

Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós - Graduação em Engenharia
Elétrica.

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE CHAPAS DE
AÇOS ELÉTRICOS NA BLINDAGEM DE
CAMPOS MAGNÉTICOS DE BAIXA
FREQUÊNCIA

Aluno: Moacir de Souza jr.

Orientador: José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte Julho de 2000

Resumo

Um dos métodos mais empregados na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência é a utilização de chapas de materiais metálicos blindando a fonte de campo.

Este trabalho contempla a utilização de diversos tipos de chapas de aço na atenuação de um campo magnético de baixa frequência (60Hz), gerado por um sistema trifásico desequilibrado de quatro condutores e por uma bobina.

É estabelecida uma relação entre o desempenho destes materiais na blindagem com suas características metalúrgicas como composição química e tamanho dos grãos.

Experimentos mostram que, a anisotropia e a variação da permeabilidade magnética com o valor do campo são importantes, porém, nem sempre são considerados nos projetos.

Por fim, uma abordagem a respeito do desempenho apresentado por estes materiais é feita, destacando-se a possibilidade de se obter uma liga ferrosa contendo uma alta permeabilidade magnética e baixa resistividade elétrica, fatores estes indispensáveis numa boa blindagem.

Abstract

One of the most employed methods in the shielding of low frequency magnetic fields is the use of metallic material sheets to shield the field font.

This work refers to the employment of different kinds of steel sheets in the attenuation of a low frequency (60Hz) magnetic field, generated by an unbalanced triphasic system of four conductors and by one coil.

It's established a relation between the performance of these materials in the shielding, with their metallurgic characters as chemical composition and grain sizes.

Experiments show that the anisotropy and the variation of the magnetic permeability with the field value are important, however they are not always considered in the projects.

Finally, we make an approach about the performance showed by these materials, in which we emphasize the possibility of achieving one iron binding that contains a high magnetic permeability and low electric resistance that are indispensable factors for a good shielding.

Agradecimentos

Ao professor José Osvaldo, pela indispensável orientação nos momentos de dificuldade;

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT), pelos dias de convívio e apoio na realização dos experimentos;

Aos amigos do CPDEE pelos dias de convívio;

A ACESITA e a USIMINAS, pelo fornecimento dos materiais que possibilitaram a realização deste trabalho;

A todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

Resumo	<i>ii</i>
Abstract	<i>iii</i>
Agradecimentos	<i>iv</i>
1-Introdução	1
1.1- A Importância da Blindagem de Campos Magnéticos	1
1.2- Objetivo do Trabalho	2
1.3- Organização do Texto	2
2- Propriedades Elétricas e Magnéticas dos Materiais	4
2.1- Introdução	4
2.2- Condutividade Elétrica dos Metais	5
2.3- Momento de Dipolo Magnético Orbital e Spin	8
2.3.1- Momento de dipolo magnético orbital	8
2.3.2- Momento angular intrínseco do elétron (spin)	9
2.4- Comportamento da Matéria na Presença de um Campo Magnético	10
2.4.1- Paramagnetismo	12
2.4.2- Diamagnetismo	12
2.4.3- Ferromagnetismo, Antiferromagnetismo e Ferrimagnetismo	15
2.4.4- Dinâmica de rotação das paredes dos domínios	19
2.5- Considerações Finais	22
3- Aços Elétricos: Propriedades Microestruturais Eletromagnéticas.	24
3.1- Introdução	24
3.2- A Estrutura Atômica dos Materiais	25
3.2.1- Planos e direções cristalográficas. Índices de Miller	27
3.2.2- Anisotropia cristalina	28
3.2.3- O diagrama de equilíbrio ferro - carbono	30

3.3- Aços Elétricos	32
3.3.1- Fatores que influenciam as propriedades elétricas e magnéticas dos aços elétricos	35
3.4- Considerações Finais	38
4- Blindagem Eletromagnética	40
4.1- Introdução	40
4.2- Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Condutores e Dielétricos	41
4.2.1- Propagação de ondas em meios dielétricos sem perdas	42
4.2.2- Propagação de ondas em condutores perfeitos	43
4.3- Regiões de Campo Próximo e Distante	45
4.4- Eficiência da Blindagem Eletromagnética	46
4.4.1- Fator de reflexão - R	48
4.4.2- Fator de absorção – A	52
4.4.3- Fator de múltiplas reflexões - MR	54
4.4.4- Fator de blindagem total - FB	55
4.5- Efeito de Aberturas – Princípio de Banbinet	58
4.6- Considerações Finais	59
5- Bancada Experimental e Desenvolvimento Matemático.	61
5.1- Introdução	61
5.2- Desenvolvimento Matemático	62
5.2.1- Sistema de condutores trifásicos	62
5.2.2- Bobina	64
5.3- Bancada de Testes – Aspectos Físicos	66
5.4- Sistema de Geração e Controle das Correntes	68
5.5- Sistema de Medição – Análise dos Instrumentos	69
5.5.1- Medições de corrente	69
5.5.2- Medições da indução magnética – comparações dos sensores	70
5.6- Considerações Finais	73

6- Análise dos Resultados.	74
6.1- Introdução	74
6.2- Considerações Gerais	75
6.3- Apresentação dos Resultados	78
6.3.1- Aço carbono SAE 1010	89
6.3.2- Aços elétricos semi - processados	81
6.3.3- Aços elétricos totalmente processados – GO e GNO	82
6.3.4- Anisotropia magnética	87
6.3.5- Efeito do valor do campo no fator de blindagem do aço	89
6.4- Técnicas Alternativas de Blindagem	92
6.5- Comparação Geral dos Resultados	97
7- Conclusões.	101
7.1- Introdução	101
7.2- Conclusão Geral do Trabalho	102
7.3-Proposta de Continuidade do Trabalho	103
Referências Bibliográficas	106
Apêndice 1	110

1- Introdução.

1.1- A Importância da Blindagem de Campos Eletromagnéticos.

A importância na diminuição do valor do campo eletromagnético presente no ambiente está cada vez mais evidente [1]. A crescente sensibilidade dos equipamentos eletrônicos juntamente com o aumento do número das instalações e equipamentos elétricos vem causando problemas freqüentes a usuários de computadores e todo tipo de equipamento sensível [2,3,4].

Estudos ainda não totalmente conclusivos [5], vem apontando o campo eletromagnético como causador de diversos tipos de doenças entre elas a leucemia e câncer no cérebro, aumentando ainda mais a preocupação na redução do campo presente no ambiente.

Uma das técnicas de redução do nível de campo eletromagnético usadas é a blindagem da fonte de emissão, onde uma barreira metálica é colocada sobre a fonte impedindo a propagação do mesmo para o ambiente. É comum também a utilização de blindagem nos equipamentos.

O fator de blindagem, definido pela relação entre os valores do campo antes e depois da blindagem, depende diretamente do valor da freqüência em que estes são emitidos, sendo que em baixas freqüências, o problema da blindagem se torna crítico, não havendo ainda uma solução definitiva para o problema.

Algumas soluções alternativas para a contenção de campos magnéticos de baixa freqüência podem ser adotadas, entre elas: alteração do local das fontes de campo ou dos equipamentos eletrônicos mais sensíveis, modificações no arranjo geométrico dos cabos de alimentação do sistema [4,6] e utilização de técnicas de blindagem sanduíche. Não é rara a utilização de combinações destas técnicas [7], porém uma solução economicamente viável e definitiva ainda não foi encontrada.

1.2- Objetivo do Trabalho.

O objetivo principal deste trabalho é determinar a eficiência de diversas chapas de aços elétricos disponíveis no mercado na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência (60Hz), relacionando suas características metalúrgicas (composição química e estrutura cristalográfica) com suas propriedades elétricas e magnéticas.

Nos testes, todos realizados no Laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT) da UFMG, foram testadas chapas de aço isoladamente como também a técnica de blindagem sanduíche, onde o aço juntamente com o alumínio foram os materiais usados.

1.3- Organização do Texto.

Esta dissertação é composta de 7 capítulos e 1 apêndice.

Abaixo está uma breve discussão dos assuntos tratados no transcorrer do texto.

- Capítulo 1: "Introdução". Neste capítulo é descrita a importância da blindagem eletromagnética e a necessidade de se obterem métodos eficazes na contenção de campos magnéticos de baixas frequências.
- Capítulo 2: "Propriedades Elétricas e Magnéticas dos Materiais". É abordado neste capítulo, o comportamento dos materiais na presença de campos magnéticos, destacando-se a condutividade elétrica, a permeabilidade magnética e a magnetização, propriedade esta de singular importância no processo de blindagem.
- Capítulo 3: "Aços Elétricos: Propriedades Microestruturais e Eletromagnéticas". De início, o capítulo apresenta a estrutura reticular dos materiais metálicos, destacando os índices de "Miller", que é um importante parâmetro de controle da textura dos aços laminados.

Diversos tipos de aços elétricos existentes no mercado são analisados destacando-se a relação entre suas propriedades microestruturais e eletromagnéticas.

- Capítulo 4: “Blindagem Eletromagnética”. É apresentado aqui o conceito de blindagem eletromagnética junto a uma análise matemática de todos os fenômenos envolvidos. Comparações são feitas entre os diferentes tipos de materiais usados na blindagem.
- Capítulo 5: “Bancada Experimental e Desenvolvimento Matemático”. Neste capítulo são apresentados os equipamentos usados nos testes e a formulação matemática empregada no cálculo das induções magnéticas geradas pelas diferentes fontes de campo usadas.
- Capítulo 6: “Análise dos Resultados”. Uma análise dos resultados experimentais, obtidas em diversas configurações de blindagem, é feita neste capítulo através de tabelas e gráficos. Comentários a respeito do desempenho de cada material específico são feitos no final de cada tópico.
- Capítulo 7: “Conclusões”. Conclusões dos resultados experimentais são apresentadas juntamente a uma proposta de continuidade dos estudos. E feita também uma análise de custo dos materiais utilizados, justificando o emprego de ligas ferrosas na blindagem.
- Apêndice 1: “Curvas de Magnetização de Pico”. Contém as curvas de magnetização de pico dos aços elétricos totalmente processados utilizados nos testes.

2- Propriedades Elébricas e Magnéticas dos Materiais .

2.1- Introdução.

Neste capítulo é feita uma análise teórica dos principais parâmetros dos materiais metálicos que influenciam suas propriedades de refletir, absorver e transmitir ondas eletromagnéticas.

A condutividade elétrica dos materiais sólidos é abordada a partir da teoria das bandas de energia chegando, por fim, a uma análise microscópica da resistividade como função da mobilidade dos portadores negativos e positivos.

O conceito de momento de dipólo magnético orbital, característica intrínseca dos materiais, é descrito como parte introdutória à análise da magnetização e do comportamento dos materiais na presença de campos magnéticos externos.

Um destaque especial é dado aos materiais ferromagnéticos, quando uma análise dos fenômenos envolvidos na rotação das paredes dos domínios é feita na presença de campo magnético variável no tempo.

É importante ressaltar que todos os conceitos apresentados neste capítulo, são baseados em fundamentos da física clássica, porém todos os resultados estão de acordo com uma abordagem mais sofisticada, que se faz presente na moderna mecânica quântica.

2.2- Condutividade Elétrica nos Metais.

A condutividade elétrica é um dos principais parâmetros que influenciam na reflexão e absorção das ondas eletromagnéticas pelos materiais metálicos.

No modelo atômico dos sólidos, descrito pela física quântica, os elétrons ocupam níveis discretos de energia em torno do núcleo dos átomos. A uma temperatura próxima do zero absoluto os elétrons ocupam níveis crescentes de energia a partir de uma região mais próxima ao núcleo [8].

Tais níveis discretos de energia são separados uns dos outros pelos chamados "gaps" ou vazios de energia, onde não é permitida a existência de elétrons. O tamanho do "gap" que separa a região de mais alta energia nos sólidos, chamada de nível de valência, da chamada região de condução é que define se o material é ou não um bom condutor elétrico (figura 2.1) [8].

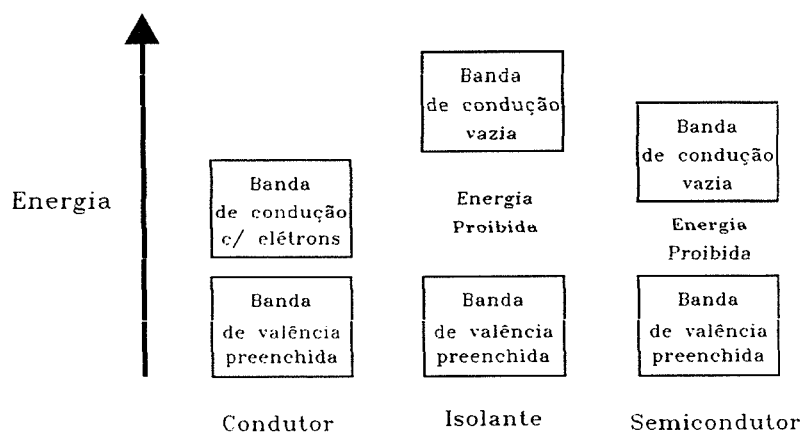


Figura 2.1: Níveis de energia nos materiais

Nos materiais que possuem maior "gap", mesmo na presença de um campo elétrico externo, os elétrons não adquirem energia suficiente para atingir a região de condução. Isto faz com que o material seja um mau condutor.

Nos bons condutores, cujas regiões de valência e condução estão mais próximas, mesmo na ausência de um campo elétrico externo, a simples agitação térmica faz com que alguns elétrons ocupem a região de condução.

A grande proximidade dos átomos vizinhos faz com que um compartilhamento de elétrons passe a existir formando a chamada “nuvem eletrônica” [8] responsável pela alta condutividade elétrica dos metais.

Os elétrons desta “nuvem eletrônica” possuem um movimento caótico (figura 2.2) produzido pela energia térmica estando em constantes colisões com as imperfeições da rede cristalina mudando aleatoriamente de velocidade e direção.

A esta velocidade aleatória dos elétrons, da ordem de 10^5 m/s, dá-se o nome de velocidade instantânea real “ v ”, e a distância percorrida por um elétron entre duas colisões sucessivas nas imperfeições da rede é definida como “caminho médio” λ [8].

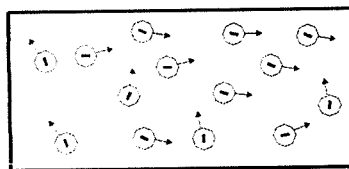


Figura 2.2: Movimento de elétrons em um condutor

Na presença de um campo elétrico, a velocidade dos elétrons passa agora a ter uma direção ordenada caindo para 10^{-4} m/s (figura 2.3): Esta velocidade é agora chamada de velocidade de arrastamento “ v_d ” [8].

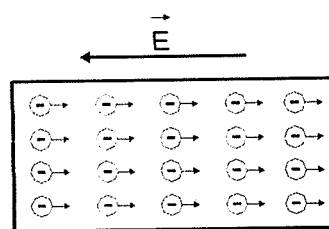


Figura 2.3: Movimento de elétrons em um condutor na presença de um campo

Pela segunda lei de Newton, a velocidade dos elétrons tenderia a aumentar continuamente, pois o campo elétrico exerce sobre eles uma força constante. Isto não acontece devido ao permanente choque dos mesmos com as imperfeições da rede fazendo com que uma velocidade constante seja atingida.

A velocidade de arrastamento é definida em função do campo elétrico aplicado, da velocidade instantânea real e do caminho médio definidos anteriormente, sendo [8]:

$$\bar{v}_d = \frac{a\lambda}{\bar{v}} = \frac{e\bar{E}\lambda}{m\bar{v}} \quad [2.1]$$

onde o quociente $\frac{e\lambda}{m\bar{v}}$ é definido como a mobilidade “ m_o ” dos elétrons e depende das características do material.

Com a definição microscópica de resistividade $\rho = \frac{\bar{E}}{j}$ [9], onde “ j ” é a densidade de corrente, e um pouco de álgebra, a definição de condutividade microscópica é obtida como [9]:

$$\sigma = \frac{ne^2\lambda}{m\bar{v}} = ne\mu \quad [2.2]$$

onde “ n ” é o número de elétrons por unidade de volume e μ a mobilidade dos mesmos.

É importante ressaltar que a equação 2.2, descreve a condutividade em bons condutores, onde somente há movimento de cargas (portadores) negativas.

Nos semicondutores no entanto, ocorrem os movimentos de lacunas que podem ser consideradas como cargas (portadores) positivas em movimento [9], com isto uma equação mais geral da condutividade pode ser escrita como:

$$\sigma = nem_{o-} + nqm_{o+} \quad [2.3]$$

onde:

m_{o-} = mobilidade dos portadores negativos (elétrons);

m_{o+} = mobilidade dos portadores positivos (lacunas);

e = carga dos elétrons;

q = carga positiva das lacunas;

n = número de portadores por unidade de volume no material.

2.3- Momento de Dipolo Magnético Orbital e Spin.

O conceito de momento de dipolo orbital e de spin é de fundamental importância na compreensão dos fenômenos relacionados à magnetização dos materiais.

2.3.1- Momento de dipolo magnético orbital.

Partindo do modelo atômico clássico, cujos elétrons descrevem órbitas circulares em torno do núcleo atômico, e considerando apenas um elétron de carga “-e”, é válida a hipótese de que a este elétron é associada uma corrente elétrica de intensidade “i” dada pela equação [9]:

$$i = \frac{|e|}{t} = \frac{e\bar{v}}{2\pi r} \quad [2.4]$$

onde “t” é o tempo gasto pelo elétron de carga “-e” para dar uma volta completa de raio “r”, em torno do núcleo atômico.

A experiência mostra que o campo magnético criado por este elétron, medido a uma grande distância da órbita, é equivalente a um dipolo magnético localizado no centro da órbita (figura 2.4) [9].

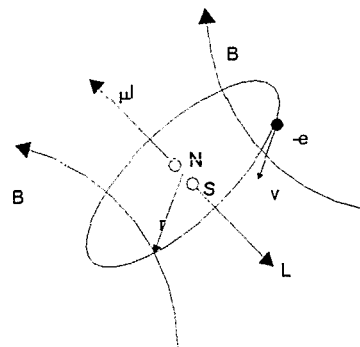


Figura 2.4: Momento de dipolo criado por um elétron em órbita do núcleo.

Justifica-se deste modo, a definição matemática de momento de dipolo magnético orbital $\bar{\mu}_l$ [9].

$$\bar{\mu}_l = iA \quad [2.5]$$

onde "A" é a área da órbita suposta circular e "i" é a corrente elétrica associada ao movimento do elétron em torno do núcleo atômico.

É importante ainda, o momento angular orbital "L", matematicamente definido por [9]:

$$\bar{L} = m\bar{v}r \quad [2.6]$$

onde:

m= massa do elétron;

r = raio da órbita do elétron em torno do núcleo.

No caso de cargas negativas seu sentido é antiparalelo ao do momento de dipolo angular como pode ser verificado também na figura 2.4.

2.3.2- Momento angular intrínseco do elétron (spin) .

O momento angular total de um átomo não se deve apenas ao movimento dos elétrons em suas órbitas, mas também ao movimento dos elétrons em torno de seus próprios eixos, e das cargas no núcleo atômico.

O momento magnético associado ao núcleo atômico é cerca 660 vezes menor do que o devido ao movimento dos elétrons em suas órbitas, sendo portanto pouco significativo no tratamento das propriedades magnéticas da matéria [10].

Em 1927, dois físicos, Phipps e Taylor, baseados na experiência realizada em 1922 por Stern e Gerlach [11] realizaram em laboratório, usando um feixe de átomos, medidas para determinar o momento magnético de átomos de hidrogênio. Seus resultados mostraram que o momento resultante diferia daquele esperado somente devido ao movimento orbital dos elétrons. Isto fez com que fossem feitas hipóteses a respeito de um momento de dipolo

magnético intrínseco do elétron associado a um momento angular denominado de "spin" – "S".

Uma abordagem completa do efeito do spin foge do objetivo deste trabalho por não ser uma teoria clássica, mas exigindo profundos conhecimentos da mecânica quântica relativista proposta em 1929 por Paul A. M. Dirac.

Uma completa abordagem das interações dos momentos angulares orbital e de "spin" pode ser encontrada em [9].

2.4- Comportamento da Matéria na Presença de um Campo Magnético.

O momento magnético resultante de certos materiais, ou seja, a soma vetorial dos momentos dos elétrons (orbital e de spin) com o do núcleo tende a ser zero.

No entanto existem alguns materiais em que esta soma difere de zero, apresentando um momento magnético resultante mesmo na ausência de campo externo. Diz-se que estes materiais possuem magnetização espontânea, um vetor na mesma direção do momento de dipolo resultante que, matematicamente, pode ser definido como o momento de dipolo magnético resultante (orbital mais "spin") (\mathbf{m}_r) por unidade de volume do material [8].

$$\bar{\mathbf{M}} = \frac{\bar{\mathbf{m}}_r}{V} \quad [2.7]$$

Com um campo magnético externo aplicado, mesmo os materiais que não possuíam magnetização espontânea passam a tê-la, e seus momentos de dipolo magnético resultante podem ser alinhados de maneira a aumentar ou diminuir a indução magnética \mathbf{B} no interior do material.

Nos materiais onde o vetor magnetização se orienta no mesmo sentido da indução \mathbf{B} , são denominados magnéticos.

No vácuo, a relação entre a indução magnética \mathbf{B} e o campo magnético \mathbf{H} é linear sendo [8] :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad [2.8]$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Na presença de um material magnético a equação 8 toma a forma [8]:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad [2.9]$$

em materiais lineares e isotrópicos [8]:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad [2.10]$$

sendo χ_m definido como a suscetibilidade magnética do meio.

Das equações 2.10 e 2.9 é obtido:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi_m) = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad [2.11]$$

Sendo μ_r definida como a permeabilidade magnética do material relativa ao vácuo.

A relação linear entre \mathbf{B} e \mathbf{H} é válida no vácuo, no entanto para determinados materiais magnéticos, é válida somente quando o valor do campo \mathbf{H} não ultrapasse determinados valores.

Em materiais anisotrópicos [12], nos quais as propriedades magnéticas variam com a direção, a permeabilidade se torna um tensor e a relação entre \mathbf{B} e \mathbf{H} é dada pela matriz:

$$\begin{bmatrix} \vec{B}_x \\ \vec{B}_y \\ \vec{B}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{H}_x \\ \vec{H}_y \\ \vec{H}_z \end{bmatrix} \quad [2.12]$$

Como exemplo de materiais anisotrópicos, amplamente usados na engenharia, podem ser citados o níquel e o ferro.

2.4.1- Paramagnetismo.

Paramagnetismo engloba uma classe de materiais magnéticos em que os átomos possuem momento de dipolo resultante e na presença de um campo magnético externo, se alinham na mesma direção e sentido deste, aumentando a indução magnética no interior do material como mostra a figura 2.5a. A figura 2.5b mostra que na ausência de campo magnético, os momentos magnéticos de cada átomo estão dispostos de maneira a não produzir nenhuma magnetização resultante.

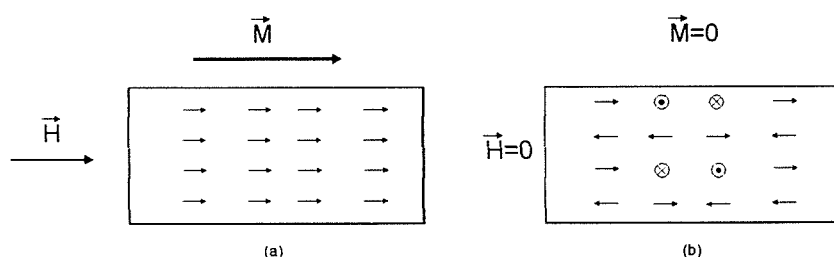


Figura 2.5: Orientação dos dipolos no interior de um amostra paramagnética

Devido a este alinhamento entre os vetores de magnetização e indução, uma força atrativa surge entre o material e a fonte de campo magnético.

A magnetização nestes materiais é fraca se comparada àquela dos materiais ferromagnéticos como o ferro e o cobalto.

Um material paramagnético de significativa importância na engenharia é o alumínio.

Uma abordagem mais completa do paramagnetismo pode ser encontrada em [9].

2.4.2- Diamagnetismo.

Em meados do século XIX, Michael Faraday, colocando um pedaço de bismuto perto de um polo de um forte imã permanente notou que era fortemente repelido [10]. A estas substâncias foi dado o nome de diamagnéticas.

O fenômeno do diamagnetismo está presente em todos os materiais, porém nos materiais magnéticos seu efeito é inibido pela presença do ferromagnetismo ou paramagnetismo [10].

Os átomos dos materiais diamagnéticos não possuem momento de dipolo magnético resultante como os paramagnéticos, pois a soma vetorial dos momentos orbital, de "spin" e nuclear se cancelam.

A figura 2.6 [10] mostra dois elétrons percorrendo órbitas no sentido inverso, nesta situação, a única força existente é de origem eletrostática, e está em ambos os elétrons, apontada para o centro de suas órbitas representando a força centrípeta.

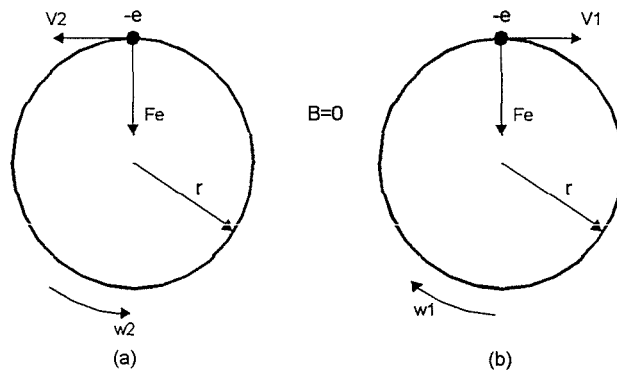


Figura 2.6: Elétrons em órbita em torno do núcleo.

