

TESE DE DOUTORADO Nº 039

**ESTUDO DE MATERIAIS E TÉCNICAS PARA
A BLINDAGEM DE CAMPOS MAGNÉTICOS
DE FREQUÊNCIAS INDUSTRIAIS**

Moacir de Souza Jr.

DATA DA DEFESA: 19/10/04

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ESTUDO DE MATERIAIS E TÉCNICAS PARA
A BLINDAGEM DE CAMPOS MAGNÉTICOS
DE FREQUÊNCIAS INDUSTRIAIS**

MOACIR DE SOUZA JR.

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte – MG

Outubro de 2004

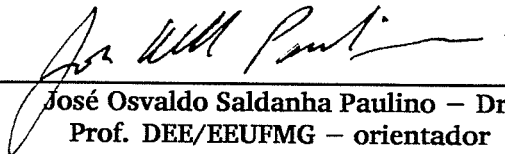
**"ESTUDO DE MATERIAIS E TÉCNICAS PARA A
BLINDAGEM DE CAMPOS MAGNÉTICOS DE
FREQUÊNCIAS INDUSTRIAIS"**

MOACIR DE SOUZA JÚNIOR

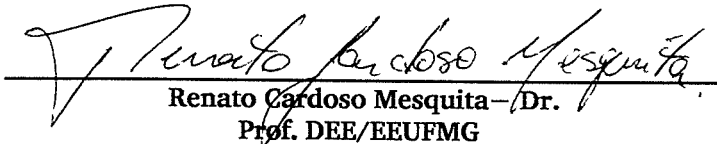
Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 19 de outubro de 2004.

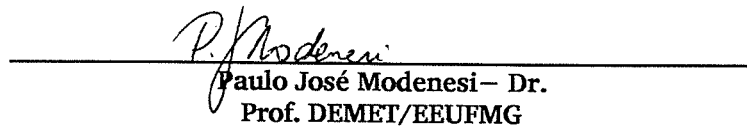
Por:



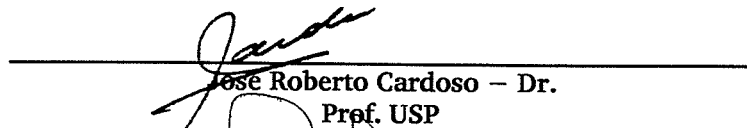
José Osvaldo Saldanha Paulino – Dr.
Prof. DEE/EEUFMG – orientador



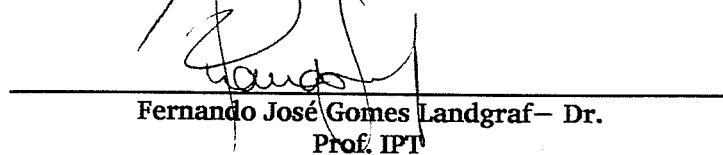
Renato Cardoso Mesquita – Dr.
Prof. DEE/EEUFMG



Paulo José Modenesi – Dr.
Prof. DEMET/EEUFMG



José Roberto Cardoso – Dr.
Prof. USP



Fernando José Gomes Landgraf – Dr.
Prof. IPT

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.

A maioria dos livros de compatibilidade eletromagnética aborda o tema de maneira bastante superficial introduzindo simplificações importantes que chegam a tornar as equações obtidas inválidas para o caso de ondas não planas.

Este trabalho emprega o conceito de potencial vetor magnético associado às condições de interface do problema para deduzir, sem aplicar qualquer simplificação que possa comprometer os resultados, o valor da indução magnética (campo magnético) na presença da blindagem metálica para os tipos de fontes de campo mais comuns encontrados na prática: longos condutores de corrente e o "loop" de corrente.

As equações são validadas computacionalmente - através do método de elementos finitos - e experimentalmente, através de medições realizadas no Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG.

Fica claro pelos resultados das simulações, que um material com altos valores de permeabilidade magnética como os aços ao silício disponíveis no mercado, associado a altos valores de condutividade elétrica como a do ferro puro, certamente poderá atender aos requisitos de uma boa blindagem.

Por fim, testes com um tipo de aço elétrico de baixo teor de silício, fabricado pela Usiminas, é testado para algumas configurações de blindagem. Os resultados destes testes apontam que este material pode ser aperfeiçoado para otimizar ainda mais o seu desempenho na contenção do campo magnético de baixa frequência.

Abstract

One of the most employed methods in the shielding of low frequency magnetic field is the use of metallic materials sheets to shield the field source.

Many books of electromagnetic compatibility approach the subject in a superficial way introducing simplifications that turn the equations invalid to the case of no planar waves.

This work uses the concept of magnetic potential vector associated to the interface conditions of the problem to deduce, without simplification, the value of the magnetic induction with a metallic shield for the types of two field sources: long conductors and the current "Loop".

The equations are validated by the finite element method and measurements were made in the Federal University of Minas Gerais.

It is clearly by the results of the simulations that a material with high values of magnetic permeability as the silicon steel, associated with high values of electrical conductivity certainly will be a good shield.

Finally, tests with electrical steel manufactured in the Usiminas were made for some configurations of shield. The results indicate that the properties of the material can be optimized to increase the performance at the shield.

Agradecimentos.

Ao professor José Osvaldo Saldanha Paulino pela orientação nos momentos de dificuldade;

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

Aos amigos do CPDEE pelos dias de convívio e discussões técnicas;

A Acesita e Usiminas, pelo fornecimento dos materiais que possibilitaram a realização deste do trabalho;

Aos amigos do Centro Universitário de Belo Horizonte - UNIBH, pelo apoio e incentivo;

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Lista de Símbolos

$\mathbf{A}(x, y)$ = potencial vetor magnético (função das variáveis x e y).

\mathbf{B} = indução magnética em Tesla.

δ = profundidade de penetração em metros.

μ_r = permeabilidade magnética do material relativa ao vácuo.

μ_n = permeabilidade magnética da região " n ".

σ_r = condutividade elétrica do material relativa ao cobre.

σ = condutividade elétrica em S/m.

σ_n = condutividade elétrica da região " n ".

ϵ = permissividade elétrica do meio em F/m.

$\eta_{B,A}$ = impedância de onda no vácuo em ohms, sendo "B" indicando fonte de campo de baixa impedância e "A" fonte de campo de alta impedância.

η_m = impedância do metal, considerado um bom condutor, em ohms.

f = frequência da onda eletromagnética em Hz.

t = espessura do material em metros.

k = número de onda na direção " x ".

ρ = número de onda na direção " y ".

ÍNDICE

Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de símbolos	iv
Agradecimentos	v
1-Introdução	1
1.1- Campos Eletromagnéticos não Ionizantes e sua Relação com o Ambiente.	1
1.2- Objetivo do Trabalho.	4
1.3- Organização do Texto.	4
2- Blindagem Eletromagnética: O Cenário Atual de Pesquisas.	9
2.1- Introdução.	9
2.2- Regiões de Campo Próximo e Distante.	11
2.3- Eficiência de uma Blindagem Eletromagnética.	12
2.4- Métodos de Análise do Fenômeno de Blindagem Eletromagnética Utilizando Chapas Metálicas.	13
2.4.1- Método do cálculo da corrente induzida no metal.	15
2.4.2- Método de elementos finitos.	16
2.4.3- Método de "Schelkunoff".	17
2.5- Blindagem Ativa versus Chapas Metálicas.	26
2.6- Considerações Finais.	28
3- O Método de Análise da Blindagem pelo Potencial Vetor Magnético	31
3.1- Introdução	31
3.2- Blindagem de Campos Magnéticos Produzidos por Fontes de Alta Impedância	34
3.2.1- Blindagem com chapas metálicas	34
3.2.2- Blindagem com tubos cilíndricos metálicos.	42
3.3- Blindagem de Campos Magnéticos Produzidos por Fontes de Baixa Impedância.	45

