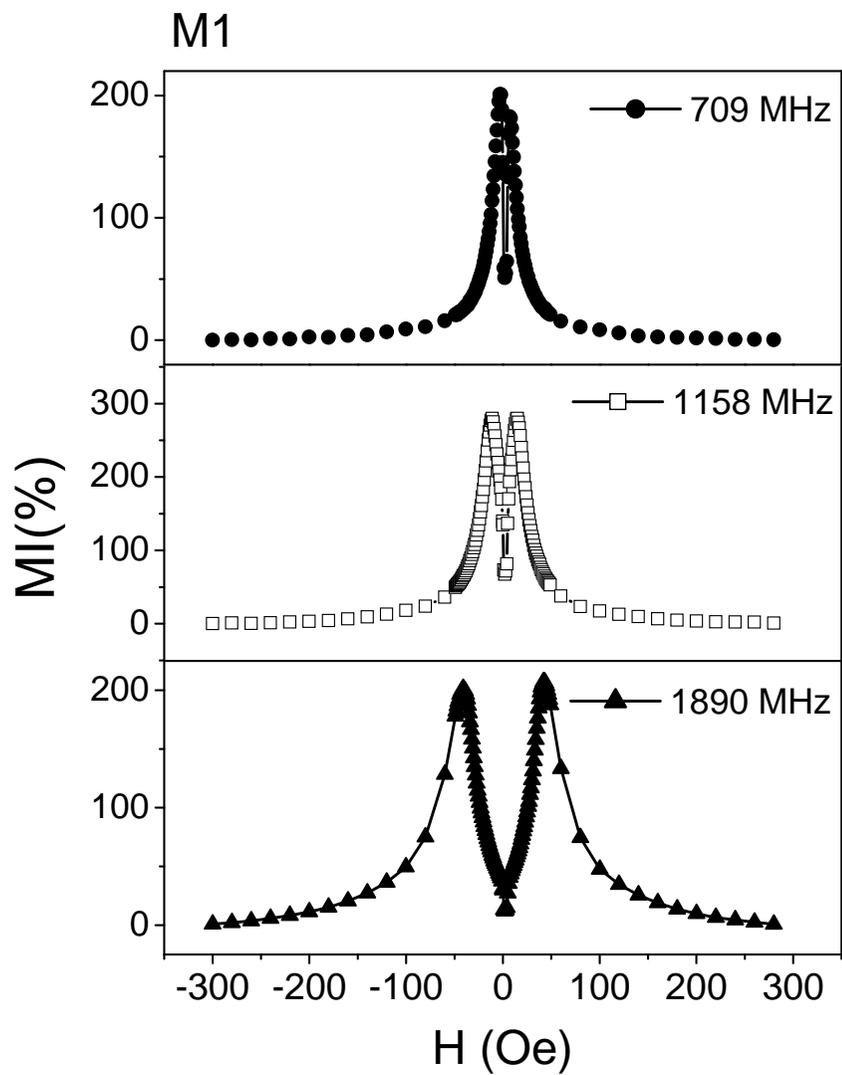
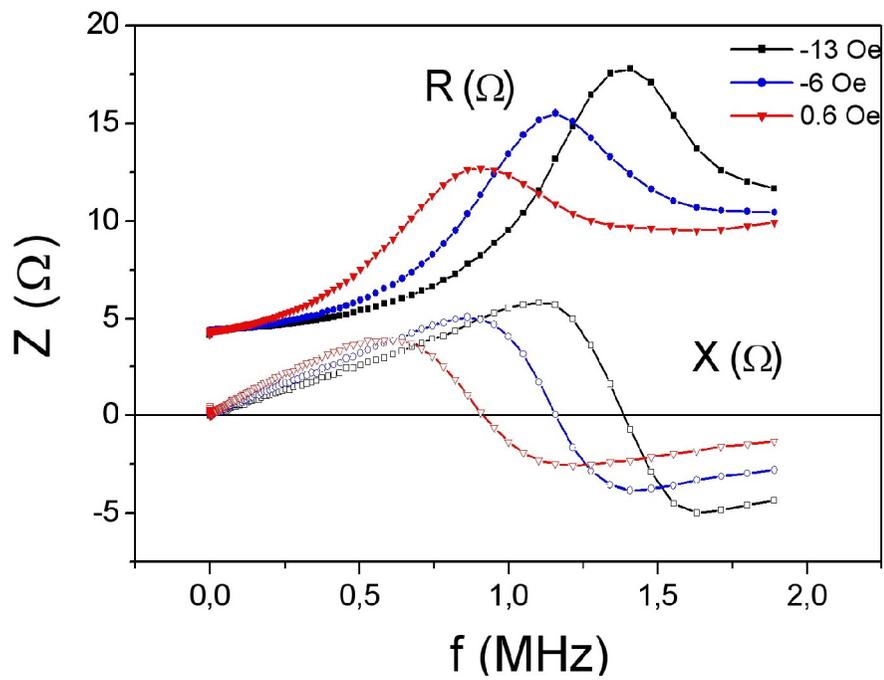