Na presença de uma indução externa \mathbf{B} , uma força magnética passa a atuar em ambos os elétrons, alterando suas velocidades angulares de maneira a manter o raio de suas órbitas constantes. Isto faz com que um momento de dipolo magnético constante de mesma direção e sentido contrário ao campo externo apareça como mostra a figura 2.7 [10].

Experiências mostram que mesmo para valores de campos magnéticos intensos a variação da velocidade angular em ambos os sentidos de rotação é pequena [10].

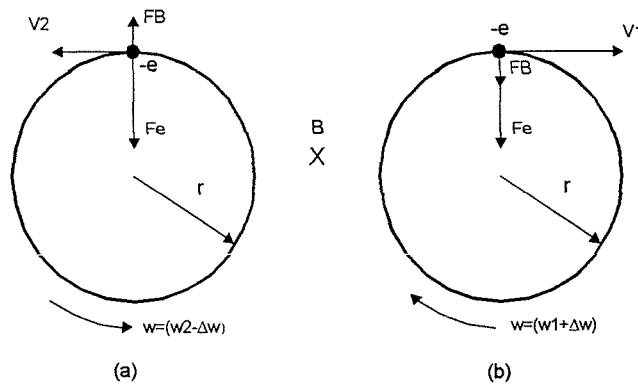


Figura 2.7: Elétrons em órbita do núcleo na presença de um campo magnético.

Aplicando-se a segunda lei de Newton e considerando a afirmativa acima, obtém-se para o incremento da velocidade angular [10]:

$$\Delta w = \pm \frac{e\vec{B}}{2m} \quad [2.13]$$

Considerando que, em uma amostra de material diamagnético, estatisticamente, metade dos elétrons tem suas órbitas no sentido indicado pela figura 2.6a e outra metade no sentido da figura 2.6b. É esperado, assim, que um vetor de dipolo magnético total apareça no sentido contrário ao campo aplicado (figura 2.8). O material diamagnético é, desta forma, repelido pela fonte de campo.

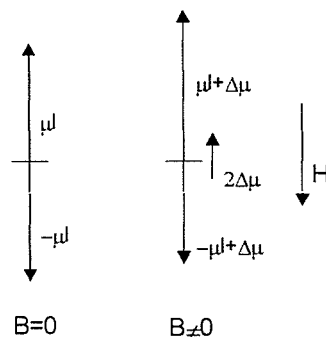


Figura 2.8: Dipolo magnético resultante com a aplicação de um campo magnético

Como exemplo de material diamagnético usado na engenharia pode ser citado o cobre.

2.4.3- Ferromagnetismo, antiferromagnetismo e ferrimagnetismo.

O ferromagnetismo é um fenômeno que ocorre em poucos elementos. Nestes, os átomos vizinhos têm seus momentos de dipolo magnético rigidamente alinhados devido a um tipo de interação entre átomos vizinhos, chamado acoplamento de troca [9]. Isto faz com que estes materiais tenham um comportamento magnético diferenciado dos demais, sendo não lineares e anisotrópicos, necessitando, desta maneira, de uma abordagem matemática mais complexa.

Apesar dos átomos terem seus momentos de dipolo interrelacionados, a magnetização resultante em uma amostra de material ferromagnético, na ausência de campo, é nula. Este fato é explicado pela presença de domínios magnéticos, regiões distintas dispostas aleatoriamente na amostra, englobando determinado número de átomos com momentos magnéticos alinhados na mesma direção (figura 2.9).

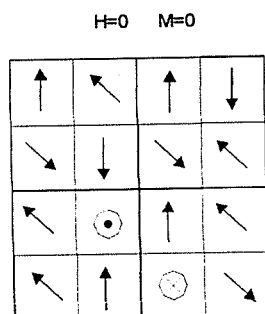


Figura 2.9: Domínios magnéticos na ausência de campo

Em materiais para e diamagnéticos a permeabilidade magnética é constante para todo valor de campo aplicado, isto no entanto não ocorre nos ferromagnéticos pois os domínios se alinham na medida que o campo magnético externo é aumentado, produzindo uma magnetização crescente no interior do material.

A figura 2.10 mostra este efeito em uma amostra ferromagnética, onde os domínios se alinham até que o campo aplicado atinja um determinado valor no

qual a amostra passa a se comportar como se fosse formada apenas por um domínio (figura 2.10 d) [9].

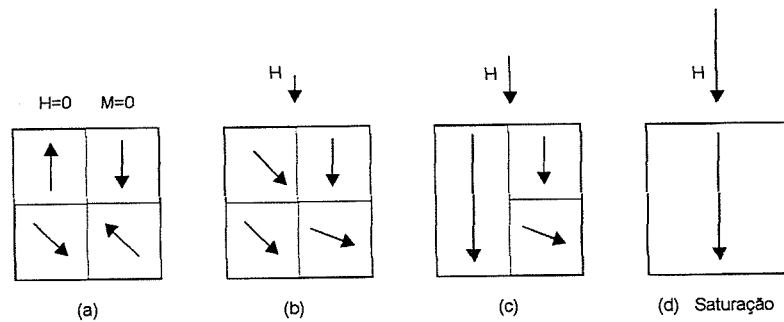


Figura 2.10: Movimento gradual dos domínios com o aumento do campo

Nesta situação, por mais que se aumente o campo magnético, o vetor magnetização não se modifica caracterizando um material magneticamente saturado sendo fortemente atraído pela fonte de campo.

A figura 2.11 mostra a relação entre o campo magnético H e a indução B em um material ferromagnético. A curva resultante é chamada curva de magnetização.

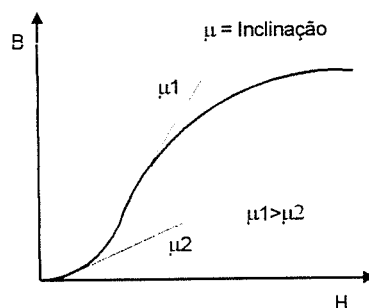


Figura 2.11: Relação entre B e H em materiais ferromagnéticos

A inclinação da curva em um determinado ponto indica o valor da permeabilidade no ponto. Fica claro, assim, que o valor do campo magnético aplicado influencia no valor da permeabilidade do material, sendo um fator que deve ser considerado nos projetos de blindagem. Aplicando-se um campo magnético alternado, a curva de magnetização toma a forma mostrada na figura 2.12 sendo chamada de curva de histerese. Tal curva mantém estreita

relação com a mobilidade das paredes dos domínios, fato explorado no próximo item.

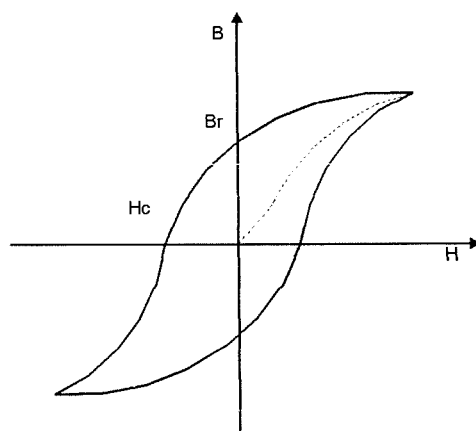


Figura 2.12: Curva de histerese produzida por um campo magnético alternado.

Um parâmetro importante no estudo dos materiais magnéticos é a temperatura em que são submetidos. Em 1895 Pierre Curie notou que a suscetibilidade dos materiais paramagnéticos é extremamente alta quando estão a temperaturas próximas do zero absoluto. Este fato é explicado pela pequena agitação térmica, que facilita o alinhamento dos momentos atômicos. Esta é a lei de “Curie” dos materiais paramagnéticos, e pode ser expressa matematicamente como [11]:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad [2.14]$$

onde:

C = constante de “Curie” de cada material paramagnético em particular.

Mais tarde Pierre Weiss mostrou que os materiais ferromagnéticos se comportam como os paramagnéticos acima de uma dada temperatura característica chamada de temperatura de “Curie”.

A relação matemática entre a suscetibilidade dos ferromagnéticos com a temperatura, válida somente para temperaturas superiores a T_c , é chamada lei de “Curie-Weiss” e matematicamente é expressa [11]:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad [2.15]$$

onde:

T_c = temperatura de "Curie" ferromagnética, característica de cada material.

Dois fenômenos ainda ligados à presença de domínios magnéticos são observados em determinados materiais, o antiferromagnetismo e o ferrimagnetismo [9].

No antiferromagnetismo, o acoplamento entre os domínios força os dipolos magnéticos dos íons adjacentes a manterem uma configuração antiparalela.

Entre as substâncias que exibem este tipo de comportamento, pode ser citado o MnO_2 .

Os materiais que exibem um comportamento ferrimagnético, possuem geralmente dois tipos de íons que, devido ao efeito do acoplamento de troca, assumem uma configuração magnética antiparalela entre si. Como exemplo pode ser citado a ferrita em que os íons Fe^{2+} e Fe^{3+} , estão presentes.

A figura 2.13 [10] mostra estes dois tipos de acoplamento.

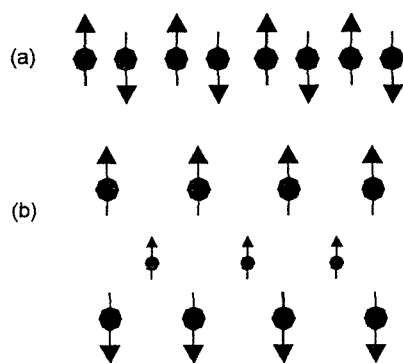


Figura: 2.13: (a) antiferromagnetismo (b) ferrimagnetismo

Os efeitos magnéticos destes materiais podem ser considerados desprezíveis se comparados ao dos materiais ferromagnéticos.

2.4.4- Dinâmica de rotação das paredes dos domínios.

Em 1932 Block [14] propôs a hipótese segundo a qual entre domínios magnéticos adjacentes existe uma interface na qual os momentos magnéticos atômicos mudam gradativamente de direção, ou seja, a passagem de um domínio a outro não ocorre bruscamente como mostra a figura 2.14 abaixo [11].

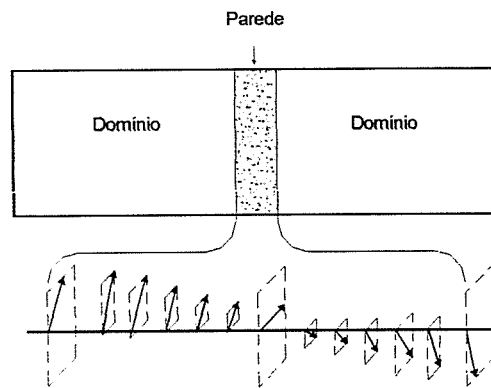


Figura 2.14: Passagem gradual entre domínios adjacentes

A energia total associada à espessura das paredes reflete a competição das energias magnetostáticas e de troca entre os momentos magnéticos.

A energia magnetostática de um material ferromagnético, é responsável por manter os momentos magnéticos atômicos em suas direções de fácil magnetização, sendo mínima quando o campo magnético aplicado está na mesma direção e sentido da magnetização espontânea dos domínios.

A energia magnetostática pode ser calculada por [11]:

$$E_m = -HM \cos(\theta) \quad [2.16]$$

onde:

M = magnetização espontânea dos domínios;

H = campo magnético aplicado;

θ = ângulo entre o campo aplicado e a direção de fácil magnetização.

A energia de troca entre os domínios, explicada pela física quântica, força os momentos magnéticos a ficarem alinhados paralelamente independente de

suas direções de fácil magnetização, fazendo com que a transição entre domínios adjacentes seja a mais suave possível.

A competição entre estes dois tipos de energia faz com que a espessura das paredes assumam valor intermediário na qual a soma das energias seja mínima.

A espessura das paredes pode ser calculada por [14]:

$$d = \sqrt{\frac{J_t}{k}} \quad [2.17]$$

onde:

J_t = energia de troca entre os domínios;

k = constante de anisotropia do material;

A presença de defeitos estruturais no material influencia os movimentos das paredes dos domínios, pois servem de barreiras fazendo com que diferentes regiões de mínima energia apareçam. A figura 2.15 mostra este efeito em um gráfico de energia interna em função da posição da parede [14].

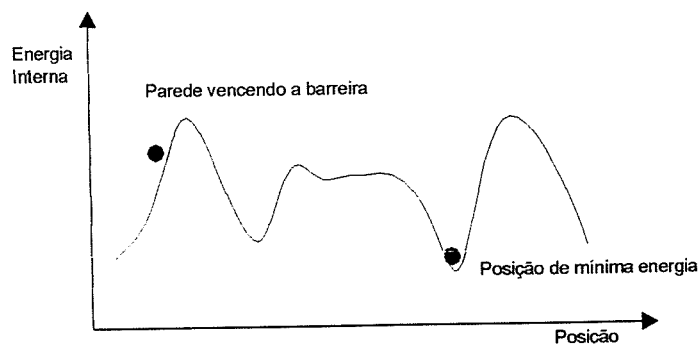


Figura 2.15: Variação da energia das paredes com a posição

A figura 2.16 [13] mostra as mudanças nas estruturas dos domínios magnéticos ao longo das curvas de histerese e magnetização, para um campo magnético variável.

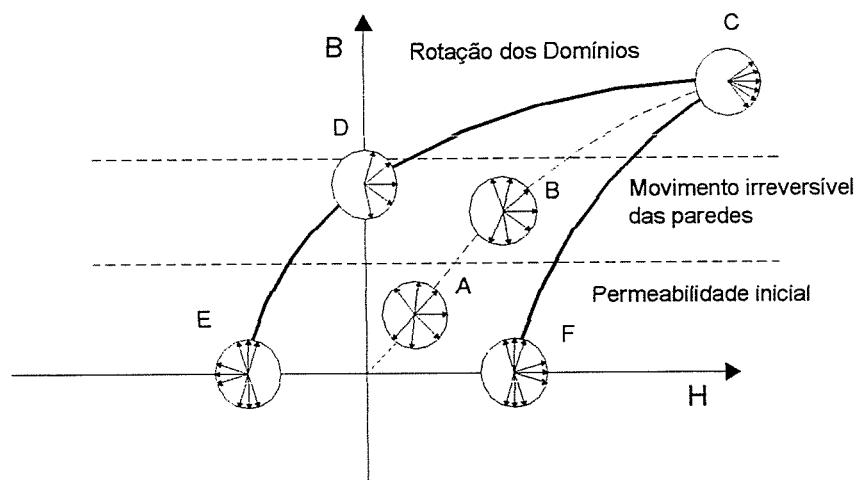


Figura 2.16: Mudança de estrutura dos domínios durante a magnetização

No ponto "A" tem-se o início de magnetização do material, esta região é chamada de região de permeabilidade inicial e é caracterizada pela rotação contínua das paredes dos domínios. Se for retirado o campo magnético as paredes voltam para a posição de origem, ou seja a rotação nesta região é reversível.

No ponto "B", o campo magnético aplicado é maior e um movimento irreversível e em saltos das paredes é observado. Estes saltos são causados por movimentos bruscos das paredes que, ao se livrarem de uma barreira devido a um defeito, movem-se rapidamente até encontrar a próxima região de equilíbrio. Estes movimentos bruscos causam grandes variações locais de indução gerando um ruído eletromagnético denominado de ruído de Barkhausen [13].

Nesta região a permeabilidade cresce com o valor do campo aplicado.

Na região do ponto "C" (aproximadamente o joelho da curva de magnetização) o aumento da magnetização só se dá devido à rotação dos domínios, pois todo movimento possível das paredes já ocorreu. Esta região é chamada de região de permeabilidade decrescente.

A partir do ponto “C”, o valor do campo magnético aplicado começa a diminuir gradativamente até se anular no ponto “D”. Nele a amostra ainda mantém uma magnetização residual chamada de remanescência B_r causada pela resistência encontrada das paredes ao retornarem para suas posições de fácil magnetização.

Ao ser invertido o sentido do campo, inicia-se o processo de crescimento dos domínios na direção contrária. O ponto “E” mostra o momento onde a resultante das polarizações da esquerda e da direita se anulam. A este valor de campo aplicado é dado o nome de campo coercivo H_c .

O ponto “F” é similar ao ponto “E”, porém na direção oposta.

A velocidade de rotação das paredes, quando o material é submetido a um campo variável, causa uma variação na indução magnética criando uma corrente elétrica ocorrendo dissipação de energia no interior do material, como mostra a figura 2.17 [14].

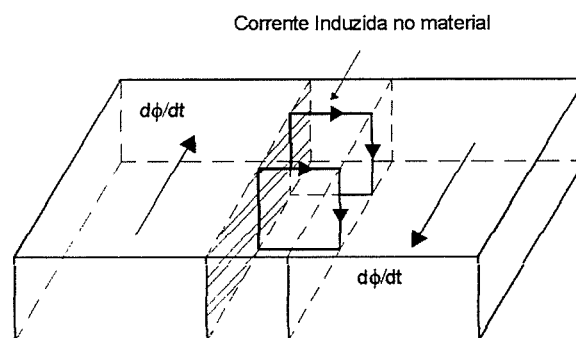


Figura 2.17: Variação de fluxo magnético e correntes induzidas

2.5- Considerações Finais.

A maior parte dos materiais usados na engenharia são ligas, ou seja, uma combinação de um ou mais elementos.

O emprego da combinação de materiais formando tais ligas, tem o objetivo de melhorar alguma característica do material, como o aumento da permeabilidade magnética e redução do campo coercivo, não invalidando os conceitos e equações apresentados neste capítulo.

Como exemplo podem ser citados o Hipernik e o Permalloy, ligas de ferro-níquel e os aços ao silício de grande emprego em máquinas elétricas, e tema central deste trabalho.

O próximo capítulo descreve as principais características, relacionadas a blindagem eletromagnética, dos aços elétricos destacando a influência prejudicial do silício na eficiência da blindagem.

3- Aços Elétricos: Propriedades Microestruturais e Eletromagnéticas.

3.1- Introdução.

A estrutura cristalina de que são formados os metais é determinante nas suas características eletromagnéticas. Os principais reticulados cristalinos ou células unitárias são apresentados neste capítulo juntamente com os índices de Miller, parâmetro importante na determinação da textura cristalográfica dos materiais sobretudo nos aços elétricos de grãos orientados.

O diagrama de equilíbrio binário Fe – C é uma importante ferramenta que mostra a variação da solubilidade do carbono e as principais transformações alotrópicas que ocorrem no material em função da temperatura. Como exemplo, é analisada a solidificação de um tipo de aço bastante usado na engenharia, o SAE 1010, que contém 0.1% de carbono.

Uma descrição das principais características presentes nos aços elétricos disponíveis no mercado é feita destacando-se a influência da microestrutura e composição química em suas propriedades elétricas e magnéticas.

3.2- A Estrutura Atômica dos Materiais.

Nos metais, os átomos são ligados entre si através de uma ligação denominada metálica, caracterizada pelo compartilhamento de elétrons entre vários átomos vizinhos.

Este tipo de ligação, por ser extremamente forte, faz com que os átomos formem estruturas espacialmente bem definidas denominadas de reticulado cristalino ou células unitárias. Na figura 3.1 estão algumas das mais importantes [15].

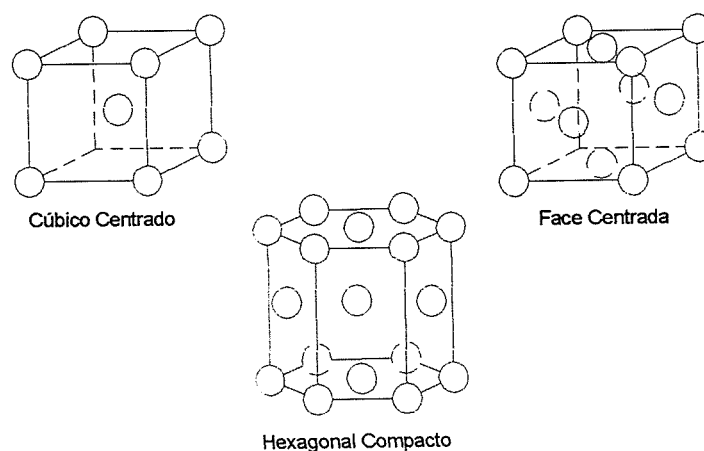


Figura 3.1: Reticulados Cristalinos

- Reticulado Cúbico de Corpo Centrado (CCC):
Os átomos do metal estão localizados no vértice e no centro do cubo. Podem ser citados o ferro (temperatura ambiente), cromo, lítio, molibdênio, entre outros que possuem este tipo de estrutura.
- Reticulado Cúbico de Face Centrada (CFC):
Neste reticulado os átomos se dispõem no centro e nas faces da estrutura cúbica. O ferro acima de 910°C, alumínio, cobre e chumbo possuem esta estrutura.
- Reticulado Hexagonal Compacto (HC):
Os átomos se localizam em cada vértice e no centro das bases de um prisma hexagonal.

Entre os metais cujo reticulado é o descrito estão o zinco, o magnésio, e o cádmio.

Durante a solidificação de um metal, há formação de células unitárias em diferentes regiões que crescem pela adição de mais átomos. Ao conjunto de células unitárias dá-se o nome de cristais, que entrando em contato com outros adquirem contornos irregulares passando a serem denominados de grãos como é mostrado na figura 3.2 [15].

É importante lembrar que em cada grão existem vários domínios magnéticos orientados aleatoriamente.

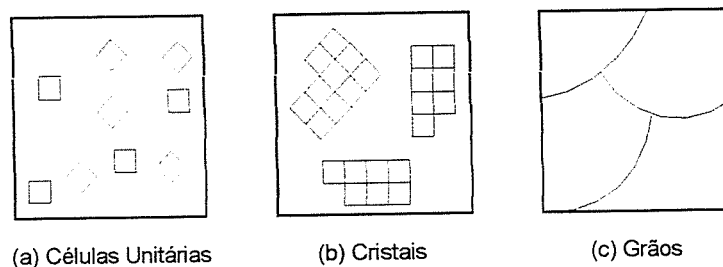


Figura 3.2: Formação dos grãos na solidificação de um metal

Alguns materiais, entre os quais está o ferro, apresentam diferentes estruturas reticulares dependendo da temperatura. A tal fenômeno é dado o nome de alotropia e é de fundamental importância na prática, pois está ligado à solubilidade do carbono no ferro.

Aquecendo-se o ferro puro, o reticulado cúbico de corpo centrado chamado de ferro alfa se faz presente até a temperatura de aproximadamente 900°C , a partir daí, até 1400°C , se faz presente a estrutura cúbica de face centrada, ou ferro gama.

Acima de 1400°C a forma alotrópica de corpo centrado retorna, e é chamada de ferro delta, com pouca importância prática [16].

3.2.1- Planos e direções cristalográficas. Índices de Miller.

Planos cristalográficos são planos que contêm átomos no reticulado cristalino, sendo de fundamental importância nas características elétricas e magnéticas dos metais [15].

Considerando uma célula unitária cúbica, especificações são feitas a respeito de seus planos e direções cristalográficas. Para isto, admite-se o reticulado cúbico posicionado em um sistema de coordenadas cartesianas como mostrado na figura 3.3 [15]. É adotado o índice de Miller para definir as direções em que determinado plano cristalográfico se encontra em relação a uma referência. Na figura 3.3, o plano ABCD, paralelo ao eixo X e Z, intercepta o eixo Y a uma distância interatômica a_0 . Os índices de Miller para tal plano seriam $\left(\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}\right)$, ou simplificando (010).

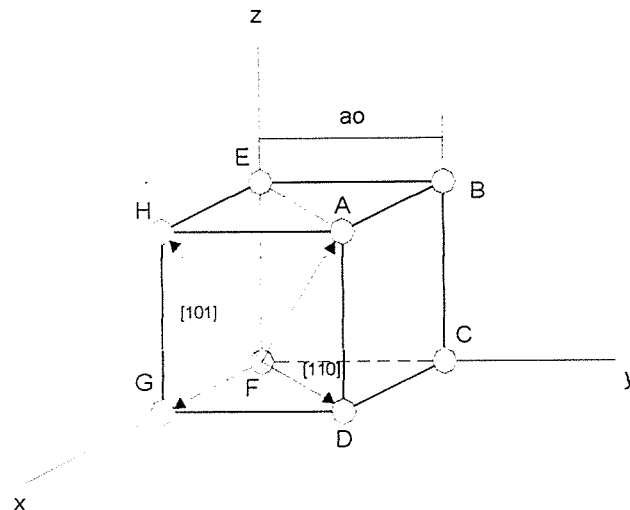


Figura 3.3: Índices de Miller em um reticulado cúbico

No caso das direções cristalográficas, estas são representadas por números entre chaves. A direção FD por exemplo é representada por [110].

Na figura 3.4 estão alguns dos mais importantes planos cristalográficos em estruturas cúbicas [15].