3.4- Equações do Campo Magnético Considerando Somente um Nível ou a Ausência Total de Blindagem.	49
3.5- Considerações Finais.	50
4- Validação do Método do Potencial Vetor Magnético	52
4.1- Introdução.	52
4.2- Materiais Utilizados na Validação.	53
4.3- Validação Computacional.	54
4.3.1- Considerações Gerais.	54
4.3.2- Sistema de condutores trifásicos – fonte de alta impedância.	58
4.3.3- “Loop” de corrente – fonte de baixa impedância.	64
4.4- Validação Experimental.	68
4.4.1- Considerações gerais.	68
4.4.2- Bancada de testes – aspectos físicos.	69
4.4.3- Sistema de geração e controle das correntes.	71
4.4.4- Sistemas de medição – características dos instrumentos.	71
4.4.5- Medições da indução magnética – comparação dos resultados.	72
4.5- Considerações Finais.	74
5- Parâmetros que Influenciam a Eficiência da Blindagem Eletromagnética.	76
5.1- Introdução.	76
5.2- Utilização de Somente um Nível de Blindagem – Blindagem Simples.	78
5.2.1- Considerações gerais.	78
5.2.2- Influência da permeabilidade magnética.	78
5.2.3- Influência da condutividade elétrica.	81
5.2.4- Influência da espessura da blindagem.	83
5.2.5- Influência da distância da fonte ao ponto de medição do campo.	85
5.2.6- Influência do tamanho do raio da blindagem cilíndrica.	87
5.2.7- Influência do tamanho finito das chapas metálicas – efeito das “bordas”.	88
5.3- Utilização de Dois Níveis de Blindagem – Blindagem “Sanduíche”.	90
5.3.1- Considerações gerais.	90
5.3.2- Influência da distância da fonte ao ponto de medição do campo.	90

5.3.3- Influência da espessura dos níveis de blindagem.	92
5.3.4- Influência do tamanho finito das chapas metálicas – efeito das bordas.	94
5.4- Considerações Finais	96
6- Análise dos Materiais Utilizados Atualmente em Projetos de Blindagem.	98
6.1- Introdução.	98
6.2- Materiais mais Utilizados nos Projetos DE Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Freqüência.	100
6.3- Verificação Experimental do Método de Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Blindagem.	106
6.4- Análise do Desempenho dos Materiais Através da Construção de Ábacos.	108
6.4.1- Considerações Gerais.	109
6.4.2- Chapas Planas.	109
6.4.2.1- Fonte de alta impedância.	110
6.4.2.2- Fonte de baixa impedância.	115
6.4.3- Cilindros metálicos.	120
6.5- Considerações Finais.	126
7- Proposta de um Material para Blindagem do Campo Magnético de 60 Hz.	128
7.1- Introdução.	128
7.2- Fatores que Influenciam a Permeabilidade Magnética e a Condutividade Elétrica dos Aços.	129
7.3- Especificação das Características Elétrica e Magnética Ideais para a Blindagem do Campo Magnético de 60 hz.	132
7.4- Procedimentos para a Fabricação de um Material com Características Ideais para a Blindagem do Campo Magnético de 60.	135
7.4.1- O processo de fabricação dos aços semi processados	136
7.4.2- O tratamento térmico de recozimento final e a otimização das propriedades magnéticas dos aços elétricos.	139
7.5- Teste Experimental do Material antes do Tratamento Térmico de Recozimento.	142

7.6- O Ciclo de Tratamento Térmico e Levantamento da Curva de Magnetização do Material.	145
7.7- A Determinação da Condutividade Elétrica do Material Antes e Depois do Tratamento Térmico.	145
7.8- Análise Metalográfica do Material Após o Tratamento Térmico Final.	149
7.9- Considerações Finais.	151
8- Resultados Finais.	152
8.1- Introdução.	152
8.2 - Resultados na Blindagem do Campo Magnético de 60 Hz Utilizando o Usicore 450.	153
8.2.1- "Loop" de corrente - fonte de baixa impedância.	153
8.2.3- Sistema de condutores retilíneos - fonte de alta impedância.	158
8.3 - Análise da Permeabilidade Magnética dos Materiais na Presença do Campo Magnético.	168
8.4 - Conclusão Geral do Trabalho e Proposta de Continuidade.	172
8.4.1- Propostas de continuidade do trabalho.	174
Referências Bibliográficas	180
Anexos	

1- Introdução.

1.1- *Campos Eletromagnéticos não Ionizantes e sua Relação com o Ambiente.*

Existe hoje em todo mundo uma crescente preocupação dos efeitos de campos eletromagnéticos não ionizantes no ambiente e em especial no corpo humano. Muitos estudos [1] têm sido feitos e ainda uma conclusão definitiva sobre o assunto ainda não foi obtida.

Nos últimos anos a energia eletromagnética presente no ambiente aumentou significativamente e as linhas de transmissão e distribuição de energia que hoje estão presentes dentro de áreas altamente povoadas, têm contribuído para este fato juntamente com as antenas de celulares.

Institutos internacionais [2] têm estabelecido normas para tentar estipular valores máximos emitidos pelas diversas fontes de campo eletromagnético no ambiente. O debate em torno de valores seguros para a exposição à radiação eletromagnética dos seres humanos tem gerado controvérsias entre os cientistas e feito com que diversas empresas brasileiras e internacionais adotassem programas que visam mitigar a emissão de campo para o ambiente.

Projetos de contenção do campo bem feitos e economicamente viáveis são fundamentais.

Além dos possíveis danos a saúde humana, um outro efeito de conseqüências mais imediatas é a interferência que campos eletromagnéticos ambientes causam em diversos tipos de equipamentos eletrônicos. 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 [3,4,5].

Muitas empresas têm investido em projetos de blindagem dos campos eletromagnéticos [6], mas até o momento as soluções têm sido de custo proibitivo e, na maioria dos casos, a mudança de lugar dos aparelhos sensíveis ou das fontes geradoras de campo tem sido a solução mais fácil e economicamente mais viável.

O meio mais comum de blindagem de campos eletromagnéticos em indústrias é a utilização de chapas de materiais metálicos próximos à fonte de campo ou ao equipamento que se deseja proteger.

Diversos autores têm estudado o fenômeno de blindagem para campos eletromagnéticos de alta frequência, no entanto, em baixa frequência, apesar de nos últimos tempos terem aumentado o número de publicações a respeito, existem ainda muitas questões a serem respondidas.

No Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, o grupo de Compatibilidade Eletromagnética desenvolve atualmente seus trabalhos sobre o tema em basicamente duas linhas de pesquisa, a saber:

Na primeira, foi abordado o método da blindagem ativa que consiste na geração de um campo eletromagnético igual em módulo, mas defasado de 180° do campo que se deseja atenuar. Uma tese de doutorado [7] foi recentemente defendida sobre o assunto.

A segunda linha de pesquisa - tema central deste trabalho - é o estudo de novos materiais de baixo custo com as características necessárias para um bom desempenho na contenção do campo eletromagnético: altos valores de condutividade elétrica e permeabilidade magnética.

Novas técnicas de blindagem como a utilização de diferentes tipos de materiais ao mesmo tempo e alterações na configuração das chapas metálicas fazem parte também desta segunda linha de pesquisa.

Já foram defendidas duas dissertações de mestrado dentro do grupo [8,9], abordando este último tema.

No tratamento do fenômeno de blindagem de campos eletromagnéticos de baixa frequência é importante a distinção de fontes de campo de baixa ou de alta impedância, o que é feito no decorrer deste trabalho.

A maioria dos artigos publicados é dedicada a fontes de baixa impedância, ou seja, campos eletromagnéticos produzidos por "loops" circulares de correntes.

Muitos casos na prática, no entanto, são de campos eletromagnéticos produzidos por condutores longos de correntes como os sistemas de distribuição de energia, que caracterizam fontes de alta impedância [10].

