

4 Magnetoimpedância Gigante (GMI)

4.1. Fundamentos

Fitas e fios de ligas ferromagnéticas moles têm atraído considerável atenção devido a suas propriedades físicas e aplicações tecnológicas. Um dos fenômenos mais interessantes observados nesses elementos é a magnetoimpedância gigante (GMI), presente, por exemplo, em amostras da família $\text{Co}_{75-x}\text{Fe}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ – as quais possuem baixa magnetostricção [14-15,148].

Em geral, a impedância de um condutor depende da distribuição de corrente dentro do material. Quando a frequência da corrente aplicada aumenta é comum a corrente se concentrar na superfície do condutor. Em materiais magnéticos, o valor da profundidade de penetração de corrente (*skin depth*) não depende apenas da amplitude e frequência da corrente aplicada, mas, também, da geometria do condutor e de sua permeabilidade magnética, a qual pode variar em função do campo magnético aplicado. Isto faz com que em amostras de materiais de alta permeabilidade, mesmo numa faixa intermediária de frequências, possa-se esperar a variação da impedância desses condutores em função do campo magnético aplicado [14-15,148].

No efeito GMI, a corrente alternada aplicada ao longo do comprimento da amostra produz um campo magnético transversal (h_{ac}). Esse campo magnetiza a amostra, aumentando sua permeabilidade. A permeabilidade irá crescer até que o campo magnético externo seja suficientemente elevado a ponto de rotacionar os domínios magnéticos, reorientando-os ao longo de sua direção. A dependência da permeabilidade magnética com o campo magnético externo e com a corrente aplicada na amostra modifica a profundidade de penetração de corrente dentro do material e, conseqüentemente, sua impedância [13-15,17,148-152].

4.2. Magnetoimpedância Longitudinal (LMI)

A pesquisa apresentada nessa dissertação baseia-se num caso particular do efeito GMI, denominado Magnetoimpedância Longitudinal (LMI). Esse fenômeno é induzido através da aplicação de uma corrente alternada (I_{ac}) ao longo do comprimento de uma amostra LMI (fita ou fio), a qual está submetida a um campo magnético externo (H) paralelo à mesma. Dessa forma, pode-se medir a diferença de potencial (V) nas extremidades da amostra, como apresentado na Fig. 29.

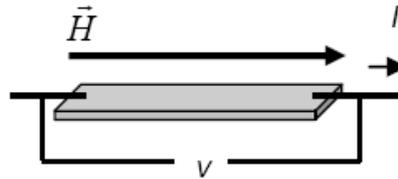


Figura 29 – Medição típica do efeito GMI.

Utilizando-se a descrição fasorial de corrente e tensão alternada (CA), e arbitrando a fase da corrente (ϕ_I) como zero, a impedância da amostra é dada por:

$$Z = \frac{|V|e^{j\phi_V}}{|I|e^{j\phi_I}} = \frac{|V|}{|I|}e^{j\phi} = |Z|e^{j\phi} \quad (14)$$

Então, a impedância complexa (Z) pode ser definida em função de suas duas componentes; a real, atribuída à parte resistiva, e a imaginária, atribuída à parte reativa. Logo, tem-se:

$$Z = R + jX, \quad (15)$$

Onde:

$$R = |Z|\cos\phi \text{ e } X = |Z|\sin\phi \quad (16)$$

Para uma liga ferromagnética metálica com comprimento L e seção transversal A , numa aproximação linear, a impedância (Z) é dada por [17,153]:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{LE_Z(s)}{A\langle j_z \rangle_A} = R_{cc} \frac{j_z(s)}{\langle j_z \rangle_A} \quad (17)$$

onde E_Z é a componente longitudinal do campo magnético, j_z é a componente longitudinal da densidade de corrente, R_{cc} é a resistividade elétrica CC, s representa o valor da função na superfície do material e $\langle j_z \rangle_A$ é o valor médio da componente longitudinal da densidade de corrente ao longo da seção transversal A .

A densidade de corrente, presente na eq. (17), pode ser obtida, no campo da eletrodinâmica clássica, resolvendo-se simultaneamente a eq. reduzida de Maxwell (18) e a eq. de Landau-Lifshitz (19), a qual modela o movimento do vetor de magnetização M [154].

$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{\mu_0}{\rho} \dot{\vec{H}} = \frac{\mu}{\rho} \dot{\vec{M}} - \text{grad div } \dot{\vec{M}} \quad (18)$$

$$\dot{\vec{M}} = \gamma \vec{M} \times \vec{H}_{ef} - \frac{\alpha}{M_S} \vec{M} \times \dot{\vec{M}} - \frac{1}{\tau} (\vec{M} - \vec{M}_0) \quad (19)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, ρ é a resistividade elétrica, γ é o fator giromagnético, \vec{M} é o vetor magnetização, M_S é a magnetização de saturação, \vec{M}_0 é a magnetização estática, \vec{H} é o vetor campo magnético, \vec{H}_{ef} é o campo magnético efetivo e α é o fator de amortecimento.

No entanto, usualmente, como forma de simplificação, assume-se que a relação entre a densidade de fluxo magnético (B) e o campo magnético (H) é linear ($B = \mu H$, onde a μ é a permeabilidade magnética). Assim, pode-se resolver diretamente a eq. (18), desprezando-se a eq. (19) [17,155-157].

