

## 5

### Caracterização Experimental das Fitas GMI

#### 5.1.

#### Métodos e Procedimentos

Amostras GMI, do tipo LMI, em forma de fita, foram caracterizadas de forma a se verificar as variações de módulo ( $|Z|$ ) e fase ( $\theta$ ) da impedância em função de um campo magnético externo CC aplicado ( $H$ ). Foram analisadas amostras, fornecidas pelo Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com as seguintes composições:  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  e  $\text{Co}_{70,4}\text{Fe}_{4,6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  [14-15].

O objetivo central é o desenvolvimento de um transdutor magnético GMI de alta sensibilidade, capaz de detectar campos ultra fracos. Este transdutor utiliza as fitas GMI como seus elementos sensores, conseqüentemente deseja-se otimizar (maximizar) suas sensibilidades de módulo e/ou fase, respectivamente  $d|Z|/dH$  e  $d\theta/dH$ . Por sua vez, a sensibilidade é tipicamente afetada por uma série de parâmetros, como a amplitude, frequência e nível CC da corrente de excitação; dimensões (comprimento, largura, espessura) das amostras GMI; campo magnético de polarização (gerado por uma fonte externa a fim de garantir que o sensor opere em sua faixa mais sensível); entre outros. Logo, de forma a se verificar qual conjunto de parâmetros gera as sensibilidades ótimas de módulo e fase, realizaram-se análises de alguns dos fatores que influenciam o comportamento das amostras.

Assim, realizaram-se análises para correntes de excitação com níveis CC variando entre 0 mA e 100 mA e com frequências de 100 kHz a 30 MHz. Também foi estudada a influência do comprimento da fita, analisando-se amostras com 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm. Nos resultados apresentados, manteve-se a amplitude da corrente CA fixa em 15 mA, pois percebeu-se que variações desse parâmetro pouco afetam o comportamento das amostras GMI [32,34-35,37].

Nesse capítulo, a corrente,  $i_C$ , utilizada para condicionar as amostras GMI, é expressa de acordo com a eq. (24). A corrente  $i_C$  é denominada corrente de condicionamento ou de excitação.

$$i_C = I_{CC} + I_{ca} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (24)$$

onde  $I_{CC}$  é o nível CC da corrente  $i_C$ , e  $I_{ca}$  é a amplitude e  $f$  é a frequência da componente alternada (CA) de  $i_C$ .

Durante os procedimentos de caracterização, as fitas GMI são colocadas no centro de uma Bobina de Helmholtz, como indicado na Fig. 40, de forma que o campo gerado pela Bobina seja longitudinal ao comprimento das fitas. Ainda, o conjunto fita-bobina é posicionado de forma a garantir que a direção do campo magnético da Terra seja perpendicular ao comprimento das fitas e esteja “entrando” no plano do papel (Fig. 40). Assim, minimiza-se a influência deste nas medições (as fitas GMI utilizadas são do tipo LMI, ou seja, a sensibilidade a campos perpendiculares às mesmas é muito baixa) [37].

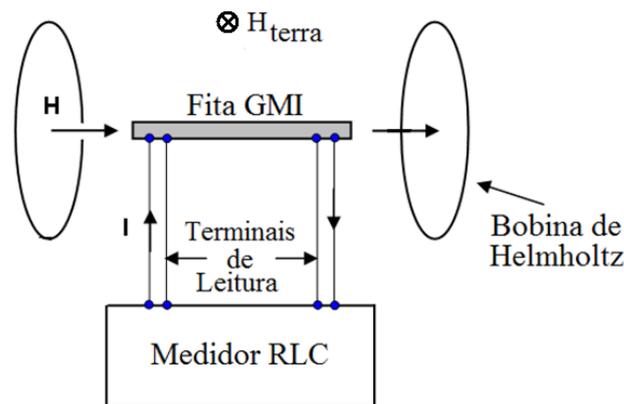


Figura 40 – Diagrama de Blocos do sistema utilizado na caracterização das fitas GMI.

As medições de módulo e fase foram realizadas com auxílio de um Medidor RLC (Agilent – 4285A), o qual, também, foi o responsável pelo condicionamento (CC e CA) das fitas. Por sua vez, as variações do campo magnético gerado pela bobina de Helmholtz foram controladas por uma fonte de corrente CC, de acordo com a eq. (25).

$$H = \frac{8\mu_0 NI}{5\sqrt{5}R} \approx 9 \times 10^{-3} \frac{NI}{R} [Oe] \quad (25)$$

onde  $H$  é a magnitude do campo magnético no centro das bobinas,  $I$  é a corrente CC que percorre as espiras,  $N$  é o número total de espiras em cada bobina e  $R$  é o raio das bobinas.

A Bobina de Helmholtz disponível no Laboratório de Biometrologia (PUC-Rio), possui 48 espiras em cada bobina e um raio de 15 cm. Logo:

$$H [\text{Oe}] = 2,877 \cdot I [A] \quad (26)$$

A Fig. 41 apresenta a Bobina de Helmholtz utilizada no processo de caracterização das amostras, com uma fita GMI em seu centro.

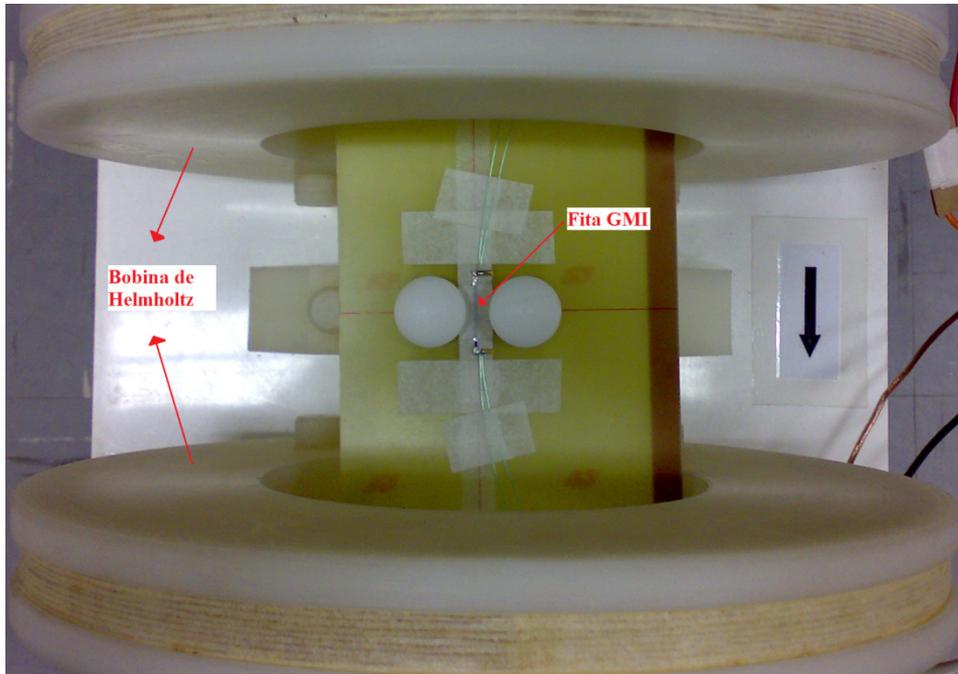


Figura 41 – Bobina de Helmholtz com a fita GMI posicionada em seu centro.

As curvas de caracterização da impedância (módulo e fase) das amostras GMI em função do campo magnético externo, apresentadas nesse capítulo, foram levantadas considerando-se a histerese. Ou seja, as medições de impedância começam na situação em que a componente do campo magnético paralela à fita é nula ( $H_{\text{início}} = 0$ ). Em seguida, aumenta-se o campo até um valor máximo ( $H_{\text{máx}}$ ) e, na sequência, reduz-se o campo, passando por  $H_{\text{início}} = 0$ , até um valor mínimo  $H_{\text{min}} = -H_{\text{máx}}$ . Finalmente, a fim de completar o ciclo de histerese, percorre-se o trajeto de  $H_{\text{min}}$  a  $H_{\text{início}}$ .

Dessa forma, para cada valor do campo magnético tem-se dois valores de módulo e dois valores de fase, exceto para os extremos da curva  $H_{\text{máx}}$  e  $H_{\text{min}}$ , para os quais tem-se apenas um valor de módulo e outro de fase, e para  $H_{\text{início}}$ , onde se obtêm 3 valores de módulo e outros 3 de fase. A Fig. 42 exemplifica a curva de histerese.

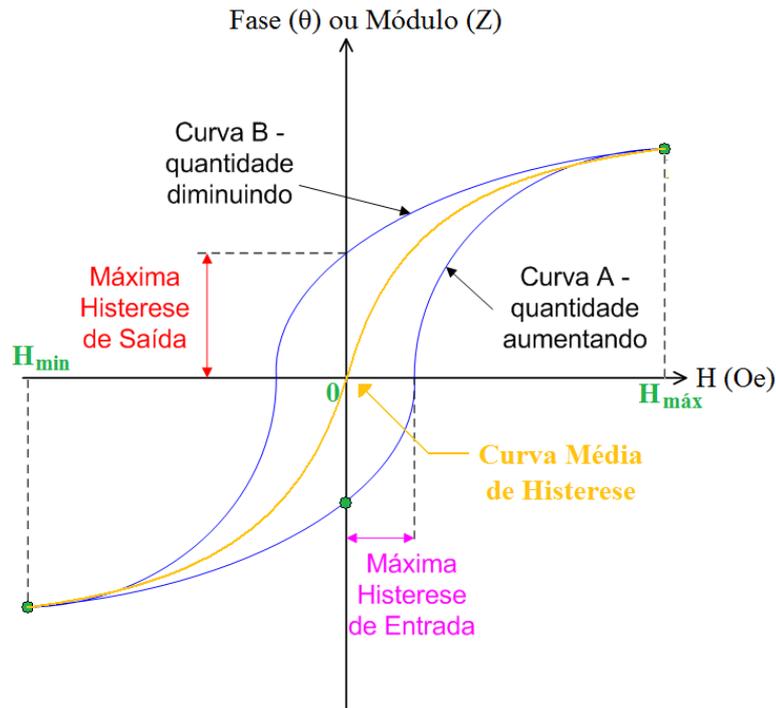


Figura 42 – Curva de Histerese.

Destaca-se que as curvas de caracterização apresentadas nesse capítulo, são a “curva média de histerese” conforme retratado na Fig. 42. Esta curva é obtida ponto-a-ponto fazendo-se as médias aritméticas dos valores de módulo ou fase obtidos experimentalmente para um mesmo valor do campo magnético externo. Ainda, são apresentados gráficos do valor absoluto da histerese ponto-a-ponto e do valor percentual da histerese ponto-a-ponto, para as características de módulo ( $|Z|$ ) e fase ( $\theta$ ) da impedância em função do campo magnético ( $H$ ). Assim, convencionando-se denominar a “curva B” (Fig. 42) como curva de carga e a “curva A” (Fig. 42) como curva de descarga, define-se a histerese absoluta ponto-a-ponto como:

$$\begin{aligned}
 \text{Módulo} \Rightarrow \text{Hist}_{abs}(H_i) &= \left| \frac{|Z|_{\text{carga}}(H_i) - |Z|_{\text{descarga}}(H_i)}{2} \right| \\
 \text{Fase} \Rightarrow \text{Hist}_{abs}(H_i) &= \left| \frac{\theta_{\text{carga}}(H_i) - \theta_{\text{descarga}}(H_i)}{2} \right|
 \end{aligned} \tag{27}$$

Por sua vez, a Histerese percentual é expressa como:

$$\begin{aligned} \text{Módulo} \Rightarrow \text{Hist}_{per}(H_i) &= 100 \times \left| \frac{|Z|_{carga}(H_i) - |Z|_{descarga}(H_i)}{|Z|_{médio}(H_i)} \right| \\ \text{Fase} \Rightarrow \text{Hist}_{per}(H_i) &= 100 \times \left| \frac{\theta_{carga}(H_i) - \theta_{descarga}(H_i)}{\theta_{médio}(H_i)} \right| \end{aligned} \quad (28)$$

onde  $|Z|_{médio}(H_i)$  é o valor do módulo da impedância no ponto  $H_i$  obtido pela “curva média de histerese” de módulo e  $\theta_{médio}(H_i)$  é o valor da fase da impedância no ponto  $H_i$  obtido pela “curva média de histerese” de fase.

Por sua vez, ressalta-se que uma das técnicas de soldagem utilizada foi à solda de ponto. Esta foi empregada objetivando a conexão das extremidades das fitas GMI aos terminais elétricos - estiletos de metal amarelo (p. ex. latão) -, de forma a viabilizar a realização das medições experimentais.