Uma maior investigação matemática do fenômeno de blindagem de campos eletromagnéticos de baixa frequência é necessária. A maior parte dos autores que aborda o fenômeno [11,12,13] simplifica o estudo de tal maneira que tornam as equações inadequadas para aplicações em problemas de ondas não planas onde o componente radial do componente magnético ou elétrico está presente.

Neste trabalho é apresentado um método de cálculo do campo magnético para diferentes configurações de fontes e blindagens. Nenhuma das principais simplificações adotadas pelos já citados autores será considerada.

Tal método, chamado aqui de Método do Potencial Vetor Magnético, é validado através de um "software" de cálculo de campo - "FEMM[®]" - baseado no método de elementos finitos e através de medições realizadas no Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG (LEAT).

Os resultados obtidos nas simulações e nas medições garantem a eficácia do método do potencial vetor magnético que é utilizado, juntamente com o método de elementos finitos para dar suporte às conclusões sobre um material de bom desempenho na contenção de campos eletromagnéticos de baixa frequência.

Por fim, é apresentado no final do trabalho um material ferromagnético que, após sofrer tratamento térmico de recozimento e descarbonetação, apresentou uma melhora significativa no desempenho na contenção do campo eletromagnético em relação os materiais mais comuns utilizados na blindagem.

Como proposta de continuação das pesquisas são sugeridas algumas modificações no tratamento térmico e no passe de encruamento do Usicore - 450 para otimizar ainda mais seu desempenho na contenção do campo magnético de baixa frequência.

1.2- Objetivo do Trabalho.

Estudo teórico e experimental do fenômeno de blindagem de campos eletromagnéticos de baixa frequência (60Hz) produzidos pelas mais comuns configurações de fontes de campo e blindagens com a proposta de, no final, especificar um material ferromagnético (aço elétrico) de bom desempenho na blindagem, de baixo custo em relação aos existentes e com as características necessárias para a contenção do campo magnético de baixa frequência.

Fica claro no final do trabalho que este material poderá ter seu desempenho na blindagem melhorado dependendo de algumas modificações no ciclo de tratamento térmico e no processo de fabricação.

É oportuno salientar que este trabalho é dedicado ao estudo da blindagem somente do componente magnético do campo eletromagnético, assim será utilizado o termo campo magnético no lugar de campo eletromagnético no decorrer do texto.

1.3- Organização do Texto.

Este trabalho é composto de 8 capítulos e 3 anexos.

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

➤ *Capítulo 1: "Introdução".*

Neste capítulo é feita uma breve discussão sobre o tema e também da necessidade de uma nova abordagem teórica diferente daquelas já tradicionais usadas pela maioria dos pesquisadores nos fenômenos de blindagem eletromagnética.

A relevância do tema em questão é destacada pela falta de soluções viáveis para o problema da blindagem de campos magnéticos de baixa frequência.

É colocado o objetivo central do trabalho.

➤ *Capítulo 2: "Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Frequência: Cenário Atual de Pesquisas".*

O capítulo é iniciado com uma discussão em torno do que tem sido pesquisado a respeito da blindagem de campos magnéticos de baixa frequência. Uma abordagem a respeito da blindagem ativa é feita e suas

principais características são comparadas ao método da utilização de chapas metálicas. Fica claro que o método utilizado depende do problema em questão.

São analisados alguns métodos de cálculo do campo magnético produzido por fontes de alta e baixa impedância na presença da blindagem metálica. Um destaque maior será dado ao tradicional método de "Schelkunoff" usado pela maioria dos autores de livros de compatibilidade eletromagnética. As limitações deste método ficam claras no final do capítulo.

➤ Capítulo 3: "*O Método de Análise da Blindagem pelo Potencial Vetor Magnético*".

São apresentadas as equações que descrevem o fenômeno da blindagem do campo magnético para diversas configurações, tanto da fonte de campo (condutores retilíneos e "loops" de corrente) como da blindagem (chapas, cilindros e blindagens "sanduíches"). É utilizado o conceito do potencial vetor magnético nas deduções das equações.

As condições de interface do problema são utilizadas para a determinação dos coeficientes das equações a fim de determinar o campo magnético (indução magnética) na presença das chapas metálicas.

O método é de fácil implementação e demanda um pequeno esforço computacional.

➤ Capítulo 4: "*Validação do Método do Potencial Vetor Magnético*".

Um programa baseado no método de elementos finitos em duas dimensões ("FEMM[®]") é empregado para a validação computacional dos resultados. Algumas medições realizadas no Laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT) da UFMG dão suporte experimental às equações.

➤ Capítulo 5: "*Parâmetros que Influenciam a Eficiência da Blindagem Eletromagnética*".

As influências no fator de blindagem das propriedades constitutivas dos materiais (permeabilidade magnética e condutividade elétrica), da distância entre o ponto de medição do campo e a fonte entre outros fatores são neste

capítulo analisadas. Tal análise sugere alguns valores de permeabilidade magnética e condutividade elétrica de um material de bom desempenho na blindagem.

O desempenho de alguns materiais como as ligas de níquel – ferro, comercializadas com os nomes de “Mumetal[®]”, “Permalloy[®]” e “Supermalloy[®]” é avaliado e suas desvantagens expostas.

É utilizada em todo este capítulo a implementação computacional do método do potencial vetor magnético sendo que, em alguns casos o método de elementos finitos é também utilizado para auxiliar nas análises.

➤ Capítulo 6: *“Análise dos Materiais Utilizados Atualmente em Projetos de Blindagem”*.

Este capítulo tem como objetivo principal a apresentação de ábacos mostrando o desempenho de vários dos mais utilizados materiais nos projetos de blindagem do campo magnético de 60 Hz.

Diversos autores têm também apresentados ábacos, porém apenas utilizando fontes de campo de baixa impedância e ainda sem apresentarem nenhuma comprovação experimental dos resultados. Tais autores utilizam ainda o método de “Schelkunoff” na determinação do fator de blindagem nos ábacos. Os ábacos neste trabalho são construídos com o auxílio do método de elementos finitos e os resultados são validados novamente por medições realizadas no Laboratório de extra Alta Tensão da Universidade Federal de Minas Gerais.

Tais ábacos incluem as mais comuns configurações de blindagem que são as chapas planas e chapas em forma de cilindros envolvendo toda a fonte de campo.

São contempladas as duas fontes de campo magnético: as fontes de alta impedância representada por um sistema de condutores trifásicos desequilibrados a quatro fios e a fonte de baixa impedância representada por um "loop" circular de corrente.

- Capítulo 7: "*Proposta de um Material para Blindagem do Campo Magnético de 60 Hz.*".

As influências da composição química e da microestrutura na permeabilidade magnética e condutividade elétrica dos aços são abordadas.

Uma análise utilizando o método do potencial vetor magnético é feita e, a partir daí, são sugeridas faixas de valores de permeabilidade magnética e condutividade elétrica suficientes para proporcionar um bom desempenho do material na blindagem.

A seguir são descritos os principais passos na fabricação de um aço semi processado contemplando também o ciclo de tratamento térmico de recozimento e descarbonetação.

O levantamento da condutividade elétrica do material antes e depois do tratamento térmico é feito neste capítulo que também apresenta os resultados da metalografia (análise do tamanho dos grãos) do Usicore - 450 obtidos após a realização do tratamento térmico de descarbonetação e recristalização.

- Capítulo 8: "*Resultados Finais*".

Os resultados do desempenho do Usicore - 450 na contenção do campo magnético são apresentados juntamente a uma proposta de continuidade dos estudos que envolvem, entre outras coisas, alterações no ciclo de tratamento térmico e no processo de fabricação do material para se obter um tamanho de grãos ainda maior e aumentar a permeabilidade magnética.

Os resultados são apresentados na forma de ábacos e uma comparação com o desempenho de um material totalmente processado de grãos não orientados (E -170 GNO) é feita em todos os casos.

Anexos.

- Anexo I: "*Lauda da Composição Química do Material antes do Tratamento Térmico*".