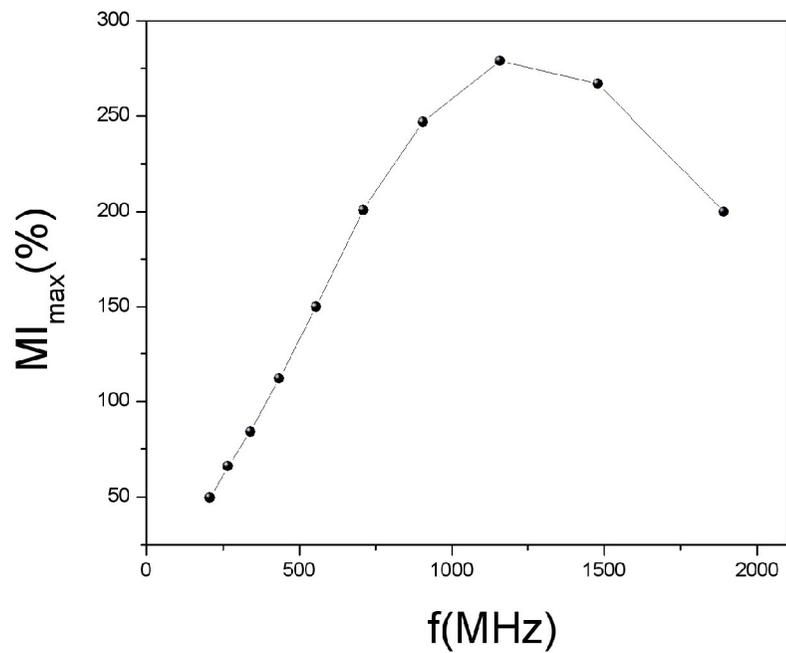
Figura 4-12 Parte real (R) e imaginária (X) da impedância da amostra M (100Å Finemet/10Å Cu) x 50.



**Figura 4-13** Variação percentual da Magnetoimpedância para a amostra M1 para algumas frequências. Pode ser verificado o deslocamento dos picos de MI em função do campo, uma das características da FMR.



**Figura 4-14** Impedância em função da frequência para a amostra M1, onde pode-se verificar a passagem da parte Real ( $R$ ) pelo máximo simultaneamente com a passagem da parte Imaginária ( $X$ ) pelo zero para determinado campo.



**Figura 4-15** Comportamento da variação percentual máxima da MI em função da frequência para a amostra M1.

O comportamento apresentado pela amostra M1 mostra a dependência da magnetoimpedância com o efeito “skin” para altas frequências da corrente de sonda. Este fato era esperado, já que esta amostra não foi estruturada na forma de sanduíche e as maiores variações na MI devem ocorrer a altas frequências, quando o efeito “skin” é predominante.

Na amostra M4 foram tomados dois cortes referentes à direção de deposição do filme (Longitudinal e Transversal), como visto na Figura 4-8 a direção transversal mostra um eixo fácil de magnetização. Com os cortes foram medidos a MI e FMR no analisador de espectro. Utilizando-se a expressão (60) como base teórica, foram plotadas as curvas da *frequência de ressonância* ( $f_R$ )  $\times H$  (Oe). Com o comportamento da curva resultante pôde ser feita uma análise da distribuição da anisotropia da amostra nas duas direções. A Figura 2-14 mostra simulações de como as curvas devem se comportar de acordo com as direções relativa do eixo de anisotropia (eixo fácil) e o eixo que o campo magnético externo está sendo aplicado durante a medida. Extrapolando-se as curvas em seus mínimos, podem-se estimar os campos de anisotropia para cada direção de corte. Os valores obtidos com este método foram comparados com as curvas de magnetização, feitas nas mesmas amostras no VSM. Para a amostra cortada longitudinalmente à deposição, foi verificada uma grande dispersão na anisotropia. Já para a amostra cortada transversalmente (na direção do eixo fácil) esta dispersão foi menor, mas ainda existente, mostrando que a amostra não possui uma anisotropia uniaxial (ver Figura 4-17 e Figura 4-19). Na Figura 4-20 estão representadas as curvas de magnetização e para uma comparação entre os campos  $H_K$ , obtidos pelos dois métodos.