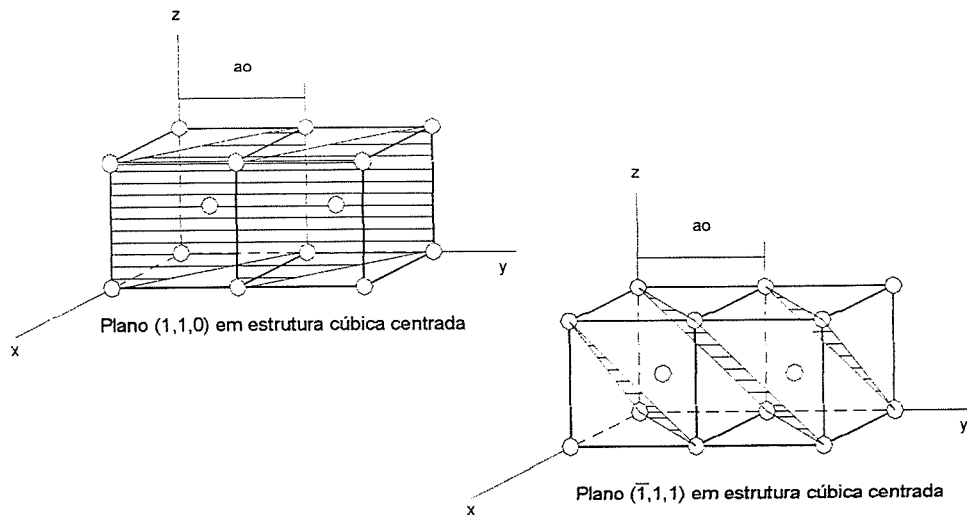


Figura 3.4: Planos cristalográficos em estruturas cúbicas

Em uma chapa de um metal qualquer existem infinitos grãos cujas orientações podem ser tomadas em relação ao comprimento da chapa ou sentido de laminação e o plano de sua superfície. É chamada de textura cristalina, a distribuição das orientações do conjunto de grãos em relação a estes dois referenciais [14].

3.2.2- Anisotropia cristalina.

Na década de 20, vários pesquisadores, realizando medidas em monocristais de materiais ferromagnéticos, notaram que havia diferenças na magnetização destes nas diversas direções nas quais era aplicado o campo magnético.

A figura 3.5 mostra este efeito em monocristais de ferro e níquel [11].

No caso do ferro, as direções [001], [010] além da [100] mostrada na figura, apresentam, em ambos os sentidos, maior facilidade de magnetização do que as demais.

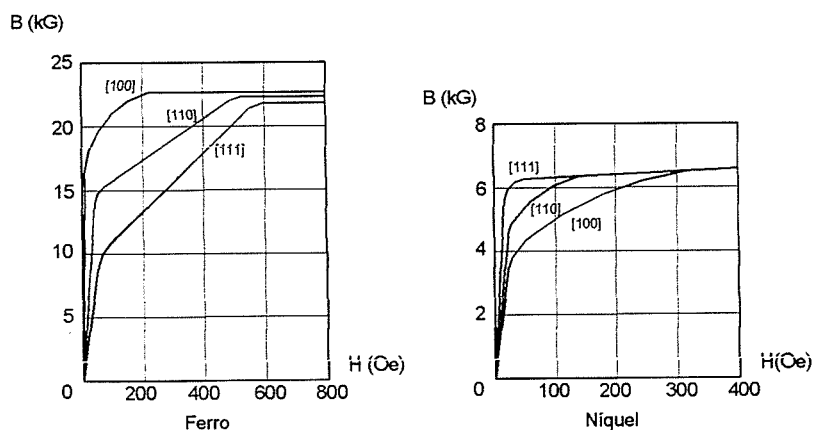


Figura 3.5: Diferenças na magnetização em diversas direções do ferro e níquel

Os momentos magnéticos de cada átomo presentes nos domínios magnéticos tendem a se alinharem paralelamente a estas direções de fácil magnetização, chamadas também de direções de magnetização espontânea. Para tal, é consumida uma energia proveniente do campo magnético aplicado como mostrou a equação 2.16, que também pode ser escrita em termos das constantes de anisotropia magnética [13]:

$$E = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_3^2\alpha_2^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) \quad [3.1]$$

onde:

K_0, K_2, K_3 = constantes de anisotropia de cada material, dadas em j/m^3 ;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = cossenos dos ângulos entre a direção do campo magnético aplicado e os três eixos cristalográficos.

Tais constantes refletem a maior ou menor diferença no comportamento dos materiais quando um campo magnético é aplicado em determinadas direções.

Ramon de Lucas [11] descreve métodos onde é possível a determinação destas constantes.

É importante destacar que o valor de magnetização de saturação não depende da direção em que o campo magnético é aplicado.

Baseado no fenômeno da anisotropia, foi desenvolvido na década de 30, um tipo de aço elétrico, onde o processo de fabricação possibilita a obtenção de uma textura cristalina na qual a direção de mais fácil magnetização seja paralela a direção de laminação. Os aços ao silício de grãos orientados, como são chamados tais materiais serão abordados em tópicos seguintes.

3.2.3- O diagrama de equilíbrio ferro-carbono.

O aço é uma liga de natureza complexa, que em sua definição mais simples, pode ser dito que é uma liga binária ferro-carbono com teores deste último variando de 0,008% a 2,11% [16].

O limite inferior de 0,008 % corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro alfa à temperatura ambiente e o limite de 2,11% à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro gama à temperatura de 1148°C.

O diagrama Fe-C, mostrado na figura 3.6, é um mapa que contém informações importantes a respeito das transformações ocorridas na solidificação do ferro em função da sua composição química.

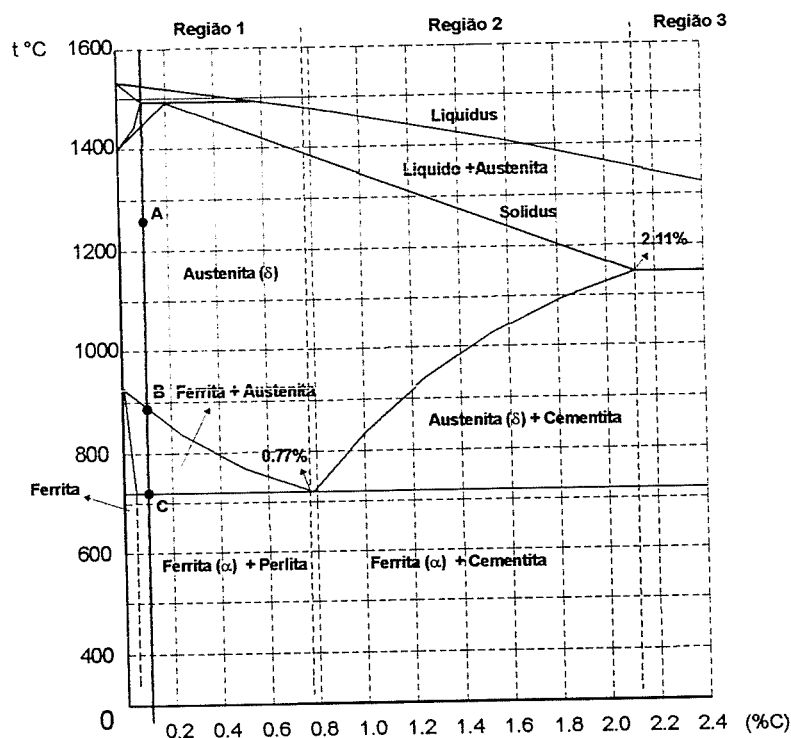


Figura 3.6: Diagrama de equilíbrio Fe - C

Na figura 3.6 podem ser destacadas três importantes regiões:

1. Região 1: Caracteriza as ligas que contem de 0,008 % a 0,77% de carbono. A estas ligas se dá o nome de ligas hipoeutetoídes.
2. Região 2: Abrange as ligas Fe- C que contem 0,77% a 2,11% de carbono e são chamadas de ligas hipereutetoídes.
3. Região 3: É a região dos ferros fundidos, se estende de 2,11% até aproximadamente 6,67% de carbono.

A região 1 é de especial interesse neste trabalho, pois nela estão os aços usados nos experimentos.

A seguir é feita uma análise da solidificação de uma liga usada nos experimentos descritos no capítulo 6, o aço SAE 1010 que contém 0.1 % de carbono [16].

Ao atravessar a linha dos líquidos, inicia-se o processo de cristalização do ferro que assume a forma alotrópica cúbica de corpo centrado ou ferro delta. Transformações anteriores ao ponto "A" são de pouca importância na prática.

No ponto "A", o aço está totalmente solidificado na forma de uma solução sólida chamada de austenita, que se apresenta como um reticulado de face centrada contendo 0.1% de carbono dissolvido. Esta situação persiste até o ponto "B", onde o ferro alfa inicia sua transformação em ferro gama que por ter menor capacidade de reter o carbono, começa a expulsá-lo enriquecendo a austenita ainda não transformada. O ferro gama, contendo carbono dissolvido, é chamado de ferrita.

No ponto "C", o teor de carbono dissolvido na austenita atinge o máximo, e uma rápida transformação acontece fazendo com que todo o ferro alfa se transforme em uma nova estrutura a perlita, formado por lamelas superpostas de ferrita e um composto quimicamente definido chamado de cementita [16]. A partir daí, não ocorre nenhuma transformação até a temperatura ambiente.

Em resumo:

Aços hipoeutetoídes, na temperatura ambiente, são constituídos de ferrita e perlita. Quanto menor o teor de carbono, maior a quantidade de ferrita presente na matriz.

Os aços elétricos por conterem carbono inferior a 0.77% possuem matriz predominantemente ferrítica.

Geralmente outros elementos além do carbono estão presentes no aço devido ao próprio processo de obtenção da liga, ou até mesmo introduzidos propositadamente, a fim de se obterem determinadas características específicas. Como exemplo podem ser citados os aços elétricos, que em média possuem 3.5% de silício.

No caso específico da adição de silício, todas as transformações descritas no diagrama Fe – C ocorrem, porém em temperaturas um pouco diferentes [16].

3.3- Aços Elétricos.

Os materiais usados na indústria elétrica são divididos em dois grupos distintos [16]:

1. Materiais de alta força coerciva ou materiais magneticamente duros. São os ímãs permanentes, onde a permeabilidade magnética não é um fator importante.
2. Materiais de baixa força coerciva e alta permeabilidade magnética ou magneticamente moles. Neste grupo estão enquadrados todos os aços elétricos.

Os aços elétricos fabricados hoje no Brasil são usados principalmente em motores e transformadores, onde uma alta permeabilidade magnética e resistividade elétrica são essenciais para minimizar as perdas por histerese e correntes parasitas.

Os aços elétricos podem ser divididos em dois grupos:

- Aços elétricos de grãos não orientados (GNO);

Mesmo não sofrendo qualquer processo de orientação, grande parte dos grãos tende a se alinhar no sentido de laminação das chapas, porém nem sempre com textura favorável à magnetização.

Este grupo, por sua vez, pode se subdividir em outros dois a saber:

1. Aços elétricos semi - processados.

São aqueles nos quais o cliente realiza um tratamento térmico final antes do uso, chamado recozimento [17,18], com o objetivo de aumentar o tamanho dos grãos, melhorando a permeabilidade magnética.

Ao sair da usina o aço semi - processado sofre um processo chamado de encruamento final [17] cujo objetivo é introduzir tensões que induzam o crescimento dos grãos no recozimento final feito pelo cliente. No Brasil suas propriedades são normalizadas pela norma **ABNT 9026-85**.

A tabela 3.1 mostra a composição química de dois aços elétricos semi - processados produzidos na Usiminas MG e usados nos testes neste trabalho:

Qualidade	C	Mn	Si	P	S	AL
Usicore 260	0,0031	0,49	0,68	0,017	0,008	0,267
Usicore 360I	0,047	0,30	1,28	0,020	0,013	0,040

Tabela 3.1 Aços elétricos semi - processados – Composição Química

Existem também os aços SAE 1006/1008, que apesar de não serem aços destinados para o uso elétrico, são usados até mesmo sem tratamento térmico devido ao baixo custo.

2. Aços elétricos totalmente processados.

São entregues ao cliente com suas propriedades magnéticas bem definidas dispensando, desta maneira, o recozimento final como objetivo de crescimento dos grãos. Muitas vezes, porém, sofrem um tratamento térmico objetivando o alívio de tensões produzidas no processo de corte ou resfriamento, vindo a aumentarem ainda mais os grãos [19].

No Brasil, suas propriedades são normalizadas pela norma **ABNT NBR 9025-85**.

➤ Aços de grãos orientados (GO).

Este tipo de material apresenta uma textura na qual praticamente todos os grãos se orientam de maneira com que seus planos (110) sejam paralelos a superfície da chapa e com a direção de magnetização espontânea [100]

paralela à direção de laminação. Tal textura é chamada “cubo de aresta” ou textura de “Goss” (figura 3.7) [14] em homenagem a Norman Goss responsável por intensas pesquisas na área na década de 30.

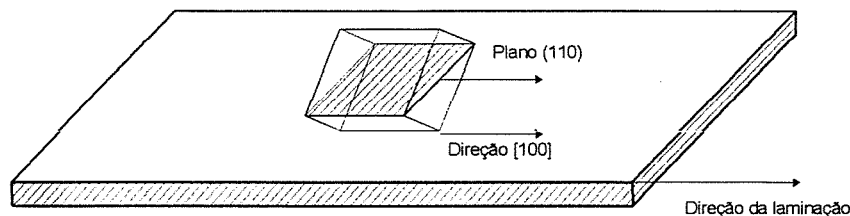


Figura 3.7: Textura de “Goss” em aço ao silício GO

Este tipo de textura faz com que a permeabilidade magnética, no sentido da laminação da chapa, seja muitas vezes maior que a dos aços ao silício grãos não orientados.

A figura 3.8 mostra em esboço as diferenças entre as curvas de magnetização de três tipos de aço: GO, GNO e um aço semi - processado típico.

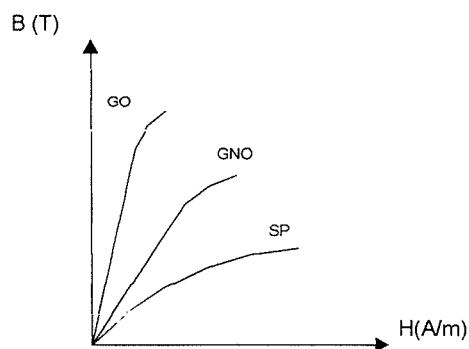


Figura 3.8: Esboço das curvas de magnetização de diferentes tipos de aços

Atualmente existem 3 tipos de aços silício GO, a saber [14]:

- Aços GO regulares: produzidos pelo método desenvolvido e patenteado por Goss consistindo basicamente em um processo de laminação a frio em dois estágios com um recozimento intermediário.
- Aços GO de alta indução (HiG): produzidos por tecnologia desenvolvida por empresas japonesas.

- Aços GO com refino de domínios magnéticos (DR): produzidos a partir dos aços de alta indução, é neles aplicado um raio laser com o objetivo de refinar os domínios magnéticos apresentando por isto menores perdas e maior permeabilidade magnética.

Nos experimentos deste trabalho, será usado o primeiro tipo de aço GO, que apresenta permeabilidade de pico (em 60 Hz) de aproximadamente 40kG/Oe e condutividade relativa ao cobre 0.034 [14,19].

A composição química típica de um aço GO é [14]:

Si %	C%	Mn %	S %
3.0 – 3.5	0.03- 0.07	0.06	0.02

Tabela 3.2 Aços elétricos GO – Composição química típica

A norma brasileira que estabelece as características dos aços GO é a **ABNT NBR 9119-85**.

Uma outra importante característica dos aços totalmente processados deve ser lembrada. Estes materiais são revestidos com uma película de óxido superficial proveniente do recozimento final, ou com revestimentos adicionais com o objetivo de aumentar a resistividade elétrica interlaminar.

Estes revestimentos são importantes em equipamentos onde a pressão entre as lâminas do material é alta e o rendimento das máquinas é crítico.

O catálogo Acesita [19] apresenta os tipos e as características de cada revestimento.

3.3.1- Fatores que influenciam as propriedades elétricas e magnéticas dos aços elétricos.

Dentre outros, os principais fatores que exercem influência nas características elétricas e magnéticas dos aços elétricos são:

1. Composição química.

O principal elemento presente nos aços elétricos é o silício que pode chegar a até 4%.

De especial interesse no efeito da blindagem de campos eletromagnéticos é o efeito deste elemento na resistividade e na permeabilidade magnética.

A função do silício é aumentar a resistividade do material tornando-o adequado para o uso em transformadores e motores, no entanto este fato é prejudicial para blindagem uma vez que quanto menor a resistividade do material melhor seu rendimento na blindagem, como será discutido no capítulo 4.

A figura 3.9 [20] destaca a influência do silício na resistividade de um aço elétrico.

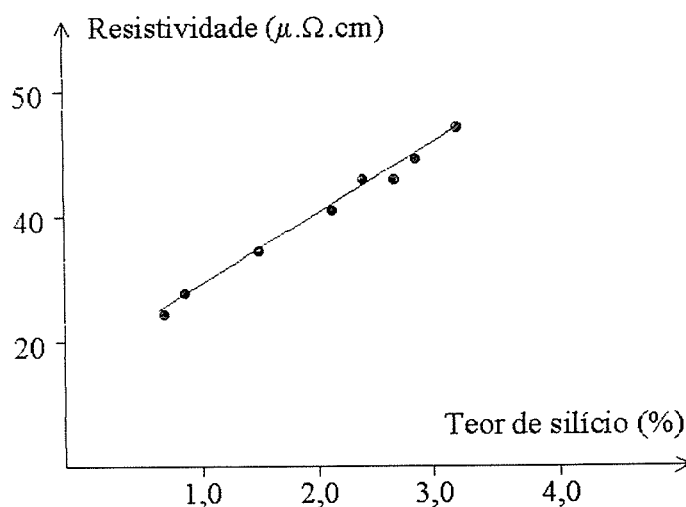


Figura 3.9 Variação da resistividade em função do teor de silício

Geralmente, todo elemento presente no aço atua de maneira a aumentar sua resistividade.

Muitas fórmulas empíricas foram desenvolvidas para o cálculo da resistividade do ferro em função da composição química.

As especificações ASTM aconselham a equação 3.2 para o cálculo da resistividade (em $\mu\Omega \times \text{cm}$) [14].

$$r = 15 + 11(\%Si + \%Al) ; \quad [3.2]$$

A constante de anisotropia K_1 (J/m^3) também é afetada pela presença de silício conforme a relação [13]:

$$K_1 = (5.2 - 0.5\%Si)10^4 ; \quad [3.3]$$

A saturação magnética do ferro puro a temperatura ambiente é de 2,158T para uma densidade de 7,878 g/cm³ [14]. A relação entre a composição química e o valor da indução de saturação pode ser expressa:

$$\bar{B}_s = 2.16 - 0.048xSi\% ; \quad [3.4]$$

A equação 3.4 acima, mostra que a adição de 1% de silício reduz a saturação em aproximadamente 0.05T.

Quanto à permeabilidade magnética, seu modelamento matemático é mais complicado, pois o fenômeno de magnetização se dá por fatores diferentes que dependem da região da curva de histerese em questão.

O que é feito é a determinação, através de ensaios em laboratórios, da permeabilidade em pontos específicos da curva a direita e no próprio joelho da curva [14].

De uma maneira geral, estudos mostram que o aumento da quantidade de silício é acompanhada de um decréscimo da permeabilidade magnética dos aços elétricos [14].

2. Tamanho dos grãos, inclusões e precipitados.

A permeabilidade magnética dos materiais está diretamente relacionada com a capacidade de rotação das paredes dos domínios magnéticos, ou seja, quanto menor forem as barreiras que impedem seu movimento, maior será a permeabilidade do material quando submetido a campos magnéticos variáveis no tempo.

O campo coercivo H_c é a grandeza que, na curva de histerese, retrata a maior ou menor mobilidade das paredes. Quanto maior H_c maior a dificuldade das paredes em se moverem, sendo assim, quanto menor o campo coercivo, melhor a permeabilidade do material.

O tamanho dos grãos é um fator determinante no valor do campo coercivo, sendo grãos grandes necessários para um baixo valor de H_c .

A relação matemática entre o tamanho dos grãos e o valor do campo coercivo é [14]:

$$\bar{H}_c = \frac{3}{4} \pi \frac{\gamma}{M_s} \frac{1}{d} ; \quad [3.5]$$

onde:

d = diâmetro médio dos grãos;

M_s = magnetização de saturação;

γ = é um parâmetro que depende da energia de troca entre os átomos, da constante de anisotropia do material e do número quântico de spin "S" [13].

Da mesma forma que o tamanho dos grãos, a presença de inclusões e precipitados causa redução nos valores de permeabilidade pois servem de barreira, impedindo a rotação das paredes e dos domínios magnéticos [14].

O teor de carbono nos aços elétricos é um dos responsáveis pela presença de precipitados pois formam carbonetos de ferro que se precipitam atrapalhando a mobilidade das paredes. Tal fenômeno é chamado envelhecimento magnético [13].

É também constatado que, quanto maiores os grãos, menor a resistividade do material [14].

3.4- Considerações Finais.

Como será analisado no próximo capítulo, uma boa blindagem se obtém com materiais de alta permeabilidade magnética acompanhada de uma baixa resistividade elétrica.

Finalizando o presente capítulo, devem ser feitas algumas considerações a respeito das características metalúrgicas ideais em um material ferromagnético para que o desempenho na blindagem contra campos magnéticos baixa frequência seja o maior possível.

A presença de silício deve ser de toda evitada, pois este é diretamente responsável pela alta resistividade elétrica dos aços elétricos, além de prejudicar também a permeabilidade magnética.

Quanto ao tamanho dos grãos, estes devem ser os maiores possíveis favorecendo desta maneira a permeabilidade magnética e diminuindo a resistividade elétrica dos materiais.

Os aços elétricos são produzidos objetivando uma alta permeabilidade magnética, no entanto, quanto a resistividade, esta deve ser elevada o bastante para evitar a presença de correntes parasitas nos materiais quando submetidos a campos magnéticos variáveis no tempo.

Em resumo:

Apesar de possuírem alta permeabilidade magnética, os aços elétricos possuem baixa condutividade elétrica, o que pode vir a prejudicar a eficiência na blindagem de campos de baixas frequências.

4- Blindagem Eletromagnética .

4.1- Introdução.

Neste capítulo, como parte introdutória ao estudo dos fenômenos que envolvem a blindagem eletromagnética, é feita uma breve discussão a respeito da propagação de ondas eletromagnéticas planas monocromáticas em meios dielétricos e condutores. São abordados os conceitos de impedância (complexa e real) e profundidade de penetração do campo em diferentes tipos de materiais.

A importância do tipo de fonte geradora de campo, assim como a caracterização do campo a ser blindado (próximo ou distante) e do tipo de material usado fica evidente no final do capítulo. Para tal é feita uma implementação no Matlab das equações envolvidas no fenômeno de blindagem: reflexão, absorção e múltiplas reflexões, utilizando-se os dois materiais mais usados na prática: o alumínio e o aço.

Por fim, é feita uma análise a respeito dos efeitos causados pela presença de aberturas na blindagem em baixa frequência.

4.2- Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Condutores e Dielétricos.

É fundamental o conhecimento das equações da propagação das ondas eletromagnéticas no estudo do fenômeno da blindagem.

A definição de meio condutor ou dielétrico para campos eletromagnéticos segue a definição abaixo [21]:

$$\text{Dielétricos:} \quad \frac{\sigma}{\omega\epsilon} < \frac{1}{100} \quad [4.1]$$

$$\text{Quase condutores:} \quad \frac{1}{100} < \frac{\sigma}{\omega\epsilon} < 100 \quad [4.2]$$

$$\text{Condutores:} \quad 100 < \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad [4.3]$$

onde:

σ = condutividade elétrica do meio em $\Omega \cdot m^{-1}$;

ϵ = permissividade elétrica do meio em $F \cdot m^{-1}$;

ω = frequência angular de propagação da onda eletromagnética em rad/s.

Como pode ser visto, a frequência de propagação do campo eletromagnético é um fator importante na caracterização do meio como condutor ou dielétrico.

Como exemplo, na frequência de 60Hz, o aço ao silício de grão orientado, onde $\sigma = 1.97 \times 10^6$ mhos/m e $\epsilon = \epsilon_0$, 8,85 pF/m se comporta como um condutor.

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \approx 5.91 \times 10^{14} \gg 100$$

Os materiais bons condutores na frequência de 60Hz são de especial interesse neste trabalho. Neles as ondas eletromagnéticas são rapidamente atenuadas, fator importante no processo de blindagem.

4.2.1- Propagação de ondas em meios dielétricos sem perdas.

A solução da equação de onda plana para campos eletromagnéticos propagando em dielétricos sem perdas, mostra que os campos elétrico e magnético são perpendiculares entre si (figura 4.1) e dependem somente da coordenada paralela a sua direção de propagação [12].

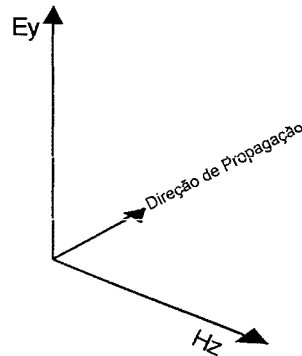


Figura 4.1: Perpendicularidade entre os campos elétrico e magnético em uma onda plana.

Resolvendo a equação da onda, para um meio dielétrico sem perdas, são obtidos para os campos elétrico e magnético respectivamente [21]:

$$\bar{E}_y = \bar{E}_0 \text{sen}(\omega t - \beta x); \quad [4.4]$$

$$\bar{H}_z = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \bar{E}_0 \text{sen}(\omega t - \beta x). \quad [4.5]$$

onde $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, sendo λ o comprimento de onda.

Em ondas planas a razão entre \mathbf{E}_y e \mathbf{H}_z é constante, e chamada de impedância de onda η_0 [21]:

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad [4.6]$$

Para o vácuo onde $\epsilon_0 = 8,85 \text{ PF/m}$ e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\eta_0 = 377\Omega$.