Como foi dito anteriormente, o efeito GMI está relacionado à dependência da profundidade de penetração de corrente (δ) com a permeabilidade magnética transversal (μ_t), a qual é função não apenas do campo magnético externo (H_{ext}), mas também da frequência (ω) e magnitude da corrente que atravessa a amostra. Assim, para uma amostra em forma de fita, de acordo com a literatura [149-150], tem-se:

$$Z = (1-j) \frac{L}{2\omega\sigma\delta} \frac{1}{1 - e^{-(1-j)t/2\delta}}, e \quad (20)$$

$$\delta = c \left(\sqrt{\frac{1}{2\pi\omega\mu_t\sigma}} \right) \quad (21)$$

onde L é o comprimento da fita, t a espessura da fita, σ a condutividade do material e c a velocidade da luz no vácuo.

4.3. Estrutura dos Domínios Magnéticos

Em geral, as variações nas estruturas de domínios magnéticos estão associadas aos diferentes tipos de materiais. A estrutura de domínios dos materiais produzidos por técnicas de resfriamento rápido (p. ex. “Single Roller Melt Spinning”) é usualmente determinada pelas interações entre a magnetostricção e tensões internas geradas durante o processo de fabricação do material. O conhecimento sobre a estrutura de domínios é fundamental para que se possa controlar e ajustar as propriedades magnéticas do material [17].

Por sua vez, a magnetostricção é um fenômeno magnetoelástico, no qual a aplicação de um campo magnético externo resulta no encolhimento (magnetostricção negativa) ou expansão (magnetostricção positiva) do material na dimensão paralela ao campo. Tais deformações são isovolumétricas, ou seja, o material conserva seu volume total [15,158].

A estrutura de domínios de fitas com magnetostricção positiva, a qual é favorecida por ligas a base de Ferro (Fe), é diferente daquela presente em fitas com magnetostricção negativa, favorecida por ligas a base de Cobalto (Co) [17]. A Fig. 30 exemplifica tal comportamento.

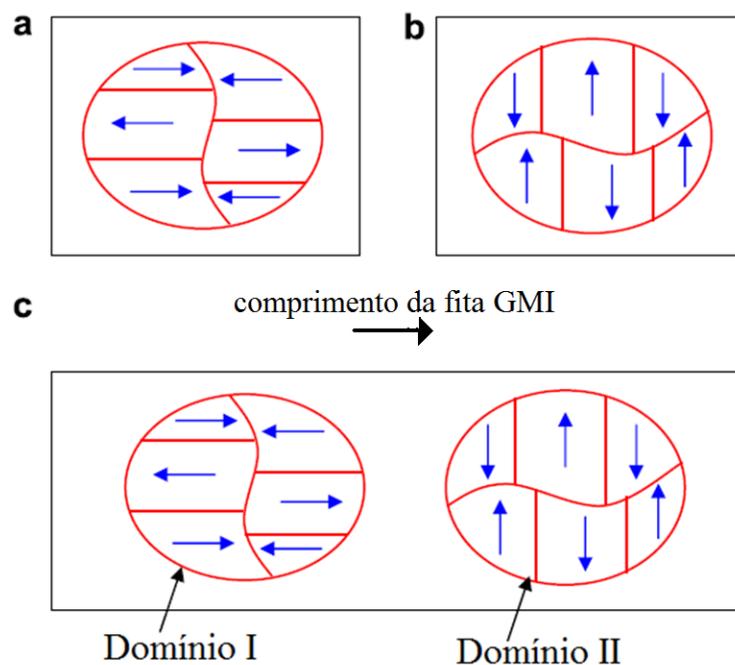


Figura 30 – Configuração dos domínios magnéticos de (a) fitas amorfas com magnetostricção positiva, (b) fitas amorfas com magnetostricção negativa, e (c) fitas amorfas com magnetização positiva ou quase nula após tratamento térmico (annealing).

As fitas amorfas com magnetostricção positiva (Fig. 30(a)) possuem uma configuração de domínios longitudinalmente orientados (em relação ao comprimento da fita). Tal configuração de domínios favorece o aparecimento do chamado Grande Efeito de Barkhausen (LBE) na direção axial da fita. Esse efeito, por sua vez, está associado ao surgimento de um indesejável ruído [17,159-160].

Por outro lado, as fitas amorfas com magnetostricção negativa favorecem o aparecimento de uma configuração transversal dos domínios (em relação ao comprimento da fita) (Fig. 30(b)). Essa estrutura intensifica o efeito GMI e pode ser otimizada pela aplicação de um tratamento térmico em conjunto com a aplicação de um campo magnético transversal. Ainda, deve-se ressaltar que para fitas com magnetostricção negativa não há LBE axial [17,161].

Os tratamentos térmicos (annealing) em ligas com magnetostricção positiva podem gerar o surgimento de domínios transversais (Domínio II da Fig. 30(c)) em adição aos domínios longitudinais (Domínio I da Fig. 30(c)) pré-existentes. Esses tratamentos podem ser aprimorados pela aplicação de campo magnético transversal. Dessa forma, consegue-se otimizar as propriedades magnéticas do material e eliminar, ou pelo menos reduzir, o LBE axial devido a redução dos domínios magnéticos longitudinais [17,160].

A estrutura de domínios, obtida através de um magnetômetro óptico Kerr, para uma amostra GMI em forma de fita tratada térmicamente, cuja composição é $\text{Co}_{66,5}\text{Fe}_{3,5}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$, é apresentada na Fig. 31 [162]. As regiões em contraste indicam domínios orientados em sentidos opostos e o comprimento da amostra é perpendicular às faixas que representam os domínios, e está no plano do papel.