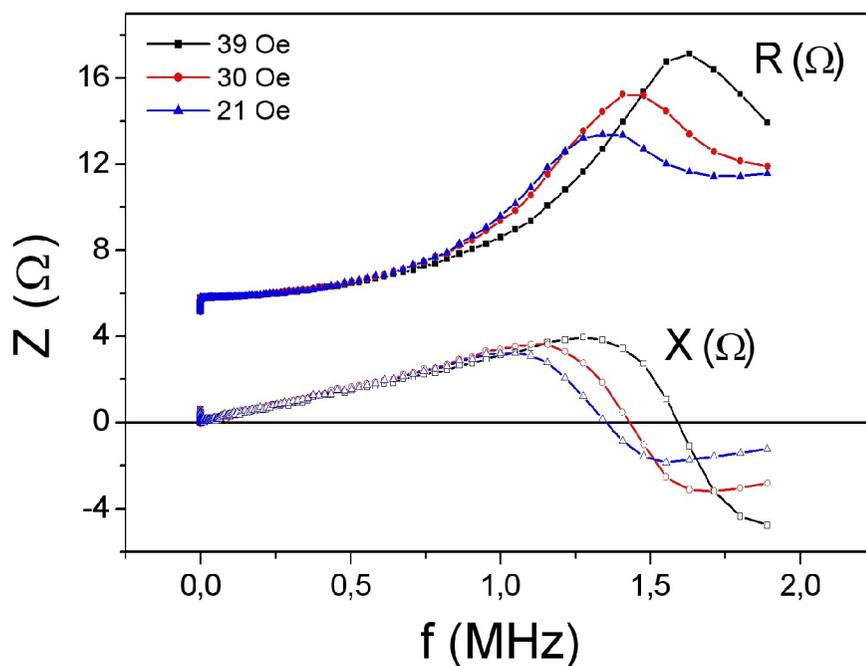


Figura 4-16 Comportamento da Impedância em função da frequência para o corte M4.

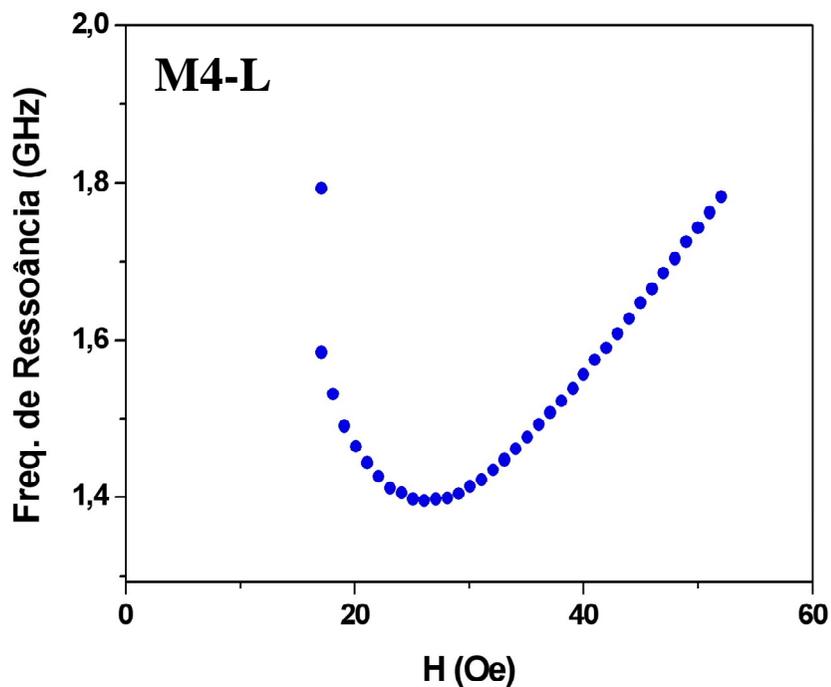


Figura 4-17 Frequência de ressonância versus campo magnético para a amostra M4. Com uma extrapolação no mínimo da curva pode-se fazer uma perspectiva do campo  $H_k$ .

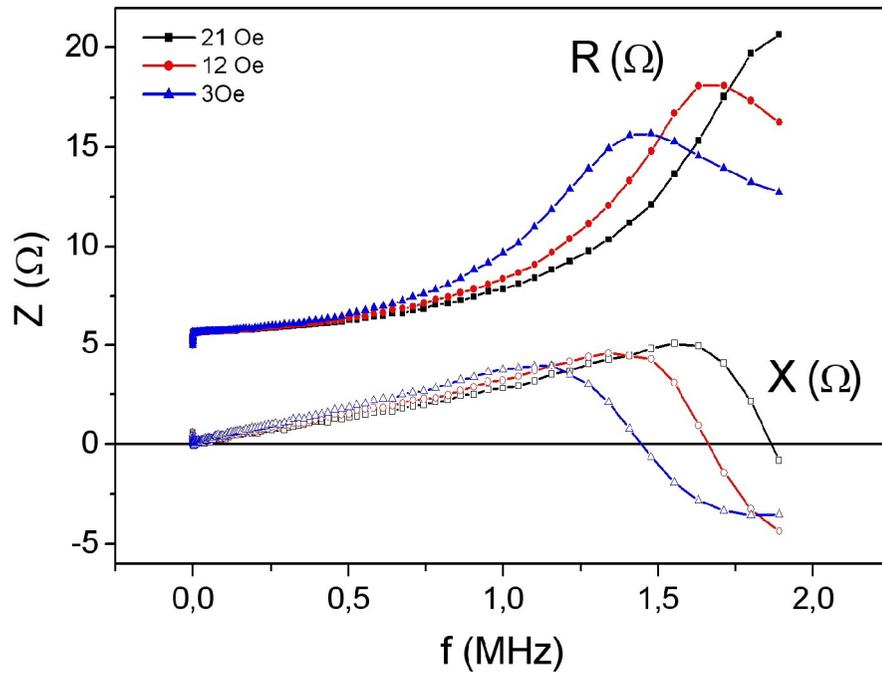


Figura 4-18 Comportamento da impedância em função da frequência para amostra M4-T.