Alguns aspectos críticos do processo de solda de ponto empregado são destacados, tendo em vista a reprodutibilidade do mesmo:

- A potência do equipamento deve ser ajustada para 15 J, visto que potências mais altas podem vaporizar a fita GMI e potências mais baixas podem não ser suficientes para estabelecimento de um bom contato elétrico entre a fita e o terminal de solda.
- Deve-se passar álcool isopropílico nas extremidades da fita GMI e nos terminais de solda a fim de retirar excessos de gordura e poeira, propiciando uma solda mais consistente.
- O contato da fita com o terminal de solda deve ser feito pela parte brilhante da fita (as fitas GMI analisadas possuem uma face opaca e outra brilhante), pois os resultados práticos mostram dessa forma que se consegue uma melhor aderência.
- Durante o procedimento de soldagem, recomenda-se que seja feita, com o eletrodo de cobre, tanta pressão quanto necessário sobre a fita e o terminal de solda, de modo a evitar a formação de arcos voltaicos no instante da solda.
- Para uma fixação consistente recomenda-se que a solda seja feita com 4 pontos em cada extremidade da fita. Um número pequeno de pontos torna o contato mecânico (“fita-terminal”) muito frágil, sendo facilmente rompido. Por outro lado, um número excessivo de pontos aumenta a

probabilidade da fita vaporizar na região soldada, pois aumenta-se o risco de se reaplicar a solda em regiões muito próximas.

- Deve-se utilizar um eletrodo de cobre com formato de “ponta de flecha”, pois concentra-se a descarga numa pequena área.

Após o processo de solda de ponto, responsável pela conexão elétrica da fita aos terminais elétricos (metal amarelo), aplica-se solda de estanho-chumbo (60% de Sn e 40% de Pb) nos terminais elétricos de forma a se realizar a conexão dos fios. As Figs. 43 e 44 apresentam detalhes do processo de solda.

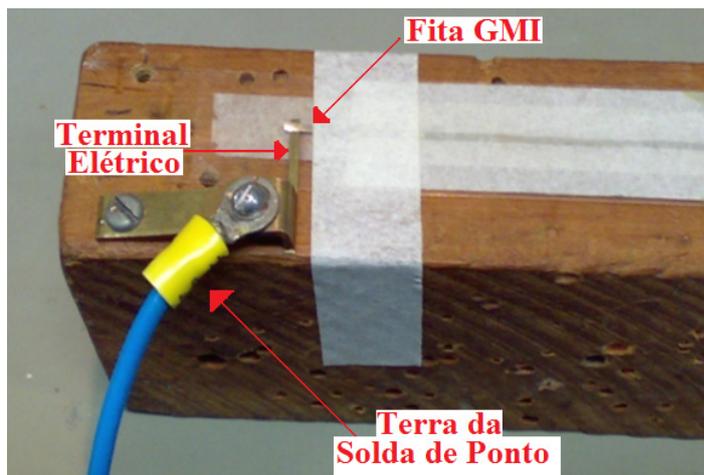


Figura 43 – Configuração do aparato para realização da solda de ponto – Vista 1.

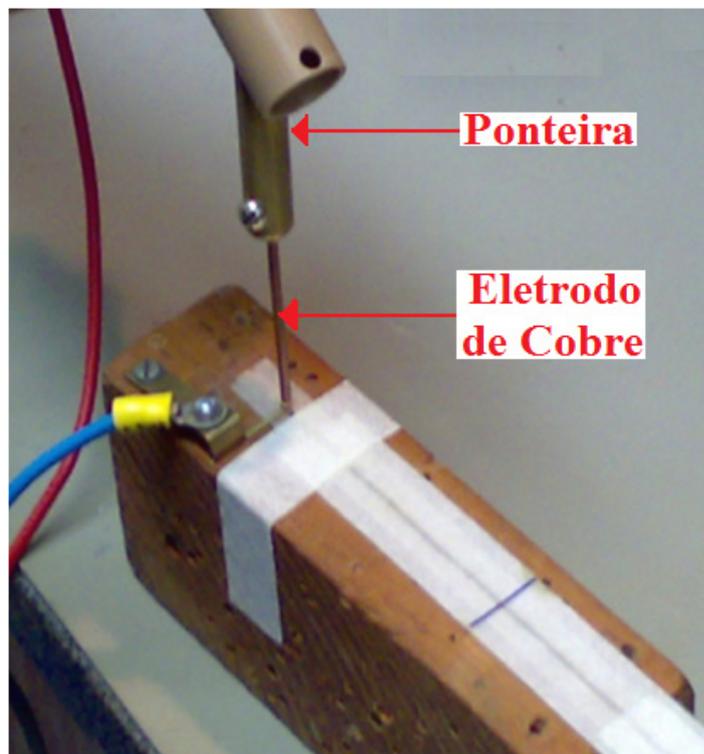


Figura 44 – Configuração do aparato para realização da solda de ponto – Vista 2.

Em alguns casos indicados no texto, realizou-se a conexão das fitas GMI aos terminais elétricos sem nenhum tipo de solda, processo este, aqui, denominado conexão por contato mecânico. Ou seja, posiciona-se cada extremidade da fita GMI entre dois terminais metálicos de forma que os mesmos comprimam a fita, e assim se realiza o contato elétrico entre os terminais metálicos e a fita. Em seguida, se aplica a solda de estanho-chumbo (60% de Sn e 40% de Pb) nos terminais metálicos de forma a possibilitar a conexão dos fios. As Figs. 45 e 46 exibem a configuração implementada.

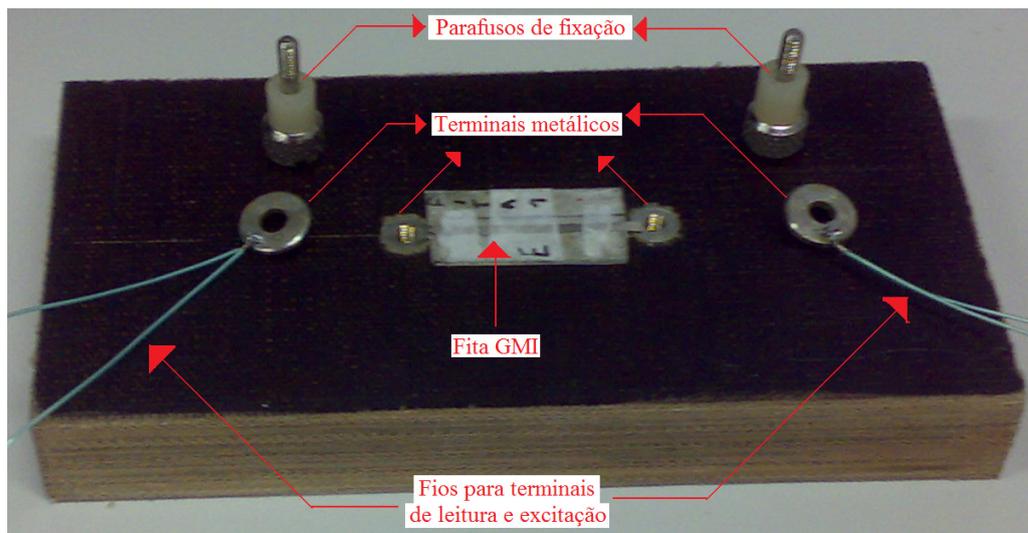


Figura 45 – Configuração do aparato montado para conexão por “contato mecânico” da fita GMI aos terminais elétricos – Vista 1.

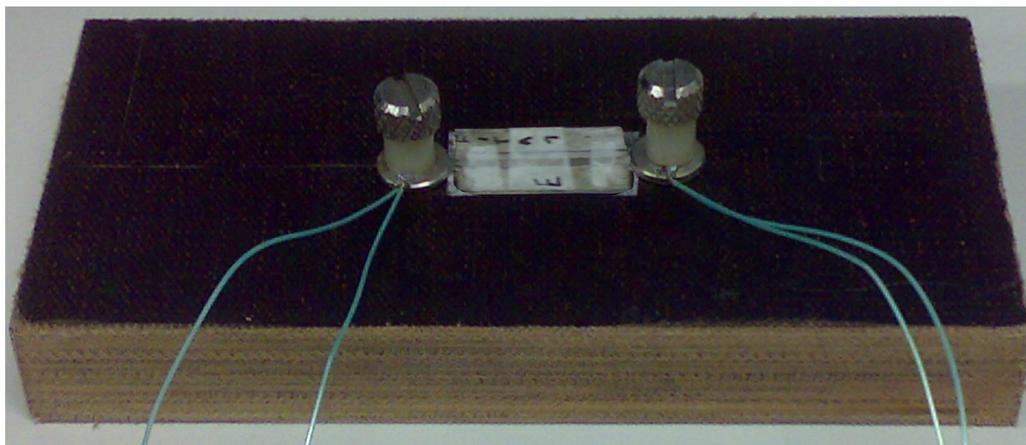


Figura 46 – Configuração do aparato montado para conexão por “contato mecânico” da fita GMI aos terminais elétricos – Vista 2.

## 5.2. Resultados Experimentais

O objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um transdutor magnético para detecção de campos biomagnéticos, em especial o campo magnético cardíaco. Para tal fim, deve-se maximizar a sensibilidade do magnetômetro, visto que a intensidade dos campos biomagnéticos é extremamente baixa, sendo que o valor máximo da densidade de fluxo magnético associada ao campo magnético cardíaco situa-se em torno de 500 pT [10,30,137]. Dessa forma, percebe-se que a otimização (maximização) da sensibilidade dos elementos sensores (fitas GMI) é essencial para que se alcancem os objetivos propostos.

Ressalta-se que a maior parte dos transdutores, magnéticos ou não, são baseados na variação do módulo. Talvez por essa razão, do que se depreende da literatura [14-17,19,21,23,127-137], o transdutor magnético GMI desenvolvido e aqui apresentado é o primeiro a se utilizar das características de fase da impedância desse efeito. Logo, os resultados experimentais obtidos são expostos de modo a tornar possível uma comparação direta entre o módulo e a fase da impedância, explicitando as peculiaridades de cada um [32]. Ainda, a fase da impedância do efeito GMI, a qual, talvez pela hipotética falta de aplicabilidade, é muito menos estudada do que o módulo, é analisada em detalhes nessa dissertação. As análises apresentadas evidenciam muitas vantagens providas a magnetômetros GMI baseados na fase, ao invés do módulo [32,37,39].

Destaca-se que as análises explicitadas em todas as subseções a seguir são baseadas em amostras da fita GMI de composição  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  com solda de ponto, excetuando-se a subseção 5.2.5. Nesta, apresentam-se análises realizadas tanto com solda de ponto, quanto com conexão por contato mecânico, a fim de se concluir sobre a homogeneidade das amostras. Amostras de fitas com composição  $\text{Co}_{70,4}\text{Fe}_{4,6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  também foram preliminarmente estudadas, e alguns dos resultados destas análises são apresentados em outros pontos da dissertação.

### 5.2.1. Influência da Frequência da Corrente de Excitação

#### 5.2.1.1. Módulo da Impedância

As Figs. 47 a 50 evidenciam a dependência do comportamento do módulo da impedância do efeito GMI em relação à frequência da corrente de condicionamento, para fitas com 1 cm (Fig. 47), 3 cm (Fig. 48), 5 cm (Fig. 49) e 15 cm (Fig. 50). Os gráficos retratam o módulo da impedância em função do campo externo CC aplicado longitudinalmente às amostras, sendo que  $Z_0$  é o valor do módulo da impedância na situação em que a componente do campo magnético paralela ao comprimento da fita é nula.

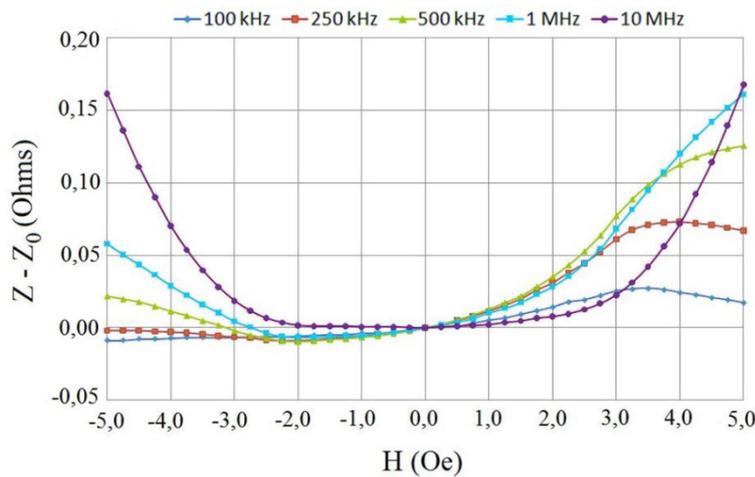


Figura 47 – Módulo da impedância de uma fita GMI de 1 cm submetida a  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde f assume os valores 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 1 MHz e 10 MHz.