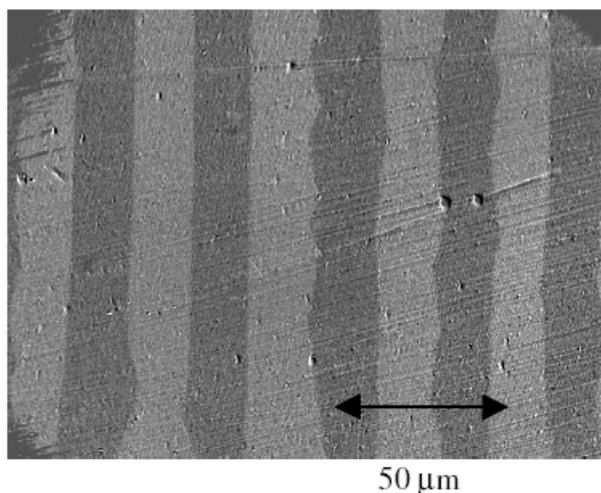


Figura 31 – Configuração da estrutura dos domínios magnéticos para uma fita GMI ($\text{Co}_{66,5}\text{Fe}_{3,5}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$).

Destaca-se que o sistema de magnetometria Kerr consiste em analisar a luz refletida por uma superfície magnética. Incidindo um feixe de luz monocromática polarizada na superfície da amostra, a luz sofre uma rotação no seu eixo de polarização de acordo com a direção da magnetização da amostra. Colocando um polarizador no feixe refletido, deixa-se passar apenas aquela parte do feixe que não sofreu rotação. Analisando a quantidade de luz que chega a um fotocaptador colocado após o polarizador pode-se traçar um diagrama de campo versus intensidade de luz refletida. Este sistema é indicado para análises onde as espessuras das amostras são pequenas (filmes finos) [62-63].

Ainda, deve-se ressaltar que a distribuição geométrica dos domínios magnéticos ao longo de fitas ou fios GMI é diferente. Sendo que, em fios os domínios possuem orientação circunferencial, enquanto que no caso de fitas os mesmos estão orientados transversalmente [17,162]. A Fig. 32 exemplifica a disposição dos domínios magnéticos em fitas e fios GMI.

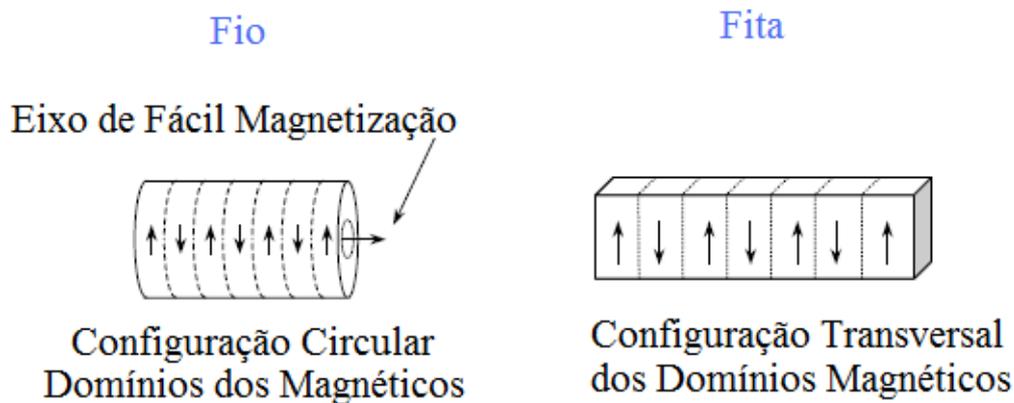


Figura 32 – Configuração dos domínios magnéticos em fitas e fios GMI.

No presente trabalho de pesquisa, utilizaram-se dois tipos de amostras GMI em forma de fita, produzidas na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com magnetostricções (λ_s) baixas: $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ ($\lambda_s = 9,2 \cdot 10^{-7}$ [14]) e $\text{Co}_{70,4}\text{Fe}_{4,6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ ($\lambda_s = -0,37 \cdot 10^{-7}$ [15]).

4.4.

Ligas Amorfas da Série $\text{Co}_{70-x}\text{Fe}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$

As ligas amorfas da série $\text{Co}_{70-x}\text{Fe}_x\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ são ferromagnéticas abaixo da temperatura de Curie (T_c) a qual depende da concentração de Ferro (Fe) na amostra. Esta varia de 610K para $x = 0$ até 750K para $x = 40$ [14,163].

Ainda, nota-se que pela variação da composição, diga-se da concentração de Ferro (Fe) em relação à de Cobalto (Co), consegue-se alterar de forma contínua o valor da magnetostricção (λ_s). Mais especificamente, através da escolha do valor de x consegue-se fazer com que λ_s assuma valores positivos e negativos, sendo que para $x \approx 4,6$ tem-se $\lambda_s = 0$ [14-15,17].

Por sua vez, a permeabilidade magnética (μ) nas fitas de ligas amorfas CoFeSiB apresentam forte dependência com a frequência do campo magnético aplicado e da história térmica do material [14,164].

A estrutura amorfa baseia-se na disposição aleatória, sem ordem atômica de longo alcance, dos átomos que constituem o material. A qual, usualmente, pode ser considerada isotrópica para distâncias muito maiores que os espaçamentos atômicos. A ausência dos contornos de grão conferem à liga uma alta resistência à corrosão, enquanto que a isotropia estrutural faz com que praticamente não exista direção preferencial de magnetização e, desta forma, os domínios magnéticos são livres para serem orientados em qualquer direção com o campo aplicado [14,165].

Na Tabela 4 apresentam-se algumas das principais características físicas dos dois tipos de amostras GMI analisadas nesta dissertação ($\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ [14] e $\text{Co}_{70,4}\text{Fe}_{4,6}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ [15]).

Tabela 4 – Propriedades das Amostras GMI analisadas.