4.2.2- Propagação de ondas em condutores perfeitos.

Diferentemente do que ocorre em um dielétrico sem perdas, a onda eletromagnética, ao penetrar um meio condutor, é rapidamente atenuada e logo é totalmente absorvida pelo meio.

Resolvendo a equação de onda em um condutor para campos elétrico e magnético respectivamente é obtido [21]:

$$\vec{E}_y = \vec{E}_o \text{sen}(\omega t - \gamma x) \quad [4.7]$$

$$\vec{H}_z = \frac{\vec{E}_y}{\eta_m} \quad [4.8]$$

onde:

$\lambda =$ é a constante de propagação da onda dada por [21] :

$$\gamma = (1+i)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad [4.9]$$

$\eta_m =$ é a impedância intrínseca do meio condutor, uma grandeza complexa, calculada por [21]:

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \angle \xi \quad [4.10]$$

o ângulo ξ , mostra a existência de uma defasagem angular entre os campos elétrico e magnético. Em condutores perfeitos seu valor é 45° .

A figura 4.2 mostra uma onda incidindo em um meio condutor.

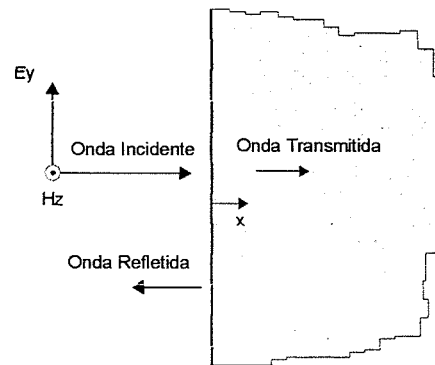


Figura 4.2: Profundidade de penetração.

Um bom parâmetro usado para medir a atenuação de uma onda em um condutor, é a profundidade de penetração δ , que é definida como a distância x medida a partir da fronteira entre os meios na qual a onda eletromagnética seja atenuada de 63% de seu valor inicial, podendo ser calculada, em metros, por [22]:

$$\delta = \frac{0.06609}{\sqrt{f\mu_r\sigma_r}} \quad [4.11]$$

A tabela 4.1 mostra a profundidade de penetração de um campo eletromagnético de 60Hz em três diferentes condutores, um diamagnético, um paramagnético e um ferromagnético.

Material	σ_r	μ_r	δ (m)
Cobre	1	0.998	8.5×10^{-3}
Alumínio 99%	0.6	1	1.01×10^{-2}
Aço	0.1	300	1.55×10^{-3}

Tabela 4.1: Profundidade de penetração

Como mostra a tabela 4.1, o material ferromagnético (aço) atenua melhor o campo eletromagnético, sendo, neste aspecto, melhor para ser usado na blindagem que os outros dois.

A solução da equação de uma onda não plana é mais complexa, porém continuam válidas as definições de impedância de onda, da profundidade de penetração e de impedância dos meios condutores, conceitos importantes no estudo da blindagem eletromagnética.

4.3- Regiões de Campos Próximo e Distante.

Em regiões suficientemente próximas da fonte de campo, chamadas regiões de campo próximo, a relação entre os campos magnético e elétrico de uma onda não é mais constante. Esta situação persiste até uma distância de aproximadamente três comprimentos de onda ($3\lambda_0$) da fonte, onde a partir daí, a relação constante entre **E** e **H** é verificada.

O tratamento matemático de campos eletromagnéticos na região de campo próximo é mais complicado pois não são introduzidas as simplificações feitas na análise do modelo de propagação dos campos em regiões distantes da fonte.

Para campos eletromagnéticos de altas frequências, por exemplo 600MHz, a região de campo próximo é considerada até 1,5m da fonte, enquanto para campos de 60Hz esta região se estende até uma distância de 15000 Km da fonte. O estudo de blindagem em baixas frequências, tema deste trabalho, está na região de campo próximo.

A impedância de onda na região de campo próximo depende do tipo da fonte de campo podendo ser elétrico ou magnético, não acontecendo na região de campo distante, onde, independentemente do tipo de fonte de campo, a impedância da onda é igual impedância do meio (figura 4.3a e 4.3b) [22].

Como fonte de campo elétrico, ou de alta impedância, entende-se aquela na qual o campo eletromagnético é gerado a partir de altas diferenças de potencial e baixas correntes. As fontes de campo magnético, ou de baixa impedância, geram campos eletromagnéticos a partir de altas correntes e baixas diferenças de potencial.

Nas fontes de campo magnético, a energia transportada está quase que totalmente concentrada no componente magnético da onda, o contrário ocorre

com o campo eletromagnético gerado por fontes elétricas, onde a energia está praticamente toda no componente elétrico da onda.

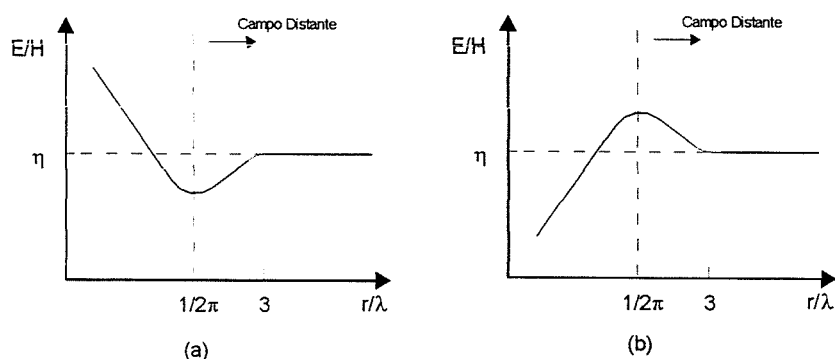


Figura 4.3: (a) Fonte de campo elétrico ou fonte de alta impedância;
(b) Fonte de campo magnético ou fonte de baixa impedância

Na figura 4.3 pode ser notado que, para um campo eletromagnético gerado por uma fonte de campo elétrico a impedância de onda é maior, em regiões muito próximas a fonte, do que a impedância do meio. O oposto acontece para os campos eletromagnéticos gerados por fontes de campo magnético. Tais fatos justificam as definições de fontes de campo de alta e baixa impedância respectivamente.

Como exemplos de fonte de campo elétrico e magnético tem-se respectivamente o dipolo elétrico e o dipolo magnético.

4.4- Eficiência da Blindagem Eletromagnética.

Blindagem eletromagnética, é qualquer barreira colocada entre a fonte de campo eletromagnético e o que se deseja proteger.

Os principais fatores que determinam a eficiência de uma blindagem são:

- Características do campo que se deseja blindar.

No caso particular de blindagem em baixas frequências, o tipo de fonte geradora de campo, elétrica ou magnética, é importante pois os fatores ligados à reflexão do campo incidente em uma superfície metálica dependem da impedância de onda, que é diferente para cada tipo de fonte.

- Tipo de material usado na blindagem.

As características elétrica (condutividade) e magnética (permeabilidade), do material usado devem ser bem conhecidas. De uma maneira geral materiais de boa condutividade e permeabilidade são os mais eficientes.

- Características ligadas à geometria do sistema.

Procedimentos simples, como o posicionamento adequado de condutores e a distância da blindagem à fonte, podem aumentar a atenuação do campo eletromagnético.

A literatura a respeito de blindagens para campos de alta frequência é vasta [23,24,25,26]. Em baixas frequências a blindagem eletromagnética vem sendo atualmente um sério problema. Relatos a respeito de interferências causadas por este tipo de campo têm se tornado cada vez mais frequentes em publicações especializadas [2,3].

A utilização de chapas metálicas, blindando a fonte de campo ou os equipamentos sensíveis, tem sido um dos meios mais utilizados, porém, para se obter uma boa atenuação, grandes espessuras de chapas são geralmente utilizadas [27], tornando o projeto pouco viável devido ao peso e ao custo do material.

Outras soluções são comumente usadas; trabalhos têm mostrado [4,6], que em sistemas trifásicos a simples aproximação dos condutores ou a alternância das fases reduzem significativamente o valor do campo magnético.

O método de blindagem ativa, que consiste na geração de um campo oposto ao que se deseja eliminar, não oferece sozinho bons resultados. Melhores resultados são obtidos quando algumas destas técnicas são associadas [7].

A proposta deste trabalho é a utilização de chapas metálicas como técnica única de atenuação do campo magnético de 60Hz.

O parâmetro que mede a eficiência de uma blindagem é o fator de blindagem, definido pela relação dos campos elétrico ou magnético medidos antes e depois da colocação da mesma.

Matematicamente o fator de blindagem pode ser expresso, em decibéis, como [22]:

$$FB = 20 \log \left| \frac{\bar{E}_a}{\bar{E}_d} \right| \quad \text{ou} \quad 20 \log \left| \frac{\bar{H}_a}{\bar{H}_d} \right| \quad [4.12]$$

onde:

\mathbf{E}_a e \mathbf{H}_a = valores dos campos medidos antes da colocação da blindagem;

\mathbf{E}_d e \mathbf{H}_d = valores dos campos medidos após a colocação da mesma.

A interação de um campo eletromagnético com uma barreira de espessura "t" é mostrada na figura 4.4.

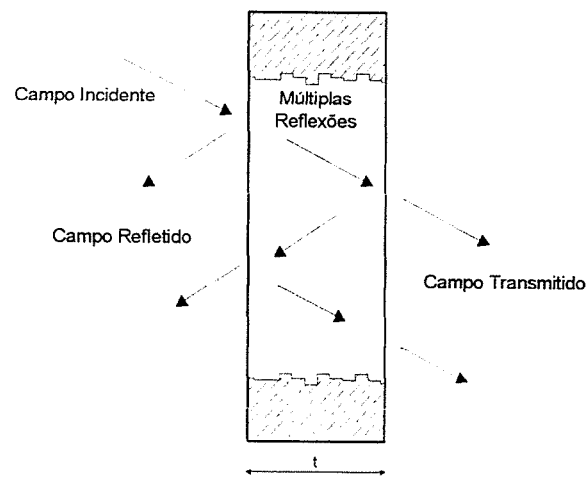


Figura 4.4: Interação de um campo eletromagnético com uma barreira

4.4.1- Fator de reflexão - R.

Ocorrerá reflexão de uma onda eletromagnética sempre que esta estiver propagando em um meio de impedância η_1 e penetrar em outro meio de impedância η_2 .

O fator de reflexão para uma onda eletromagnética no vácuo incidindo sobre um metal pode ser escrito como [28]:

$$R = \frac{(\eta_0 + \eta_m)^2}{4\eta_0\eta_m} \quad [4.13]$$

onde:

η_0 = impedância de onda do campo no vácuo;

η_m = impedância do metal.

A equação 4.13 mostra que a reflexão depende da impedância de onda, sendo influenciada pela natureza da fonte de campo (elétrica ou magnética) e pela região (campo próximo ou distante) em estudo.

Em bons condutores a impedância η_m foi definida pela equação 4.10 e é a mesma para campos distantes ou próximos. A impedância de onda, no entanto, para campos próximos deve ser calculada, em ohms, por [28] :

$$\eta_{mH} = 2\pi f\mu D \quad [4.14]$$

para fonte de campo magnético e,

$$\eta_{mE} = \frac{1}{2\pi efD} \quad [4.15]$$

para fonte de campo elétrico.

onde:

D = distância do ponto considerado à fonte.

Desenvolvendo-se a equação 4.13 juntamente com as equações 4.14 e 4.15 é obtido, para região de campo próximo, o fator de reflexão em decibéis [23]:

$$R = 20 \log \left\{ \left[1.173 \left(\frac{\mu_r}{f\sigma_r} \right)^{0.5} D^{-1} \right] + 0.0535 D \left(\frac{f\sigma_r}{\mu_r} \right)^{0.5} + 0.354 \right\} \quad [4.16]$$

para fonte de campo magnético e:

$$R = 362 - 20 \log \left[\left(\frac{f^3 \mu_r}{\sigma_r} \right)^{0.5} D \right] \quad [4.17]$$

para fonte de campo elétrico.

onde:

μ_r = permeabilidade relativa ao vácuo do material usado na blindagem;

σ_r = condutividade relativa ao cobre do material usado na blindagem;

D = distancia em cm, da blindagem a fonte de campo;

f = frequência do campo em Hz.

Na região de campo distante, o tipo de fonte não influenciará mais na reflexão, pois a impedância de onda se iguala à do meio para ambos os tipos de fonte. Com isto o fator de reflexão para fontes elétricas e magnéticas, toma a forma, também em decibéis [23]:

$$R = 168 - 10 \log \left[\left(\frac{f \mu_r}{\sigma_r} \right) \right] \quad [4.18]$$

Pelas equações acima, pode ser visto que o fator de reflexão depende do quociente entre as propriedades magnética e elétrica (μ_r/σ_r) dos materiais. Os gráficos a seguir, (figuras 4.5 e 4.6) mostram a variação do fator de reflexão em função de μ_r/σ_r para diversos valores de distância entre a blindagem e a fonte, na frequência de 60Hz.

Os materiais paramagnéticos, como o alumínio, são caracterizados por terem baixos valores de μ_r/σ_r pois possuem permeabilidade magnética próxima da unidade e condutividade elétrica relativa que pode variar de 1 a 0,6. Nos materiais ferromagnéticos, como alguns tipos de aço, o quociente μ_r/σ_r alcança valores bem elevados, pois possuem permeabilidade magnética relativa alta enquanto a condutividade elétrica, geralmente mais baixa que nos materiais paramagnéticos, pode ser inferior a 0,05.

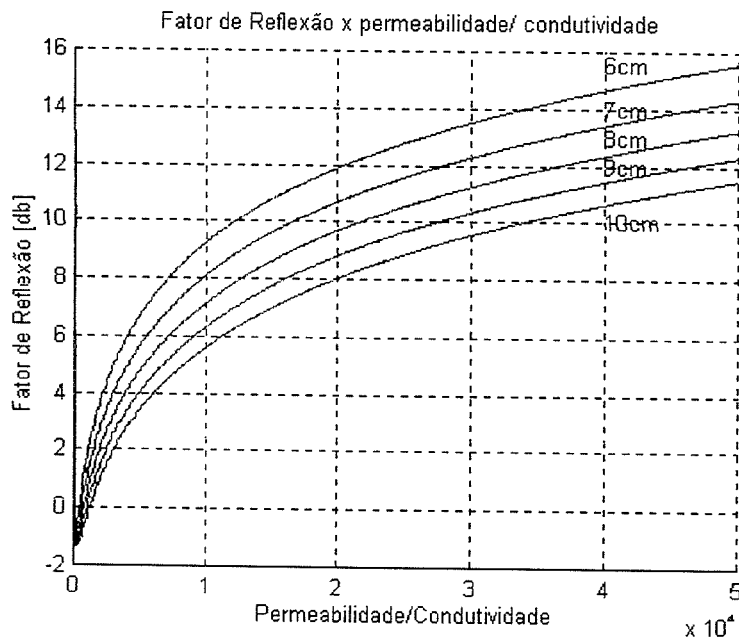


Figura 4.5 : Fator de reflexão para uma fonte de baixa impedância .

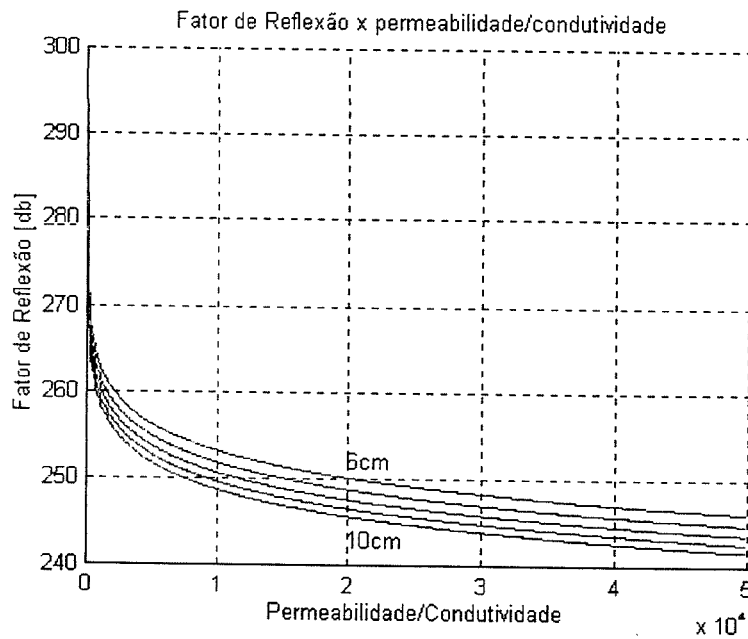


Figura 4.6 : Fator de reflexão para uma fonte de alta impedância.

Para um campo eletromagnético gerado por uma fonte de campo elétrico, o fator de reflexão cai com o aumento do quociente μ_r/σ_r (figura 4.6), o que nos permite concluir que um material paramagnético produz melhores resultados que os ferromagnéticos na blindagem por reflexão.

Numa fonte de campo magnético (figura 4.5), o fator de reflexão aumenta com o crescimento de μ_r/σ_r , porém só a partir de um determinado valor, que pela figura 4.7, está próximo de 150.

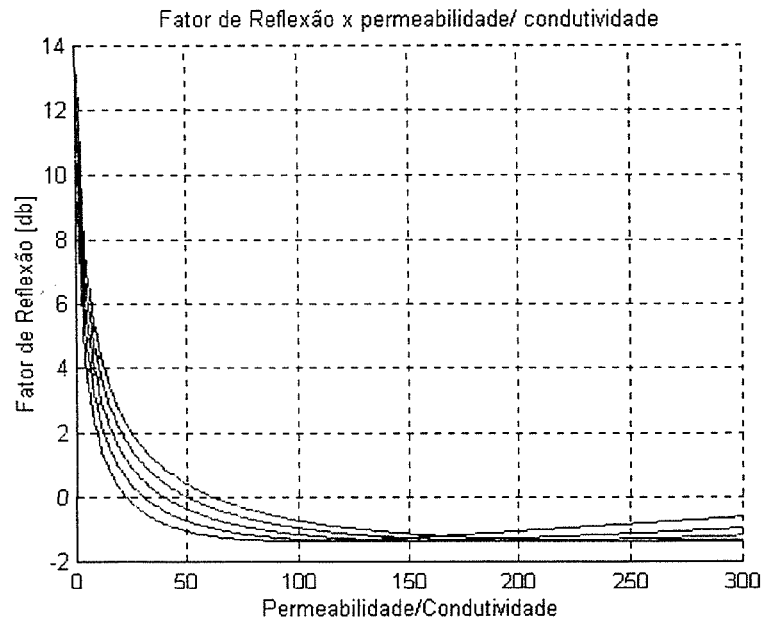


Figura 4.7 : Fator de reflexão numa fonte de baixa impedância para pequenos valores de μ_r/σ_r .

As figuras 4.5 e 4.6 mostram que o conhecimento da natureza da fonte de campo é determinante no projeto de uma blindagem. O coeficiente de reflexão é muito superior em uma fonte de campo elétrico, a em uma fonte de campo magnético.

É esperado com isto que, em baixas frequências, a maior dificuldade se encontre na atenuação de campos eletromagnéticos gerados por fontes de campo magnético.

4.4.2- Fator de absorção - A.

O fator de absorção não está relacionado à natureza do campo nem tampouco à região do campo em estudo. Assim como o fator de reflexão, ele depende das características elétricas e magnéticas dos materiais, da frequência do campo e ainda da espessura do material usado na blindagem.

Ao penetrar em um material bom condutor, o campo eletromagnético induz neste correntes parasitas, causando dissipação de energia e, com isto, sofrendo uma atenuação. Esta atenuação é definida como perda por absorção, e matematicamente pode ser calculada, em decibéis, por [23]:

$$A = 1.314t\sqrt{f\sigma_r\mu_r} \quad [4.19]$$

onde:

t= espessura do material usado na blindagem em cm.

O gráfico abaixo (figura 4.8), mostra a dependência do fator de absorção com o produto $\mu_r\sigma_r$ para diferentes espessuras da blindagem, na frequência de 60 Hz.

Quanto maior o produto $\mu_r\sigma_r$ e a espessura do material, maior a atenuação do campo. Na frequência de 60Hz, o fator de absorção se torna desprezível para materiais paramagnéticos de pequenas espessuras.

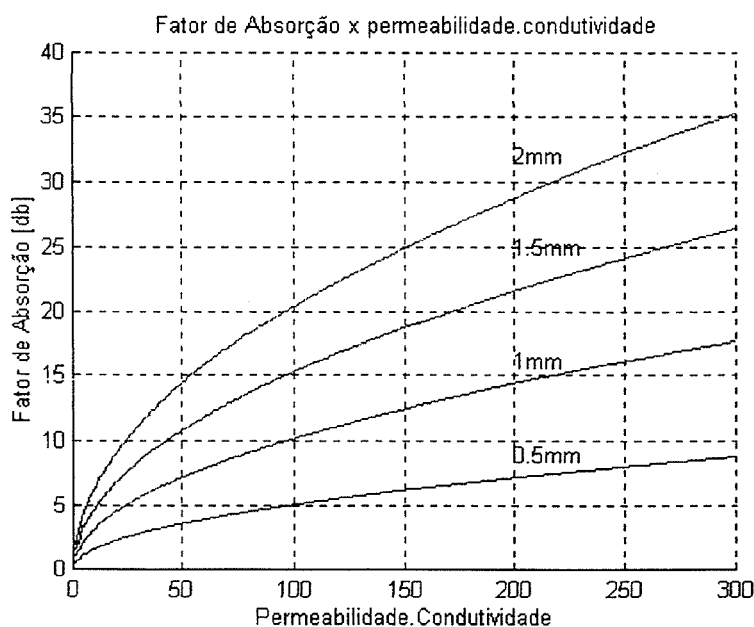


Figura 4.8: Fator de absorção em função do produto $\mu_r\sigma_r$ para diferentes espessuras da blindagem.

4.4.3- Fator de múltiplas reflexões - MR.

Nos materiais onde o fator de absorção é pequeno, grande parte do campo que penetra na blindagem deixa de ser absorvido sofrendo múltiplas reflexões no interior da blindagem.

O efeito das múltiplas reflexões pode ser ainda mais significativo em chapas de pequena espessura onde a absorção se torna ainda menor. Porém em baixas frequências é calculado independentemente da espessura da blindagem.

Matematicamente, o fator de múltiplas reflexões para bons condutores pode ser calculado, em decibéis, por [22]:

$$MR = 20 \log(\text{abs}(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}(1+j)}})) \quad [4.20]$$

onde δ é a profundidade de penetração da onda no material.

O gráfico abaixo (figura 4.9) mostra a variação do fator de múltiplas reflexões, em 60Hz, em função da espessura da blindagem para os seguintes materiais:

- Aço: $\mu_r=300$, $\sigma_r=0.1$; alumínio: $\mu_r=1$, $\sigma_r=0.61$.

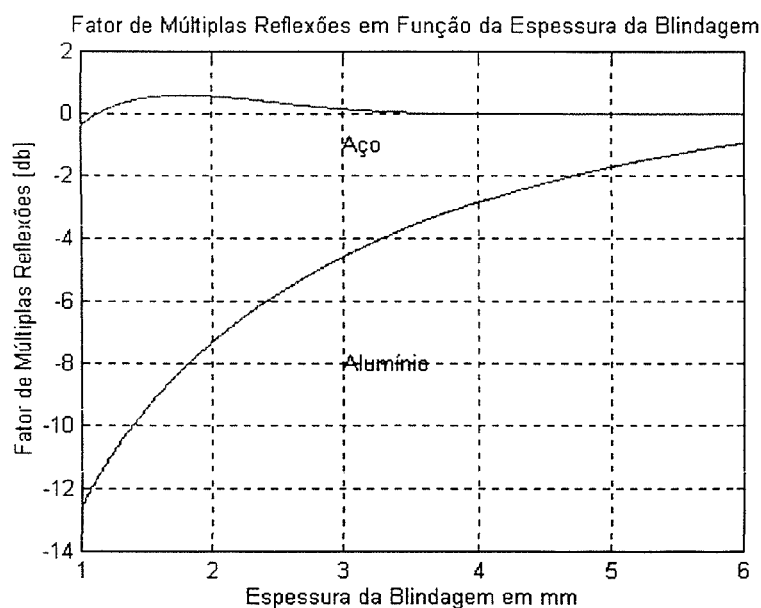


Figura 4.9: Fator de múltiplas reflexões em função da espessura das chapas.

As múltiplas reflexões, assim como a atenuação por absorção, não dependem da natureza nem da região do campo em estudo, sendo bastante significativo em materiais que possuem grandes profundidades de penetração, pois nestes o campo eletromagnético não é absorvido rapidamente e sofre sucessivas reflexões no interior do mesmo

Isto se torna visível na figura 4.9 onde o alumínio possui maior profundidade de penetração que o aço.

4.4.4- Fator de blindagem total - FB.

O fator de blindagem total é representado matematicamente pela soma, em decibéis, dos fatores de reflexão, absorção e múltiplas reflexões.

A ordem de grandeza de cada termo depende dos valores da permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material usado.

$$FB = R + A + MR \quad [4.21]$$

Vale lembrar que a equação 4.20 é definida somente para valores positivos de FB [28].

A utilização de várias camadas (níveis) superpostas de materiais com diferentes propriedades (figura 4.10) aumenta a eficiência da blindagem.