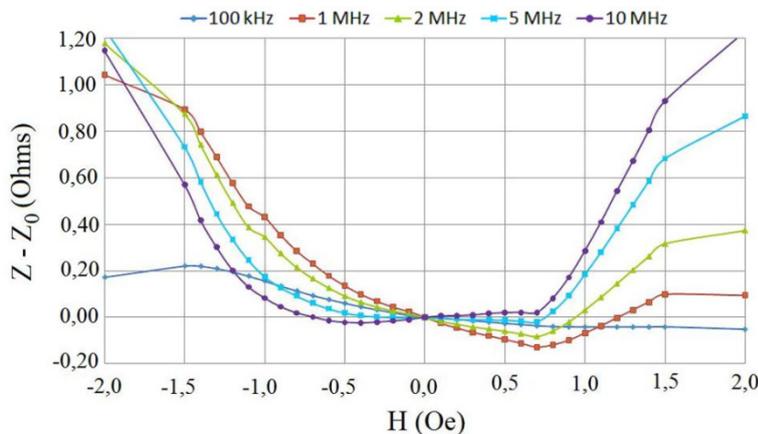


Figura 48 - Módulo da impedância de uma fita GMI de 3 cm submetida a  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde f assume os valores 100 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz e 10 MHz.

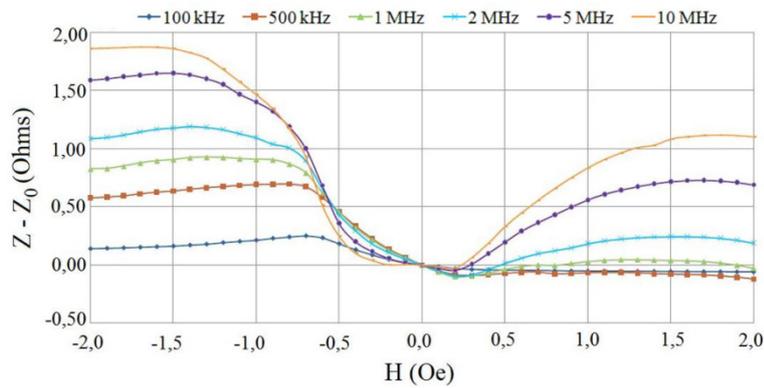


Figura 49 - Módulo da impedância de uma fita GMI de 5 cm submetida a  $i_C = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde  $f$  assume os valores 100 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz e 10 MHz.

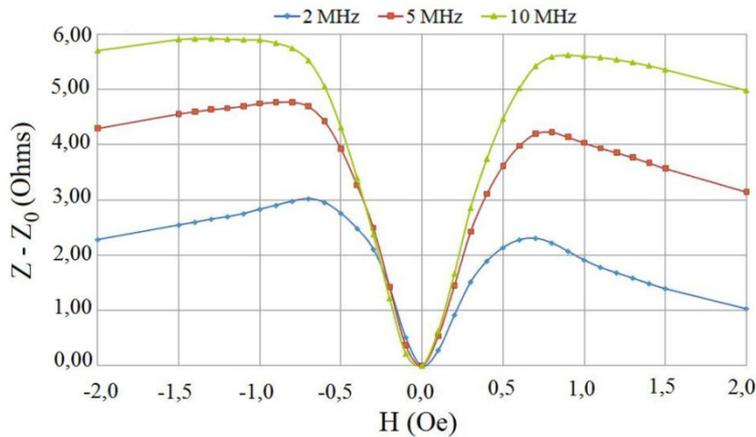


Figura 50 - Módulo da impedância de uma fita GMI de 15 cm submetida a  $i_C = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde  $f$  assume os valores 2 MHz, 5 MHz e 10 MHz.

### 5.2.1.2. Fase da Impedância

As Figs. 51 a 54 evidenciam a dependência do comportamento da fase da impedância do efeito GMI em relação à frequência da corrente de condicionamento, para fitas com 1 cm (Fig. 51), 3 cm (Fig. 52), 5 cm (Fig. 53) e 15 cm (Fig. 54). Os gráficos retratam a fase da impedância em função do campo externo CC aplicado longitudinalmente às amostras, sendo que  $\theta_0$  é o valor da fase da impedância na situação em que a componente do campo magnético paralela ao comprimento da fita é nula.

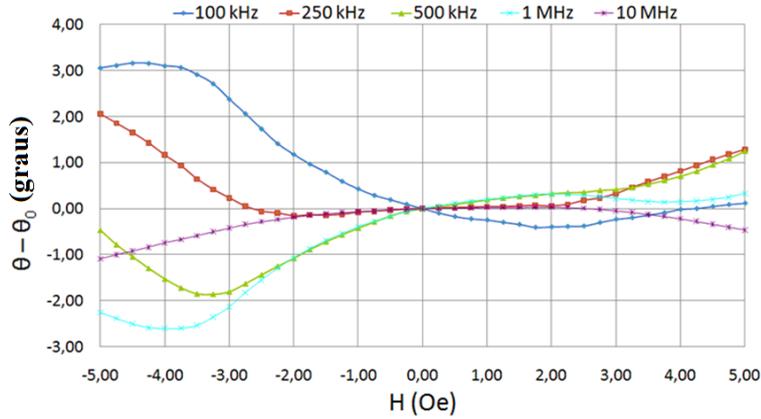


Figura 51 - Fase da impedância de uma fita GMI de 1 cm submetida a  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde  $f$  assume os valores 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 1 MHz e 10 MHz.

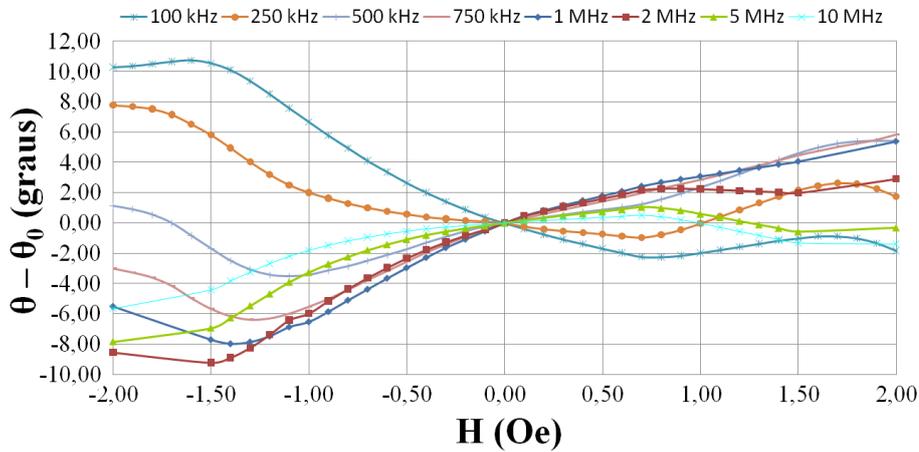


Figura 52 - Fase da impedância de uma fita GMI de 3 cm submetida a  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde  $f$  assume os valores 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 750 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz e 10 MHz.

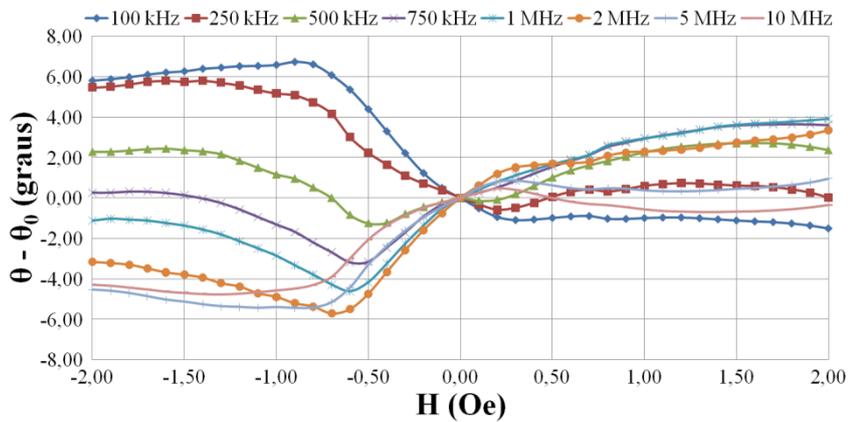


Figura 53 - Fase da impedância de uma fita GMI de 5 cm submetida a  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde  $f$  assume os valores 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 750 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz e 10 MHz.

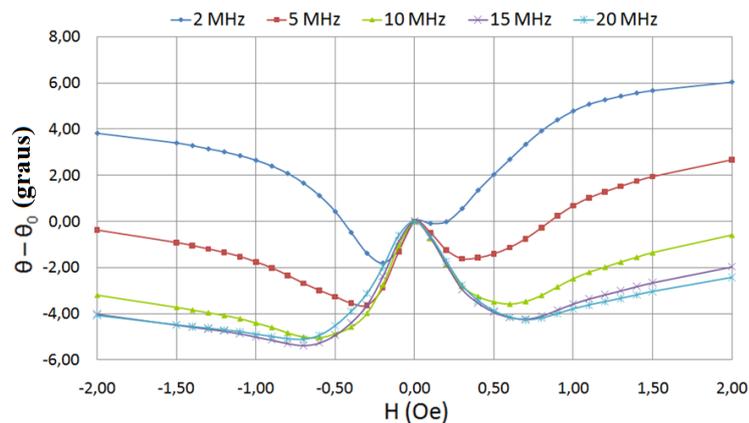


Figura 54 - Fase da impedância de uma fita GMI de 15 cm submetida a  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde  $f$  assume os valores 2 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz.

### 5.2.1.3.

#### Análise da Influência da Frequência da Corrente de Excitação

As Figs. 47 a 50 (módulo) e 51 a 54 (fase) deixam claro que a variação da frequência da corrente de excitação afeta significativamente o comportamento do efeito GMI, visto que as características de módulo e fase em função do campo magnético externo CC (aplicado longitudinalmente às amostras) são dependentes da frequência da corrente  $i_c$ .

As curvas de módulo (Figs. 47 a 50) indicam que a sensibilidade de módulo aumenta com o aumento da frequência de  $i_c$ . Porém, a taxa de aumento da sensibilidade em função do aumento da frequência diminui com o aumento da frequência. Dessa forma, nota-se que, usualmente, a sensibilidade satura para valores acima de 10MHz.

Observa-se, também, que os picos das curvas de módulo pouco se deslocam em função da frequência. Porém, os mesmos são fortemente afetados pelo comprimento das amostras. Podendo-se verificar que a redução do comprimento implica na ocorrência dos picos de módulo em campos magnéticos mais altos.

Por outro lado, as curvas de fase ( $\theta(H)$ ) em função do campo magnético ( $H$ ), Figs. 51 a 54, quando minuciosamente observadas, apresentam um comportamento curioso. Na Fig. 51, referente a uma amostra GMI de 1 cm, observa-se que as sensibilidades máximas de fase ( $d\theta(H)/dH$ ) ocorrem para frequências de 100 kHz e 1 MHz; na Fig. 52, referente a uma amostra GMI de 3 cm, observa-se que as sensibilidades máximas ocorrem para frequências de 100

kHz e 1 MHz; na Fig. 53, referente a uma amostra GMI de 5 cm, observa-se que as sensibilidades máximas ocorrem para frequências de 100 kHz e 2 MHz; e na Fig. 54, referente a uma amostra GMI de 15 cm, observa-se que as sensibilidades máximas ocorrem para frequências de 2 MHz e 10 MHz – para a amostra de 15 cm não analisou-se experimentalmente o comportamento da fase da impedância para frequências abaixo de 2 MHz.

Dessa forma, percebe-se que a sensibilidade de fase apresenta máximos para dois valores distintos da frequência, sendo que tipicamente um dos máximos se apresenta para frequências em torno de centenas de kHz e o outro em alguns MHz. Esse comportamento se verifica para todos os comprimentos de fita GMI analisados (1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm), porém, nota-se que os valores de frequência para os quais os máximos de sensibilidade são observados são funções do comprimento das amostras.