Apresentação da análise da composição química do material, antes do tratamento térmico, realizada pelo Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de Minas Gerais.

- Anexo II: "*Laudo do Tratamento Térmico de Recozimento e da Obtenção das Características Magnéticas do Material*".

Apresentação do laudo fornecido pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - do ciclo de tratamento térmico e levantamento das características magnéticas do material. Parâmetros como a temperatura de encharque e o ponto de orvalho no ciclo de tratamento térmico estão detalhados. São descritos os procedimentos adotados para o levantamento da curva de magnetização do material.

- Anexo III: "*Laudo da Composição Química do Material depois do Tratamento Térmico*".

Apresentação da análise da composição química do material, depois do tratamento térmico, realizada pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

2- Blindagem Eletromagnética: O Cenário Atual de Pesquisas.

2.1- Introdução.

Como parte introdutória ao estudo dos fenômenos que envolvem a blindagem eletromagnética, é feito neste capítulo um breve estudo dos principais métodos de cálculo do campo magnético utilizados na presença da blindagem metálica.

Os autores que tratam do assunto da blindagem eletromagnética geralmente o fazem para campos magnéticos de alta frequência, onde os componentes do campo elétrico ou magnético existentes no sentido de propagação da onda podem ser desconsiderados, além do que, na maioria dos casos, a onda eletromagnética é considerada uniforme.

Em baixas frequências, tais autores [11,12,13] são demasiadamente superficiais na abordagem do fenômeno, adotando aproximações nos cálculos que acarretam erros significativos nos resultados e podem vir a comprometer os projetos de contenção do campo.

O conhecimento do tipo de fonte geradora de campo assim como a caracterização do campo a ser blindado (próximo ou distante) é indispensável em qualquer método de cálculo adotado ou projeto a ser executado. O capítulo é iniciado com alguns destes conceitos fundamentais para um estudo mais detalhado do fenômeno de blindagem.

É realizada uma discussão sobre os principais métodos de tratamento do problema de blindagem com chapas metálicas, com maior destaque no método de "Schelkunoff" por ser o mais difundido entre os especialistas no assunto.

Por fim uma comparação entre as técnicas de blindagem ativa e da utilização de chapas metálicas blindando a fonte de campo magnético é feita quando são apontadas as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos.

O próximo capítulo é dedicado inteiramente a um método mais elaborado de análise que utiliza o conceito do potencial vetor magnético e das condições de

interface do problema para a determinação do campo magnético na presença da blindagem com chapas metálicas.

Duas das configurações de blindagens mais utilizadas nos projetos são discutidas.

2.2- Regiões de Campos Próximo e Distante.

Em regiões suficientemente próximas da fonte de campo, chamadas região de campos próximos, a relação entre o campo elétrico e magnético, definida como impedância de onda não é constante. Esta situação persiste até aproximadamente a uma distância de três comprimentos de onda ($3\lambda_0$) da fonte, onde a partir daí a razão constante entre \mathbf{E} e \mathbf{H} é verificada e se iguala a impedância do meio.

O estudo da blindagem de campos magnéticos de 60 Hz é sempre feito considerando a região de campo próximo já que nesta frequência o comprimento de onda se estende até uma distância de 5000 km da fonte de campo.

A impedância de onda na região de campo próximo depende do tipo da fonte de campo. Este fato não acontece na região de campo distante, onde a impedância da onda é igual à impedância do meio de propagação da onda.

A figura 2.1 [8] mostra o gráfico da variação da impedância de onda com a distância, para uma fonte de alta e outra de baixa impedância.

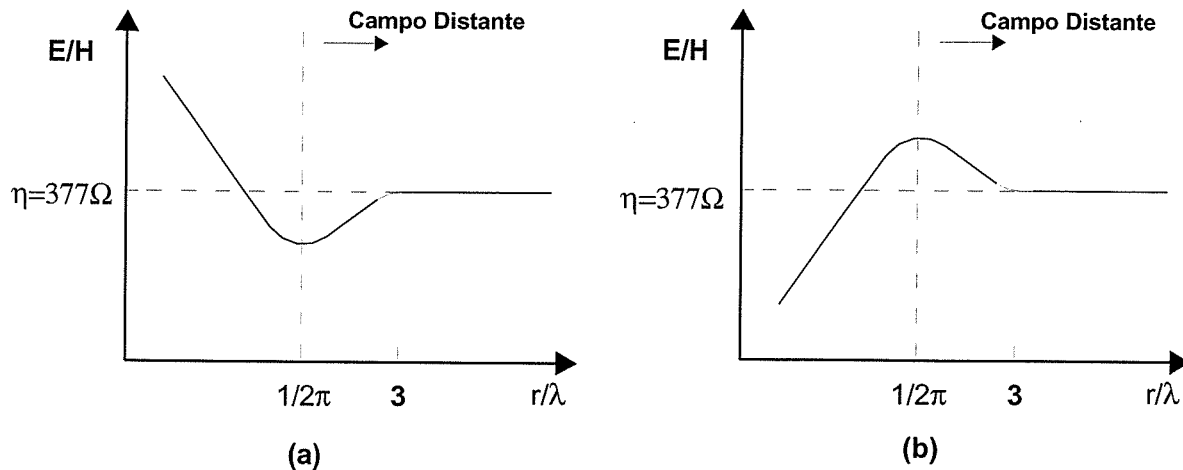


Figura 2.1: Variação da impedância da onda com a distância da fonte de campo eletromagnético:

(a) Fonte de alta impedância.

(b) Fonte de baixa impedância.

Na figura 2.1 (a) é notado que o campo elétrico é maior do que o do campo magnético para regiões mais próximas à fonte de campo, o oposto acontece na

figura 2.1 (b). Tais fatos justificam as definições de fontes de campo de alta e baixa impedância respectivamente.

Como fontes de campo de alta impedância temos, como exemplos mais comuns, os longos condutores de correntes trifásicas presentes em sistemas de alimentação de prédios e nas redes urbanas de distribuição de energia.

As fontes de baixa impedância podem ser exemplificadas pelos transformadores com suas bobinas formando “loops” de corrente.

Neste trabalho o fenômeno de blindagem é discutido para ambos os tipos de fontes.

2.3- Eficiência de uma 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 independentes, como era de se esperar, do método de cálculo utilizado e podem ser caracterizados como se segue abaixo:

- Características do campo que se deseja blindar.

No caso particular de blindagem em baixas frequências, o tipo de fonte geradora de campo - alta ou baixa impedância - é importante. No caso de fonte de baixa impedância, o componente do campo eletromagnético presente na direção de propagação da onda incidente em uma superfície metálica é magnético e para fontes de alta impedância este componente é elétrico. Este fato influencia no desempenho da blindagem [8].

- 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 na blindagem, pois estes dois parâmetros estão diretamente ligados à absorção do campo magnético pelo material. Quanto maior a espessura do material maior seu desempenho na blindagem, no entanto, chapas com espessura maior do que 2 mm são geralmente evitadas devido ao peso e ao custo elevado do projeto.

➤ Características ligadas à geometria do sistema.

Procedimento simples como o posicionamento adequado dos condutores pode significar uma grande atenuação do campo magnético e, em alguns casos, suficiente para a diminuição do campo dispensando assim a presença da blindagem metálica. A geometria do sistema gerador de campo é o fator mais importante quando o método de blindagem a ser utilizado é o da blindagem ativa.

O método de blindagem ativa que consiste na geração de um campo oposto ao que se deseja eliminar, apresenta suas limitações. Melhores resultados são obtidos quando algumas destas técnicas são associadas [8,9].

O parâmetro que mede a eficiência de uma blindagem é o fator de blindagem, definido pela razão do campo ou indução magnética medidos ou calculados antes e depois da colocação da mesma.