Co₇₀Fe₅Si₁₅B₁₀	
Magnetostricção (λ_s)	$9,2 \cdot 10^{-7}$
Temperatura de Curie (T_c)	675 K
Resistividade (ρ)	160 $\mu\Omega\text{cm}$
Magnetização de saturação (M_s)	8,6 kOe
Temperatura de início de cristalização (T_{x1})	748 K
Temperatura de final de cristalização (T_{x2})	819 K
Temperatura de fusão (T_f)	1298 K
Largura	1,5 mm
Espessura	60 μm
Comprimentos	1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm
Co_{70,4}Fe_{4,6}Si₁₅B₁₀	
Magnetostricção (λ_s)	$-0,37 \cdot 10^{-7}$
Temperatura de Curie (T_c)	657 K
Resistividade (ρ)	180 $\mu\Omega\text{cm}$
Magnetização de saturação (M_s)	8,6 kOe
Temperatura de início de cristalização (T_{x1})	748 K
Temperatura de final de cristalização (T_{x2})	819 K
Temperatura de fusão (T_f)	1298 K
Largura	1,0 mm
Espessura	40 μm
Comprimentos	1 cm, 3 cm, 5 cm e 15 cm

4.5. Efeito GMI por Faixa de Frequências

A Magnetoimpedância Gigante pode ter seu comportamento explicado em função da frequência (f) da corrente de excitação. Usualmente, tem-se [14,17]:

- Baixas frequências (até alguns kHz): as alterações na impedância podem ser essencialmente atribuídas ao chamado efeito magnetoindutivo. A contribuição da variação da profundidade de penetração de corrente (δ) é muito pequena nesse caso. As alterações na impedância da amostra em função do campo magnético externo (H_{ext}) estão, principalmente, relacionadas a alterações na componente indutiva (L). A qual é proporcional à permeabilidade circunferencial (μ_ϕ) no caso de condutores magnéticos cilíndricos (p.

- ex. fios), e à permeabilidade transversal (μ_t) no caso de filmes magnéticos planos (p. ex. fitas) [166-167].
- b) Frequências intermediárias (entre 100 kHz e alguns MHz): o efeito GMI pode ser essencialmente atribuído às variações da profundidade de penetração de corrente (δ) em função do campo magnético externo (H_{ext}), devido às grandes variações na permeabilidade magnética. Deve-se ressaltar que dependendo da geometria da amostra pode-se obter o resultado ótimo, máxima variação de Z em função de H_{ext} , nesse regime de frequências, como resultado da contribuição da permeabilidade magnética tanto para movimento das paredes de domínio quanto para a rotação da magnetização. A redução do efeito GMI em frequências mais elevadas pode ser explicada pelo amortecimento do movimento das paredes de domínio devido a correntes parasitas (*eddy currents*), sendo que apenas a rotação da magnetização passa a contribuir para o efeito GMI [168].
- c) Altas frequências (dezenas de MHz até alguns GHz): os fatores que contribuem para o efeito GMI são o efeito giromagnético e a relaxação ferromagnética. Os pontos de máximo das caracterizações do efeito GMI passam a ocorrer para campos magnéticos mais elevados, onde as amostras já estão saturadas magneticamente. Grandes variações na profundidade de penetração de corrente (δ) podem ser atribuídas a mecanismos similares à ressonância ferromagnética [155,169].

4.6. GMI Assimétrica (AGMI)

As curvas GMI de variação da impedância (Z) em função do campo magnético externo (H_{ext}) apresentam, em geral, um comportamento simétrico em relação a esse campo. No entanto, certos fatores induzem o surgimento de um comportamento assimétrico dessas curvas, o qual é denominado Magnetoimpedância Gigante Assimétrica (AGMI). Três fatores destacam-se na literatura, diga-se AGMI induzida por: corrente CC [14,17,170-172], campo

magnético CA [14,17,173-175] e “exchange bias” [14,17,176-177]. Deve-se ressaltar que atualmente esses efeitos são explicados qualitativamente, sendo que muitos grupos de pesquisa têm trabalhado na tentativa de desenvolver modelos que permitam descrevê-los quantitativamente.

4.6.1. AGMI Induzida por Corrente CC

Em amostras GMI em forma de fio, quando se aplica uma corrente CC (I_{cc}) paralela à direção de propagação da corrente de excitação CA (I_{ca}) e ao campo magnético externo (H_{ext}), será induzido um campo magnético CC (H_{cc}) circunferencial ao comprimento da amostra. Este, em conjunto com o campo magnético CA (H_{ca}) gerado pela corrente CA (I_{ca}), estimulam o processo de magnetização circunferencial em oposição ao sentido de magnetização induzido pelo campo magnético externo (H_{ext}). É a combinação da anisotropia magnética helicoidal com o campo magnético CC (fruto da corrente CC) que causam a assimetria nas características do efeito GMI [14,17,170-172].

A Fig. 33 exemplifica a situação na qual é induzida AGMI, por corrente CC, numa amostra em forma de fio [14].

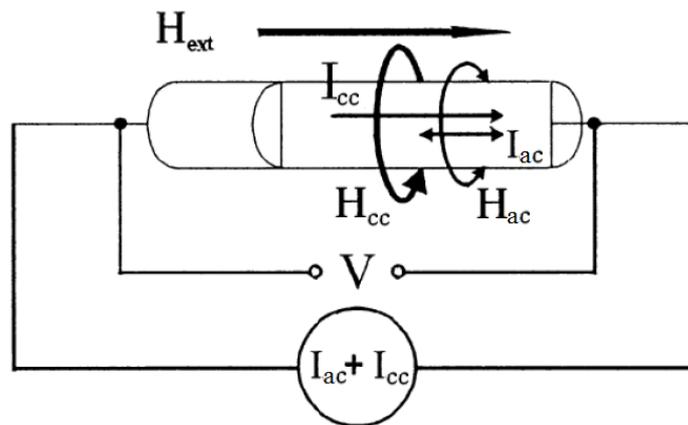


Figura 33 – Configuração experimental para indução de AGMI, por corrente CC, numa amostra em forma de fio.