Assim, a dependência da fase com a frequência exibe o que pode-se denominar “efeito gangorra”, pois frequências intermediárias (entre as ótimas) exibirão, obrigatoriamente, valores de sensibilidade intermediários. Supondo-se que as frequências geradoras das sensibilidades ótimas  $S_{\max 1}$  e  $S_{\max 2}$  estejam localizadas, respectivamente, em 100 kHz e 10MHz, teria-se que, partindo de  $S_{\max 1}$  em 100 kHz, inicialmente, a sensibilidade diminuiria até um valor mínimo ( $S_{\min}$ ) ao se elevar a frequência até um valor crítico ( $f_{\text{crítico}}$ ) - localizado entre 100kHz e 10 MHz. Após  $f_{\text{crítico}}$ , o comportamento se inverte, ou seja, elevando-se a frequência aumenta-se a sensibilidade para valores superiores a  $S_{\min}$ , até que se atinja o outro máximo  $S_{\max 2}$  em 10 MHz. A partir de 10 MHz, o aumento da frequência implica na redução da sensibilidade até  $S_{\min}$  num novo  $f_{\text{crítico}}$ , sendo que para valores de frequência acima desse  $f_{\text{crítico}}$  a sensibilidade volta a aumentar até  $S_{\max 1}$ .

Em princípio, esse comportamento cíclico de “sobe e desce” dos valores de sensibilidade ficaria se repetindo, dando nome ao denominado “efeito gangorra”. Porém, não foram realizadas análises experimentais no sentido de verificá-lo em uma ampla faixa de frequências, devido ao equipamento disponível estar limitado à análise de frequências entre 75 kHz e 30 MHz. Ainda, cabe destacar que, para frequências mais elevadas, outros aspectos passam a contribuir para o efeito GMI, sendo que usualmente o movimento de rotação da magnetização sobrepuja o

movimento das paredes de domínio, podendo alterar o comportamento do “efeito gangorra”.

Ainda, pode-se notar que as amplitudes dos máximos da sensibilidade de fase também são dependentes do comprimento da fita GMI. Esse fato sugere a existência de um comprimento ótimo.

## 5.2.2. Influência do Nível CC da Corrente de Excitação

### 5.2.2.1. Módulo da Impedância

As Figs. 55 a 58 evidenciam a dependência do comportamento do módulo da impedância do efeito GMI em relação ao nível CC da corrente de condicionamento, para fitas com 1 cm (Fig. 55), 3 cm (Fig. 56), 5 cm (Fig. 57) e 15 cm (Fig. 58). Ou seja, induz-se GMI assimétrica (AGMI) por corrente CC. Os gráficos retratam o módulo da impedância em função do campo externo CC aplicado longitudinalmente às amostras.

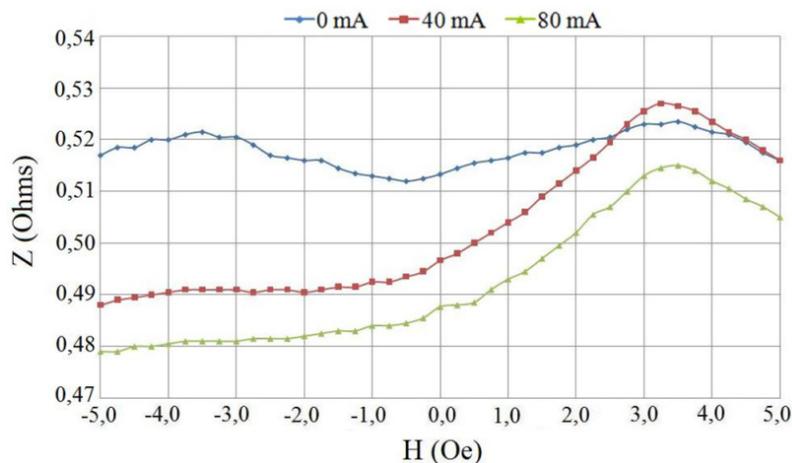


Figura 55 - Módulo da impedância de uma fita GMI de 1 cm submetida a  $i_c = [I_{CC} + 15 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 100\text{kHz} \cdot t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

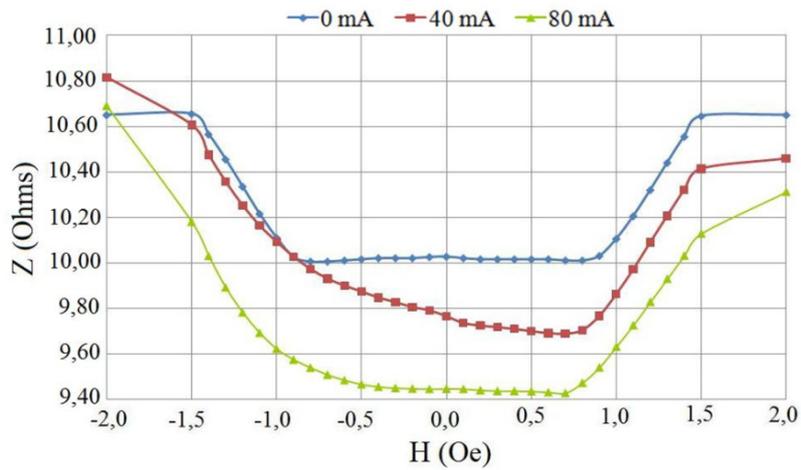


Figura 56 - Módulo da impedância de uma fita GMI de 3 cm submetida a  $i_c = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.5\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

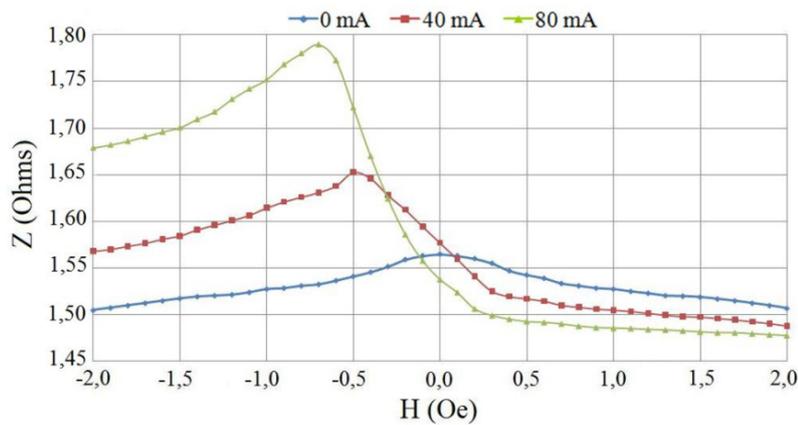


Figura 57 - Módulo da impedância de uma fita GMI de 5 cm submetida a  $i_c = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

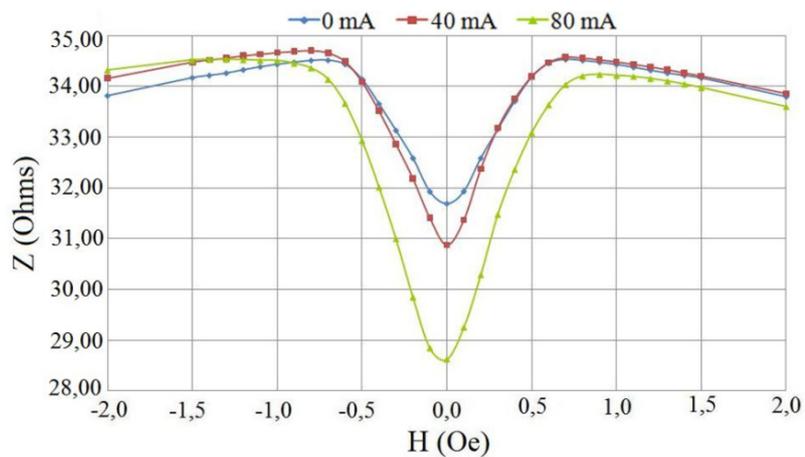


Figura 58 - Módulo da impedância de uma fita GMI de 15 cm submetida a  $i_c = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.10\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

**5.2.2.2. Fase da Impedância**

As Figs. 59 a 62 evidenciam a dependência do comportamento da fase da impedância do efeito GMI em relação ao nível CC da corrente de condicionamento, para fitas com 1 cm (Fig. 59), 3 cm (Fig. 60), 5 cm (Fig. 61) e 15 cm (Fig. 62). Ou seja, induz-se GMI assimétrica (AGMI) por corrente CC. Os gráficos retratam a fase da impedância em função do campo externo CC aplicado longitudinalmente às amostras.

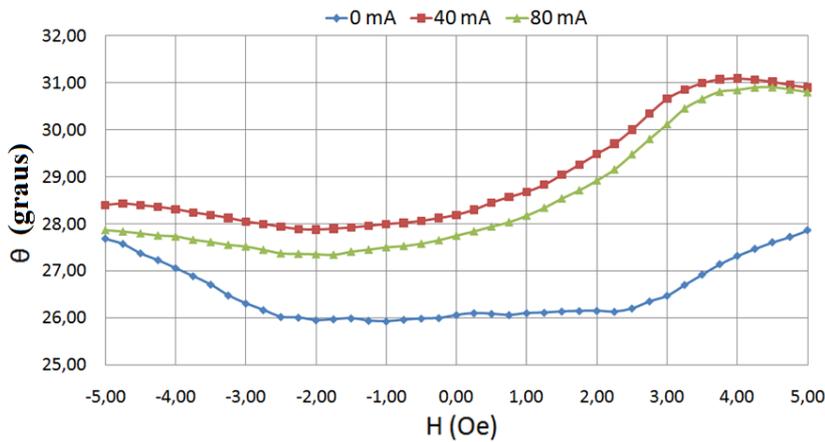


Figura 59 - Fase da impedância de uma fita GMI de 1 cm submetida a  $i_C = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

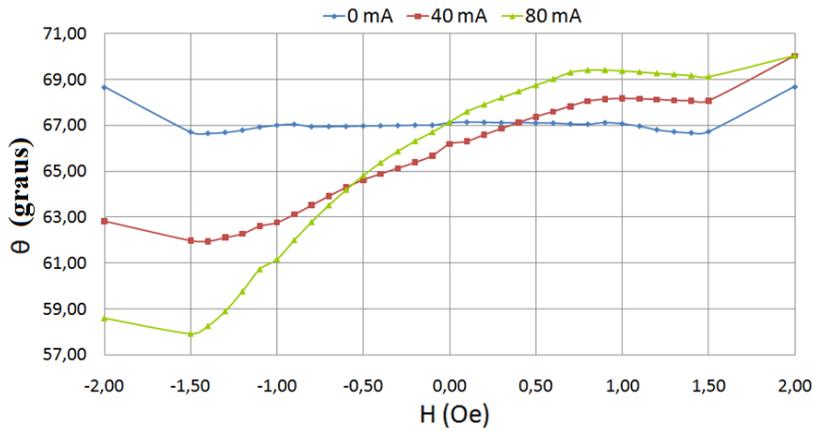


Figura 60 - Fase da impedância de uma fita GMI de 3 cm submetida a  $i_C = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.2\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

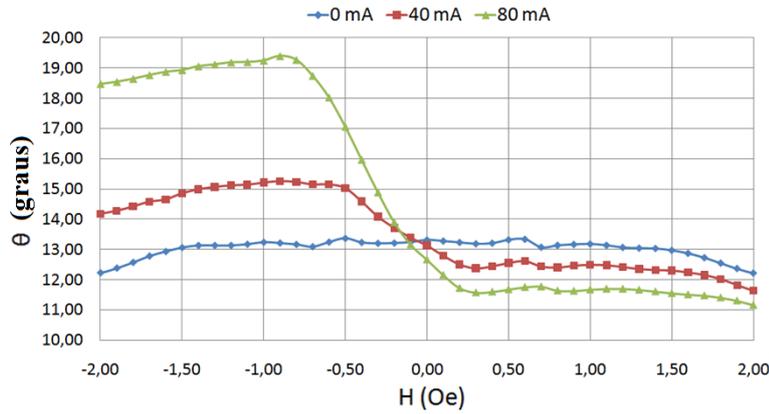


Figura 61 - Fase da impedância de uma fita GMI de 5 cm submetida a  $i_C = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

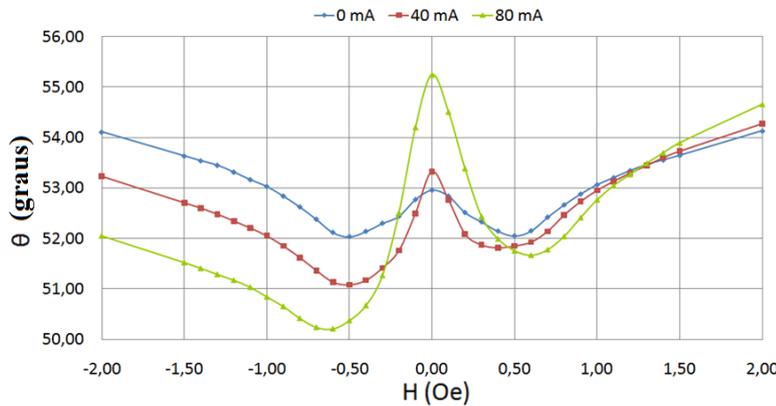


Figura 62 - Fase da impedância de uma fita GMI de 15 cm submetida a  $i_C = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.10\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA, 40 mA e 80 mA.