Matematicamente o fator de blindagem pode ser expresso como:

$$F_b = \frac{|B_a|}{|B_d|} \quad (2.1)$$

onde:

B_a = valor da indução magnética medida ou calculada antes da colocação da blindagem;

B_d = valor da indução magnética medida ou calculada após a colocação da mesma.

2.4- Métodos de Análise do Fenômeno de Blindagem Eletromagnética Utilizando Chapas Metálicas.

Vários métodos de análise da blindagem de campos têm sido adotados pelos pesquisadores no assunto.

Todos estes métodos buscam determinar o campo magnético radiado pelos diferentes tipos de fontes na presença de algum tipo de blindagem.

A figura 2.2 mostra um esquema geral contendo fonte, blindagem e região blindada que geralmente é onde se deseja obter o valor reduzido do campo magnético.

Os métodos de cálculo descritos a seguir possibilitam a determinação do campo magnético nas três regiões da figura 2.2.

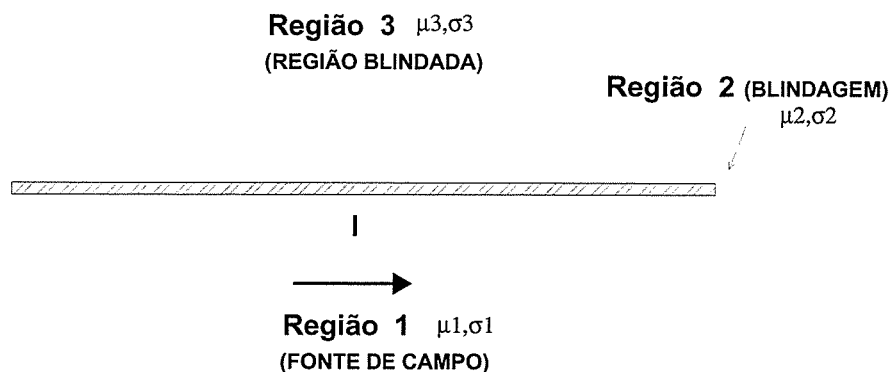


Figura 2.2: Esquema de blindagem com chapas metálicas com as três regiões de interesse representadas.

Neste trabalho a região de interesse é somente a região blindada (região 3). Pode ser de interesse futuro a determinação do campo magnético na região 1, caso seja necessário o conhecimento do campo magnético produzido pelas correntes induzidas na blindagem na região da fonte de campo.

Neste tópico é feita uma rápida discussão a respeito de alguns destes métodos sendo dado maior destaque para o método de "Schelkunoff" [11,14] que é o mais citado nos livros de compatibilidade eletromagnética e também o mais difundido entre os estudiosos.

Nos últimos anos, outros métodos de cálculo mais elaborados que o método de "Schelkunoff" têm ganhado espaço entre os pesquisadores e resultados mais condizentes com os diversos relatos de casos na prática têm sido verificados.

Estes métodos têm sido empregados com sucesso em diversas configurações de blindagens como chapas planas e cilindros metálicos e também nos dois principais tipos de fontes de campo que são os condutores longos de corrente (fonte de alta impedância) e "loops" de corrente (fonte de baixa impedância).

Apesar de serem mais exatos que o método de "Schelkunoff" todos os métodos de cálculo discutidos neste trabalho, exceto o método de elementos finitos, têm em comum a adoção de algumas simplificações, a saber:

- O tamanho da blindagem metálica é considerado infinito em relação à fonte de campo no caso da utilização de chapas planas;
- No caso de condutores retilíneos de corrente (fonte de alta impedância), estes são considerados de comprimento infinito.

Estas simplificações não são significativas quando resultados dos cálculos são comparados, como será mostrado em capítulos seguintes, com medições realizadas em regiões suficientemente próximas à blindagem.

A seguir estão alguns destes métodos de cálculo:

1. Método do cálculo da corrente induzida no metal [14];
2. Método de elementos finitos (FEM);
3. Método de "Schelkunoff" [11,12,13];
4. Método de análise do vetor potencial magnético e das condições de interface do problema.

2.4.1- Método do cálculo da corrente induzida no metal.

Este método consiste na determinação da corrente elétrica induzida pelo campo eletromagnético na superfície da placa metálica usada como blindagem de campo.

A densidade de corrente elétrica total induzida na superfície da blindagem eletromagnética pode ser calculada em A/m^2 , no sistema de coordenadas cartesianas, pela expressão [14].

$$J(x,y) = -2j\pi f \sigma A(x,y) \quad (2.2)$$

onde:

$A(x, y)$ = potencial vetor magnético determinado na superfície da chapa metálica;

σ = condutividade elétrica do material de que é feita a blindagem, em S/m;

f = frequência da onda eletromagnética incidente na chapa, em Hz.

A corrente elétrica total induzida é então determinada pela integração da equação (2.2) sobre a seção de área transversal da chapa metálica. O campo eletromagnético produzido por esta corrente induzida é adicionado ao campo incidente na chapa, permitindo avaliar o efeito da blindagem.

Uma importante simplificação, para tornar o problema matematicamente mais tratável, pode ser considerada neste método de cálculo conforme mostra [14]. Tal simplificação considera a distribuição e o valor da densidade de corrente e do potencial vetor em ambos os lados da blindagem os mesmos, implicando que nenhuma perda por absorção é considerada. Este fato faz com que resultados satisfatórios sejam obtidos somente em casos onde a espessura da blindagem for

muito menor que a profundidade de penetração da onda na mesma, o que não acontece quando materiais com alta permeabilidade magnética ou condutividade elétrica como os aços ao silício ou o alumínio são utilizados.

A referência [14] emprega este método para determinar a absorção de potência (ativa e reativa) pela blindagem na presença de fontes de alta impedância. Neste caso a absorção de campo pela blindagem é considerada.

2.4.2- Método de elementos finitos (FEM).

Este método é bastante utilizado em problemas de cálculo de campo na engenharia, mas nos tipos de problemas deste trabalho apresenta alguns inconvenientes, entre eles:

- Nos problemas aqui abordados, são utilizados como fontes de campo magnético condutores longos de correntes e "loops" circulares. Em ambos os casos o problema é aberto e a fixação do valor do potencial vetor magnético em regiões afastadas da fonte (determinação do tipo de condição de contorno) é um problema, principalmente com a introdução da blindagem eletromagnética;
- Devido ao fato de ser um problema aberto, a região delimitada para os cálculos deve ser grande o suficiente para não comprometer os resultados. Este fato faz com que um grande tempo de cálculo seja demandado;
- A densidade da malha de cálculo dentro da blindagem é tanto maior quanto menor a profundidade de penetração do campo magnético no material. Este fato, associado ao tamanho da região de cálculo, pode limitar a utilização do método para problemas de blindagens que utilizam materiais com altos valores de permeabilidade magnética e condutividade elétrica;
- A utilização de elementos finitos, devido ao tempo gasto para cada simulação, deve ser evitada quando gráficos relacionando as variáveis do problema são apresentados. Nos capítulos seguintes é avaliado, entre outras coisas, o efeito da permeabilidade magnética dos materiais na

blindagem e, caso fosse utilizado o método de elementos finitos, uma simulação deveria ser feita para cada valor de permeabilidade magnética.

Apesar das desvantagens acima, o método de elementos finitos fornece resultados confiáveis e é utilizado para validar as equações apresentadas no próximo capítulo.

2.4.3- Método de "Schelkunoff".

Este é o método tradicional de análise de blindagem eletromagnética e é adotado por muitos autores [11,12,13].

Na sua formulação, a diferença entre a impedância da onda eletromagnética propagando no vácuo no momento que incide na blindagem e a impedância intrínseca do metal de que é feita a blindagem é considerada.

Neste método, o fenômeno da blindagem eletromagnética é analisado considerando a influência de três fatores, reflexão, absorção e múltiplas reflexões, todos representados na figura 2.3:

Segue uma descrição separadamente de cada um destes três fatores.