Assim, na ausência de corrente CC, nota-se uma estrutura simétrica nas características do efeito GMI em função do campo magnético externo (H_{ext}). No entanto, em alguns casos, mesmo quando $I_{cc} = 0$ pode-se notar uma pequena assimetria, o que indica a presença da anisotropia helicoidal inerente à amostra [172].

Por outro lado, quando se aplica um corrente CC o comportamento assimétrico emerge e mostra-se dependente tanto da intensidade quanto do sentido de I_{cc} . Um exemplo típico desse fenômeno é apresentado na Fig. 34 [14,170].

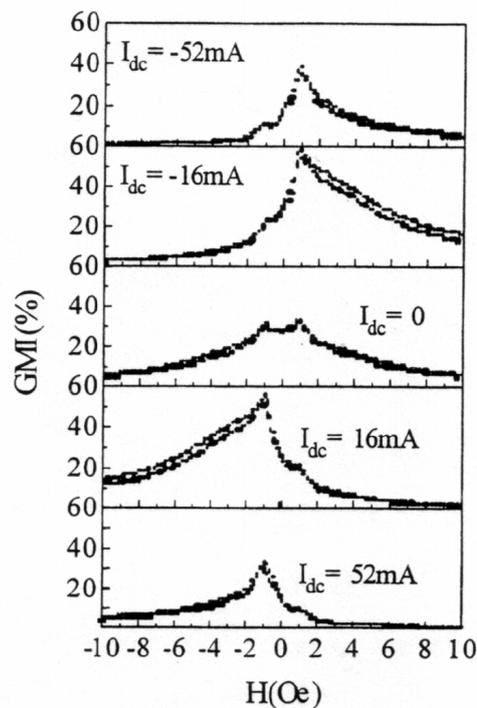


Figura 34 – GMI(%) em função do campo magnético externo, variando-se a intensidade e o sentido de I_{cc} .

Da Fig. 34 percebe-se que o comportamento quase simétrico é verificado para I_{cc} igual a zero. Ainda, fica claro que, existe um nível bem definido de I_{cc} para o qual se consegue obter uma variação ótima do GMI(%). Pois, o GMI(%) aumenta ao se elevar o nível CC de corrente de 0mA para 16mA, entretanto, ele decai ao se aumentar ainda mais I_{cc} de 16 mA para 52 mA. Essa situação sugere que, para o exemplo apresentado, o valor ótimo de I_{cc} deve estar no intervalo entre 0mA e 52 mA.

Outro aspecto relevante, sobre o qual se pode concluir por inspeção da Fig. 34, é que, ao se inverter o sentido da corrente CC, as características do efeito GMI em função do campo magnético externo são espelhadas em relação ao eixo vertical (GMI(%)).

Essas observações são compreendidas como decorrentes da influência do campo magnético CC (H_{cc}), gerado por I_{cc} , sobre o movimento das paredes de domínio na direção circunferencial. O campo magnético H_{cc} torna a susceptibilidade magnética CA assimétrica, através do movimento das paredes de

domínio, na situação da aplicação conjunto do campo magnético externo (H_{ext}) na direção do comprimento do fio [14,172]. A combinação de H_{cc} e H_{ext} produz um campo helicoidal resultante, o qual atua sobre o fio GMI. Assim, o efeito AGMI aparece em função do sentido do campo magnético externo (H_{ext}), e a assimetria aumentará com a elevação de H_{cc} , ou seja, com a elevação de I_{cc} [17].

Por outro lado, quando H_{cc} é suficientemente grande, o movimento das paredes de domínio é suprimido. Essa supressão, em conjunto com a assimetria, reduz a permeabilidade magnética da amostra e, conseqüentemente, diminui o GMI(%). Sabe-se que a contribuição para a permeabilidade advinda do movimento dos domínios localizados no núcleo, dos fios é praticamente constante e independente de I_{cc} . No entanto, a contribuição para a permeabilidade advinda da rotação dos domínios presentes na superfície do fio (μ_{rot}) aumenta com o incremento de I_{cc} até um dado valor crítico (dependente da composição do material e de outros fatores) e depois passa a diminuir para valores superiores de I_{cc} . O aumento inicial de μ_{rot} está relacionado ao aumento do volume dos domínios localizados na superfície do fio, e o posterior decremento é explicado pela redução da magnetização rotacional induzida por fortes campos H_{cc} [17,172].

No caso de fitas GMI, o mecanismo de indução de AGMI por correntes CC pode ser compreendido de forma similar ao discutido para fios, ao se assumir que a configuração dos domínios magnéticos nas fitas é transversal e não helicoidal (como nos fios). Assim, observa-se que a assimetria é devido à combinação da anisotropia magnética transversal com o campo magnético gerado pela corrente CC [14,170].

4.6.2. AGMI Induzida por Campo Magnético CA

Esse tipo de AGMI foi observada em amostras em forma de fio submetidas a um campo magnético helicoidal. Esse campo é gerado pela superposição de um campo CA axial, devido à corrente CA que passa pela amostra, com um campo tangencial, devido à corrente CA que passa por um enrolamento senoidal em torno da amostra [14,17,173-175]. A Fig. 35 exhibe a configuração experimental que possibilita a manifestação desse efeito [14,175].