**5.2.2.3. Análise da Influência do Nível CC da Corrente de Excitação**

Por meio das Figs. 55 a 58 (módulo) e 59 a 62 (fase) pode-se observar, claramente, a indução de assimetria nas curvas GMI, Magnetoimpedância Gigante Assimétrica (AGMI), por corrente CC. Na ausência de nível CC (0 mA) observa-se um comportamento quase simétrico do módulo e da fase em função do campo magnético aplicado, porém a adição de nível CC (40 mA e 80 mA) gera um comportamento assimétrico. Ainda, percebe-se que a variação do nível CC de corrente altera significativamente tanto a sensibilidade das curvas de módulo (Figs. 55 a 58) quanto a das de fase (Figs. 59 a 62), indicando que, quando escolhido apropriadamente, o nível CC pode elevar a sensibilidade das amostras GMI. Também, nota-se que o nível CC pode ser utilizado com o objetivo de

linearizar a região de operação das amostras, ou seja, a faixa de campos na qual o transdutor magnético funcionará.

Outra constatação verificada para ambos os casos – módulo e fase – foi o fato de, com o aumento do nível CC, os picos (ou vales) das curvas GMI passam a ocorrer em campos magnéticos ligeiramente mais altos. Também, verifica-se que a posição dos picos (ou vales) é afetada pelo comprimento das fitas, de forma que a redução do comprimento das fitas implica na ocorrência dos picos (ou vales) para campos magnéticos mais altos. Destaca-se que a influência do comprimento das amostras GMI sobre a posição dos picos e/ou vales é muito mais significativa do que aquela proveniente de variações no nível CC da corrente de excitação.

### 5.2.3. Influência do Comprimento das Fitas GMI

#### 5.2.3.1. Módulo da Impedância

As Figs. 63 a 65 evidenciam a dependência do comportamento do módulo da impedância do efeito GMI em relação ao comprimento das amostras, para fitas com 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm. Os gráficos retratam o módulo da impedância em função do campo externo CC aplicado longitudinalmente às amostras, sendo que  $Z_0$  é o valor do módulo da impedância na situação em que a componente do campo magnético paralela ao comprimento da fita é nula.

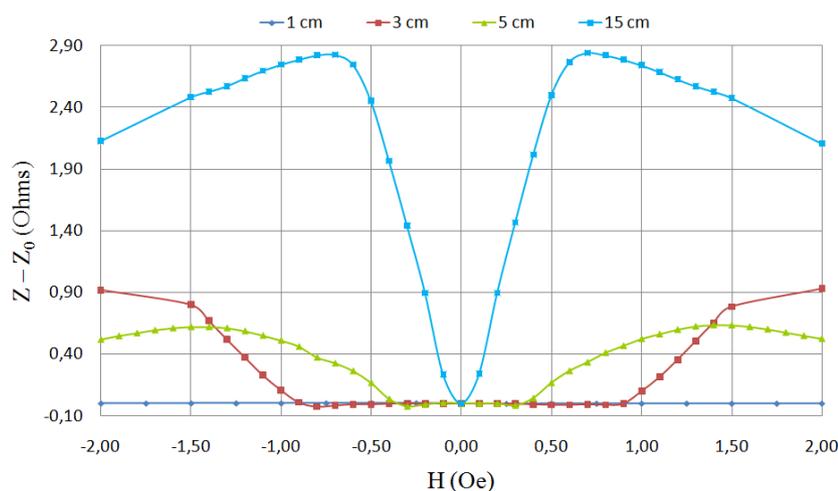


Figura 63 - Módulo da impedância de fitas GMI de 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm; submetidas a  $i_c = [0 + 15.\text{sen}(2\pi.10\text{MHz}.t)]$  mA.

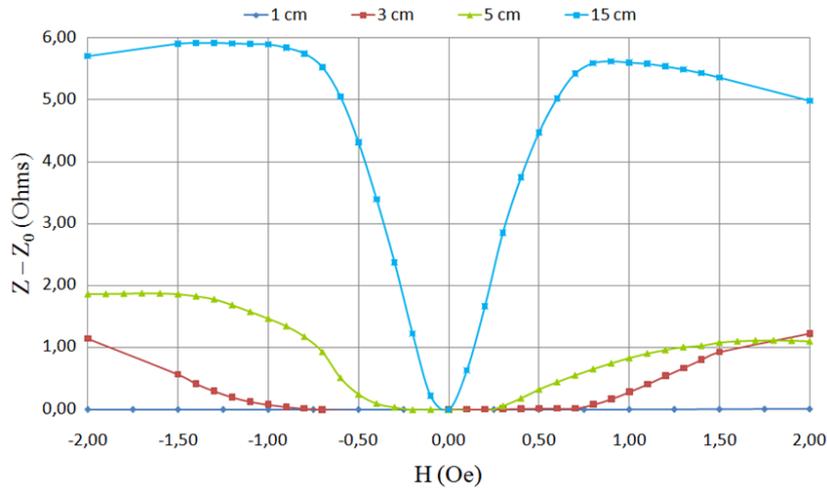


Figura 64 – Módulo da impedância de fitas GMI de 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm; submetidas a  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.10\text{MHz}.t)]$  mA.

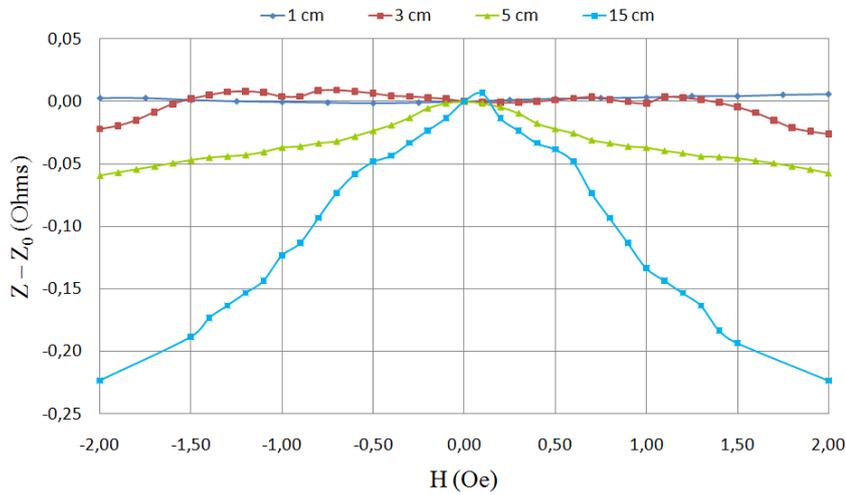


Figura 65 - Módulo da impedância de fitas GMI de 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm; submetidas a  $i_c = [0 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA.

### 5.2.3.2. Fase da Impedância

As Figs. 66 a 68 evidenciam a dependência do comportamento da fase da impedância do efeito GMI em relação ao comprimento das amostras, para fitas com 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm. Os gráficos retratam a fase da impedância em função do campo externo CC aplicado longitudinalmente as amostras, sendo que  $\theta_0$  é o valor da fase da impedância na situação em que a componente do campo magnético paralela ao comprimento da fita é nula.

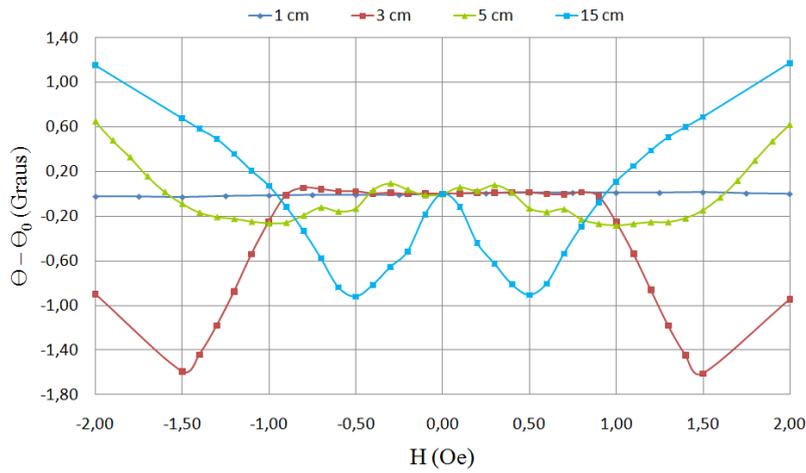


Figura 66 - Fase da impedância de fitas GMI de 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm; submetidas a  $i_C = [0 + 15.\text{sen}(2\pi.10\text{MHz}.t)]$  mA.

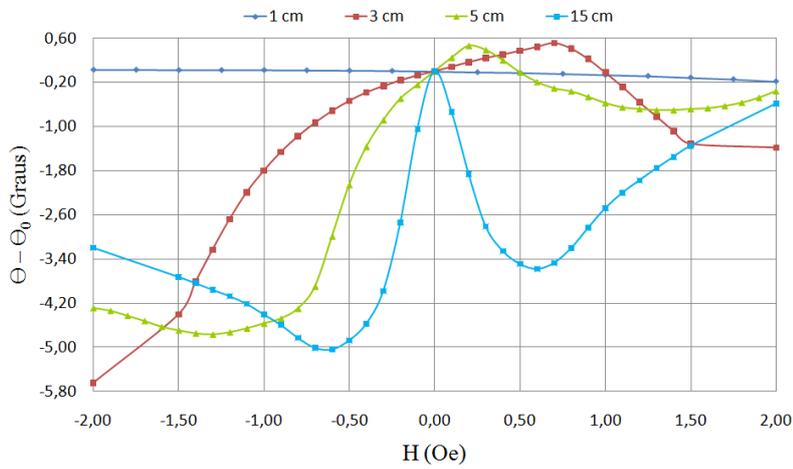


Figura 67 - Fase da impedância de fitas GMI de 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm; submetidas a  $i_C = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.10\text{MHz}.t)]$  mA.

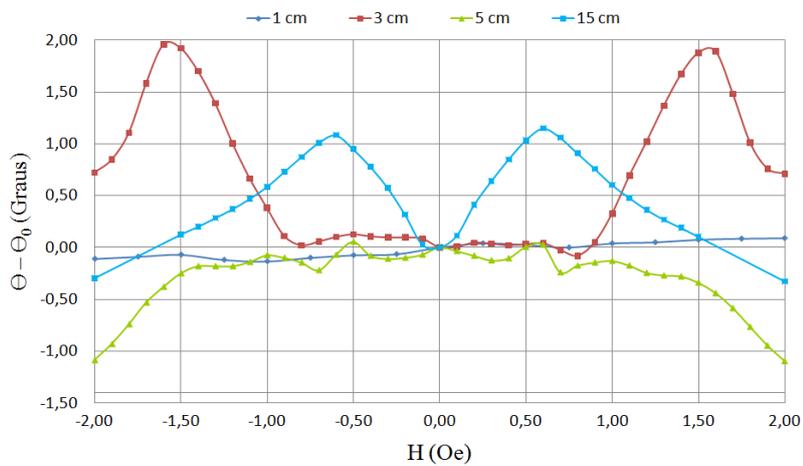


Figura 68 - Fase da impedância de fitas GMI de 1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm; submetidas a  $i_C = [0 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA.

### 5.2.3.3.

#### **Análise da Influência do Comprimento das Fitas GMI**

Inicialmente, ressalta-se que alguns aspectos da dependência do módulo e fase do efeito GMI com relação ao comprimento das amostras já foram destacados nas subseções anteriores, visto que sua análise estava relacionada, respectivamente, à dependência com a frequência e com o nível CC da corrente de excitação. No entanto, aqui são discutidas algumas particularidades que podem ser melhor percebidas visualizando-se as Figs. 63 a 65 (módulo) e 66 a 68 (fase).

A variação do comprimento das amostras afeta de forma não linear a dependência do módulo e da fase em função da frequência e do nível CC da corrente de excitação. Observa-se que existe um comprimento para o qual a sensibilidade específica (sensibilidade por unidade de comprimento) atinge seu valor máximo e, ao contrário do que se poderia esperar, pelo menos para o módulo, a sensibilidade específica não apresenta seu valor ótimo para o maior comprimento analisado.

Das Figs. 63 a 68 observa-se, tanto no caso do módulo quanto da fase, que a redução do comprimento das fitas implica no aumento do limiar de mobilidade, qualitativamente definido como a região na qual a resposta (variação do módulo/fase) das amostras em função do campo magnético é inexpressiva.