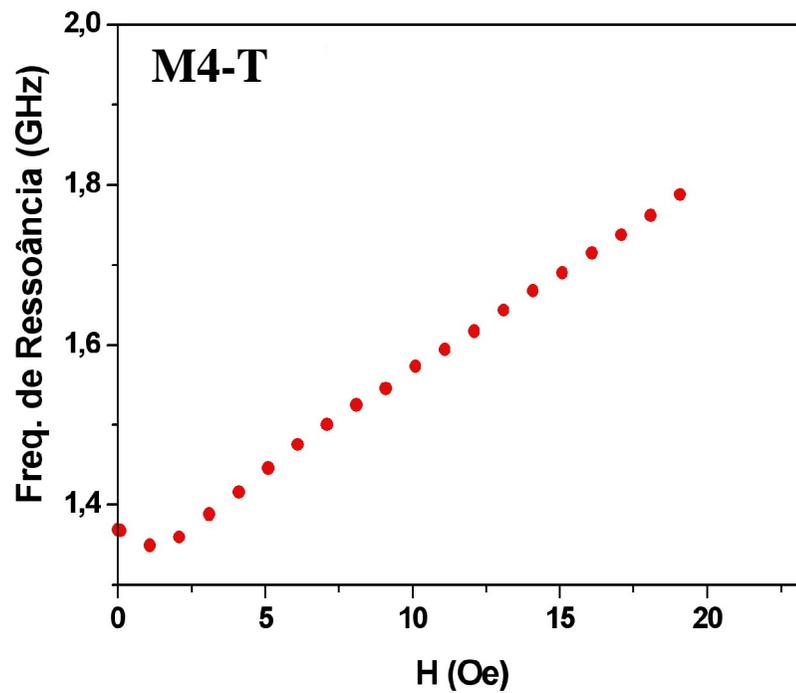
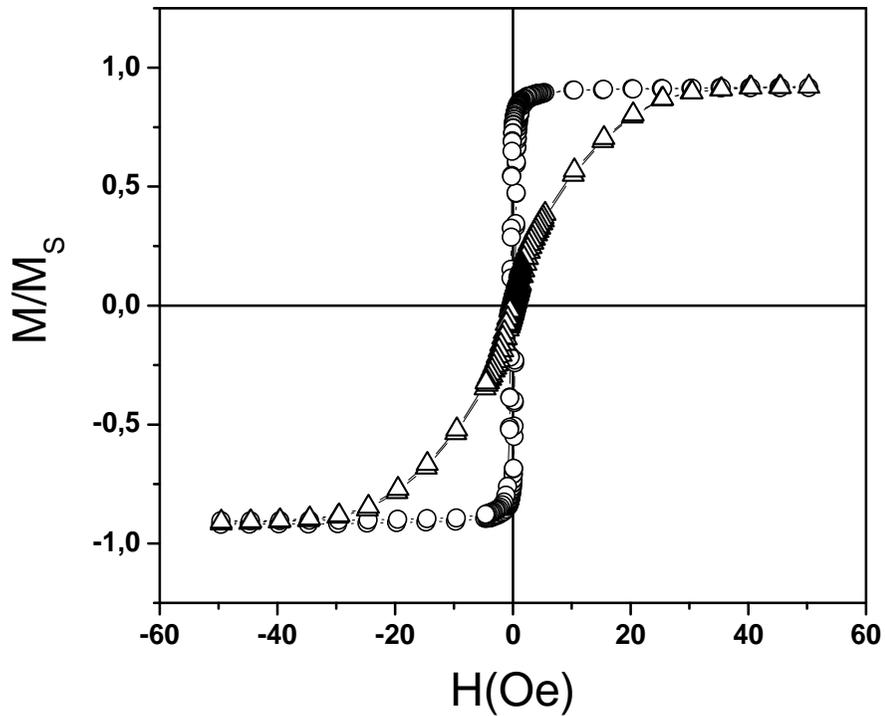


Figura 4-19 Frequência de ressonância versus campo externo para a amostra M4-T. Extrapolando o mínimo, tem-se uma perspectiva do campo  $H_k$ .