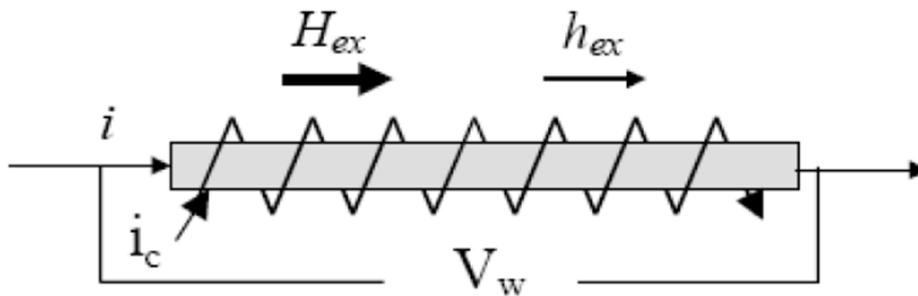


Figura 35 – Configuração experimental para indução de AGMI por campo CA em amostras em forma de fio.

O campo magnético CA axial (h_{ex}), gerado pela corrente i_c , está relacionado ao processo dinâmico de magnetização cruzada, sendo responsável pela indução de uma magnetização circulatória. Dessa forma, o campo h_{ex} altera significativamente as características de Tensão V_w em função do campo magnético CC (H_{ex}) [14,175].

Esse processo é considerado similar ao Efeito Matteucci, quando consideramos uma região de altas frequências de h_{ex} onde a magnetização circulatória apresenta movimento rotacional. Nesse efeito, uma tensão é gerada num material como consequência da aplicação de um campo magnético CA axial – o qual movimenta as paredes de domínio orientadas helicoidalmente [14,175].

Com o aumento da frequência do campo axial h_{ex} , sua contribuição para o comportamento das características de tensão em função do campo externo CC (H_{ex}) torna-se similar ao da corrente de excitação da amostra (i). Dessa forma, consegue-se alterar significativamente o comportamento do efeito GMI tornando-o assimétrico em relação a H_{ex} [175].

Ainda, sabe-se que a contribuição do Efeito Matteucci nas componentes da impedância da amostra pode ser controlada pelo número de enrolamentos da bobina senoidal. Sendo que, quando o número de enrolamentos é grande a assimetria é observada [17].

4.6.3. AGMI Induzida por “Exchange Bias”

Esse tipo de AGMI, também conhecida como válvula GMI (*GMI-valve*), ocorre quando se aplica o processo de recozimento (*annealing*), na presença de ar, em fitas GMI elevando-as a uma temperatura adequada (em geral, em torno de

350°C), durante certo tempo, e aplicando simultaneamente um campo magnético fraco (em geral, em torno de 1 Oe) e unidirecional (na direção do comprimento da fita) [17,176].

O comportamento usual desse tipo de AGMI, para amostras GMI da família CoFeSiB, é atribuído a cristalização da camada imediatamente inferior à superfície da fita. Quando as amostras são recozidas no ar, a parte superficial da fita se oxida sendo que o Boro (B) e o Silício (Si) migram das regiões mais internas para a superfície sob a forma de óxidos. A temperatura necessária para a cristalização dessa nova camada pobre em B e Si é reduzida, e conseqüentemente num dado instante a cristalização terá início. Deve-se lembrar que esse processo de recozimento é efetuado com a aplicação de campo magnético ao longo do comprimento da fita; logo, a região cristalina em formação terá seus domínios orientados na direção definida pelo campo externo. Assim, a anisotropia da superfície cristalina com domínios unidirecionalmente orientados, ao longo do comprimento da fita, afeta o movimento das paredes dos domínios transversalmente orientados localizadas na região amorfa mais interna. Logo, dá-se origem a AGMI [14,17,176-177].

A Fig. 36 exhibe uma representação esquemática da fita, após o processo de recozimento responsável pelo aparecimento do efeito AGMI por “Exchange bias”.

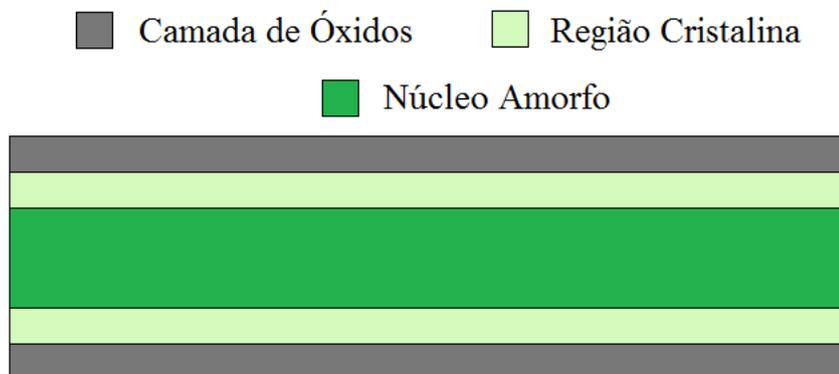


Figura 36 – Representação esquemática de uma fita amorfa, após recozimento em ar com aplicação de campo magnético.

Destaca-se que a técnica de recozimento em ar com aplicação de campo magnético, ao longo da fita, inferior ao campo magnético de anisotropia, proporciona a obtenção de configurações de domínios particularmente interessantes, pois se consegue reforçar a permeabilidade transversal e, conseqüentemente, elevar a assimetria nas características GMI [17,176].

4.7. GMI(%)

A figura de mérito mais utilizada na literatura para determinação da variação percentual do efeito GMI em função do campo magnético externo aplicado considera, apenas, o módulo da impedância ($|Z|$). A GMI(%) é definida como [14-15,17]:

$$\text{GMI}(\%) = \left[\frac{|Z(H)| - |Z(H_{\max})|}{|Z(H_{\max})|} \right] \cdot 10^2 \quad (22)$$

onde H_{\max} é o valor do campo magnético externo suficiente para saturar o módulo da impedância da amostra GMI.