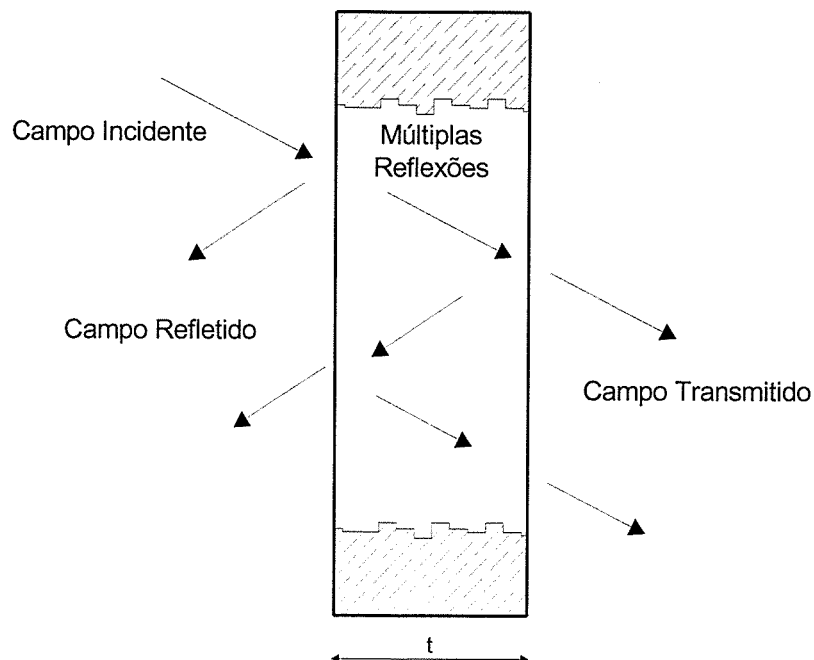


Figura 2.3: Representação geral do fenômeno de blindagem com chapas metálicas.

- **Fator de reflexão - R.**

Ocorrerá reflexão de uma onda eletromagnética, plana ou não, 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 é a razão entre o campo magnético incidente e o transmitido, como mostra a figura 2.3, sendo escrito de forma geral como [11]:

$$R = \frac{(\eta_{B,A} + \eta_m)^2}{4\eta_{B,A}\eta_m} \quad (2.3)$$

onde:

$\eta_{B,A}$ = impedância de onda no vácuo em ohms, sendo "B" indicando fonte de campo de baixa impedância e "A" fonte de campo de alta impedância.

η_m = impedância do metal, considerado um bom condutor [11], em ohms.

A equação 2.3 mostra que a reflexão depende da impedância de onda, sendo influenciada pela natureza da fonte de campo (alta ou baixa impedância) e pela região (campo próximo ou distante) em estudo.

Em bons condutores a impedância é definida, tanto para a região de campo próximo ou distante, como [11]:

$$\eta_m = \frac{\sqrt{2}}{\sigma\delta} \quad (2.4)$$

sendo:

σ = condutividade elétrica em S/m;

δ = profundidade de penetração [11], em metros, da onda eletromagnética no material, definida pela equação:

$$\delta = \frac{0.06609}{\sqrt{f\mu_r\sigma_r}} \quad (2.5)$$

onde:

μ_r = permeabilidade magnética do material relativa ao vácuo;

σ_r = condutividade elétrica do material relativa ao cobre.

A impedância de onda para campos próximos deve ser calculada, em ohms, por [11]:

$$\eta_B = 2\pi f \mu D \quad (2.6)$$

para fonte de campo de baixa impedância (dipolo magnético) e,

$$\eta_A = \frac{1}{2\pi \epsilon f D} \quad (2.7)$$

para fonte de campo de alta impedância (dipolo elétrico), onde:

D= distância do ponto considerado à fonte em metros.

ϵ = permissividade elétrica do meio em F/m.

Desenvolvendo-se as equações 2.3 e 2.4 juntamente com as equações 2.6 e 2.7 é obtido, para região de campo próximo, o fator de reflexão para os dois tipos de fonte de campo [12].

As figuras 2.4 e 2.5 mostram como varia o fator de reflexão com a permeabilidade magnética para alguns valores de condutividade elétrica ("c_r"), na frequência de 60 Hz.

Os valores de permeabilidade e condutividade ("c_r") representados nas figuras 2.4 e 2.5 são relativos ao vácuo e ao cobre respectivamente.

Na região de campo distante, o tipo de fonte não influenciará mais na reflexão, pois a impedância de onda se iguala à do meio cujo valor é de aproximadamente 377 Ω para ambos os tipos de fonte. A figura 2.1 mostrou este fato.

Com os mesmos procedimentos adotados anteriormente na obtenção das equações do fator de reflexão para fontes de alta e baixa impedância, pode ser obtido o fator de reflexão para campos distantes [8] ($\eta_A = \eta_B = 377\Omega$).

A figura 2.6 mostra o fator de reflexão para campos distantes em função da permeabilidade magnética relativa para diferentes valores de condutividade elétrica.

Pelas figuras 2.4, 2.5 e 2.6 é visto que o fator de reflexão depende das propriedades constitutivas do material (condutividade e permeabilidade).

Pela análise de "Schelkunoff", para um campo eletromagnético gerado por uma fonte de alta impedância o fator de reflexão cai com o aumento da permeabilidade magnética conforme mostrou a figura 2.5.

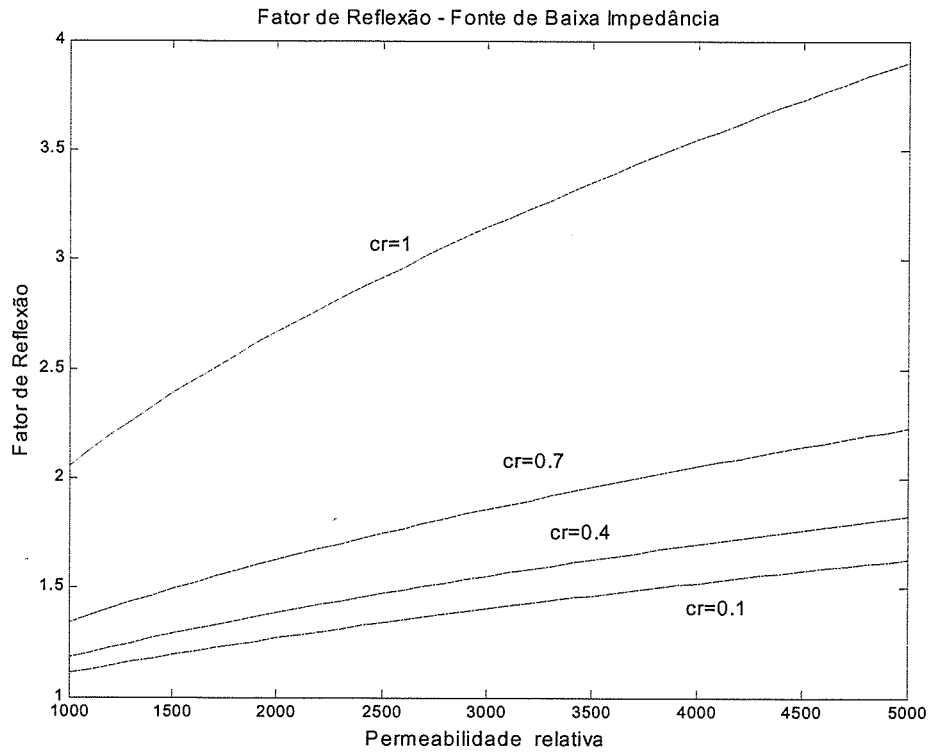


Figura 2.4: Fator de reflexão x permeabilidade, pelo método de "Schelkunoff" – Fonte de Baixa Impedância.