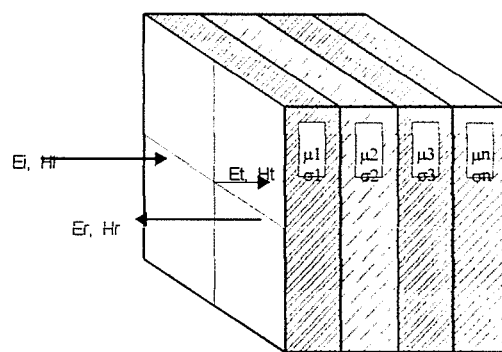


Figura 4.10: Blindagem utilizando materiais com propriedades diferentes

Desta maneira, o fator de blindagem total, passa a ser em decibéis:

$$FBt = FB1 + FB2 + FB3 + \dots + FBn \quad [4.22]$$

onde: FB1, FB2,FB3..... são os fatores de blindagem total de cada camada isolada. Esta técnica é chamada de blindagem sanduíche.

Os gráficos abaixo (figura 4.11 e 4.12) mostram a variação do fator de blindagem total do aço e do alumínio em função da frequência para fontes de baixa e alta impedância respectivamente.

Os parâmetros considerados nas simulações foram:

- distância da blindagem a fonte: 7cm;
- espessura das chapas: 2mm;
- Aço: $\mu_r=300$, $\sigma_r=0.1$;
- Alumínio 99,0%: $\mu_r=1$, $\sigma_r=0.61$.

Em toda faixa de frequência considerada, a blindagem oferece boa atenuação para campos gerados por fontes de alta impedância.

Para fontes de baixa impedância o desempenho de ambos os materiais não é satisfatório. Este fato mostra porque as maiores dificuldades estão na atenuação de campos gerados por este tipo de fonte, sendo por isto usada nos experimentos.

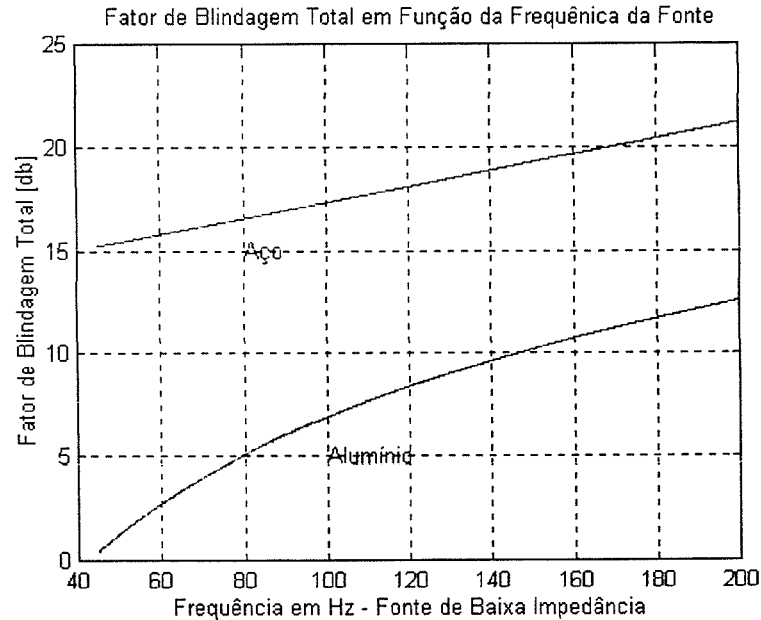


Figura 4.11: Fator de blindagem total para fonte de baixa impedância.

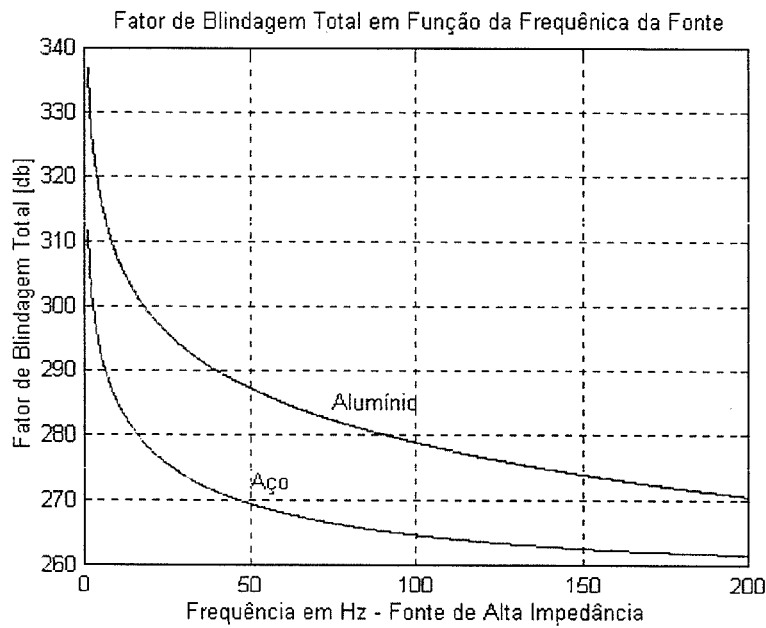


Figura 4.12: Fator de blindagem total para fonte de alta impedância.

Finalizando, a figura 4.13 destaca a importância da permeabilidade e da condutividade dos materiais no fator de blindagem total. Os parâmetros considerados são os mesmos da simulação anterior, sendo a fonte de baixa impedância e a frequência de 60Hz.

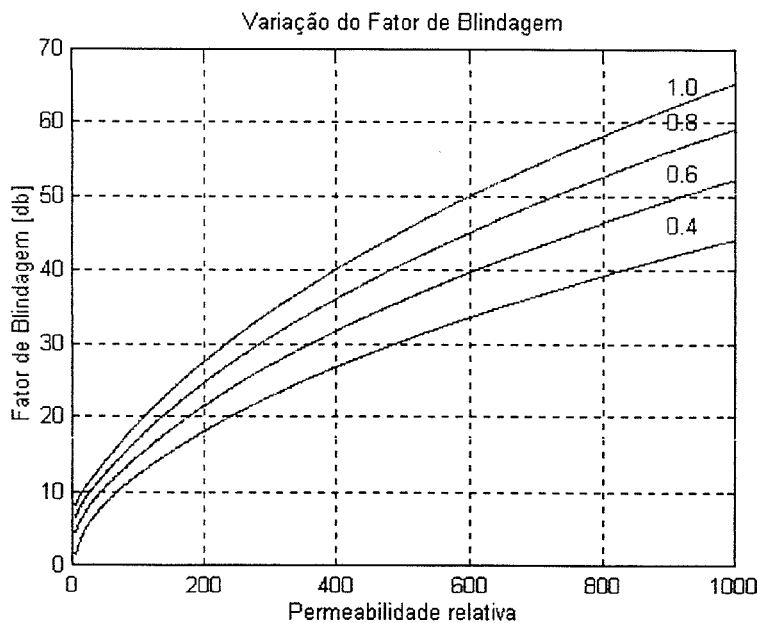


Figura 4.13: Fator de blindagem total em função da permeabilidade para 3 valores de condutividade.

4.5- Efeito de Aberturas – Princípio de Babinet.

A presença de abertura e frestas nos materiais usados na blindagem se faz necessária principalmente em equipamentos eletrônicos onde a circulação de ar é indispensável.

Considerando uma blindagem feita com chapas de um material bom condutor, a presença de aberturas na superfície prejudica a circulação de correntes parasitas fazendo com que o desempenho da mesma seja prejudicado [22].

A figura 4.14 mostra o efeito da presença de frestas no caminho da corrente parasita [22].

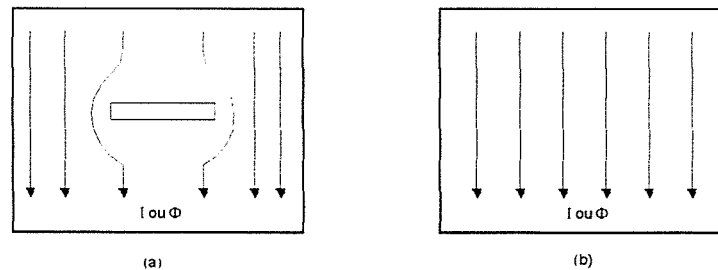


Figura 4.14: (a) Corrente ou fluxo sem a presença de frestas
(b) Efeito da presença de frestas

O posicionamento da abertura em relação a corrente induzida é importante. Pode ser verificado que, se a abertura é posicionada de maneira que seu comprimento esteja perpendicular ao fluxo como mostra a figura 4.15 b, seu efeito é minimizado [22].

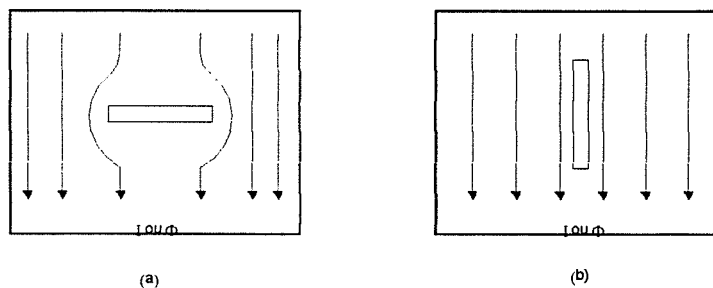


Figura 4.15: (a) Presença de frestas perpendicular ao fluxo
(b) Presença de frestas paralela ao fluxo

medidos, sobretudo em materiais mais espessos nos quais a perda por absorção é elevada.

A figura 4.17 ilustra um campo magnético que, ao penetrar em uma chapa metálica, é atenuado fazendo com que sua permeabilidade magnética varie ao longo da espessura do metal.

Como consequência do exposto, o fator de blindagem total (FB) se torna função também da posição "x" da onda dentro da chapa.

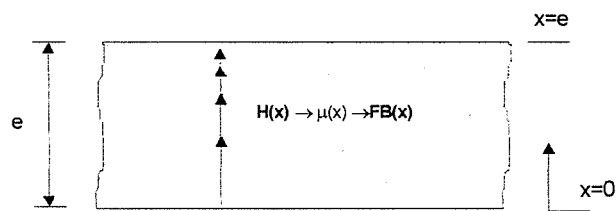


Figura 4.17: Campo magnético ao penetrar em um bom condutor

É importante destacar que o aumento da frequência do campo magnético acarreta uma diminuição na permeabilidade magnética dos materiais [22]; no entanto, este efeito só é significativo a partir de 1kHz sendo assim não abordado neste trabalho.

5- Bancada Experimental e Desenvolvimento Matemático.

5.1- Introdução.

Condições adequadas de trabalho juntamente à confiabilidade dos instrumentos de medição são de fundamental importância em trabalhos experimentais.

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática necessária ao cálculo dos campos magnéticos produzidos por um sistema de condutores trifásicos e por uma bobina, assim como os instrumentos de medições de campo, corrente e tensão utilizados.

A bancada utilizada para os testes, já pronta, é descrita em seus aspectos básicos, onde maiores detalhes podem ser encontrados em [6].

Um software, desenvolvido no Matlab[®], foi usado para o cálculo do campo magnético nas regiões de maior interesse em torno da bancada de testes, possibilitando comparações entre os valores medidos pelos diferentes sensores de campo.

Considerações a respeito da influência dos campos magnéticos externos e do efeito do solo do laboratório nas medições são abordadas no final do capítulo.

5.2- Desenvolvimento Matemático.

Como já exposto anteriormente, a fonte geradora de campo considerada neste trabalho é basicamente magnética, onde grandes correntes são obtidas com baixas diferenças de potencial.

5.2.1- Sistema de condutores trifásicos.

A figura 5.1 mostra um sistema trifásico de condutores de comprimento “L” em um sistema de coordenadas cartesianas posicionado de maneira que o ponto médio dos condutores esteja no plano z=0 [6].

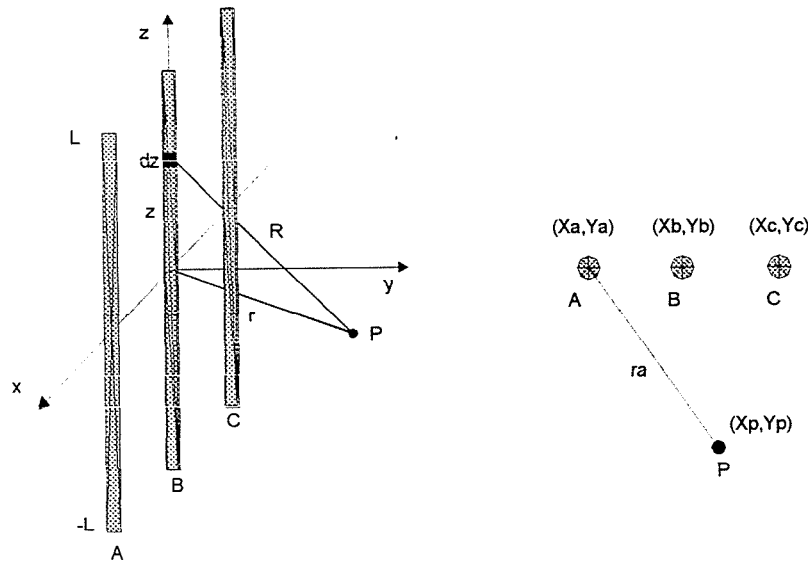


Figura 5.1: Sistema de condutores trifásicos no plano z=0.

A equação matemática para a densidade de fluxo magnético gerada por um único condutor, no ponto “P” percorrido por uma corrente I é [6] :

$$B_x = \frac{\mu I_a}{2\pi} (y_p - y_a) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_a^2} \right) \cdot \left(\sqrt{L^2 + r_a^2} \right)} - \frac{1}{r_a^2} \right]; \quad [5.1]$$

$$B_y = \frac{\mu I_a}{2\pi} (x_p - x_a) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_a^2} \right) \left(\sqrt{L^2 + r_a^2} \right)} - \frac{1}{r_a^2} \right]; \quad [5.2]$$

onde:

$$r_a^2 = (x_p - x_a)^2 - (y_p - y_a)^2; \quad [5.3]$$

A densidade de fluxo magnético resultante é dada pela soma vetorial dos componentes x e y:

$$\vec{B}_r = B_x + B_y; \quad [5.4]$$

No sistema trifásico, a cada componente de **B**, deve ser somado a contribuição de cada condutor.

$$B_{xtotal} = \frac{\mu I_a}{2\pi} (y_p - y_a) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_a^2} \right) \left(\sqrt{L^2 + r_a^2} \right)} - \frac{1}{r_a^2} \right] +$$

$$\frac{\mu I_b}{2\pi} (y_p - y_b) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_b^2} \right) \left(\sqrt{L^2 + r_b^2} \right)} - \frac{1}{r_b^2} \right] + \quad [5.5]$$

$$\frac{\mu I_c}{2\pi} (y_p - y_c) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_c^2} \right) \left(\sqrt{L^2 + r_c^2} \right)} - \frac{1}{r_c^2} \right]$$

e:

$$\begin{aligned}
 B_{y\text{total}} = & \frac{\mu I_a}{2\pi} (x_p - x_a) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_a^2} \right) \left(\sqrt{L^2 + r_a^2} \right)} - \frac{1}{r_a^2} \right] + \\
 & \frac{\mu I_b}{2\pi} (x_p - x_b) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_b^2} \right) \left(\sqrt{L^2 + r_b^2} \right)} - \frac{1}{r_b^2} \right] + \\
 & \frac{\mu I_c}{2\pi} (x_p - x_c) \left[\frac{1}{\left(L + \sqrt{L^2 + r_c^2} \right) \left(\sqrt{L^2 + r_c^2} \right)} - \frac{1}{r_c^2} \right]
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Vale lembrar que as correntes I_a , I_b , I_c são fasores e devem vir acompanhadas do ângulo correspondente. No caso de um sistema de 4 condutores, a contribuição do neutro deve ser considerada nas equações 5.5 e 5.6.

5.2.2- Bobina.

É de interesse neste trabalho, o cálculo da indução magnética gerado por um solenóide ao longo de seu eixo de simetria.

Em um solenóide de comprimento "L", no qual a separação entre suas espiras é muito menor que seu diâmetro, as linhas do fluxo magnético em seu interior tem o aspecto mostrado na figura 5.2 [29].

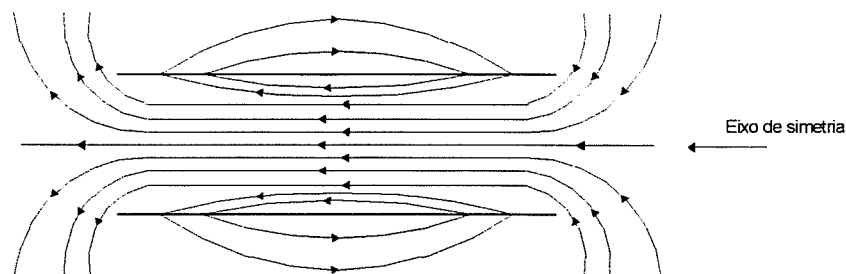


Figura 5.2: Linhas de fluxo magnético em um solenóide finito

Em regiões mais próximas do centro do solenóide, as linhas são paralelas e o vetor indução magnética é constante, podendo ser calculado facilmente [29].

De especial interesse são os campos gerados sobre o eixo de simetria, porém fora do solenóide (figura 5.3). Nesta região, a indução já não é mais constante e depende da coordenada x .

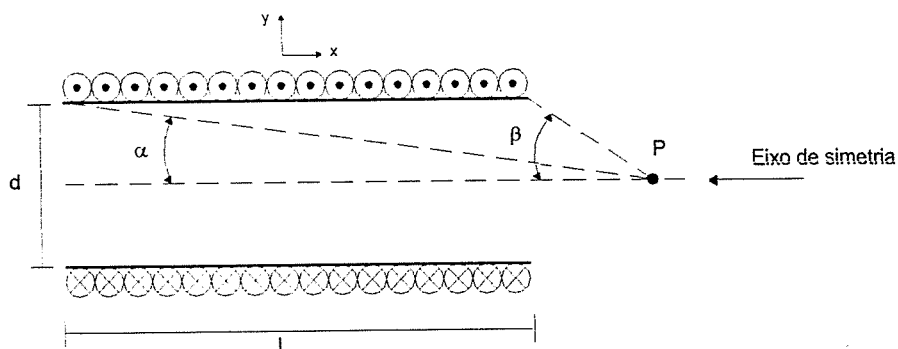


Figura 5.3: Cálculo da indução em um ponto exterior ao solenóide.

No ponto P da figura acima, a indução deve ser calculada por [29]:

$$\vec{B}_P = \mu_0 N I \frac{\cos(\alpha) - \cos(\beta)}{2L} \vec{a}_x ; \quad [5.7]$$

onde:

N = é o número de espiras;

I = corrente no solenóide;

L = comprimento do solenóide;

\vec{a}_x = vetor unitário na direção x .

Vale ressaltar que a equação acima é válida não só para regiões fora do solenóide, mas para qualquer ponto em seu eixo de simetria.

5.3- Bancada de Testes – Aspectos Físicos.

Todos os experimentos deste trabalho foram realizados no Laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT) da UFMG.

Para tal, houve a necessidade da montagem de uma bancada, projetada no próprio LEAT [6], onde fosse possível a realização dos mesmos.

A figura 5.4 mostra o aspecto físico da bancada de testes com o sistema de condutores trifásicos. Tal sistema é usado em estudos de blindagem e, no caso específico deste trabalho, permitiu a verificação experimental da anisotropia magnética das chapas de aço, pois gera campo magnético somente em uma direção.

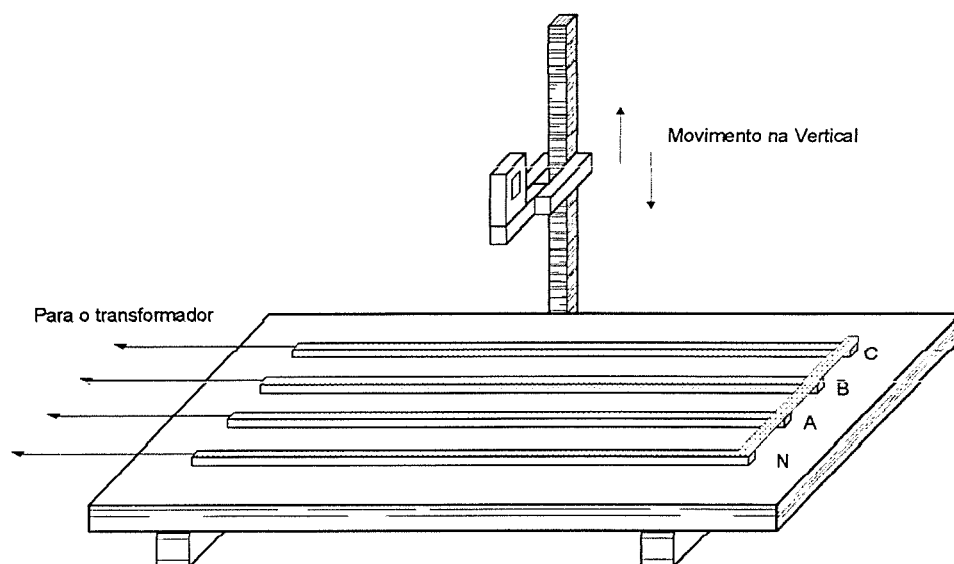


Figura 5.4: Bancada de testes com condutores trifásicos.

Os condutores usados foram de alumínio com 6m de comprimento e bitola com 1cm de diâmetro.

Para as medições de campo na vertical foi usada uma estrutura de material não metálico devidamente graduada, na qual o sensor de campo pudesse se mover até uma altura de 3,2m dos condutores. Na direção horizontal, os sensores de campo foram colocados em um suporte de maneira com que ficassem no nível dos condutores. As medidas foram tomadas até uma distancia de 4,2m do sistema, tendo como referência o condutor da fase "B".

A figura 5.5 mostra o posicionamento do sensor de campo nas medições feitas na horizontal.

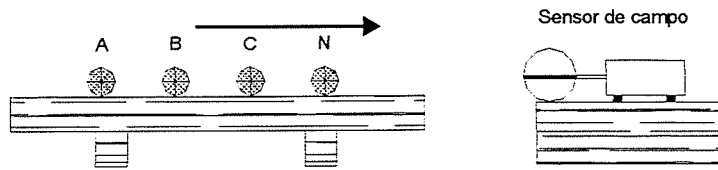


Figura 5.5: Esquema de medição da indução magnética na horizontal.

Nos experimentos em que foi utilizada a bobina, a bancada de testes e os instrumentos de medição de campo magnético foram os mesmos.

A figura 5.6 mostra as dimensões da bobina utilizada nos testes, e o seu posicionamento na bancada de testes.

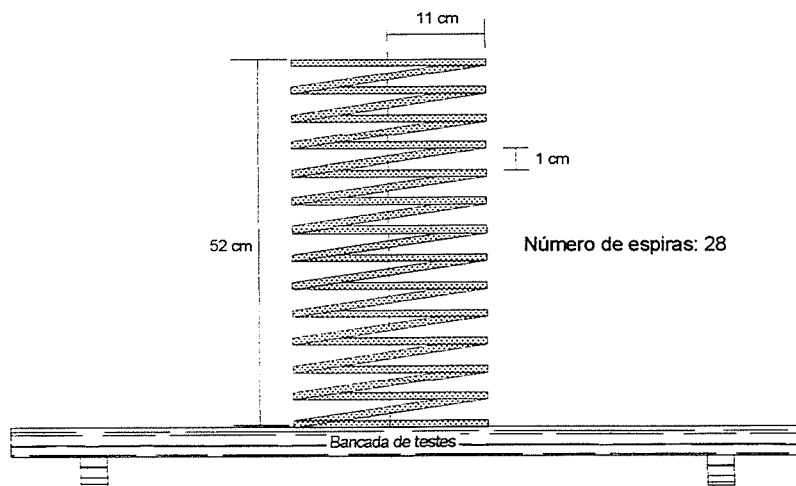


Figura 5.6: Características físicas da bobina usada nos testes.

O uso da bobina nos testes se deveu principalmente a necessidade da geração de campos magnéticos de maior intensidade e em várias direções, uma vez que o sistema trifásico, como já foi dito, gera campos somente em uma direção.

No capítulo 6 fica mais claro o motivo da utilização das diferentes fontes de campo magnético.

5.4- Sistema de Geração e Controle das Correntes.

Sendo o campo magnético proporcional ao valor da corrente, esta deve atingir valores mais elevados possíveis a fim de garantir a qualidade nas medições, sobretudo em regiões distantes da fonte, quando a interferência dos campos externos se torna significativa.

Com este propósito, os condutores do sistema trifásico foram colocados em curto-circuito em uma de suas extremidades, ficando a corrente limitada apenas pela impedância dos condutores e do transformador.

A figura 5.7 mostra a bancada de testes juntamente com um varivolt ligado no primário do transformador, para o controle da tensão de entrada.

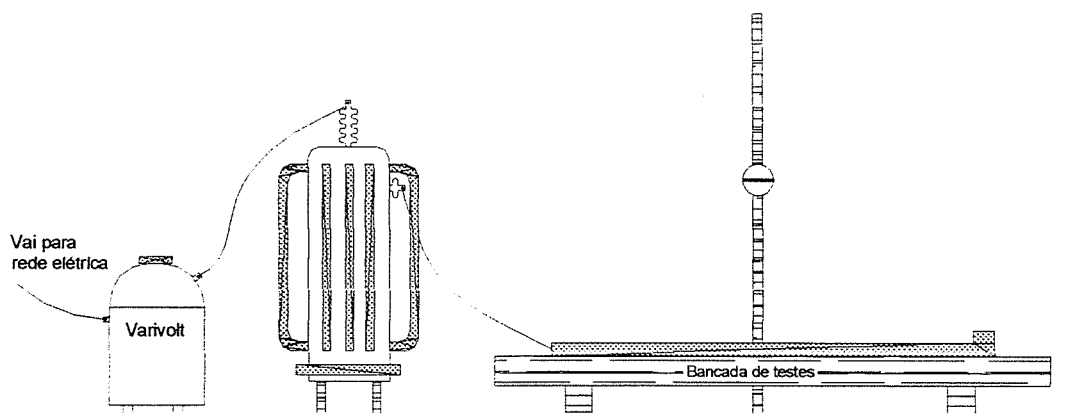


Figura 5.7: Sistema de controle de tensão.