Assim, apesar do efeito GMI consistir da variação do módulo e da fase da impedância de uma dada amostra em função do campo magnético externo, a análise da GMI(%) não permite concluir sobre as variações de fase. Logo, com a finalidade de inferir sobre a fase da impedância propõe-se no presente trabalho a utilização de uma figura de mérito alternativa, GMI_θ (%). A qual é definida como:

$$\text{GMI}_\theta(\%) = \left[\frac{\theta(H) - \theta(H_{\max})}{\theta(H_{\max})} \right] \cdot 10^2 \quad (23)$$

onde H_{\max} é o valor do campo magnético externo suficiente para saturar a fase da impedância da amostra GMI.

Por meio dos exemplos da Tabela 5, pode-se notar, porém, que valores iguais de GMI(%) não indicam, necessariamente, sensibilidades de módulo iguais ($\Omega \cdot \text{Oe}^{-1}$). Ou, ainda pior, uma amostra GMI com GMI(%) superior ao de outra pode apresentar uma sensibilidade inferior ao dessa mesma outra amostra. Essas conclusões também são aplicáveis ao caso da fase, empregando-se a GMI_θ (%).

Tabela 5 – Exemplos de não-correlação entre GMI(%) e sensibilidade.

$\text{GMI}(\%)_{\max}$	$ Z(H) $ (Ω)	$ Z(H_{\max}) $ (Ω)	Sensitivity (Ω/Oe)
200%	3	1	2
100%	20	10	10
100%	200	100	100

Um dos focos dessa dissertação é maximizar as sensibilidades das amostras GMI, visando utilizá-las como elementos sensores de transdutores. Assim, tendo em vista o que foi discutido nessa seção decidiu-se não utilizar a usual GMI(%) para as análises do módulo, nem a $GMI_{\theta}(\%)$ para as análises da fase. Ao invés disso, os resultados experimentais apresentados no capítulo 5 exibem diretamente as características de módulo ($|Z|$) e fase (θ) da impedância em função do campo magnético externo (H_{ext}).

4.8. Técnicas de Fabricação

Dentre as técnicas de fabricação de ligas metálicas amorfas destacam-se: “*Melt Spinning*” [178-179], “*In-rotating Water Spinning*” [180-181], “*Taylor-wire Process*” [182-183], “*Glass-coated Melt Spinning*” [184-186], “Eletrodeposição” [187-190], “*Single Roller Melt Spinning*” [14,178,191] e “*Sputtering*” [192-193]. A Tabela 6 resume as principais tecnologias de fabricação, indicando o tipo de produto resultante (fio, fita ou filme fino), as dimensões típicas dos mesmos e, quando pertinente, as respectivas taxas de resfriamento, o que permite concluir sobre a eficiência relativa dos métodos [17].

Tabela 6 – Tecnologias de fabricação e suas características.

Técnica	Tipo de produto	Dimensões típicas (μm)	Taxa de resfriamento (K/s)
<i>Melt Spinning</i>	Fio de seção circular	Diâmetro: 1 - 300	$10^4 - 10^6$
<i>In-rotating Water Spinning</i>	Fio de seção circular	Diâmetro: 30 - 300	$10^5 - 10^6$
<i>Taylor-wire Process</i>	Fio de seção circular	Diâmetro: 2 - 100	$10^3 - 10^6$
<i>Glass-coated Melt Spinning</i>	Fio com revestimento de vidro	Diâmetro: 3 - 50	$10^4 - 10^7$
Eletrodeposição	Fio com camada magnética	Diâmetro: 20 - 1000	--
<i>Single Roller Melt Spinning</i>	Fita Amorfa	Espessura: 15 - 25	$10^6 - 10^8$
<i>Sputtering</i>	Filme fino	Espessura: 0.1 – 10	--

As técnicas de “*Melt Spinning*” e “*In-rotating Water Spinning*” permitem a produção de fios metálicos amorfos sem revestimento de vidro, esses são conhecidos como Fios Amorfos Convencionais (CAW – *Conventional Amorphous Wires*). Por outro lado, os métodos “*Taylor-wire Process*” e “*Glass-coated Melt Spinning*” – o qual, na verdade, é uma variação do “*Taylor-wire Process*” – produzem os chamados Fios Amorfos Recobertos de Vidro (AGCW – *Amorphous Glass-Covered Wires*). Do ponto de vista prático, os AGCW, especialmente os fabricados pelo “*Glass-coated Melt Spinning*”, são melhores que os CAW; pois possuem maior repetibilidade das propriedades dos fios e permitem uma ampla gama de variação dos parâmetros mecânicos e físicos, por exemplo, pode-se produzir amostras contínuas com até de 10 km de comprimento.

Os fios fabricados por “*Eletrodeposição*” apresentam ótima uniformidade em relação a suas propriedades magnéticas. Porém, é muito difícil produzir amostras muito longas usando esse método, o que limita a gama de potenciais aplicações. Por sua vez, as Fitas Amorfas e Filmes Finos produzidos respectivamente pelo “*Single Roller Melt Spinning*” e por “*Sputtering*”, têm se mostrado tão bons quanto os fios AGCW, uma vez que os mesmos também exibem ótimas propriedades magnéticas.

Uma importante técnica complementar é a síntese de materiais nanocristalinos a partir de seus precursores amorfos, a qual conserva as dimensões das amostras e pode otimizar suas propriedades magnéticas. Uma grande variedade de técnicas de recozimento (*annealing*) são citadas na literatura, as quais permitem a obtenção de estruturas nanocristalinas. Deve-se ressaltar que em certas aplicações (p.ex. núcleos de transformadores), os materiais nanocristalinos apresentam desempenhos superiores a de seus precursores amorfos [17].