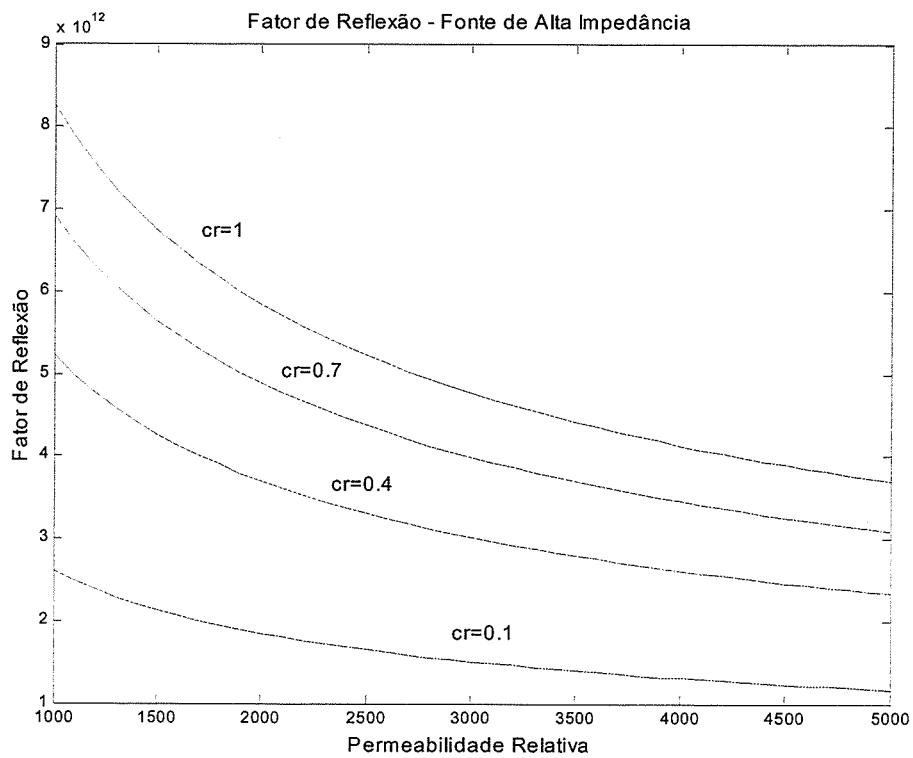


Figura 2.5: Fator de reflexão x permeabilidade pelo método de Schelkunoff, para vários valores de condutividade (cr), - Fonte de alta impedância.

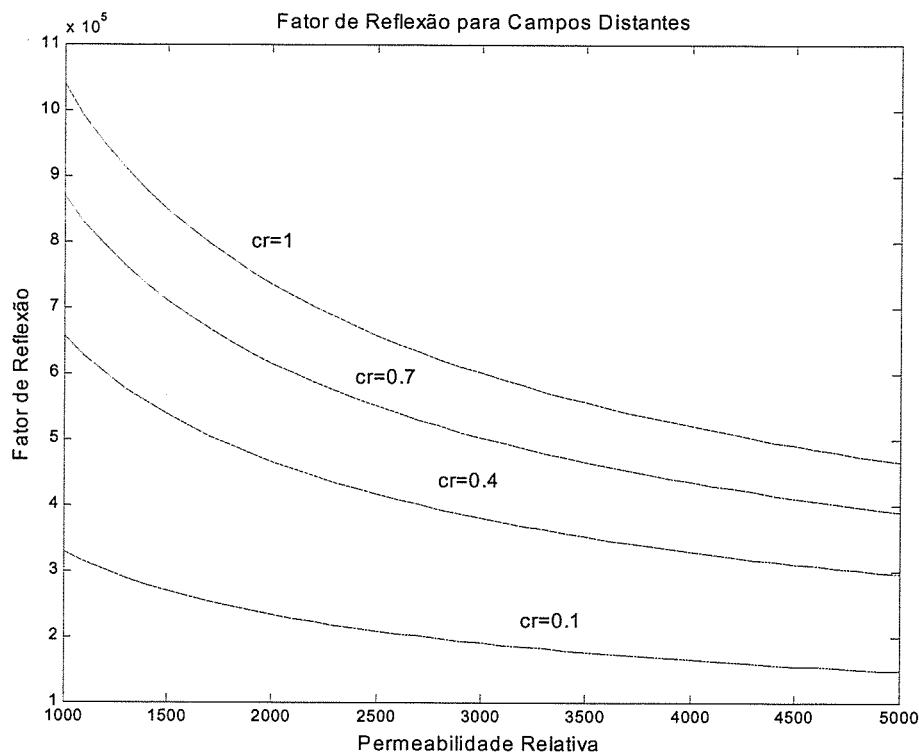


Figura 2.6: Fator de reflexão x permeabilidade (campos distantes), pelo método de Schelkunoff, para vários valores de condutividade elétrica (cr).

Fica claro pelas figuras 2.4 e 2.5 que o conhecimento da natureza da fonte de campo é determinante no projeto de uma blindagem se o método utilizado for o método de "Schelkunoff".

O coeficiente de reflexão obtido pelo método de "Schelkunoff" é muito grande para uma fonte alta impedância podendo atingir reduções de campo na ordem de 10^{13} vezes! Este fato leva a conclusão errada, como será demonstrado, que campos gerados por fontes de alta impedância podem ser facilmente atenuados.

- **Fator de absorção - A.**

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

Ao penetrar em materiais bons condutores, o campo magnético induz nestes correntes parasitas causando dissipação de energia sofrendo uma atenuação. Esta atenuação é definida como perda por absorção, e matematicamente é calculada por:

$$A = \frac{1}{e^{-\frac{t}{\delta}}} \quad (2.8)$$

sendo:

t = espessura do material usado na blindagem em metros;

δ = profundidade de penetração (em metros) definida pela equação (2.5).

A figura 2.7, mostra a dependência do fator de absorção com a permeabilidade magnética para diferentes valores de condutividade elétrica, para uma blindagem de 2 mm de espessura na frequência de 60 Hz.

Ficou claro mais uma vez que quanto maior a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica maior a eficiência da blindagem em absorver o campo.

Na frequência de 60Hz, o fator de absorção se torna desprezível para materiais paramagnéticos e diamagnéticos de pequenas espessuras como o alumínio e o cobre.

Para materiais com altos valores de permeabilidade magnética este fator pode contribuir com reduções de mais de 50 vezes no valor do campo magnético incidente, dependendo do valor da condutividade elétrica conforme mostra a figura 2.7.

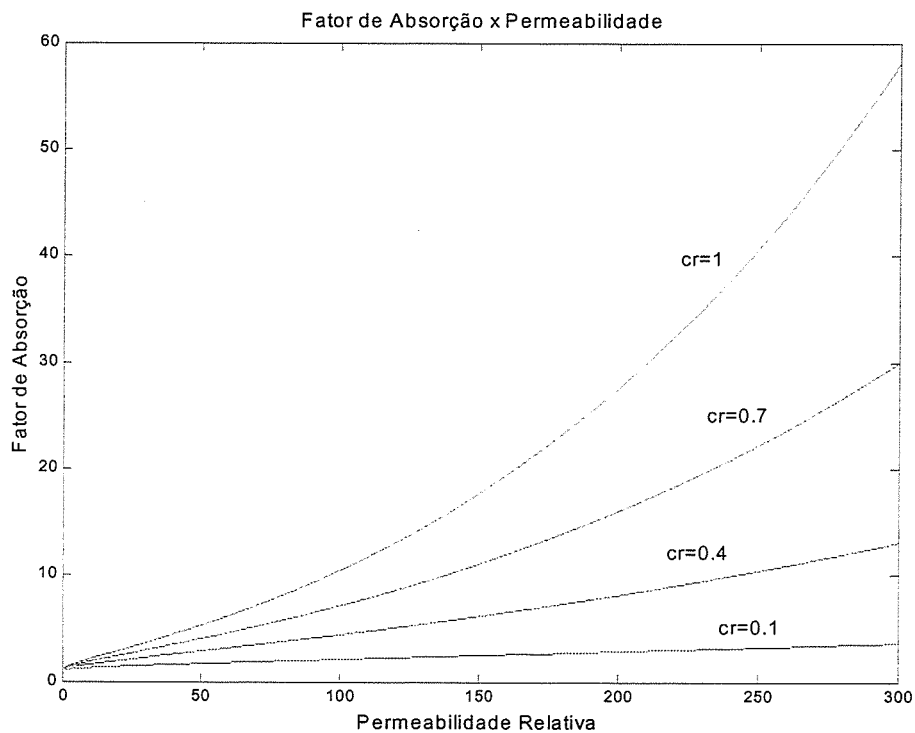


Figura 2.7: Fator de absorção x permeabilidade para vários valores de condutividade elétrica (cr).