A seguir, estão as características dos equipamentos usados na montagem acima:

➤ Varivolt trifásico:

Fabricante: STP- Soc. Técnica Paulista Ltda.

Tipo: VT-290.

Tensão de entrada 240V.

Saída: 0-240 V; 22 A; 9kVA.

➤ Transformador trifásico:

Fabricante: CIME.

Potência: 112,5 kVA.

Primário: 13,2 kV, ligação Δ .

Secundário: 220/127 V, ligação Y.

Impedância: 3.14%.

Deste modo, a máxima corrente obtida no sistema trifásico foi de aproximadamente 140A por fase sendo no condutor neutro registrada uma corrente de aproximadamente 11A.

Na bobina, que foi ligada entre duas fases do transformador, a máxima corrente atingida foi de 75A.

Os valores de correntes foram limitados pelas características nominais do varivolt.

Em ambos os casos, a tensão medida no secundário do transformador não ultrapassou 1,5 V, garantindo assim a característica de uma fonte de campo magnético.

5.5- Sistema de Medição – Análise dos Instrumentos.

5.5.1- Medições de corrente.

A confiabilidade dos instrumentos de medição é um fator de extrema importância nos trabalhos experimentais.

As medições de corrente, tanto no sistema trifásico quanto na bobina foram feitas utilizando-se os seguintes instrumentos, todos devidamente aferidos:

➤ Amperímetro digital:

Fabricante: Tektronix.

Modelo: DM 251.

➤ Tc:

Fabricante: HeB.

Tipo: Ti44-1.

Potência: 5 VA.

Primário: 600 A

Secundário: 5 A

➤ Amperímetro Alicate:

Fabricante: General Electric.

Fundo de escala: 300 A.

Os valores de correntes medidos pelo amperímetro digital e o alicate concordaram em suas leituras, fazendo com que o alicate, por ser de mais fácil manipulação, fosse usado nos experimentos.

5.5.2- Medições da indução magnética – comparações dos sensores.

Foram analisados dois sensores de campo, um comercial da Wandell & Goltermam, próprio para medições de campos elétricos e magnéticos na faixa de 5 Hz a 30 kHz e outro construído no próprio LEAT [6].

Medições feitas com ambos medidores no sistema trifásico foram comparadas com valores calculados de campo nas direções vertical e horizontal tomando-se o condutor da fase **B** como referência (figura 5.8).

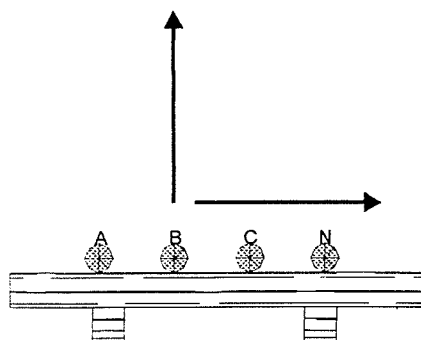


Figura 5.8: Sistema de referência usado.

As tabelas 5.1 e 5.2 juntamente com as figuras 5.9 e 5.10 mostram os valores calculados e medidos, na vertical e na horizontal, utilizando-se os dois sensores. O sensor 1 é o construído no LEAT.

Os valores de correntes medidos foram de 140A nas fases A e B, 130A na fase C e 10A no neutro.

A distância entre os condutores foi de 10cm.

Pode ser visto, pelas tabelas 5.1 e 5.2, que o medidor comercial apresentou resultados mais próximos do esperado sendo, por isto, escolhido nas futuras medições.

Medições na Vertical

Distancia da fonte (m)	Valores Calculados	Valores medidos em μT		Erros %	
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 2
0.2	93.87	79.03	90.00	15.81	4.12
0.4	25.98	21.66	25.00	16.63	3.78
0.6	11.65	10.29	11.42	11.63	1.96
0.8	6.50	6.06	6.49	6.74	0.14
1.0	4.10	3.93	4.17	3.98	1.81
1.2	2.79	2.76	2.83	1.11	1.49
1.4	2.00	1.99	2.09	0.64	4.43
1.6	1.49	1.88	1.60	25.99	7.17
1.8	1.15	1.21	1.26	5.51	9.87
2.0	0.90	0.99	1.01	9.58	12.02
3.0	0.34	0.42	0.40	23.97	17.37

Tabela 5.1: Medições na vertical

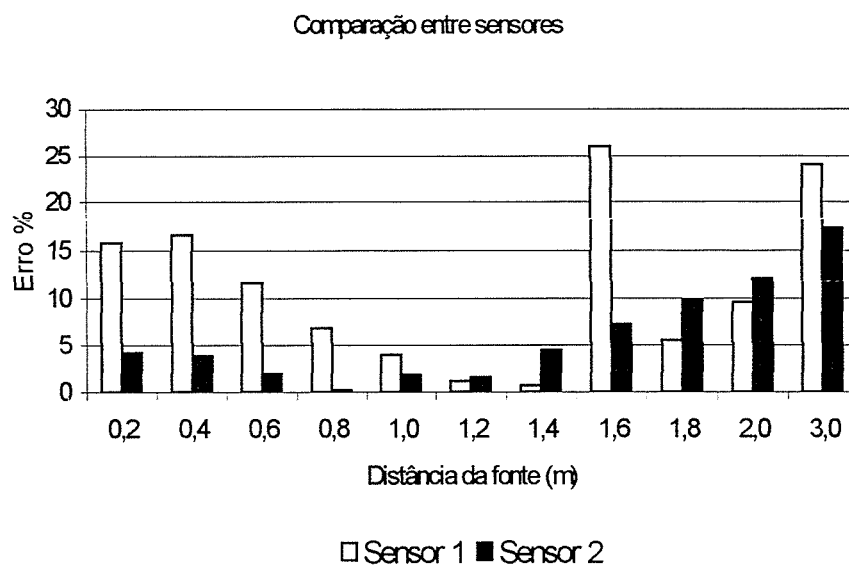


Figura 5.9: Medições na vertical – Comparações entre sensores

Medições na Horizontal

Distancia da fonte (m)	Valores Calculados	Valores medidos em μT		Erros %	
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 2
0.3	51.57	44.46	52.90	13.79	2.58
0.4	28.43	25.69	29.30	9.62	3.08
0.6	12.46	12.21	13.20	1.98	5.96
0.8	7.03	6.74	7.22	4.20	2.68
1.0	4.54	4.09	4.27	9.87	5.98
1.2	3.19	2.81	2.87	11.81	10.00
1.4	2.37	2.03	2.04	14.17	13.76
1.6	1.83	1.48	1.49	19.00	18.40
1.8	1.45	1.13	1.14	22.32	21.46
2.0	1.18	0.89	0.90	24.63	23.69
2.4	0.82	0.60	0.60	26.37	26.56
3.0	0.51	0.37	0.38	28.45	25.62
3.8	0.30	0.14	0.18	54.20	41.79

Tabela 5.2: Medições na horizontal

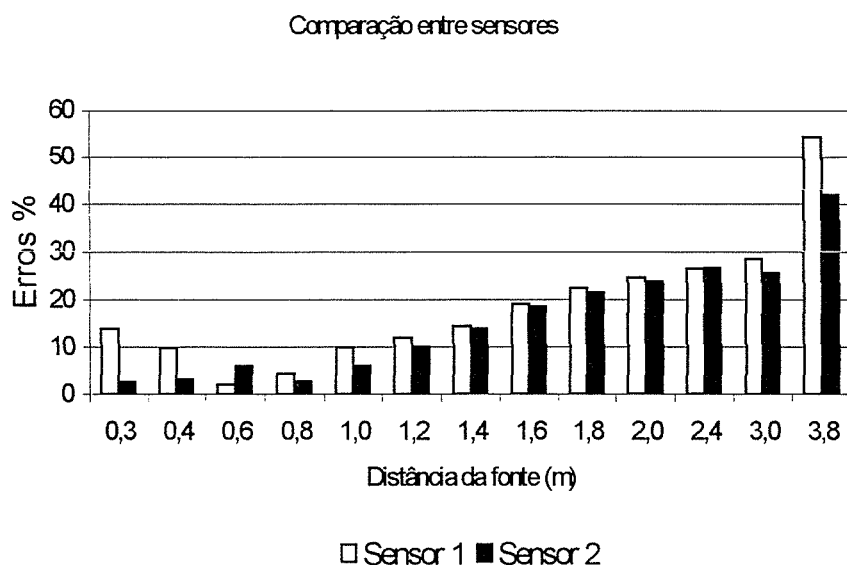


Figura 5.10: Medições na horizontal – Comparações entre sensores

5.6- Considerações Finais.

Alguns fatores relativos ao levantamento dos erros nas medições devem ser considerados.

A formulação matemática apresentada não prevê a influência do diâmetro da bitola dos condutores, mas como as medições foram realizadas a uma distância mínima de 20 cm dos mesmos, este fator pode ser desprezado como fonte de erro.

As diferenças entre os valores calculados e medidos aumentam com a distância da fonte devido à influência dos campos magnéticos externos.

Estudo feito [6] a respeito da influência do solo do laboratório nas medições conclui que seu efeito pode ser completamente ignorado.

6- Análise dos Resultados.

6.1- Introdução.

Os resultados dos experimentos realizados em diversas classes de aços e configurações de blindagem são discutidos neste capítulo.

Os experimentos se concentraram nos aços elétricos, no entanto, um tipo de aço carbono muito citado em estudos a respeito de blindagem em baixa frequência [7,23,27] foi também analisado, o SAE 1010.

A escolha das classes de aços elétricos foi tal que permitiu a identificação das características metalúrgicas ligadas a um bom desempenho na blindagem do campo eletromagnético.

Conclusões importantes são tiradas a respeito da influência do valor do campo magnético na permeabilidade dos materiais e conseqüentemente na eficiência dos mesmos na blindagem.

O estudo de cada tipo de aço foi feito em tópicos separados, e os melhores resultados apresentados separadamente. A utilização do alumínio se restringiu à técnica de blindagem sanduíche.

As tabelas contendo os resultados são acompanhadas de gráficos mostrando a atenuação dos materiais em decibéis.

6.2- Considerações Gerais.

Algumas considerações iniciais a respeito das medições realizadas são importantes.

Antes do início dos testes, foram feitas medições da indução magnética em diversas distâncias em torno da bancada desenergizada objetivando avaliar a influência dos campos magnéticos externos. Para isto foi usado o sistema trifásico com as medições sendo feitas na horizontal e na vertical, tomando-se como referência o condutor da fase "B" e o plano "z=0".

O espaçamento adotado entre os condutores foi de 10cm, conforme mostra a figura 6.1.

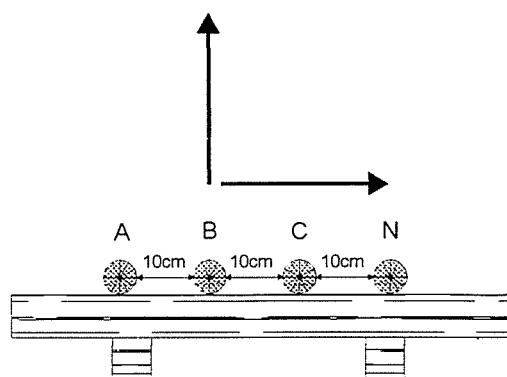


Figura 6.1: Referência usada para avaliar a influência de campos externos.

A tabela 6.1 mostra os valores das induções medidas.

Distância da Fonte (m)	Vertical (μT)	Horizontal (μT)
0.2	0.243	0.040
0.4	0.110	0.039
0.6	0.066	0.051
0.8	0.048	0.051
1.0	0.040	0.051
1.2	0.035	0.096
1.4	0.033	0.065
1.6	0.031	0.029
1.8	0.030	0.065
2.0	0.029	0.098
2.4	-	0.023
3.0	0.030	0.099
3.8	-	0.100

Tabela 6.1: Valores do Campo magnético ambiente

Os valores do campo magnético presentes no ambiente são maiores em regiões mais próximas da bancada, no entanto sua influência é maior nas regiões mais distantes devido ao menor valor do campo produzido pelo sistema de condutores.

As tabelas 5.1 e 5.2 mostram as diferenças entre os valores medidos e calculados da indução magnética, com os erros aumentando no afastamento do ponto de medição da fonte.

Os erros são ainda maiores nas medições na direção horizontal, chegando a mais de 50% para uma distância de 3,8m da fonte. Com estes fatores, nos experimentos, foram realizadas medidas apenas na direção vertical e até uma distância de 2,0m da fonte, onde os erros são de aproximadamente 10%.

Para calcular a eficiência das chapas de aço, foram tomadas medidas da indução magnética, na vertical, antes e depois do posicionamento das mesmas sobre a bancada. A atenuação, em decibéis, foi então calculada de acordo com a equação 4.12.

A montagem permite que o espaçamento entre os condutores varie de 5cm até 15cm, porém estando em 5cm, o campo gerado é menor [6] tornando a influência do campo externo mais significativa principalmente em regiões mais distantes da fonte. Com o espaçamento de 15cm, os condutores estariam muito próximos da borda das chapas metálicas (figura 6.2) utilizadas na blindagem, prejudicando assim a análise da eficiência dos materiais. Devido aos fatores expostos, o espaçamento de 10cm foi o adotado em todos os experimentos.

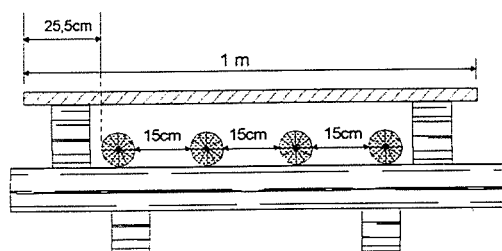


Figura 6.2: Distância das bordas da chapa aos condutores para $d = 15\text{cm}$

A figura 6.3 mostra o posicionamento das chapas de aço sobre a bancada de testes. Foram usados diversos tamanhos de chapas em função do tipo de experimento realizado, porém todas com 1m de largura.

Com exceção do item 6.3.4, "Anisotropia Magnética", as chapas foram posicionadas na bancada de maneira que suas direções de laminação estivessem perpendiculares ao campo gerado.

Nos experimentos em que 6 chapas de 1m foram usadas, todas elas foram posicionadas de maneira a estarem encostadas sem se sobreporem umas às outras.

A distância entre a blindagem e a fonte foi mantida, em todos os testes, igual a 7cm e as correntes nas fases A, B, C e no neutro, sendo aproximadamente igual a 140A, 140A, 130A, 10A, respectivamente. Estes valores de correntes estão dentro do que se encontra na prática.

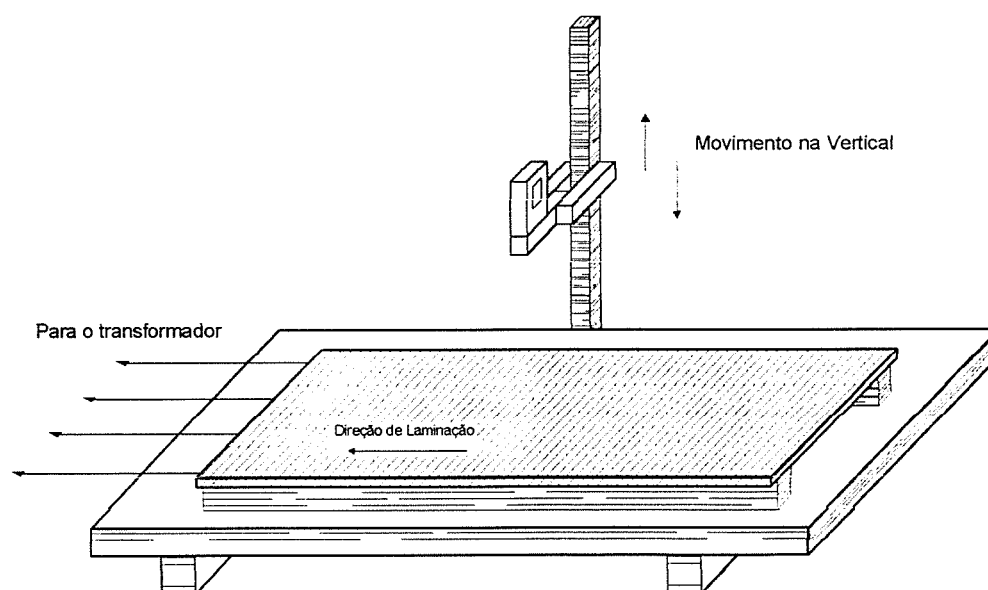


Figura 6.3: Posição da blindagem sobre a bancada de testes.

As medições onde foi utilizada a bobina como fonte de campo serão devidamente especificados.

Todas as medições foram feitas com o medidor de campo magnético comercial "Wandell & Goltermam".

6.3- Apresentação dos Resultados.

Na tabela 6.2[14,17,19] estão as principais características dos materiais usados.

Materiais usados	Composição Química típica %			Perdas (w/Kg)	Cond. Rel.	Chapas			Grãos μm
	C	Si+Al	Mn			Comp. m	Espe. mm	Quant.	
SAE 1006	0.06	0.06	-	8.5	0.13	6	0.6	1	15 a 20
SAE 1010	0.10	-	-	-	0.1	2	2 e 3	2	-
Usicore 260	0.0031	0.95	0.49	4.64*	0.064*	1	0.5	6	15 a 20
Usicore 360 I	0.047	1.32	0.30	6.67*	0.058*	1	0.5	6	15 a 20
E 125 SP	-	-	-	-	-	1	0.35	6	15 a 20
E 125 TP	-	-	-	3.13	0.03	1	0.35	6	130 a 170
E 170 TP	-	2.2	-	4.36	0.035	6 e 1	0.5	1 e 6	130 a 170
E 230 TP	-	2.0	-	4.69	0.04	6	0.5	1	130 a 170
E 004 GO TP	0.03	3.5	0.06	1.05	0.03	1	0.27	6	4000

Tabela 6.2: Características dos materiais usados nos experimentos

*Dados obtidos após tratamento térmico final

Foi usado, juntamente com o SAE 1010, o alumínio 99,0% de pureza, cujas características são mostradas na tabela 6.3 abaixo.

Material	Composição Química %				Chapas		
	Al	Si	Fe	Outros	Comp.m	Larg.m	Espe.mm
*Alumínio	99.0	0.25	0.4	0.26	2	1	5

Tabela 6.3: Características das chapas de alumínio usadas no experimento

*Fonte AICOA

A escolha dos materiais foi baseada nas curvas de magnetização de pico (disponíveis apenas nos aços totalmente processados) e nas perdas magnéticas fornecidas pelos fabricantes [17,19].

As siglas TP e SP indicam respectivamente materiais totalmente e semi-processados.

As perdas magnéticas especificadas acima são obtidas de acordo com a norma **NBR 5161** (60 Hz/1.5T).

Todos os aços totalmente processados e o E125 - SP foram fornecidos pela Acesita -MG, os demais fornecidos pela Usiminas -MG.

6.3.1- Aço - carbono SAE 1010.

Com a grande diversificação dos tipos de aços, houve a necessidade da criação de um sistema de classificação. Uma das mais práticas e usadas é a que leva em conta a composição química. A "Society of Automotive Engineers – SAE" adota este sistema de classificação.

Para os aços-carbono comuns, é usada a sigla SAE seguida do código 10XX. Como exemplo, SAE1010 significa aço carbono comum, contendo 0.1 % de carbono.

No Brasil, a ABNT segue os critérios adotados pela SAE.

Apesar de não ser um aço produzido para fins elétricos, o SAE1010 é um material constantemente citado em estudos de blindagem em baixas frequências, pois é relativamente barato e facilmente encontrado no mercado.

A condutividade do SAE 1010, devido ao baixo teor de carbono e de outros elementos como o silício e o alumínio, atinge valores até 3 vezes maior do que alguns aços elétricos. Alguns autores [23], consideram a permeabilidade magnética relativa deste material igual a 1000, no entanto sem especificar o valor do campo magnético ao qual é submetido, o que é importante.

A tabela 6.4 e a figura 6.4 mostram os resultados obtidos nas medições.

Distância da fonte (m)	Indução s/ blind. (μT)	Chapa 2mm		Chapa 3mm	
		c/blind. (μT)	Red. (dB)	c/blind (μT)	Red. (dB)
0,2	93,31	24,50	11,62	13,10	17,05
0,4	27,17	8,95	9,65	5,51	13,86
0,6	12,44	4,91	8,08	3,17	11,86
0,8	7,01	3,13	7,00	2,18	10,15
1,0	4,51	2,18	6,30	1,60	9,01
1,2	3,11	1,63	5,60	1,24	7,97
1,4	2,28	1,27	5,09	1,00	7,17
1,6	1,74	1,00	4,75	0,81	6,64
1,8	1,38	0,82	4,54	0,67	6,23
2,0	1,11	0,68	4,23	0,57	5,84

Tabela 6.4: Redução da indução magnética em dB com as chapas SAE 1010

Valores da Indução Antes e Depois da Blindagem

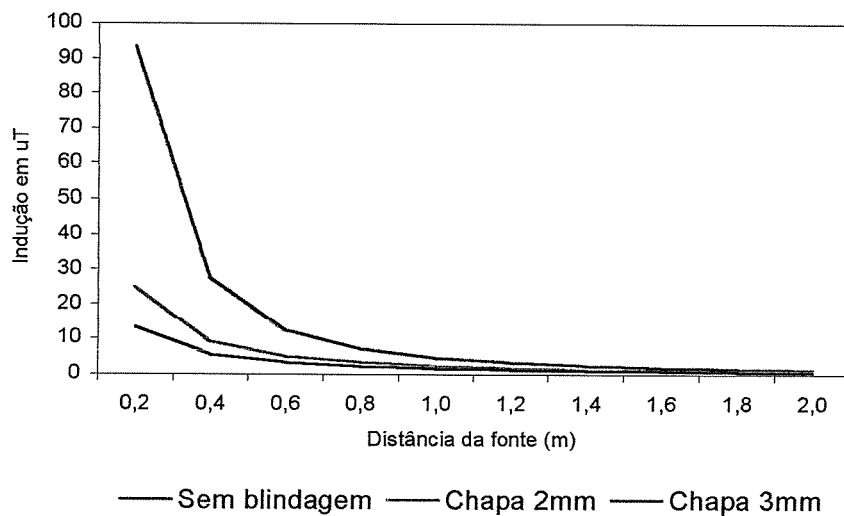


Figura 6.4: Comparação da indução antes e depois da blindagem

A falta do conhecimento da permeabilidade magnética relativa do material quando submetido aos valores indução mostrados na tabela, impede que seja feita qualquer comparação dos resultados obtidos com cálculos feitos utilizando as equações do fator de blindagem apresentadas no capítulo 4.

Os valores da redução obtidos estão bem próximos dos obtidos por [7].

6.3.2- Aços elétricos semi - processados.

O conhecimento do desempenho dos aços semiprocessados na blindagem é fundamental pois, a partir daí, pode ser evidenciada a importância do tratamento térmico no desempenho dos mesmos na blindagem, quando comparados com os totalmente processados.

É importante lembrar que o aço SAE1006, assim como o SAE1010, não é considerado um aço elétrico, mas é constantemente usado como um, devido ao baixo custo.

Os resultados obtidos nas medições estão na tabela 6.5 e figura 6.5.

Distância da fonte (m)	Indução s/ blind. (μT)	Valor da Indução Após Blindagem (μT)			
		SAE1006 0.6mm	E125 SP 0.35mm	Usicore 260 0.5mm	Usicore 360I 0.5mm
0,2	93,31	58,30	75,04	63,00	60,96
0,4	27,17	19,54	24,29	22,10	21,12
0,6	12,44	9,84	11,50	11,30	10,33
0,8	7,01	5,76	6,59	6,20	5,99
1,0	4,51	3,85	4,30	4,21	3,94
1,2	3,11	2,74	2,95	2,81	2,78
1,4	2,28	2,02	2,19	2,12	2,06
1,6	1,74	1,57	1,68	1,62	1,53
1,8	1,38	1,36	1,33	1,30	1,26
2,0	1,11	1,02	1,08	1,10	1,02

Tabela 6.5: Redução da indução magnética usando chapas de aços semi- processados

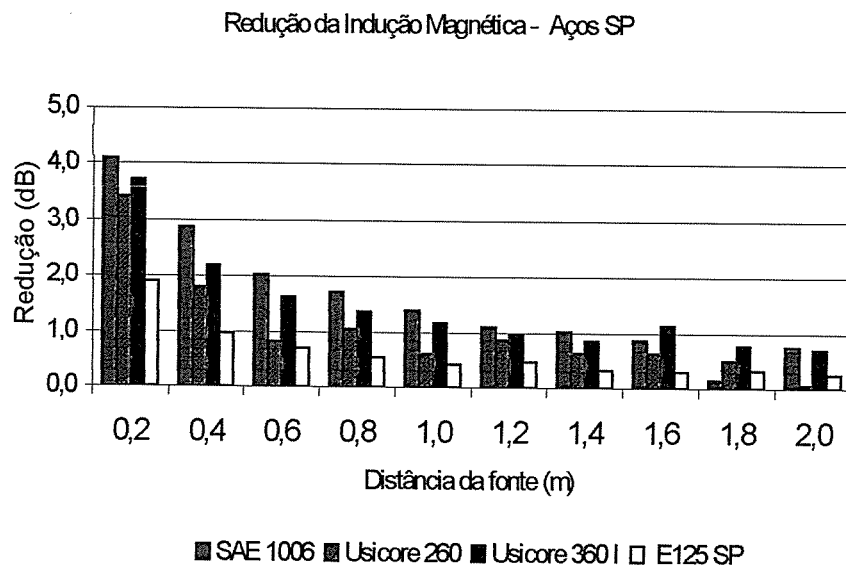


Figura 6.5: Redução da indução magnética, em dB, obtida com aços semi-processados

Os resultados apresentados acima descartam qualquer possibilidade do uso dos aços semiprocessados, apesar do baixo custo, na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência. As principais causas de tão baixa eficiência são a alta resistividade acompanhada pelo pequeno tamanho dos grãos, que é responsável também pela baixa permeabilidade em relação aos materiais totalmente processados (tabela 6.2).