Por outro lado, ao se analisar as Figs. 63 e 65, nota-se que a redução da frequência da corrente de excitação, de 10 MHz para 100 kHz, reduz drasticamente a sensibilidade de módulo. Mas, por sua vez, as Figs. 66 e 68 permitem verificar que, nessa mesma situação, a sensibilidade de fase aumenta, ao invés de diminuir. Esse comportamento ocorre em todos os comprimentos analisados e está diretamente relacionado ao “efeito gangorra” – mencionado na seção 5.2.1.3. Este fato permite verificar que a alta sensibilidade de módulo é fortemente dependente de frequências altas, no entanto, pode-se obter altas sensibilidades de fase em baixas frequências.

Também, destaca-se o fato das características de fase exibidas nas Figs. 66 e 68 estarem praticamente espelhadas em relação ao eixo do campo magnético. Esta situação, também, está associada ao “efeito gangorra”, sendo que o espelhamento só não é mais perfeito devido às frequências exibidas (10 MHz e 100 kHz) não serem, exatamente, as que resultam em um casamento perfeito.

Ainda, pode-se observar que, conforme esperado, a adição de um nível CC à corrente de condicionamento,  $i_c$ , das amostras GMI introduz assimetria (efeito AGMI) tanto ao comportamento de variação do módulo (Fig. 64) em função do campo magnético quanto ao da fase (Fig. 67). Também, ao se comparar as Figs. 63 e 64 (módulo) e Figs. 66 e 67 (fase), verifica-se que o nível CC de corrente permite o aumento da sensibilidade (módulo e fase) para todos os comprimentos de amostras GMI analisados.

A Tabela 7 exhibe as máximas sensibilidades alcançadas, de módulo e fase, e a combinação de parâmetros que resultou na mesma. Ainda, para fins de comparação, é apresentada a sensibilidade específica, definida como a sensibilidade dividida pelo respectivo comprimento da amostra associada. Logo, esta terá unidade [ $\Omega \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ], para o módulo, e [ $^\circ \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ], para a fase.

Tabela 7 – Sensibilidades ótimas em função do comprimento das amostras e da corrente de excitação.

Tipo:	Comprimento da Fita:	Corrente de excitação:			Sensibilidade:	Sensibilidade Específica:
		Amplitude:	Frequência:	Nível CC:		
<b>Módulo</b>	1 cm	15 mA	10 MHz	80 mA	0,09 $\Omega/\text{Oe}$	0,09 $\Omega/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$
	3 cm		10 MHz	80 mA	1,42 $\Omega/\text{Oe}$	0,47 $\Omega/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$
	5 cm		10 MHz	80 mA	4,20 $\Omega/\text{Oe}$	0,84 $\Omega/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$
	15 cm		10 MHz	80 mA	11,59 $\Omega/\text{Oe}$	0,77 $\Omega/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$
<b>Fase</b>	1 cm	15 mA	100 kHz	80 mA	1,36 $^\circ/\text{Oe}$	1,36 $^\circ/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$
	3 cm		125 kHz	80 mA	9,48 $^\circ/\text{Oe}$	3,16 $^\circ/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$
	5 cm		100 kHz	80 mA	10,80 $^\circ/\text{Oe}$	2,16 $^\circ/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$
	15 cm		10 MHz	100 mA	17,41 $^\circ/\text{Oe}$	1,16 $^\circ/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$

Por inspeção da Tabela 7, verifica-se que tanto as sensibilidades de fase quanto, obviamente, as sensibilidades específicas de fase são, numericamente, superiores às de módulo, para todos os comprimentos analisados. Apesar das sensibilidades de módulo e fase serem expressas por unidades diferentes, a comparação faz sentido, visto que ambas serão convertidas para  $\text{V} \cdot \text{Oe}^{-1}$  – pelo circuito eletrônico de transdução (vide capítulo 6). Dessa forma, admitindo-se que

um circuito de transdução de fase em tensão possua uma constante de transdução,  $k_{\text{fas}}$ , numericamente igual à constante do circuito de transdução de módulo em tensão,  $k_{\text{mod}}$ , pode-se estabelecer uma comparação direta entre as sensibilidades de módulo e fase.

Ressalta-se que, na faixa de comprimentos analisada, as sensibilidades (módulo e fase) aumentam com o aumento do comprimento das fitas GMI, no entanto, as sensibilidades específicas exibem pontos de máximo. Para o módulo,  $0,84 \Omega \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , em 5 cm e, para a fase,  $3,16^\circ \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , em 3 cm.

Ainda, pode-se verificar que todos os valores ótimos das sensibilidades de módulo ocorrem para 10 MHz, estando assim de acordo com a observação de que boas sensibilidades de módulo dependem de altas frequências. No entanto, no caso da fase, os resultados para as amostras de 1 cm e 5 cm indicam ótimos de sensibilidade para frequências de 100 kHz e para a amostra de 3 cm o ótimo se localiza em 125 kHz. No caso da fita GMI com 3 cm, analisou-se em detalhes a região em torno de 100 kHz; no entanto, essa análise não foi feita para os comprimentos de 1 cm e 5 cm. Dessa forma, se justifica a pequena diferença obtida para a frequência ótima das amostras de 1 cm e 5 cm, em relação à da amostra de 3 cm.

Por outro lado, a frequência ótima obtida para a amostra de 15 cm foi 10 MHz, ou seja, 100 vezes superior à das demais. Esse fato pode ser explicado pela fita de 15 cm ter sido a primeira a ser analisada, em uma época em que se estava mais interessado no comportamento do módulo do que no da fase. Assim, de acordo com as referências da literatura, buscou-se o ótimo apenas em altas frequências, da ordem de MHz, sendo que foram realizadas poucas medições para frequências mais baixas.

No entanto, ao longo das medições experimentais dos diversos comprimentos analisados, vislumbrou-se a possibilidade do desenvolvimento de um transdutor baseado nas características de fase, posteriormente ao bom desempenho da fase em baixas frequências e o “efeito gangorra”. Ou seja, o ótimo da sensibilidade de fase obtido para a fita de 15 cm em 10 MHz, não significa que esta não possua um ótimo em frequências da ordem de 100 kHz, pois, não foram realizadas medições nessa faixa de frequências com a fita submetida a níveis CC de corrente – onde ocorrem os máximos de sensibilidade.

Ainda, destacam-se as Figs. 66 e 68, que exibem o comportamento da fase para fitas submetidas a uma corrente puramente CA com 15 mA de amplitude e, respectivamente, 10 MHz (Figs. 66) e 100 kHz (Figs. 68). Nestas, é possível observar que a sensibilidade da fita de 15 cm condicionada com uma frequência de 100 kHz é ligeiramente superior à da submetida a 10 MHz. Esse fato sugere que a análise experimental da fase da fita de 15 cm, submetida a uma corrente com 15 mA de amplitude, 100 kHz e um nível CC igual ou superior a 80 mA, resultaria em uma sensibilidade maior do que a máxima atualmente obtida.

## 5.2.4. Histerese

### 5.2.4.1. Módulo da Impedância

As Figs. 69 a 72 evidenciam o comportamento da histerese do módulo da impedância do efeito GMI, em função do campo magnético ( $H$ ) paralelo ao comprimento das amostras, sendo que as Figs. 69 e 70 retratam a dependência em relação à frequência da corrente e as Figs. 71 e 72 retratam a dependência em relação ao comprimento e ao nível CC de corrente. Ainda, as Figs. 69 e 71 exibem o valor absoluto da histerese, dado pela eq. (27), e as Figs. 70 e 72 o valor percentual, dado pela eq. (28).

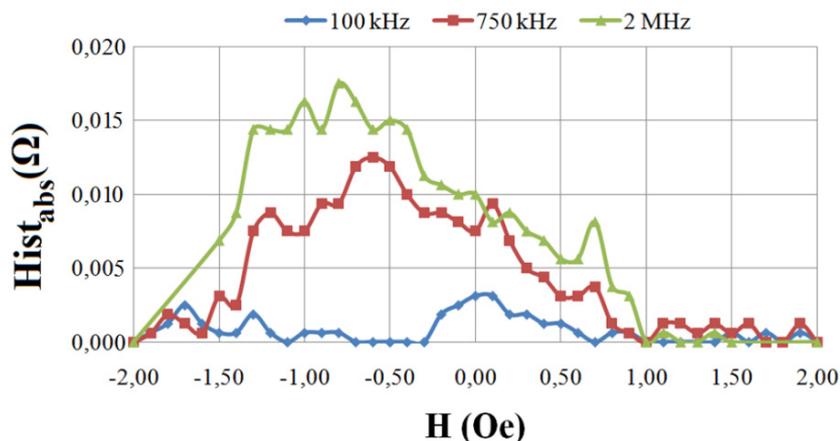


Figura 69 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese absoluta, do módulo da impedância, em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm excitada por  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde  $f$  assume os valores 100 kHz, 750 kHz e 2 MHz.

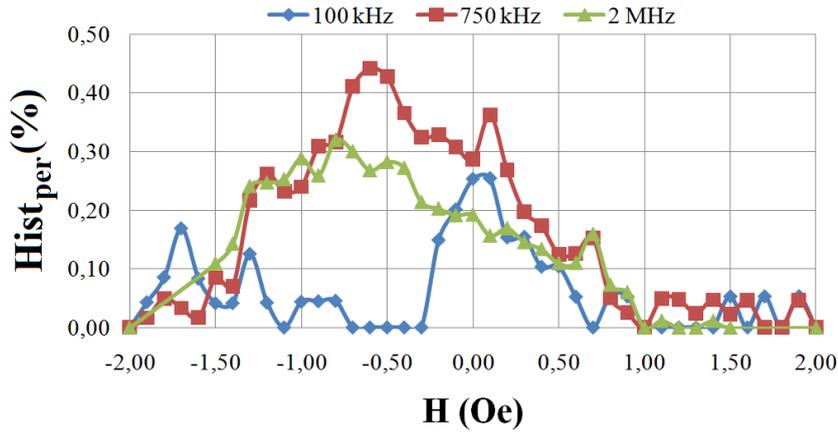


Figura 70 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese percentual, do módulo da impedância, em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm excitada por  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde f assume os valores 100 kHz, 750 kHz e 2 MHz.

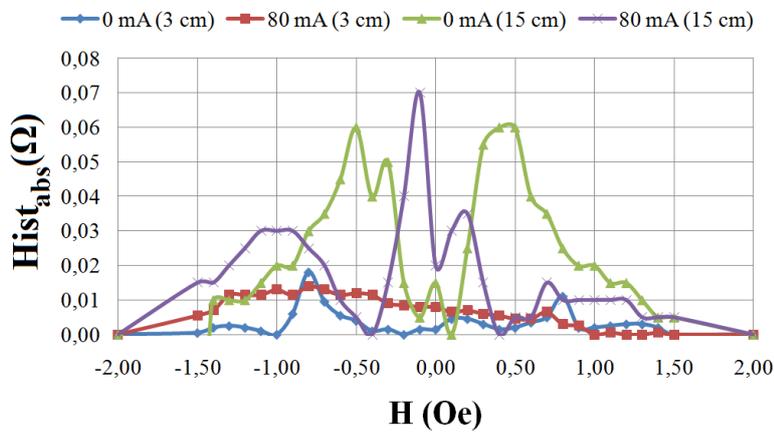


Figura 71 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese absoluta, do módulo da impedância, em função do campo magnético, para fitas GMI de 3 cm e 15 cm excitadas por  $i_c = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.2\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA e 80 mA.

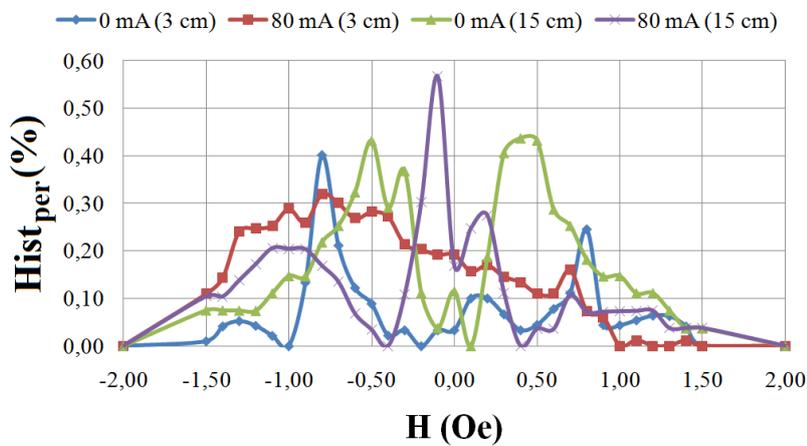


Figura 72 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese percentual, do módulo da impedância, em função do campo magnético, para fitas GMI de 3 cm e 15 cm excitadas por  $i_c = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.2\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA e 80 mA.