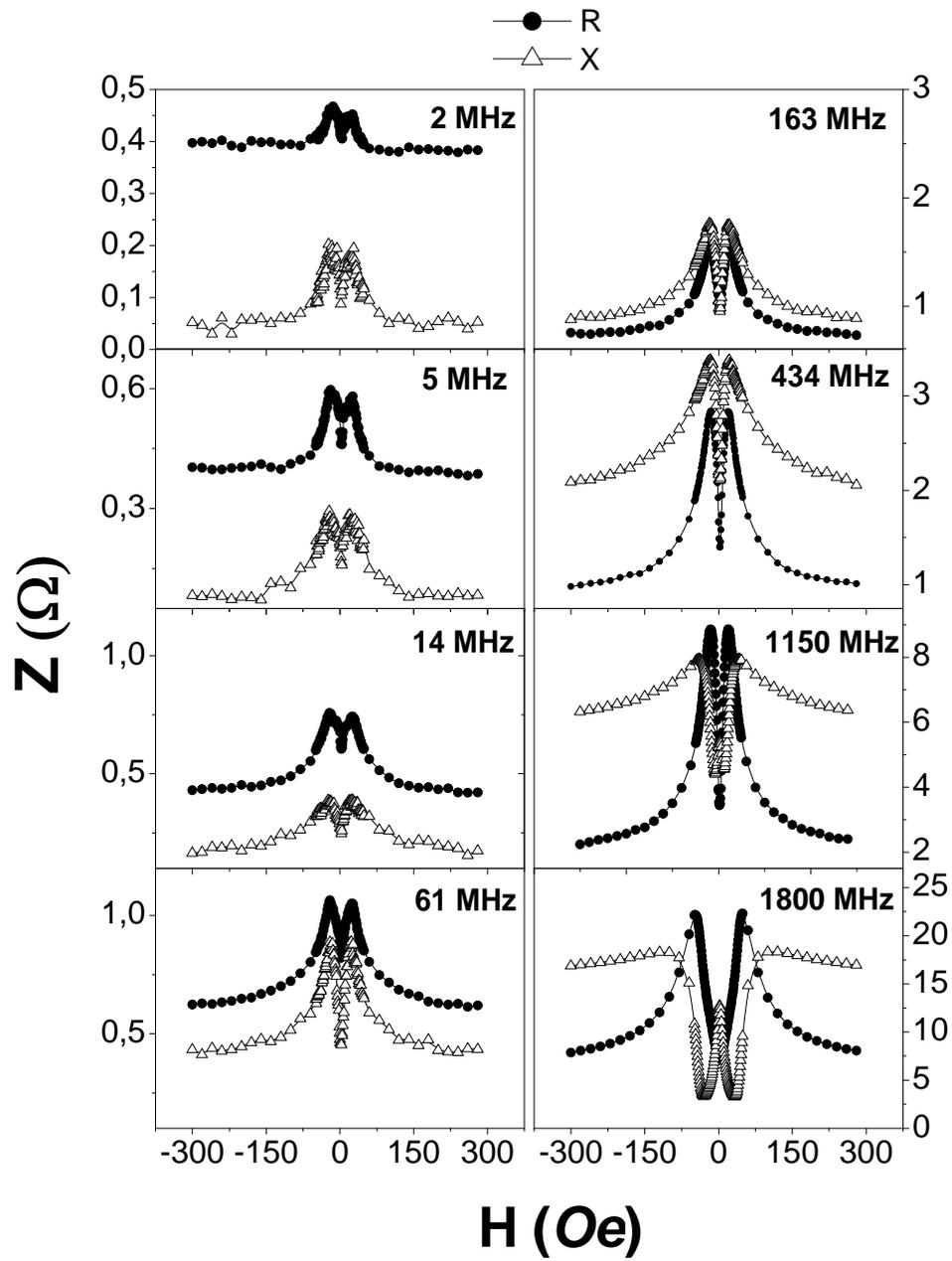


**Figura 4-20** Resultados obtidos no VSM para uma comparação com as curvas  $f_r \times H$ , para o  $H_K$ .

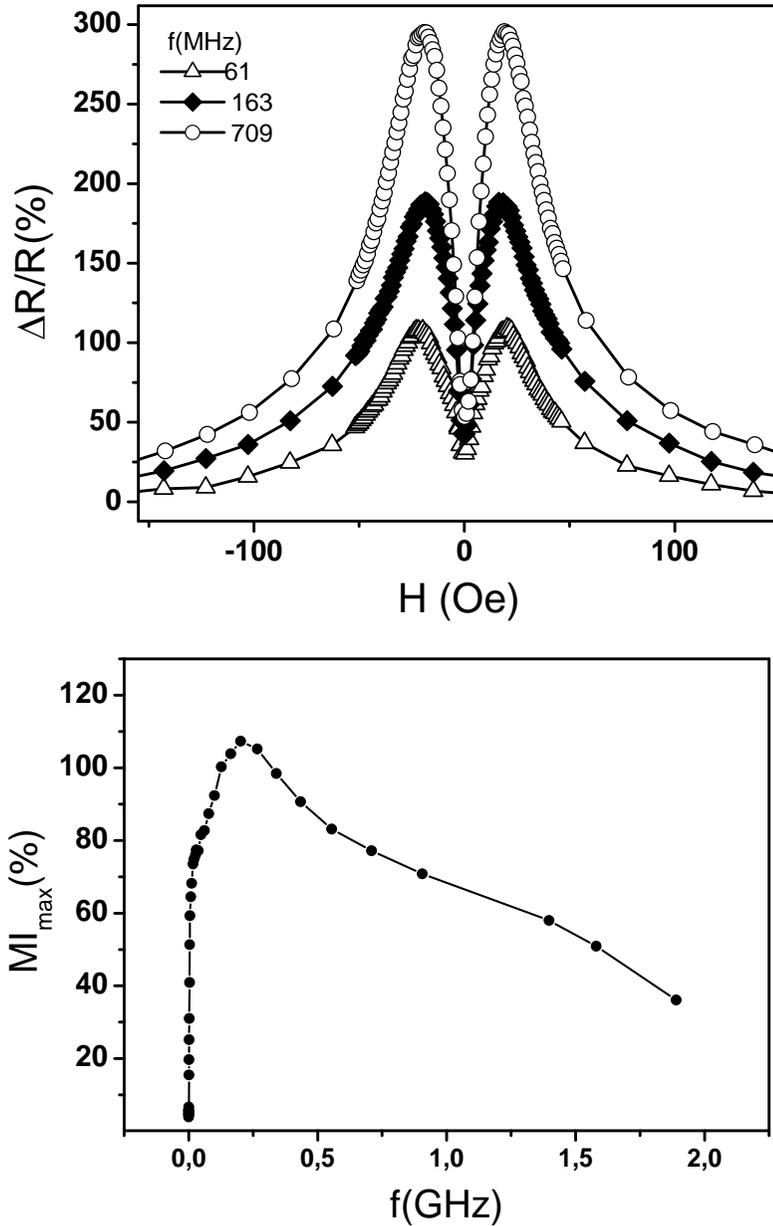
Quando a amostra é estruturada na forma de sanduíche, a diferença de condutividade do caroço de Cobre e do filme multicamada faz com que a corrente alternada seja parcialmente confinada no caroço, e o efeito responsável pela variação da MI é o efeito magnetoindutivo, como discutido na seção 2.5.3. Experimentalmente, isso acarreta as maiores variações percentuais na MI em frequências da ordem de alguns MHz (baixas frequências).

As séries (SW1,SW2,SW3) e (SW4,SW5,SW6) foram produzidas na forma de sanduíches como mostrado na Figura 3-3, os resultados referentes às medidas de MI serão mostrado a seguir

Para a amostra SW4 ( $3\mu\text{m}$  (Finemet/Cu) /  $1\mu\text{m}$ (Cu) /  $3\mu\text{m}$  (Finemet/Cu), os resultados são mostrados na Figura 4-21 e Figura 4-22.



**Figura 4-21** Parte real e imaginária da impedância para alguns valores de frequência, para a amostra SW4.



**Figura 4-22** Comportamento da parte Real da impedância em função do campo e comportamento da parte  $MI_{Max}$  em função da frequência.

Como pode ser visto na Figura 4-22 as maiores variações na MI ocorreram à frequências da ordem de 200 MHz. De acordo com as previsões teóricas, nas quais

foram considerados duas camadas ferromagnéticas (Finemet), sanduichando uma camada de metal (Cu), as maiores variações deveriam ocorrer em frequências da ordem de alguns MHz. Este fato pode ser explicado devido à mudança de uma camada ferromagnética (Finemet) por multicamadas (Finemet/Cu), acarretando assim uma diminuição considerável da resistividade total da camada. Este fator influenciará tanto na magnitude do efeito MI como na localização dos picos [33].

Os comportamentos para as amostras SW5 e SW6 serão mostrados a seguir, onde poderá ser visto que as maiores variações percentuais ocorreram a baixas frequências, o que é previsto pela teoria. O comportamento da MI(%) em função do campo mostrou-se simétrico e não houve o deslocamento dos picos de impedância em função da frequência. Novamente, a magnitude do efeito mostrou-se reduzida, fato este que pode ser explicado pela redução da razão entre as condutividades do caroço e do filmes ferromagnético.