Melhores resultados poderiam ser obtidos com maiores espessuras das chapas, no entanto o peso dos materiais seria um fator negativo nos projetos.

6.3.3- Aços elétricos totalmente processados – GO e GNO.

Os aços elétricos totalmente processados, grãos orientados (GO) e não orientados (GNO), são fabricados no Brasil pela Acesita – MG.

Os resultados obtidos nos experimentos são mostrados na tabela e na figura a seguir:

Distância da fonte (m)	Indução s/ blind. (μT)	Valor da Indução Após Blindagem (μT)			
		E 125 TP 0.35mm	E170 0.5mm	E 230 0.5mm	E004 – GO 0.27mm
0,2	93,31	27,50	29,29	27,18	37,00
0,4	27,17	12,99	13,19	12,46	17,68
0,6	12,44	7,43	7,64	7,28	8,08
0,8	7,01	4,79	4,91	4,28	5,16
1,0	4,51	3,29	3,41	3,29	3,55
1,2	3,11	2,41	2,50	2,42	2,61
1,4	2,28	1,83	1,92	1,85	2,10
1,6	1,74	1,44	1,51	1,45	1,57
1,8	1,38	1,16	1,10	1,19	1,27
2,0	1,11	0,95	1,00	0,97	1,04

Tabela 6.6: Redução da indução magnética usando chapas de aços totalmente processados

Redução da Indução Magnética

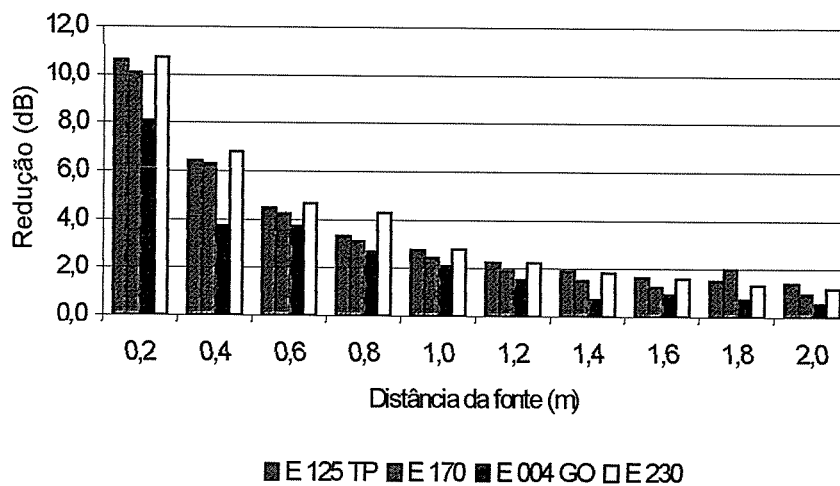


Figura 6.6: Redução da indução magnética, em dB, obtida com aços totalmente processados.

A atenuação proporcionada pelos aços totalmente processados ainda é muito baixa, no entanto, uma melhora significativa é notada em relação aos materiais semiprocessados. Uma comparação pode ser feita, através da tabela

6.7, entre um mesmo tipo de aço (E-125 TP e SP) antes e depois do tratamento térmico final, reforçando ainda mais a importância deste.

Distância da Fonte (m)	B s/ blind (μT)	B Após a Blindagem (μT)	
		E125 TP 0.35mm	E125 SP 0.35mm
0,2	93,31	27,50	75,04
0,4	27,17	12,99	24,29
0,6	12,44	7,43	11,50
0,8	7,01	4,79	6,59
1,0	4,51	3,29	4,30
1,2	3,11	2,41	2,95
1,4	2,28	1,83	2,19
1,6	1,74	1,44	1,68
1,8	1,38	1,16	1,33
2,0	1,11	0,95	1,08

Tabela 6.7: Comparação entre o mesmo material antes e depois do tratamento térmico final

Um fato importante deve ser destacado nos resultados obtidos até agora: a eficiência da blindagem cai à medida em que o ponto considerado se afasta da fonte. Contribui para este fato a largura limitada das chapas de aço em relação ao sistema de condutores trifásicos.

A seguir é mostrada uma comparação entre os resultados obtidos nos experimentos até então realizados (largura das chapas de 1m), com um no qual a largura da blindagem é duplicada passando para 2m. O material utilizado para tal foi o E170.

Distância da fonte (m)	Indução s/ blind. (μT)	E170, 1m de largura		E170, 2m de largura	
		C/ blind	Red. (dB)	C/ blind	Red. (dB)
0,2	93,31	29,29	10,06	29,10	10,12
0,4	27,17	13,19	6,28	12,30	6,88
0,6	12,44	7,64	4,24	6,74	5,32
0,8	7,01	4,91	3,10	4,00	4,87
1,0	4,51	3,41	2,42	2,70	4,46
1,2	3,11	2,50	1,90	2,00	3,83
1,4	2,28	1,92	1,50	1,50	3,64
1,6	1,74	1,51	1,23	1,25	2,87
1,8	1,38	1,10	1,97	1,05	2,37
2,0	1,11	1,00	0,92	0,85	2,32

Tabela 6.8: Comparação entre os resultados obtidos para 1m e 2m de largura da blindagem

Eficiência da Blindagem com a Largura das Chapas

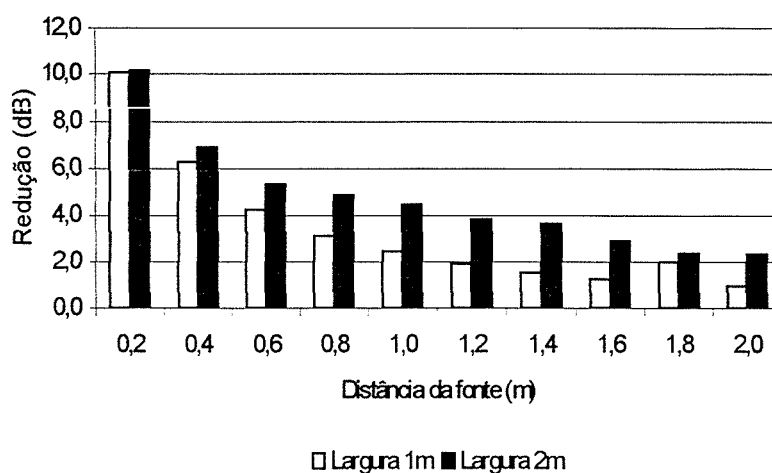


Figura 6.7: Redução dos valores de Indução magnética em dB

Fica claro pela figura 6.7 e tabela 6.8 que o aumento na largura das chapas é um fator que influencia na eficiência da blindagem, principalmente para regiões mais distantes da fonte, no entanto, para tais regiões ainda não se obtém uma redução comparável àquelas obtidas em regiões mais próximas da blindagem.

alguns autores [4] citam a necessidade da solda entre as chapas como indispensável na obtenção de bons resultados na blindagem, no entanto, isto pode causar alterações nas propriedades elétricas e magnéticas no devendo ser evitado.

Com o fim de verificar este efeito, foi realizado um teste onde somente uma chapa de 6m de comprimento foi usada cobrindo a bancada. O aço utilizado foi E170 e a comparação dos resultados pode ser vista na tabela 6.9.

Distância da fonte (m)	Indução s/ blind. (μT)	E 170 – 6 chapas		E170 – 1chapa	
		C/ blind	Red. (dB)	C/ blind.	Red. (dB)
0,2	93,31	29,29	10,06	28,81	10,21
0,4	27,17	13,19	6,28	13,08	6,35
0,6	12,44	7,64	4,24	7,63	4,24
0,8	7,01	4,91	3,10	4,84	3,22
1,0	4,51	3,41	2,42	3,41	2,42
1,2	3,11	2,50	1,90	2,50	1,91
1,4	2,28	1,92	1,50	1,92	1,48
1,6	1,74	1,51	1,23	1,51	1,21
1,8	1,38	1,10	1,97	1,23	0,99
2,0	1,11	1,00	0,92	1,00	0,90

Tabela 6.9: Efeito da utilização de somente uma chapa de 6m na blindagem

Como não houve qualquer influência no desempenho da blindagem ao se utilizar chapas de 1m ou 1 chapa de 6m. Este fato está de acordo com a teoria (Princípio de Babinet) segundo a qual em campos de baixa frequência as pequenas frestas não alteram a eficiência da blindagem.

É importante lembrar que as 6 chapas de um metro foram posicionadas de maneira que não tenham contato entre si, sem se sobreporem umas nas outras, o que naturalmente não evita a possibilidade de haverem pequenas frestas na blindagem.

As diferenças encontradas entre os valores apresentados na tabela 6.9 não podem ser atribuídas a pequenas variações nas medições.

Distância da fonte (m)	Indução s/ blind. (μT)	Valor da Indução Após Blindagem (μT)			
		E 125 TP 0.35mm	E 125 SP 0.35mm	E 170 0.5mm	E 004 GO 0.27mm
0,2	93,31	18,47	75,04	22,52	11,30
0,4	27,17	9,92	24,29	10,10	7,89
0,6	12,44	6,20	11,50	5,92	5,40
0,8	7,01	4,14	6,59	3,90	3,87
1,0	4,51	2,95	4,30	2,73	2,83
1,2	3,11	2,20	2,95	2,02	2,15
1,4	2,28	1,71	2,19	1,56	1,70
1,6	1,74	1,36	1,68	1,24	1,36
1,8	1,38	1,10	1,33	1,00	1,11
2,0	1,11	0,90	1,08	0,84	0,93

Tabela 6.10: Atenuação do campo com as chapas paralelas a indução

Redução da Indução Magnética - Chapas paralelas ao fluxo

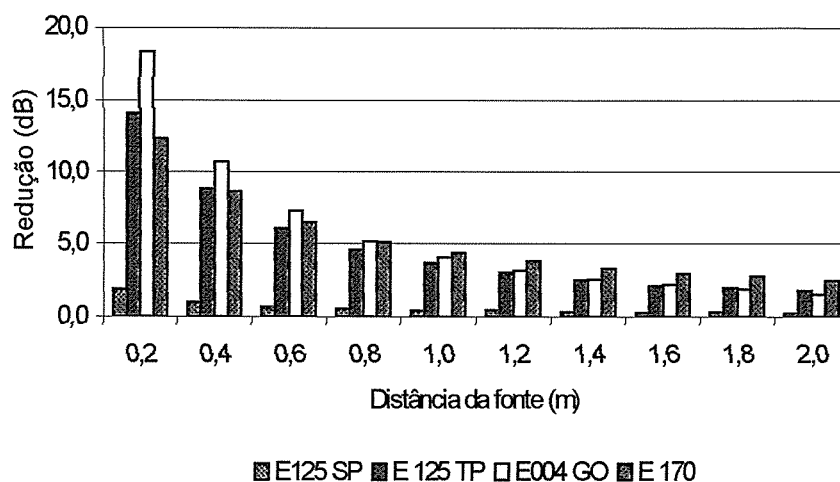


Figura 6.9: Atenuação do campo, em dB, com as chapas paralelas a indução

A figura 6.10 mostra a diferença na atenuação, em decibéis, da indução magnética devido ao posicionamento das chapas de aço E004-GO, onde a diferença é ainda mais significativa.

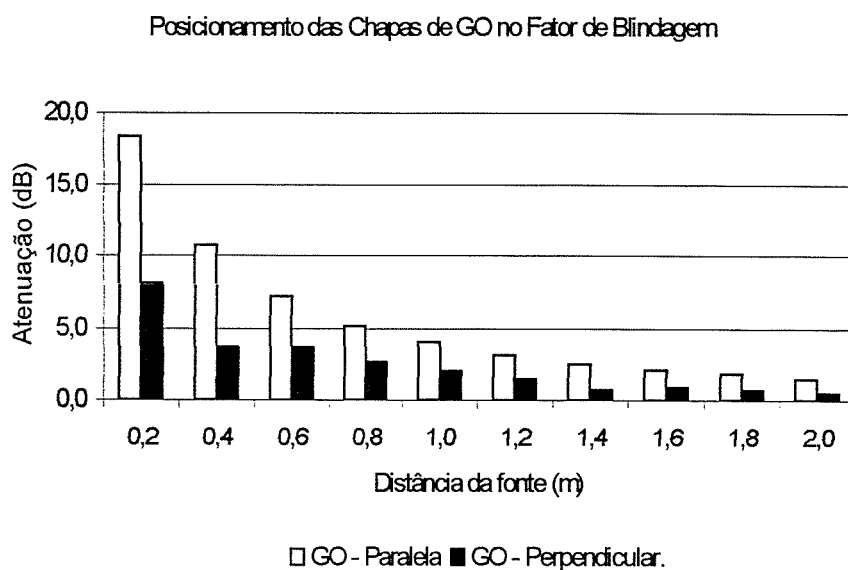


Figura 6.10: Efeito da posição das chapas na blindagem .

Um fato importante foi detectado na utilização do aço silício de grão orientado. Ao ser posicionada a chapa sobre a bancada, um desequilíbrio ocorreu no sistema fazendo com que a corrente do neutro, antes de 10A, fosse para aproximadamente 15A. Este fato pode ser explicado pelo acoplamento indutivo existente entre o metal, que possui permeabilidade magnética bem maior que os demais, e os condutores.

Na tentativa de minimizar tal desequilíbrio, a distância das chapas à fonte foi aumentada para 14cm, no entanto, nenhuma melhora nos resultado foi obtida permanecendo o desequilíbrio. Uma solução seria afastar ainda mais as chapas dos condutores, o que prejudicaria a análise da blindagem , uma vez que as chapas são de largura reduzida e grande parte do campo magnético produzido passa a não mais incidi-las.

6.3.5- Efeito do valor do campo no fator de blindagem do aço.

A permeabilidade magnética dos materiais ferromagnéticos depende fundamentalmente do valor do campo magnético no qual são submetidos.

Para a verificação experimental deste fato, foi montada a bancada de testes conforme mostra a figura 6.11, onde a bobina descrita no capítulo 5 foi usada como fonte de campo magnético.

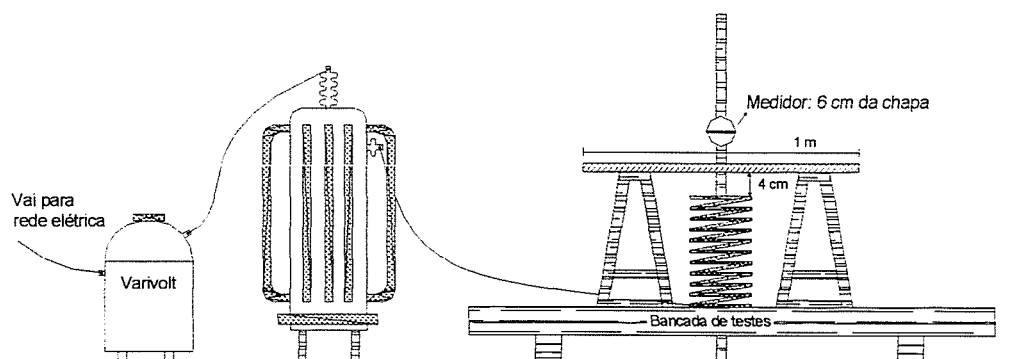


Figura 6.11: Bancada de testes com bobina.

A corrente na bobina foi variada de 5A a 75A, fazendo com que um campo crescente, incidisse em todas as direções na chapa. A tabela 6.11 e a figura 6.12 mostram a atenuação em função do valor corrente na bobina.

I (A)	B s/blind (μT)	Redução em dB				
		E 004 GO 0.27mm	E 125 TP 0.35mm	E 170 0.5mm	Usic. 360 0.5mm	E 125 SP 0.5mm
5	51,43	13,78	12,38	11,89	3,28	1,73
10	91,13	13,87	12,93	12,40	3,42	1,47
15	134,23	14,31	13,67	13,06	3,54	1,81
20	179,00	14,76	14,27	13,53	3,82	2,07
25	223,60	14,96	14,82	14,08	3,98	2,12
30	271,70	15,12	15,23	14,54	5,14	2,27
35	325,70	15,71	16,10	15,26	4,43	2,70
40	367,00	15,91	16,44	15,61	4,68	2,85
45	412,00	16,19	16,91	15,97	4,88	3,04
50	456,10	16,33	17,22	16,37	5,03	3,08
55	506,6	16,60	17,57	16,81	5,26	3,31
60	548,9	16,74	17,91	17,10	5,40	3,40
65	593,9	16,92	18,14	17,26	5,51	3,52
70	640,5	17,10	18,42	17,56	5,67	3,61
75	689,1	17,24	18,63	17,84	5,80	3,68

Tabela 6.11: Atenuação do campo, em dB, para diversos valores de corrente na bobina

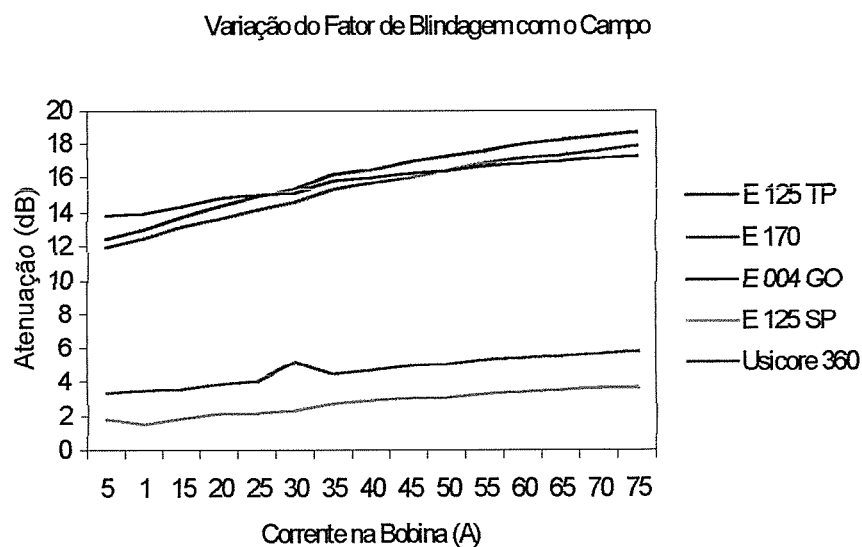


Figura 6.12: Fator de blindagem x corrente na bobina

A figura 6.12 mostra que a variação da corrente na bobina com o fator de blindagem é uma reta, no entanto, para valores maiores de correntes é esperado um decréscimo do mesmo devido à saturação dos materiais. Vale lembrar que 75A é o valor máximo de corrente obtido com os equipamentos disponíveis no LEAT.

Na figura 6.12, a variação do fator de blindagem com o valor do campo é representada em dB, para uma melhor visualização, pode ser observado como exemplo o aço E 170, que para uma corrente na bobina de 5A o campo magnético foi reduzido de 4 vezes, enquanto para uma corrente de 75A, a redução foi de 8 vezes.

A equação 5.7 mostra que a densidade de fluxo magnético gerado por uma bobina é diretamente proporcional à corrente, com isto, o aspecto de um gráfico "Fator de Blindagem x Campo Magnético" teria o mesmo aspecto da figura 6.12.

O desempenho do aço E 004 – GO é inferior aos demais (E 125 TP e E170) após um determinado valor de corrente, sugerindo um início de saturação do material no sentido de fácil magnetização.

A figura 3.5 mostra que a direção de fácil magnetização atinge a saturação antes das demais.

Com esta possível saturação na direção de fácil magnetização, o fluxo magnético passa a ser mais bem distribuído na chapa, e devido à anisotropia magnética, já discutida, a eficiência da blindagem cai. A figura 6.13 ilustra este efeito.

No apêndice 1 estão as curvas de magnetização de pico dos aços totalmente processado utilizados neste trabalho. Tais curvas são obtidas seguindo normas técnicas, não servindo por isto, como base de determinação da permeabilidade magnética dos materiais sob as condições apresentadas neste trabalho.

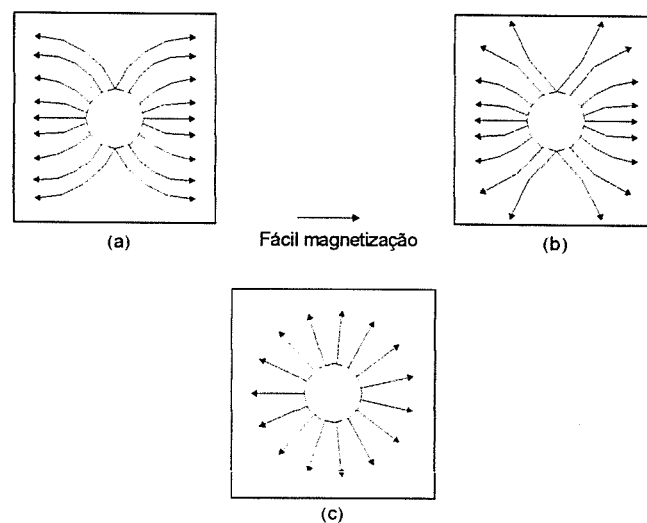


Figura 6.13: (a) Ausência de saturação: maior parte do fluxo na direção de fácil magnetização;
(b) Início da saturação;
(c) Total saturação na direção de fácil magnetização

6.4- Técnicas Alternativas de Blindagem.

Muitas vezes a utilização de uma única chapa metálica como solução na atenuação do campo magnético não é suficiente. Algumas configurações mais sofisticadas de blindagem, com isto, são propostas.

A figura 6.14 apresenta as configurações usadas nos experimentos. As configurações 3, 4 e 5, são chamadas de blindagem sanduíche.

Na configuração 3 as chapas de alumínio (99,0%) usadas têm espessura de 5mm e as de aço SAE1010 2mm.

Em todos os testes, com exceção das configurações 4 e 5, a direção de laminação das chapas foi colocada perpendicularmente ao campo gerado pelo sistema trifásico.

As correntes nas fases A, B, C foram respectivamente de 140A, 140A, 128A, sendo medida no neutro uma corrente de aproximadamente 10A.

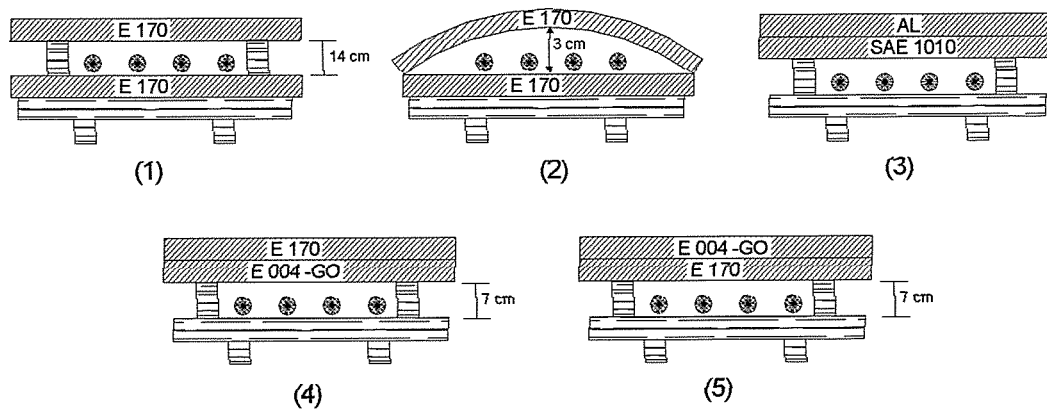


Figura 6.14: Técnicas alternativas de blindagem.

A figura 6.15, juntamente com a tabela 6.12 mostram os resultados obtidos nos testes.