### 5.2.4.2. Fase da Impedância

As Figs. 73 a 76 evidenciam o comportamento da histerese da fase da impedância do efeito GMI, em função do campo magnético (H) paralelo ao comprimento das amostras, sendo que as Figs. 73 e 74 retratam a dependência em relação à frequência da corrente e as Figs. 75 e 76 retratam a dependência em relação ao comprimento e ao nível CC de corrente. Ainda, as Figs. 73 e 75 exibem o valor absoluto da histerese, dado pela eq. (27), e as Figs. 74 e 76 o valor percentual, dado pela eq. (28).

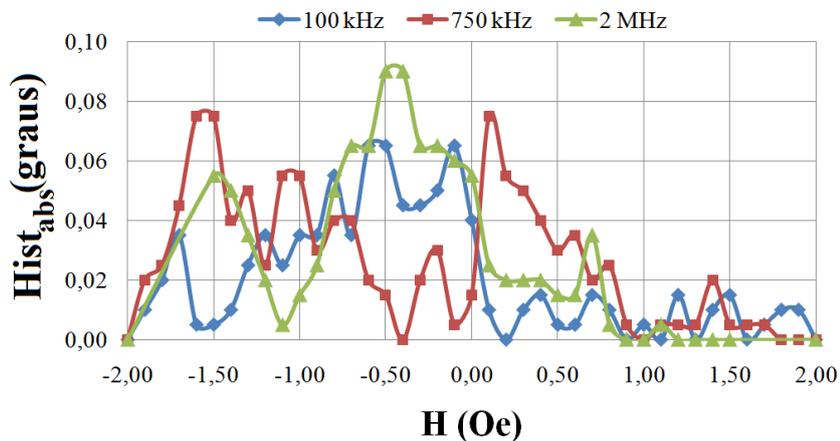


Figura 73 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese absoluta, da fase da impedância, em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm excitada por  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde f assume os valores 100 kHz, 750 kHz e 2 MHz.

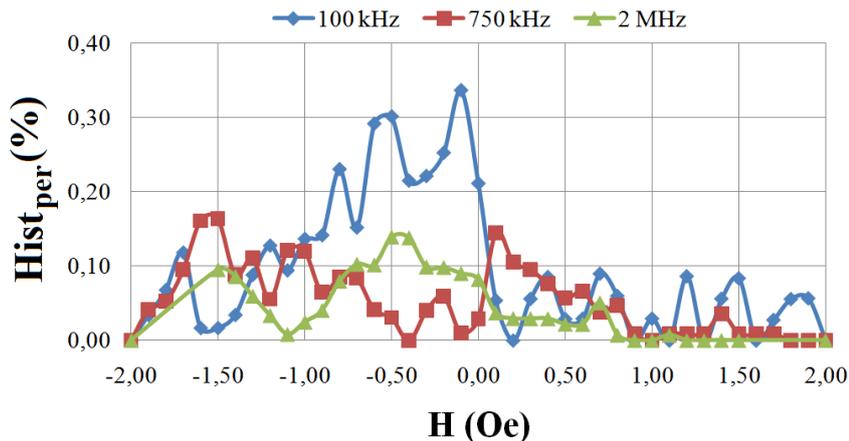


Figura 74 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese percentual, da fase da impedância, em função do campo magnético, para uma fita GMI de 3 cm excitada por  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.f.t)]$  mA, onde f assume os valores 100 kHz, 750 kHz e 2 MHz.

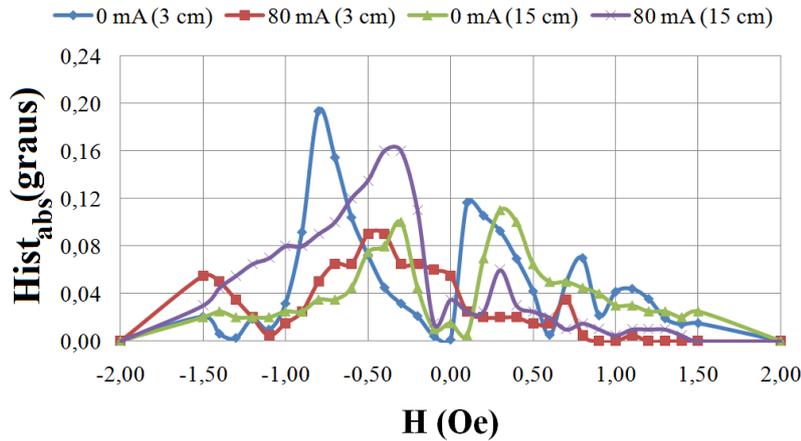


Figura 75 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese absoluta, da fase da impedância, em função do campo magnético, para fitas GMI de 3 cm e 15 cm excitadas por  $i_c = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.2\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA e 80 mA.

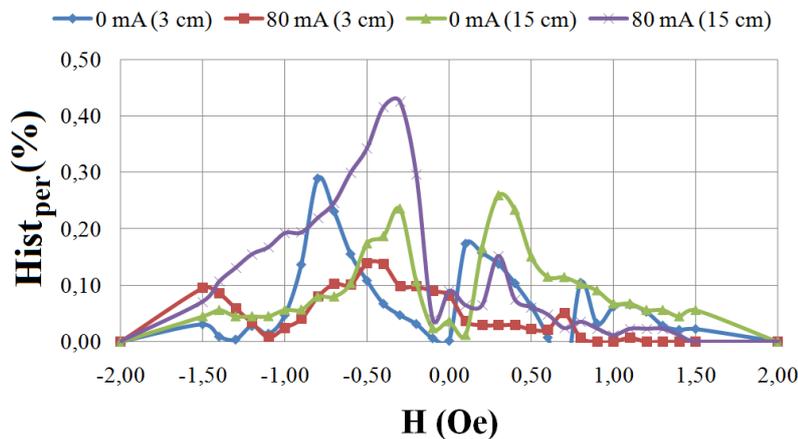


Figura 76 – Valor, ponto-a-ponto, da histerese percentual, da fase da impedância, em função do campo magnético, para fitas GMI de 3 cm e 15 cm excitadas por  $i_c = [I_{CC} + 15.\text{sen}(2\pi.2\text{MHz}.t)]$  mA, onde  $I_{CC}$  assume os valores 0 mA e 80 mA.

### 5.2.4.3. Análise da Histerese

Ressalta-se que na maioria das amostras analisadas a histerese, de módulo e fase, foi satisfatoriamente pequena. Para as curvas de módulo, os máximos valores absolutos de desvio em relação à “curva média de histerese” foram  $\pm 0,2 \Omega$ , obtidos para amostras de 15 cm. Consegue-se perceber que, para o módulo da impedância, o valor absoluto da histerese diminui com a redução do comprimento (Fig. 71) das fitas GMI, bem como com a redução da frequência da corrente de excitação (Fig. 69), sendo isto uma consequência da redução do módulo da impedância das amostras em função do comprimento. No entanto, o valor da

histerese percentual, das características de módulo, é menos afetado pelo comprimento (Fig. 72). Há dependência da histerese percentual em relação à frequência, indicando que a histerese absoluta não decresce proporcionalmente ao módulo, existindo um valor de frequência para o qual a histerese percentual é máxima (Fig. 70). Para este parâmetro, usualmente, se obtêm valores inferiores a  $\pm 1\%$ . Ainda, o nível CC de corrente não altera significativamente os valores máximos de histerese, absoluta (Fig. 71) ou percentual (Fig. 72), porém desloca suas posições em função do campo magnético, devido à indução de assimetria (AGMI).

No caso das curvas de fase, os máximos valores absolutos de desvio em relação à “curva média de histerese” foram  $\pm 0,3^\circ$ , enquanto que as máximas histereses percentuais localizam-se abaixo de  $\pm 1\%$ . Nota-se que, para a fase da impedância, não é possível estabelecer uma dependência direta entre o valor absoluto (ou percentual) da histerese com o comprimento das amostras (Figs. 75 e 76). A dependência da histerese de fase em relação ao comprimento não é trivial, pois a componente resistiva das amostras GMI decai muito mais rapidamente, em função da redução do comprimento, do que a componente reativa (indutiva – no caso das fitas GMI), e a fase da impedância é dada pelo arco tangente da divisão entre a componente reativa e a componente resistiva. Por sua vez, em relação à frequência, tem-se que a histerese absoluta (Fig. 73) de fase é, praticamente, independente da frequência; no entanto, a histerese percentual (Fig. 74) tende a reduzir com o aumento da frequência, quando esta está associada ao aumento do valor da fase. Ainda, o nível CC induz assimetria (AGMI) e, conseqüentemente, altera a dependência da histerese em função do campo magnético (Figs. 75 e 76).

### 5.2.5. Homogeneidade das Amostras GMI

Foram analisados os comportamentos de variação da impedância (módulo e fase) em função do campo magnético, de 5 fitas GMI ( $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ ) com 3 cm de comprimento, pois foi para esse comprimento que se observou a melhor sensibilidade específica da fase ( $\text{graus.Oe}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ ).

Inicialmente, esperava-se que fitas de mesmo comprimento apresentassem comportamentos similares. Porém, essa premissa não foi verificada

experimentalmente, ou seja, as 5 fitas caracterizadas apresentaram comportamentos significativamente diferentes. Assim, visando justificar o ocorrido, levanta-se a hipótese das fitas serem heterogêneas (processo de fabricação) ou da solda de ponto (processo de conexão dos contatos elétricos à fita) afetar desproporcionalmente as características das mesmas.

Das 5 fitas estudadas, aplicou-se solda de ponto em 3 delas (A, B e C) e nas outras duas (D e E) realizou-se o contato elétrico sem nenhum tipo de solda, posicionando as extremidades da fita entre terminais metálicos (conexão por contato mecânico). Todos os resultados apresentados nessa subseção referem-se a amostras de 3 cm, condicionadas pela corrente  $i_C$  indicada.

### 5.2.5.1. Módulo da Impedância

A Fig. 77 permite comparar o comportamento do módulo em função do campo magnético das fitas cuja conexão foi realizada por solda de ponto (A, B e C) – quando submetidas a  $i_C = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA.

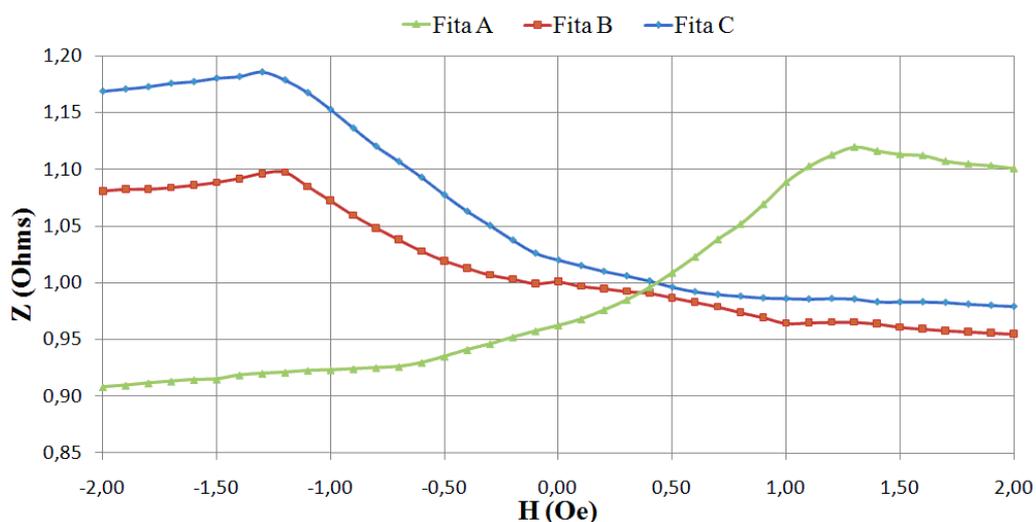


Figura 77 – Características do Módulo de fitas GMI com solda de ponto.

Por sua vez, a Fig. 78 permite observar o comportamento do módulo em função do campo magnético das amostras que não sofreram solda de ponto. Os resultados referem-se a amostras condicionadas por uma corrente  $i_C = [I_{cc} + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA, sendo que  $I_{cc}$  assume os seguintes valores: 0 mA, 40 mA e 80 mA.