Para todas as amostras mostradas nesta seção não ocorreu qualquer processo de tratamento térmico, devido às características magnéticas apresentadas pela amostra serem favoráveis nas amostras “como feitas”.



## 5 Conclusões e Perspectivas para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi estudado uma nova configuração de filmes ferromagnéticos para o estudo do efeito da MI na forma de sanduíche, utilizando-se o Cu como caroço central e multicamadas Finemet/Cu como elemento ferromagnético. Dentre as conclusões referentes a este trabalho, vale salientar que:

- A estruturação dos filmes ferromagnéticos na forma de multicamadas Finemet/Cu mostrou-se macia magneticamente, porém com uma estrutura amorfa, como pode ser visto através dos espectros de XDR. Este fator possibilitou a eliminação de processos, até então necessário, que são os sucessivos tratamentos térmicos, necessários para obtenção da fase nanocristalina nos materiais Finemet. Este processo acarretava tempo e um sistema para tratamento que exigia um ambiente evacuado.
- Os resultados experimentais concordaram com as previsões teóricas no que se refere a localização dos maiores valores da MI em função da frequência. Tornou-se a magnitude do efeito menor que as previstas, devido a utilização de multicamadas no lugar de monocamadas. Devido às camadas magnéticas serem interfaciadas com Cu a condutividade associada a multicamadas aumentou consideravelmente, acarretando assim uma razão pequena entre a condutividade do núcleo de Cu e das camadas ferromagnéticas dos filmes sanduichados, de modo que os valores de frequências para as maiores variações percentuais aumentaram se comparados com amostras sanduichadas utilizando-se monocamadas de material ferromagnético.
- Com esta configuração pode-se fazer um controle sobre a localização das maiores variações percentuais da MI em função da frequência, fator este importante na construção de sensores devido as limitações no que se refere as frequências da corrente de sonda em um circuito integrado (filme + eletrônica).
- Mostrou-se que a utilização de multicamadas no estudo da MI é uma excelente opção para o uso deste efeito em sensores de filmes finos.