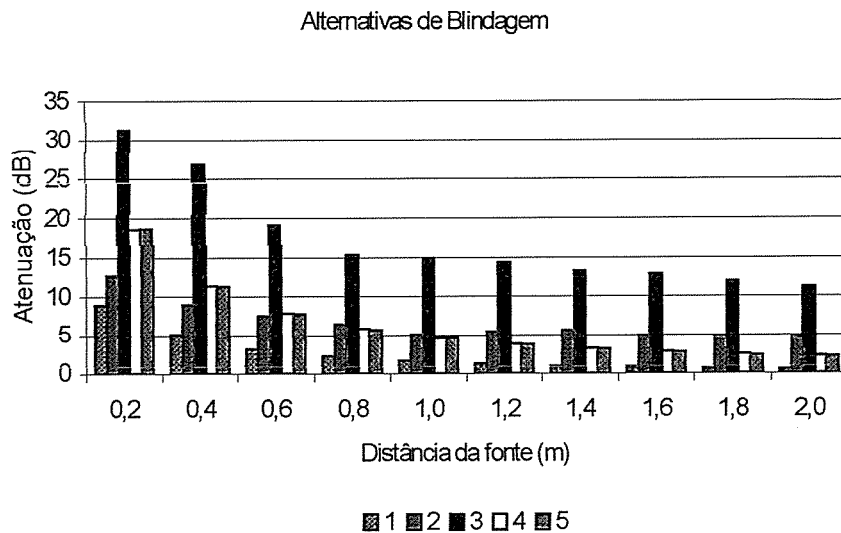


Figura 6.15: Fator de blindagem nas diversas configurações

Distância (m)		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
Indução s/blind.(μ T)		93.31	27.17	12.44	7.01	4.51	3.11	2.28	1.74	1.38	1.11	
Configurações	1	Ind. μ T após	33.86	15.26	8.75	5.5	3.78	2.72	2.06	1.60	1.28	1.05
		Red. dB	8.80	5.01	3.06	2.11	1.55	1.15	0.89	0.76	0.61	0.50
	2	Ind. μ T após	21.81	9.69	5.34	3.38	2.53	1.68	1.21	1.00	0.81	0.66
		Red. dB	12.63	8.95	7.35	6.34	5.03	5.36	5.51	4.84	4.65	4.52
	3	Ind. μ T após	2.56	1.24	1.37	1.20	0.81	0.60	0.50	0.40	0.35	0.30
		Red. dB	31.24	26.82	19.17	15.30	14.90	14.31	13.20	12.84	12.00	11.21
	4	Ind. μ T após	10.98	7.34	5.10	3.63	2.68	2.04	1.59	1.28	1.04	0.86
		Red. dB	18.59	11.37	7.75	5.71	4.52	3.66	3.09	2.69	2.42	2.15
	5	Ind. μ T após	10.83	7.38	5.13	3.65	2.7	2.05	1.61	1.29	1.06	0.88
		Red. dB	18.70	11.32	7.69	5.67	4.47	3.62	3.01	2.59	2.25	2.01

Tabela 6.12: Atenuação do campo para as diversas configurações de blindagem.

Algumas considerações a respeito dos resultados apresentados na tabela 6.12 e figura 6.15 devem ser feitas.

A configuração 1, onde uma chapa é usada sob os condutores, apresenta piores resultados que os obtidos quando somente uma chapa do mesmo material foi usada sobre os mesmos (tabela 6.6).

A explicação para tal fato é que, devido à alta permeabilidade magnética do material em questão, a parcela do campo magnético refletida na blindagem é alta fazendo com que múltiplas reflexões ocorram entre as chapas, diminuindo assim a eficiência da blindagem.

A figura 6.16 a e b ilustra este fenômeno.

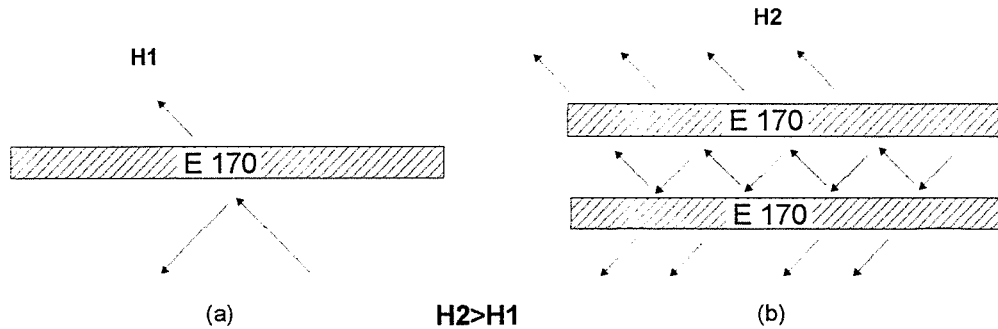


Figura 6.16 a e b: Efeito das múltiplas reflexões entre as chapas

Para reforçar esta hipótese, foi feito um teste no qual somente uma chapa sob os condutores foi colocada (figura 6.17).

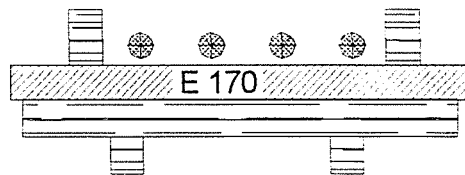


Figura 6.17: Posicionamento da blindagem sob os condutores.

A tabela 6.13 compara os resultados antes e depois da blindagem e mostra um aumento da indução magnética após o posicionamento da chapa inferior.

Distância (m)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Indução s/blind.(μT)	93.31	27.17	12.44	7.01	4.51	3.11	2.28	1.74	1.38	1.11
Indução c/blind.(μT)	109.8	33.14	15.02	8.43	5.33	3.59	2.62	1.96	1.54	1.24
Aumento (dB)	1.42	1.73	1.64	1.60	1.46	1.24	1.20	1.03	0.94	0.94

Tabela 6.13: Aumento da indução devido ao posicionamento da blindagem sob os condutores.

A configuração 2 apresenta também uma chapa sob os condutores, porém, a forma encurvada da chapa superior envolvendo toda a fonte de campo fez com que tal configuração apresentasse melhores resultados do que aqueles obtidos quando somente uma chapa do material E 170 foi utilizada (tabela 6.6).

No capítulo 4 foi mostrado que o fator de reflexão aumenta com o quociente entre a permeabilidade magnética e a condutividade do material.

Nos aços elétricos, este quociente está na casa dos milhares pois possuem alta permeabilidade magnética e baixa condutividade elétrica, o mesmo entretanto, não ocorre com o alumínio puro, que possui permeabilidade magnética relativa unitária e condutividade elétrica de até 20 vezes maior que determinados tipos de aços elétricos. O fator de reflexão deve ser maior, no caso de campos magnéticos gerados por fontes magnéticas, nos aços elétricos.

Medições anteriores realizadas no LEAT [6], mostraram que a utilização de duas chapas de alumínio conforme a configuração 1, apresenta melhores resultados quando da utilização de somente uma chapa do mesmo material sobre os condutores, o que pode ser justificado pelo exposto acima.

As configurações 4 e 5, mostram resultados praticamente iguais entre si, como também aos obtidos na utilização de somente uma chapa de aço E004 – GO. Este fato demonstra que, em se tratando de materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade o uso de uma chapa sobre a outra não acarreta nenhum ganho significativo na atenuação do campo. Isto pode ser explicado pelo valor do campo magnético que, após ultrapassar a chapa inferior, atinge a superior já atenuado, fazendo com que a permeabilidade magnética desta última não atinja valores altos o suficiente para uma boa atenuação.

Por fim, a configuração número 3, onde é usado o alumínio 99.0% e o aço SAE1010 apresenta os melhores resultados até aqui obtidos, porém, a espessura total da blindagem (7mm) é de pouca praticidade e ao mesmo tempo economicamente inviável.

Resultados obtidos [6] utilizando chapas de alumínio blindando o equipamento mostram que o máximo valor de atenuação da indução magnética obtida está em torno de 66% (9.37 dB) , não sendo portanto recomendada como única técnica de blindagem.

6.5- Comparação Geral dos Resultados.

Os resultados apresentados até aqui, descartam qualquer tipo de aço semi-processado como possível material usado em blindagens de campos magnéticos de baixa frequência.

Tal fato pode ser justificado pelo tamanho reduzido de seus grãos se comparados com os dos aços totalmente processados, o que lhes confere uma baixa permeabilidade magnética. A figura 6.18 juntamente com a tabela 6.15 mostram os melhores resultados obtidos nos experimentos na atenuação da indução magnética.

Vale a pena observar, como comparação, a tabela 6.14 que mostra os resultados das medições obtidos anteriormente no LEAT [6], onde somente chapas de alumínio 99.0% (5mm), foram utilizadas na blindagem da fonte de campo.

Apesar de oferecer um fator de atenuação menor do que alguns dos aços elétricos, em pontos mais distantes da fonte, o alumínio apresenta melhor desempenho.

Distância da fonte (m)	Redução (dB)	Redução %
0.4	16.95	85.8
0.8	16.36	84.8
1.2	13.35	78.5
1.6	11.60	73.7
2.0	10.46	70.0
2.4	9.53	66.6
2.8	8.87	64.0

Tabela 6.14: Resultados obtidos utilizando chapas de alumínio 99,0%.

Distância (m)		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Indução s/blind.(μ T)		93.31	27.17	12.44	7.01	4.51	3.11	2.28	1.74	1.38	1.11
SAE 1010 3mm	B (μ T) Após	13.10	5.51	3.17	2.18	1.60	1.24	1.00	0.81	0.67	0.57
	Red. dB	17.05	13.86	11.86	10.15	9.01	7.97	7.17	6.64	6.23	5.84
E 125 TP	B (μ T) Após	18.47	9.92	6.20	4.14	2.95	2.20	1.71	1.36	1.10	0.90
	Red. dB	14.07	8.75	6.05	4.57	3.69	3.02	2.5	2.11	1.93	1.80
AL + SAE 2mm	B (μ T) Após	2.56	1.24	1.37	1.20	0.81	0.60	0.50	0.40	0.35	0.30
	Red. dB	31.24	26.82	19.17	15.30	14.90	14.31	13.20	12.84	12.00	11.21
E 170 + E170 conf 2	B (μ T) Após	21.81	9.69	5.34	3.38	2.53	1.68	1.21	1.00	0.81	0.66
	Red. dB	12.63	8.95	7.35	6.34	5.03	5.36	5.51	4.84	4.65	4.52
E 004 GO	B (μ T) Após	11.30	7.89	5.40	3.87	2.83	2.15	1.70	1.36	1.11	0.93
	Red. dB	18.34	10.74	7.25	5.17	4.04	3.19	2.55	2.17	1.88	1.50
E 004 + E 170	B (μ T) Após	10.83	7.38	5.13	3.65	2.70	2.05	1.61	1.29	1.06	0.88
	Red. dB	18.70	11.32	7.69	5.67	4.47	3.62	3.01	2.59	2.25	2.01

Tabela 6.15: Comparação dos melhores resultados obtidos nos testes

Comparação dos Melhores Resultados

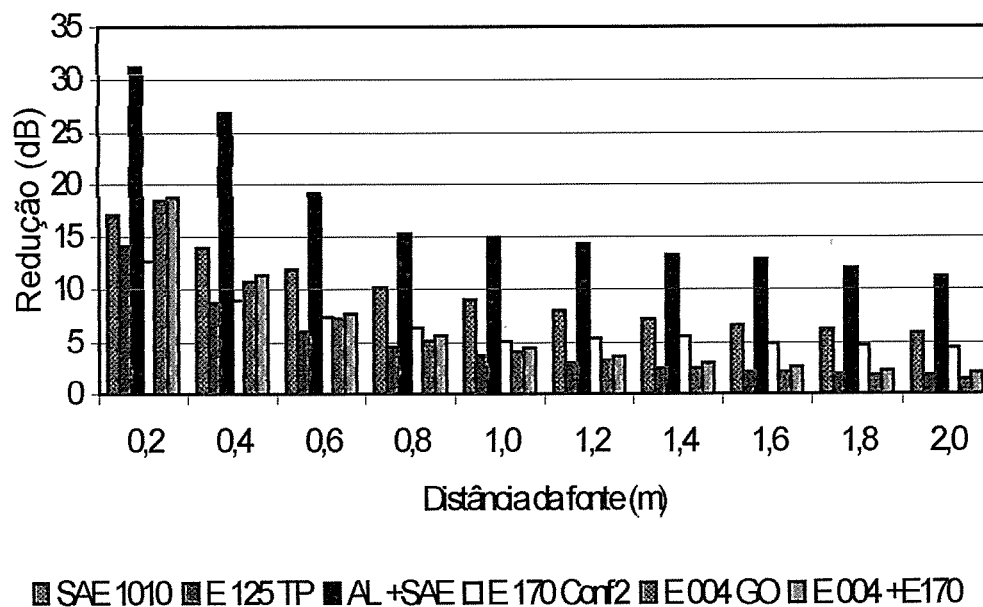


Figura 6.18: Comparação dos melhores resultados obtidos nos testes

Foram apresentados no decorrer deste capítulo os resultados obtidos com a utilização de diferentes classes de aços na blindagem de campos eletromagnéticos de baixa frequência gerados por uma fonte de baixa impedância.

Em todos os experimentos, sem exceção, a eficiência da blindagem caiu sensivelmente na medida em que o ponto de medição se afastou da fonte de campo. Somente para pontos muito próximos da fonte, até 40 cm, a redução obtida utilizando –se aços elétricos foi razoável, atingindo mais de 11 dB para a configuração em que foram usados os aços E004 GO e o E170.

O aumento na largura da blindagem (1m para 2m), juntamente com o envolvimento total dos condutores pela blindagem (configuração 2 – tabela 6.12), mostraram que esta queda de eficiência pode ser, em parte, atribuída ao tamanho limitado das chapas em relação ao sistema usado como fonte, no entanto, este fato somente não explica a visível superioridade do alumínio e até

do SAE 1010 (chapas de 1m de largura) na atenuação dos campos em maiores distância da fonte.

Três fatores estão provavelmente relacionados com o exposto acima:

1. A melhor condutividade das chapas de alumínio e SAE 1010, que é de 20 e 3 vezes, respectivamente, superior aos aços elétricos usados.
2. A maior espessura das mesmas, 5mm e 3mm, respectivamente para o alumínio e o SAE 1010.
3. A influência dos campos magnéticos externos, que a maiores distâncias da fonte influenciam os valores medidos sobretudo após o posicionamento da blindagem.

Os dois primeiros fatores citados acima são apenas hipóteses merecendo, este fato, maiores estudos com o auxílio de uma formulação matemática mais adequada.

No próximo capítulo são apresentadas as principais conclusões a respeito dos resultados obtidos nas medições e também a necessidade da continuação dos estudos na área.

7- Conclusões.

7.1 - Introdução.

O objetivo principal deste trabalho, ou seja, a determinação da eficiência das chapas de aços elétricos disponíveis no mercado na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência foi atingido.

Este último capítulo apresenta as principais conclusões dos experimentos realizados, assim como uma proposta de continuidade nos estudos, uma vez que o tema em questão se encontra ainda em fase de intensas pesquisas.

Vale ressaltar que nenhuma das conclusões tiradas põem em dúvida a qualidade deste ou daquele material para a principal finalidade na qual são destinados, ou seja, a utilização em transformadores e máquinas elétricas.

Deve ficar bem claro que nenhum dos materiais utilizados nos experimentos deste trabalho foram fabricados objetivando a utilização na blindagem eletromagnética de baixa frequência, uma vez que para tal, algumas das características presentes nestes materiais devem ser diferentes daquelas requeridas para um bom desempenho em máquinas elétricas como a condutividade elétrica e o tamanho dos grãos.

7.2- Conclusão Geral do Trabalho.

Através dos resultados experimentais apresentados, importantes conclusões a respeito do uso de materiais ferromagnéticos na blindagem foram obtidas.

A principal delas mostra que a escolha correta das classes dos aços é fundamental na eficiência da blindagem uma vez que a composição química e o tamanho dos grãos, fatores decisivos na permeabilidade magnética e condutividade elétrica, variam muito entre estas.

O conhecimento do valor do campo magnético a ser atenuado, juntamente com o correto posicionamento das chapas, principalmente no caso dos aços de grãos orientados, devem também ser observados.

A importância do tratamento térmico final, objetivando principalmente o crescimento dos grãos, traz um acréscimo significativo no preço dos materiais, mas é indispensável para um bom desempenho dos mesmos.

A presença de soldas entre as chapas, na blindagem de um sistema de condutores trifásicos se mostrou irrelevante, contrariando o que defendem alguns autores [4].

A importância do conhecimento da sensibilidade dos equipamentos a serem protegidos é fundamental, pois a partir daí pode ser estabelecida a técnica de blindagem a ser utilizada, podendo até um simples rearranjo geométrico dos condutores [6] ser suficiente para acabar com a interferência.

A tabela 7.1 traz uma comparação do custo, em reais, dos principais materiais usados neste trabalho. Os valores foram fornecidos pelas revendedoras das chapas. É importante lembrar, no entanto, que os valores apresentados podem ser modificados dependendo da quantidade de material a ser adquirida.

Material	Preço/ kg	Preço por chapa (1x1)	Espessura
AL	7.29	98.4	5 mm
SAE 1010	0.80	18.72	3 mm
E 004 –GO	7.20	14.10	0.27 mm
E125 SP	3.40	9.30	0.35mm
E 170	3.40	13.29	0.5mm

Tabela 7.1: Comparação dos preços dos principais materiais usados nos experimentos.

Apesar de seu melhor desempenho, em relação aos demais em pontos mais afastados da fonte, o alumínio é de longe o material mais caro de todos.

A seguir é discutida a possibilidade de se obter um material ferroso de baixo custo reunindo todas as características necessárias para uma blindagem eficiente, ou seja, alta permeabilidade magnética associada a uma baixa resistividade elétrica.

7.3- Proposta de Continuidade do Trabalho.

Os aços elétricos são produzidos atualmente visando o mercado de transformadores, geradores e motores elétricos.

O alto rendimento destas máquinas está ligado as características magnéticas e elétricas dos materiais, sendo que, uma alta permeabilidade magnética associada a uma grande resistividade elétrica são fundamentais para tal finalidade.

O parâmetro que determina a eficiência dos aços elétricos, usados pelos fabricantes, são as perdas magnéticas que usualmente são separadas em três componentes [14].

1. **Perdas histeréticas:** é proporcional a área da curva de histerese sendo maior em materiais com grãos pequenos. Uma menor perda histerética reflete uma maior facilidade de alinhamento dos domínios quando submetidos a campos magnéticos variáveis no tempo. Este componente da perda está ligado a uma boa permeabilidade magnética e deve ser mínimo, assim como nos aços usados em máquinas elétricas, nos aços destinados a blindagem.
2. **Perdas parasíticas:** é proporcional a corrente induzida no interior do material pela variação do fluxo magnético. Este componente é tanto maior quanto for a condutividade elétrica do aço. Diferentemente dos aços usados em máquinas, os materiais destinados a blindagem devem possuir boa condutividade elétrica. Uma maior perda parasítica é fundamental para uma boa blindagem.

3. **Perdas anômalas:** é a diferença entre as perdas totais e a soma das parcelas histeréticas e parasíticas. Este componente de perda é ainda motivo de intensos estudos e ainda não existe uma conclusão definitiva sobre sua origem.

O principal responsável pela alta resistividade dos aços elétricos é a presença do alto teor de silício. Outros elementos como o alumínio, o fósforo e o enxofre estão presentes porém em menor quantidade, não contribuindo significativamente para o aumento da resistividade nos materiais.

Quanto a textura, o aço de grãos orientados, apresentou uma eficiência muito superior na blindagem quando posicionado de maneira que sua direção de laminação coincidisse com a direção do campo magnético aplicado. Este fato, no entanto, não é ideal pois nem sempre o campo a ser atenuado apresenta componentes somente em uma direção. A obtenção de um material de alta permeabilidade magnética em todas as direções se faz necessária.

Uma textura ideal para a aplicação na blindagem de campo magnéticos de vários componentes, seria uma que apresentasse o plano $[100]$ paralelo a superfície da chapa, sem no entanto nenhuma direção preferencial. Tal textura é chamada de textura de fibra [14] e é mostrada na figura 7.1.

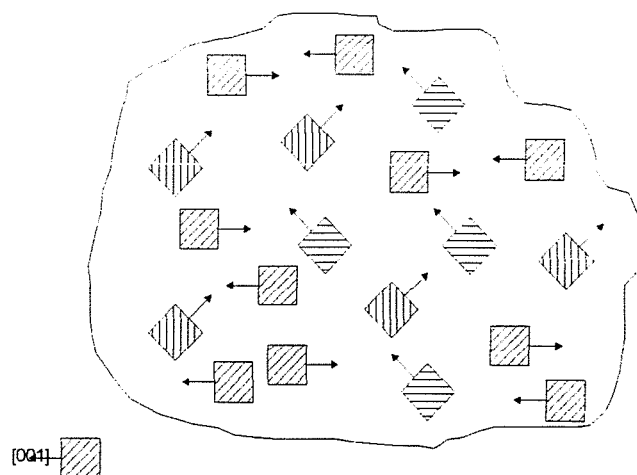


Figura 7.1: Planos (110) de cada cubo paralelos a superfície da chapa

Em resumo:

O emprego de um aço com baixos teores de silício, com grãos os maiores possíveis e apresentando uma textura do tipo fibra apresentaria teoricamente melhor desempenho no uso em blindagem de campos magnéticos de baixas frequências.

Referências Bibliográficas.

- [1] -GALVÃO, BENJAMIM, S.M.C.; LOUREIRO, G., "Importância do Controle de EMI para a indústria Brasileira" *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp 298 - 308, Abril de 1995.
- [2] -SÁINZ, F. M.; ECHEANDIA, SOROA, J. M., "*Problemas de Campos Magnéticos de Baixa Frequência Gerados em Subestações*" *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp 112- 115, Março de 1996.
- [3] - MARTINS, M. C. V., "Interferência e Compatibilidade Eletromagnética em Ambientes Industriais" *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp 72-78, Agosto de 1994.
- [4] - JUHA, TIKKANEN; ESA, VIRTANEN, "*Campos Magnéticos Causados por Postos de Transformações Internos*", *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp. 119-128, Abril de 1996.
- [5] -EDO, R.D.; ARAUJO, L.R.R; SARTORI, C.A.F., " Efeitos Biologicos dos Campos Magnéticos em Baixas Frequências: Níveis de Exposição em um Ambiente Universitário". *III Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, São Paulo, 25 a 28 de Outubro, de 1998.
- [6] - MURTA, M.L., "Estudo de Técnicas de Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Frequência", *Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 1998.

- [7] -HILES, M. L.; OLSEN, R. G.; HOLTE, K. C.; JENSEN, D. R.; GRIFFING, K. L., " *Power Frequency Magnetic Field Management Using a Combination of Active and Passive Shielding Technology* ", IEEE Transaction of Power Delivery, vol. 13, no 1, pp 171-177, January, 1998.
- [8] - HAYT, WILLIAN H. ,Jr, "*Eletromagnetismo*", Editora Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro 1983.
- [9] - EISBERG; RESNICK, "*Física Quântica*", Editora Campus, Rio de Janeiro, 13ª Edição.
- [10] -HALLIDAY, D.; RESNICK, R., "*Física* " Editora Livros Técnicos e Científicos, Vol. 3, 4ª Edição.
- [11] - LUCAS, R., "*Materiales Magneticos – Teoria Metalurgia y Aplicaciones* ", Madrid, 1955.
- [12] -MACEDO, A., "*Eletromagnetismo*", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1988.
- [13] -WEN, C.C., "*Magnetism and Metalurgy of Soft Magnetics Materials*".
- [14] -Curso Organizado pelo Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos, "*Aços carbono e Aços Silício para Fins Elétricos* ", São Paulo 1999.
- [15] - VICENTE, C., "*Tecnologia Mecânica*", vol.1, Editora Mc Graw Hill do Brasil São Paulo, 1977.
- [16] - VICENTE, C., "*Aços e Ferros Fundidos Características Gerais*", 5ª Edição São Paulo, Sociedade Brasileira dos Metais, 1984.

- [17] -Marra, K.M.; MELO, E. G.; RIBEIRO, C. F., Artigo Técnico: "Série USICORE- Aços Elétricos Semi-Processados".
- [18] -NOVICOV, I., " Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais ", Editora UFRJ 1994.
- [19] -Catálogo Acesita, "Aços ao Silício de Grãos Orientados e Aços ao Silício de Grãos não Orientado".
- [20] -TALARICO, M. L., "Resistividade Elétrica no Aço Silício", Dissertação de Mestrado do Curso de Pós - Graduação em Metalurgia da UFMG, 1977.
- [21] -KRAUS, J.D.; CARVER. K.R., "Eletromagnetismo", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.
- [22] -PAUL, C. R., "*Introduction to Electromagnetic Compatibility*", Department of Electrical Engineering - University of Kentucky, Lexington. A Wiley - Interscience Publication, 1992.
- [23] -HEMMINIG, LELAND H., "*Architectural Electromagnetic Shielding Handbook, A Design and Specification Guide*", IEEE PRESS, Inc., New York, 1991.
- [24] -GARDNER, C. L.; POISSANT, Y. F.C., "*Measurement of the Shielding Properties of Composite Materials; Comparison of the Dual TEM and Noncontact Probe Methods*", IEEE Transaction of Electromagnetics Compatibility, vol. 40, no 4, pp 364-369, November, 1998.
- [25] -ALBANI, M.;PIAZZESI, P.; CAPOLINO, F.; MACI, S.;TIBERIO, R., "*Shielding Effect of a Thick Screen with Corrugations*", IEEE Transaction of Electromagnetic Compatibility, vol. 40, no 3, pp 235-239, August, 1998.

- [26] -CHIU, H. K.; CHU, H., C.; CHEN, C.H., " Propagation Modeling of Periodic Laminated Composite Structures" IEEE Transaction of Electromagnetics Compatibility, vol. 40, no 3, pp 217-224, November, 1998.
- [27] -MATIAS, M. R., "*Blindagens Contra EMI: Princípios, Tipos e Eficiências.*" , Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp 86-98, Março de 1999.
- [28] -GOEDBLOED, J.J., "*Electromagnetic Compatibility*", Philips Research Laboratories, Eindhoven - translated by Tom Holmes, Predice Hall, 1990.
- [29] -FOGIEL, M., " Problem Solvers Eletromagnetics: A Complete Solution Guide to Any Texbook. " Research & Education Association, Chief Editor.

APÊNDICE 1

Curvas de Magnetização de Pico

*Reprodução devidamente autorizada pela Acesita