4.8.1. Single Roller Melt Spinning

No desenvolvimento da pesquisa apresentada nessa dissertação utilizaram-se amostras GMI em forma de fita, as quais foram fabricadas pelo Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e fornecidas, por intermédio de um projeto de pesquisa conjunto que visa o desenvolvimento de novos transdutores magnéticos, ao Laboratório de Biometrologia pertencente ao Programa de Pós Graduação em Metrologia (Pós-MQI) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

As fitas GMI foram produzidas pelo método “*Single Roller Melt Spinning*”. Essa técnica consiste no direcionamento de um jato de metal fundido sobre um substrato de resfriamento em movimento, no qual ocorre a troca de calor que permite que o jato seja conformado e solidificado. A contínua colisão do jato de metal fundido com substrato de resfriamento (volante) forma uma poça dinâmica que serve como reservatório do qual a fita é continuamente formada e resfriada. Quando a solidificação começa, a fita é expelida da superfície do volante [14,17,178,191]. A Fig. 37 exhibe o diagrama esquemático do equipamento empregado no processo de fabricação das fitas GMI e as Figs. 38 e 39 retratam detalhes do equipamento presente na UFPE [14].

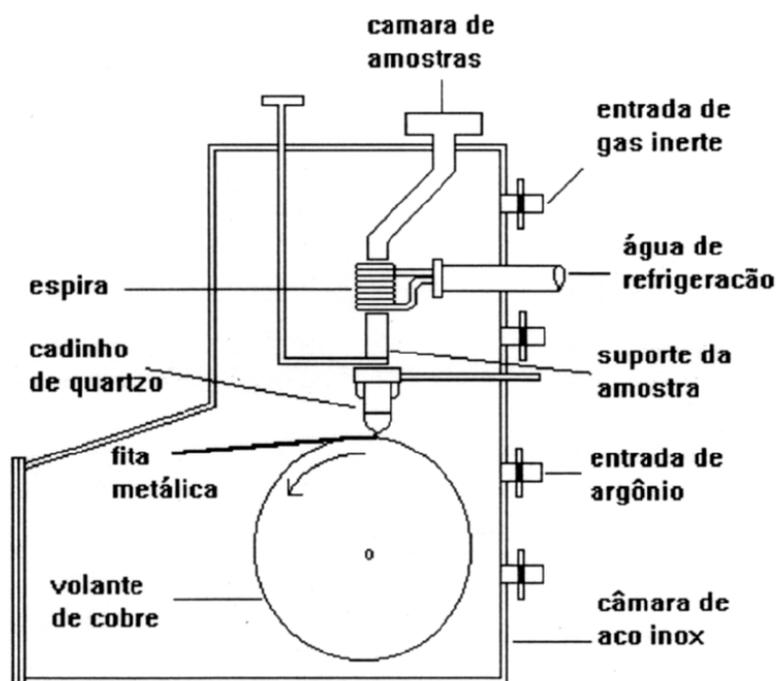


Figura 37 – Representação esquemática do processo “Single Roller Melt Spinning”.



Figura 38 – Equipamento utilizado, na UFPE, para produção de amostras GMI pela técnica “Single Roller Melt Spinning”.

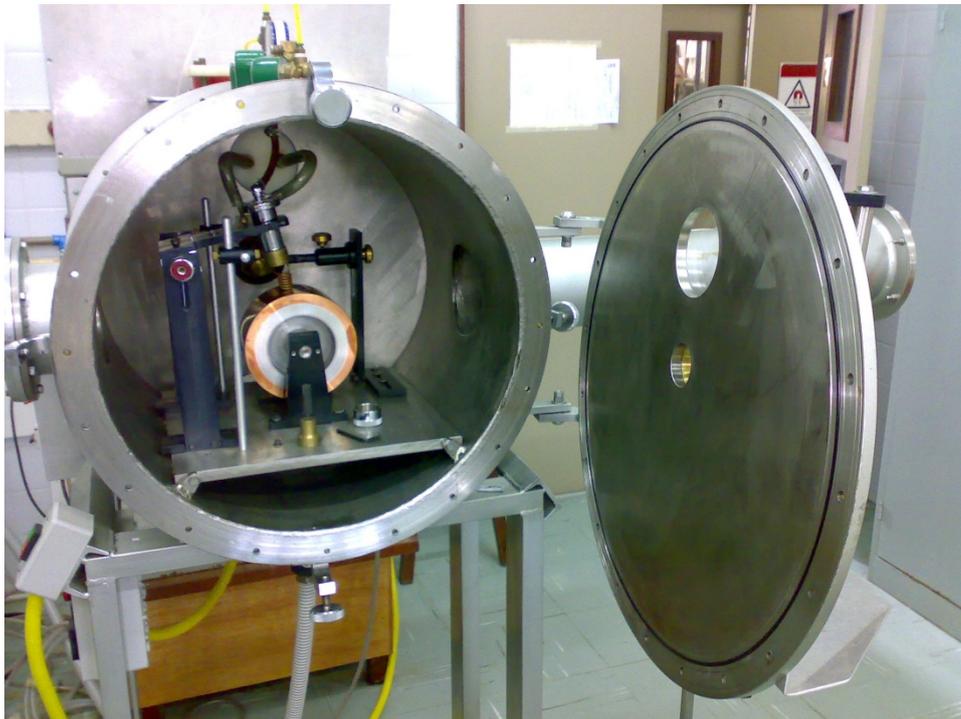


Figura 39 – Detalhes do interior do equipamento apresentado na Fig. 38.