Com a possibilidade de troca de máscara sem a necessidade de abrir a câmara é possível um estudo referente as conseqüências da oxidação natural das amostras quando submetidas a atmosfera durante o processo de produção.

Outra possibilidade é a introdução de um filme isolante elétrico entre a camada ferromagnética e o núcleo, impossibilitando assim uma penetração da corrente no ferromagneto, eliminando as variações no efeito MI devido a profundidade de penetração (efeito skin).

A partir da relação existente entre o efeito MI e o FMR tem-se a possibilidade de estudar característica magnéticas das amostras e compará-las com outras técnicas, buscando assim uma análise mais detalhada. Este efeito tornou-se possível para a faixa de frequência estudada para as multicamadas, onde foi possível obter características importante referentes a dispersão de anisotropia através da análise de  $f_r \times H$ .

## 6 Referências:

- 
- <sup>1</sup> T. Katayama, M. Hirano, Y. Koizumi, K. Kawanishi; T. Tsushima, *IEEE Trans. Magn.*, **13** 1603 (1977).
- <sup>2</sup> S. Foner, *Rev. Sci. Instrum.* **30** 548 (1959).
- J.A. Osborn, *Phys. Rev.* **67** 351 (1945).
- <sup>3</sup> B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Material*, New York (1972)
- <sup>4</sup> T. Kaneyoshi, *Introduction to amorphous magnets* (World Scientific, 1992, pg. ix).
- <sup>5</sup> S. Takayama e T Oi, *J. Appl. Phys.* **50** 4962 (1979).
- <sup>6</sup> H.H. Liebermann e C.D. Graham, *IEEE Trans. Magn.* **MAG-15** 921 (1979).
- <sup>7</sup> C. Appino, C. Beatrice, M. Coisson P. Tiberto, F. Vianai, *J. Mag. Mag. Mater.* **226-230** 1476 (2001)
- <sup>8</sup> M.V.Sedova, A.L.Dyachkov, T.A.Furmanova, N.S. Perov, *J. Non-Cryst. Sol.* **287** 104 (2001)
- <sup>9</sup> Z. Pászti, I.Szabó, É. Kisdi-Koszó, G. Petö, Z.E. Horváth, E. Zsoldos e L.Guczi, *Thin Solid Films* **317** 294 (1998)
- <sup>10</sup> A. Neuweiler, H. Kronmüller, *J. Magn. Magn. Mater.* **177-181** 1269 (1998)
- <sup>11</sup> D. García, J.L. Muñoz, G. Kurlyandskaya, M. Vásquez, M. Ali, M.R.J. Gibbs, *J. Magn. Magn. Mater* **191** 339 (1999)
- <sup>12</sup> G Herzer, *J. Mag. Mag. Mater* **112**, 258 (1992)
- <sup>13</sup> G Herzer, *IEEE Trans. Magn.* **26** 1367 (1990)
- <sup>14</sup> R. Alben, J.J. Becker e M.C.Chi, *J. Appl Phys.* **49** 1653 (1978)
- <sup>15</sup> M.N. Baibich, *et al*, *Phys Rev. Lett.* **61** 2472 (1988).
- <sup>16</sup> E.P. Harrison, G. L.Turney e H. Rowe, *Nature* **135** 961 (1935).
- <sup>17</sup> F.L.A. Machado, B.Lopes da Silva e E. Montarroy, *J. Appl. Phys.* **73 (10)**, 6387 (1993)
- <sup>18</sup> K. V. Rao, F. B. Humphrey e J. L. Costa-Kramer, *J. Appl. Phys.* **76 (10)** 6204 (1994).
- <sup>19</sup> J. Valázquez, M. Vasquez, D. X. Chen e A. Hernando, *Phys. Rev. B* **50 (22)** 16737 (1994).
- <sup>20</sup> M. Knobel, M. L. Sanchez, J. Velásquez e M. Vazquez, *J. Phys.: Condens. Matter.* **7** 115 (1995).
- <sup>21</sup> L.V. Panina e K. Mohri, *J. Magn. Magn. Mat.* **151** 137 (1996).