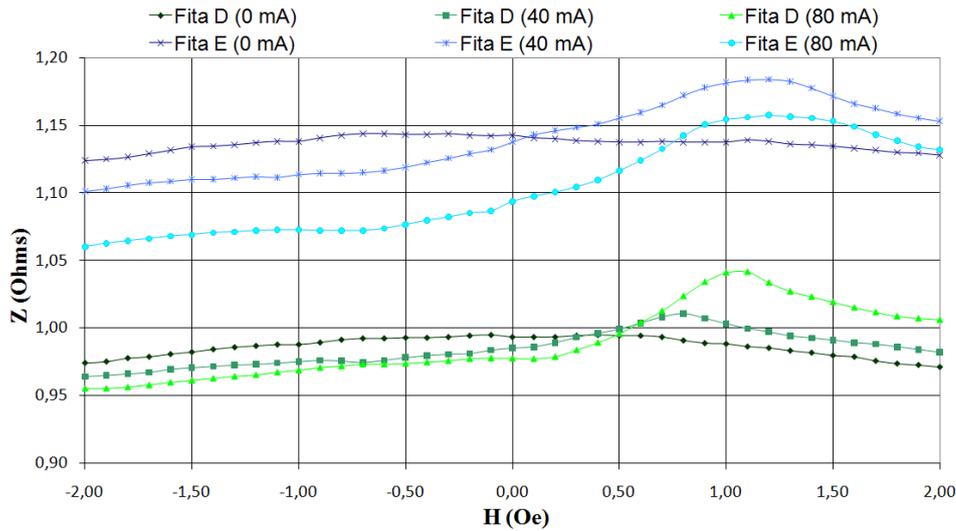


Figura 78 – Características do Módulo de fitas GMI sem solda.

Na Fig. 79, exibe-se as características de módulo das 5 fitas analisadas (A, B e C com solda de ponto, e D e E sem solda), todas condicionadas por uma corrente  $i_C = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA. Nas curvas apresentadas,  $Z_0$  indica o valor do módulo da impedância quando o campo magnético é nulo.

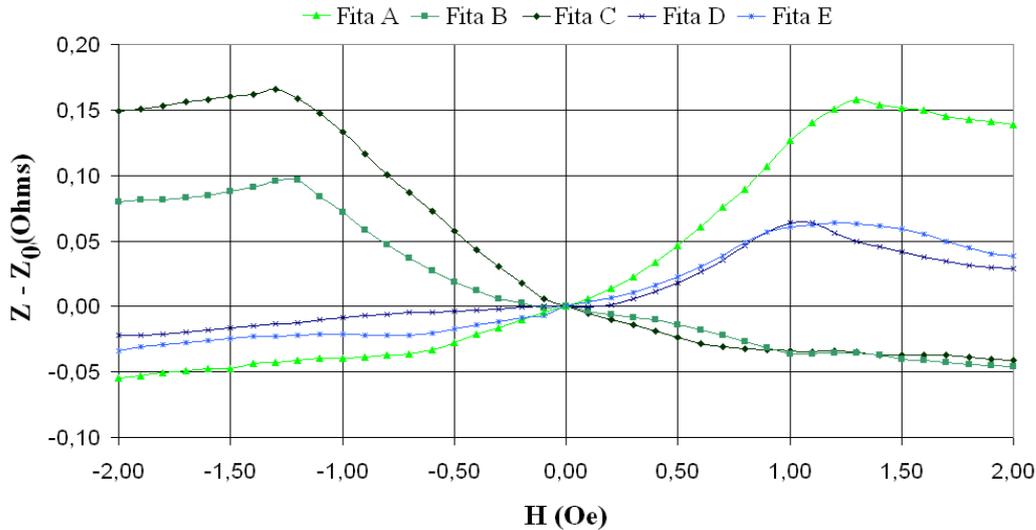


Figura 79 – Características de Módulo das 5 fitas GMI analisadas, para uma mesma corrente de condicionamento  $i_C = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA.

**5.2.5.2. Fase da Impedância**

A Fig. 80 permite comparar o comportamento da fase em função do campo magnético das fitas cuja conexão foi realizada por solda de ponto (A, B e C) – quando submetidas a  $i_C = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA.

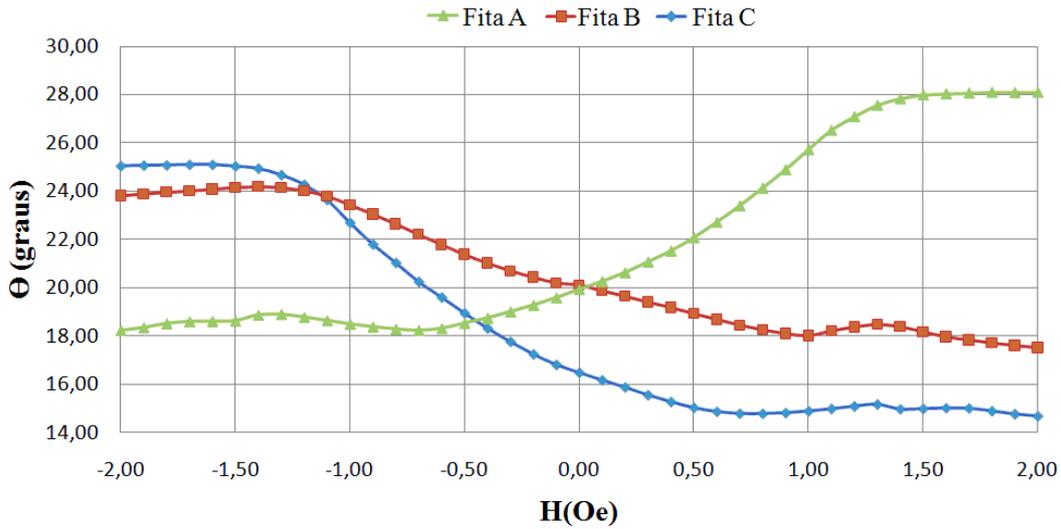


Figura 80 - Características da Fase de fitas GMI com solda de ponto.

Por sua vez, a Fig. 81 permite observar o comportamento da fase em função do campo magnético das amostras que não sofreram solda de ponto. Os resultados referem-se a amostras condicionadas por uma corrente  $i_c = [I_{cc} + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA, sendo que  $I_{cc}$  assume os seguintes valores: 0 mA, 40 mA e 80 mA.

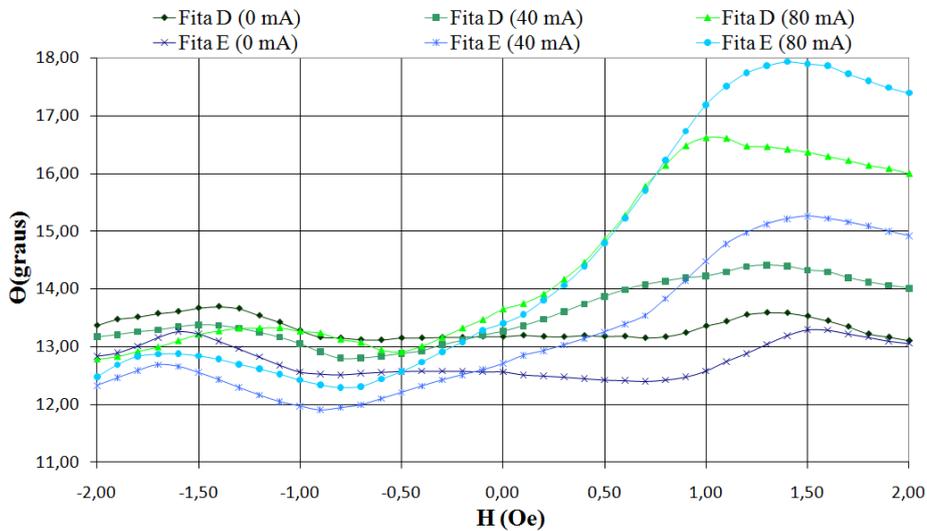


Figura 81 - Características da Fase de fitas GMI sem solda.

Na Fig. 82, exibe-se as características de fase das 5 fitas analisadas (A, B e C com solda de ponto, e D e E sem solda), todas condicionadas por uma corrente  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA. Nas curvas apresentadas,  $\theta_0$  indica o valor da fase da impedância na situação de campo nulo.

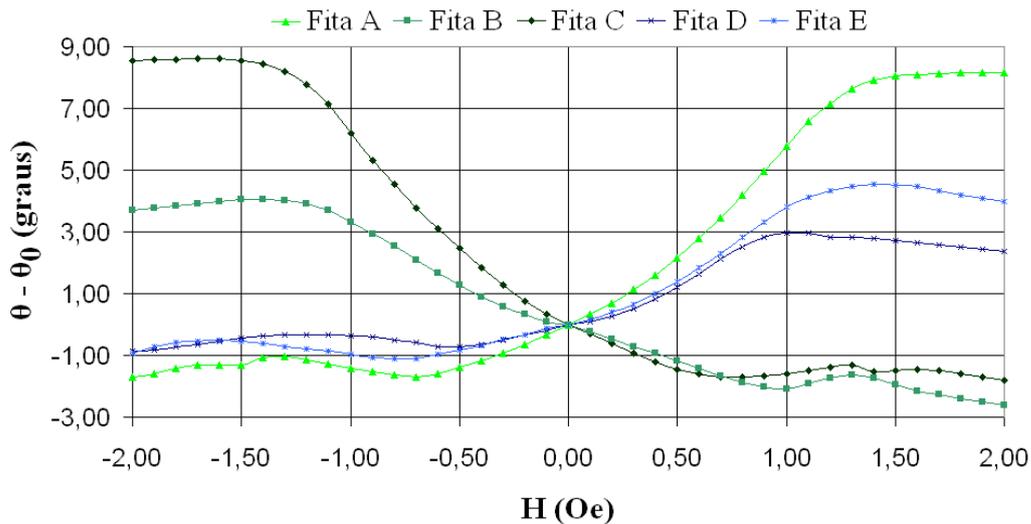


Figura 82 - Características de Fase das 5 fitas GMI analisadas, para uma mesma corrente de condicionamento  $i_c = [80 + 15.\text{sen}(2\pi.100\text{kHz}.t)]$  mA.

### 5.2.5.3.

#### Análise da Homogeneidade das Amostras GMI

Pode-se perceber que os comportamentos das amostras analisadas variam significativamente, tanto nas curvas de módulo (Figs. 77 a 79) quanto nas de fase (Figs. 80 a 82). As fitas que não sofreram solda de ponto possuem comportamento mais próximo do que as outras; mas as características, ainda, não são suficientemente próximas, indicando que as fitas podem ser heterogêneas. Também, nota-se que as características das fitas que sofreram solda de ponto são diferentes das conectadas sem solda, indicando que o processo de solda afeta de alguma forma o comportamento dos elementos sensores.

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos se apresenta a Tabela 8, a qual exhibe as sensibilidades ótimas (máximas) de módulo e fase das fitas GMI (A, B, C, D e E) apresentadas nas Figs. 79 e 82.

Tabela 8 – Comparativo das sensibilidades ótimas para fins de homogeneidade.

Fita	Sensibilidade de Módulo	Sensibilidade de Fase
A	0,2 $\Omega/\text{Oe}$	8,3 $^\circ/\text{Oe}$
B	0,1 $\Omega/\text{Oe}$	4,4 $^\circ/\text{Oe}$
C	0,2 $\Omega/\text{Oe}$	9,4 $^\circ/\text{Oe}$
D	0,1 $\Omega/\text{Oe}$	5,3 $^\circ/\text{Oe}$
E	0,1 $\Omega/\text{Oe}$	5,1 $^\circ/\text{Oe}$

Ainda, cabe ressaltar que se tentou analisar o comportamento das fitas quando os terminais elétricos são conectados por solda de prata. Entretanto, devido às perdas ôhmicas na junção “fita-solda-fio de conexão”, esse tipo de solda aumenta muito (mais de 3 vezes) o valor do módulo da impedância das amostras de 3 cm. Assim, apesar dessa técnica de conexão poder ser viável para amostras com comprimentos maiores que 10 cm, ela foi descartada para efeito de montagem dos elementos sensores de 3 cm em virtude da redução drástica que ela introduz na sensibilidade de fase.

As fitas que não sofreram nenhum tipo de solda deveriam ter um comportamento muito próximo, porém isso não se verificou, o que fortalece a hipótese das fitas serem heterogêneas no processo de fabricação. Por outro lado, o tipo de processo de conexão dos terminais elétricos à fita (solda de ponto, solda de prata e contato mecânico) afeta o comportamento das fitas GMI, o que fortalece a hipótese do tipo de conexão influenciar a leitura.

Aparentemente, as duas hipóteses inicialmente sugeridas influenciam o comportamento das fitas GMI, sendo que o problema do método de conexão dos terminais elétricos à fita, teoricamente, é solucionado pela conexão mecânica (não envolvendo solda). Porém, esse tipo de conexão dificulta a montagem do transdutor, e a maioria dos resultados obtidos para amostras com solda de ponto apresentaram sensibilidade superior. Assim, a influência da solda de ponto no efeito GMI deve ser melhor compreendida para que possa ser controlável.

Por sua vez, deve-se analisar mais detalhadamente a homogeneidade das fitas, por técnicas de microscopia óptica, de forma que, sendo verificado que as mesmas são heterogêneas, dever-se-á pesquisar a utilização de técnicas que garantam a homogeneidade dos elementos sensores.