- 
- <sup>22</sup> K. Mohri, L.V. Panina, T. Uchiyama, K. Bushida e M. Noda, *IEEE Trans. Magn.* **31** (2) 1266 (1995).
- <sup>23</sup> D. P. Makhnovskiy, L. V. Panina e D. J. Mapps, *Appl. Phys. Lett.* **77** (1) 121 (2000)
- <sup>24</sup> R.B. da Silva, A.M.H. de Andrade, A.M. Severino, L.F.Schelp, R.L.Sommer, *J. Magn. Mater.* **249** 288 (2002)
- <sup>25</sup> R.L. Sommer e C.L. Chien, *Phys. Rev. B* **53** (10)
- <sup>26</sup> A.D. Santos, L. G. Melo, C.S. Martins, F. P. Missel, Y. Souche, F.L.A. Machado e S.M. Rezende, *J. Appl. Phys.* **79**(8) 6546 (1996)
- <sup>27</sup> K.R. Pirota, L. Kraus, M. Knobel, P.G. Pagliuso e C. Rettori, *Phys. Rev. B* **60** (9) 6685 (1999)
- <sup>28</sup> R.L. Sommer e C. S. Chien, *Appl. Phys. Lett.* **67** (22) 3346 (1995)
- <sup>29</sup> A. Antonov, S Gasedtsky, A. Granovsky, A. D'yatckov, M Sedova, N. Perov, N. Usov, T. Furmanova, A. Lagar'kov, *Phys. A* **241** 414 (1997)
- <sup>30</sup> A.M. de Andrade, R.B.da Silva, M.A.Corrêa, A.M. Severino, R.L.Sommer, *J. Magn. Mater. Mater.* **In Press**.
- <sup>31</sup> K. Hika, L.V. Panina e K. Mohri, *IEEE Trans. Mag.* **32** (5) 4594 (1996)
- <sup>32</sup> T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, J. Sakata e Y. Taga, *IEEE Trans. Mag.* **32** (5) 4965 (1996)
- <sup>33</sup> T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, e Y. Taga, *IEEE Trans. Mag.* **33** (5) 4367 (1997)
- <sup>34</sup> S. Xiao, Y. Liu, Y. Daí e L. Zhang, *J. Appl. Phys.* **85** (8) 4127 (1999)
- <sup>35</sup> S Xiao, Y. Liu, S. Yan, Y. Daí, L. Zhang e L. Mei, *Phys. Rev. B* **61** (8) 5734 (2000)
- <sup>36</sup> L.V. Panina e K. Mohri, *Sens. Act.* **81** 71 (2000)
- <sup>37</sup> L.V. Panina, D. P. Makhnovskiy , D.J. Mapps e D. S. Zarechnyuk, *J. Appl. Phys.* **89** (11) 7221 (2001)
- <sup>38</sup> G.V. Durllyandskaya, J. L. Muñoz, J.M. Barandiarán, A. García-Arribas, A.V. Svalov, V.O. Vas'Kovskiy, *J. Magn. Mater.* **242-245** 291 (2002)
- <sup>39</sup> F. Amalou e M.A.M. Gijs, *Appl. Phys. Lett.* **81** (9) 1654 (2002)
- <sup>40</sup> F. Amalou e M.A.M. Gijs, *J. Appl. Phys.* **95** (3) 1364 (2004)
- <sup>41</sup> K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa e H. Yoshida, *IEEE Trans. Magn.* **29** (2) 1266 (1993)

- 
- <sup>42</sup> R.S. Beach e A. E. Berkowitz, *Appl. Phys. Lett.* **64** 3652 (1994)
- <sup>43</sup> A. Yelon, D. Menard, M. Britel e P. Ciureanu, *Appl. Phys. Lett.* **69 (20)** 3084 (1996)
- <sup>44</sup> L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, M. Noda e K. Bushida, *IEEE Trans. Magn.* **31 (2)** 1249 (1995)
- <sup>45</sup> M. R. Spiegel, Coleção Schaum, *McGraw-Hill*
- <sup>46</sup> L. Kraus, *J. Magn. Magn. Matter* **195** 764 (1999)
- <sup>47</sup> C Kittel, Introdução a Física do Estado Sólido, **5ª edição**, *guanabara dois*
- <sup>48</sup> D. Ménard, M. Britel, P. Ciureanu e A. Yelon, *J. Appl. Phys.* **84 (5)** 2805 (1998)
- <sup>49</sup> C. Kittel, *Phys. Rev.* **73 155** (1948)
- <sup>50</sup> G.F. Hughes, *J. Appl. Phys.* **54** 4168 (1983)
- <sup>51</sup> L. D. Landau e E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media* (pergamon, Oxford) (1975)
- <sup>52</sup> L.I.Maissel, R. Glang, *Handbook of thin film technology*, New York (1983).
- <sup>53</sup> G.N. Jackson, *Thin Solid Films*, **5** 209 (1970) .
- <sup>54</sup> S. Foner, *Rev. Sci. Instrum.* **30** 548 (1959).
- <sup>55</sup> J. A. Gerber, W.L.Burmester, D.J.Selimyer, *Rev. Sci. Instrum* **53 (5)** 691 (1982).
- <sup>56</sup> J. Mallinson, *J. Appl. Phys.* **37** 2514 (1966).
- <sup>57</sup> Ashcroft/Mermin, *Solid States Phsics*, (brooks/cole)

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.