- **Fator de múltiplas reflexões - MR.**

Em materiais onde o fator de absorção é pequeno, grande parte do campo que penetra na blindagem deixa de ser absorvido e sofre múltiplas reflexões no interior da mesma conforme foi mostrado na figura 2.3.

O efeito das múltiplas reflexões pode ser ainda mais significativo em chapas de pequena espessura onde a absorção se torna ainda menor.

Matematicamente, o fator de múltiplas reflexões para bons condutores é calculado pela equação [11]:

$$MR = \text{abs}\left(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}(1+j)}\right) \quad (2.9)$$

O gráfico a seguir (figura 2.8) mostra a variação do fator de múltiplas reflexões, na frequência de 60Hz, novamente em função da permeabilidade magnética para diferentes valores de condutividade elétrica para uma blindagem de 2 mm de espessura.

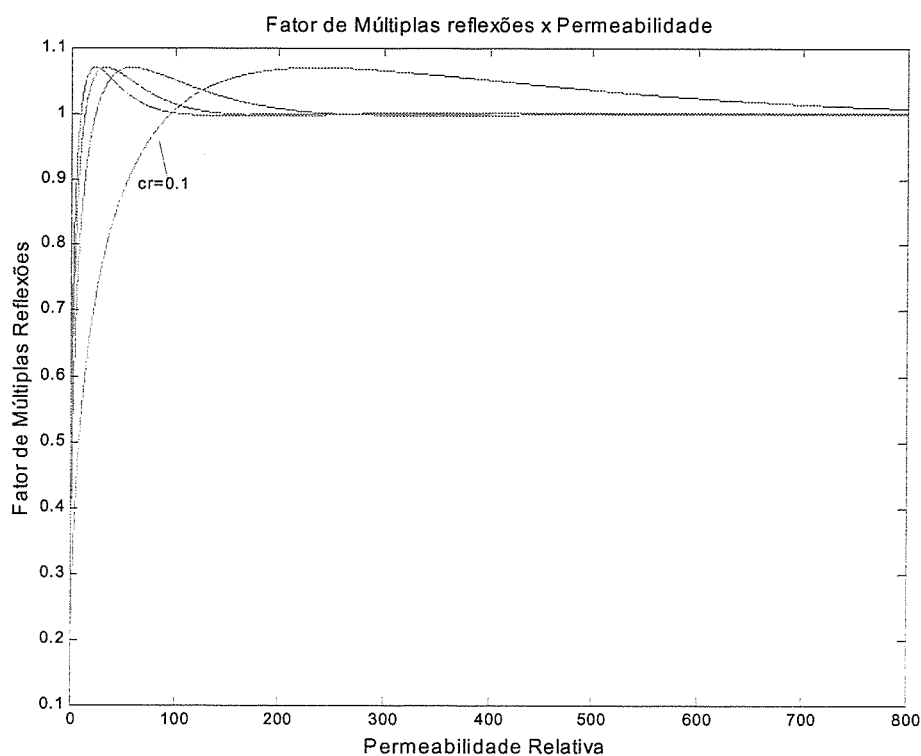


Figura 2.8: Fator de múltiplas reflexões x permeabilidade.

- **Fator de blindagem total - FB.**

O fator de blindagem total é representado matematicamente pela multiplicação dos fatores de reflexão, absorção e múltiplas reflexões conforme mostra a equação (2.10).

A ordem de grandeza de cada termo depende dos valores da permeabilidade magnética, condutividade elétrica do material e também do tipo de fonte geradora do campo.

$$FB=R \times A \times MR \quad (2.10)$$

As figuras 2.9 e 2.10 mostram o fator de blindagem total na frequência de 60 Hz, em função da permeabilidade magnética para diferentes valores de condutividade elétrica e para os dois tipos de fontes de campo. A espessura da blindagem é de 2 mm.

Fica claro pelas figuras 2.9 e 2.10 que o fator de blindagem total, deduzido pelo método de "Schelkunoff", é muito maior para fontes de alta impedância, podendo chegar a valores de redução do campo magnético da ordem 10^{13} vezes! no caso dos materiais ferromagnéticos comuns (condutividade elétrica relativa na ordem de 0.1 e permeabilidade magnética relativa da ordem de 200).

Por este motivo pode parecer que a contenção de campos magnéticos gerados a partir de fontes de alta impedância é mais fácil. Métodos mais precisos de cálculo, apresentados em capítulos posteriores, mostram que isto não é verdade.

A utilização de várias camadas (níveis) superpostas de materiais com diferentes propriedades (figura 2.11) tende a aumentar a eficiência da blindagem, pois aumenta significativamente a absorção do campo magnético.

Um inconveniente da utilização de muitas camadas de materiais é o aumento do custo e do peso da blindagem, mas ainda sim em alguns projetos, devido ao alto desempenho exigido da blindagem, até três camadas de um mesmo ou de diferentes tipos de materiais é utilizada [8].

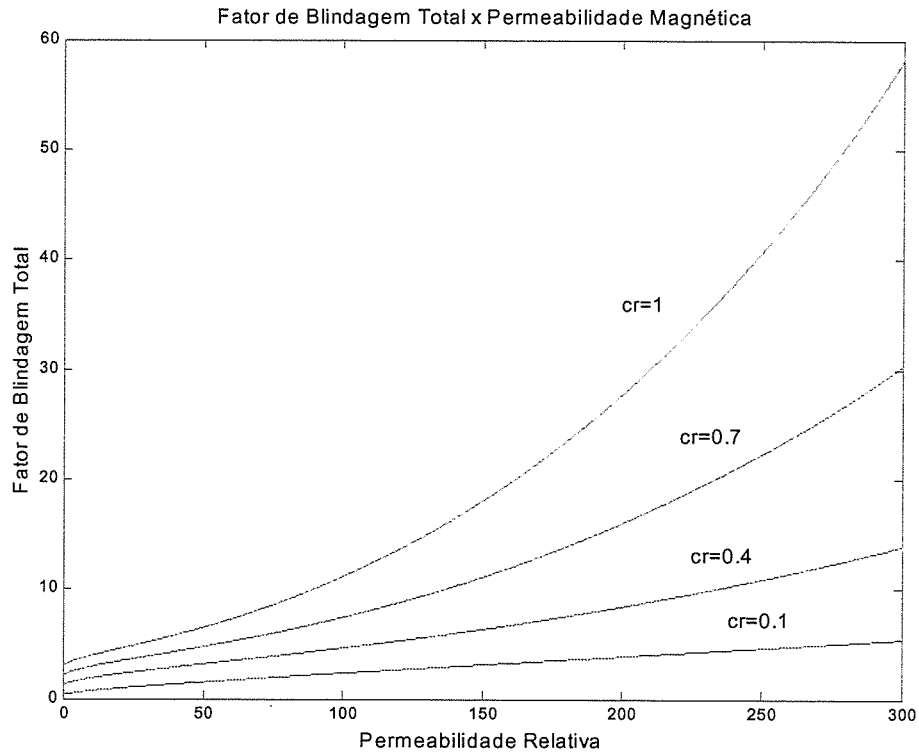


Figura 2.9: Fator de blindagem total x permeabilidade, pelo método de "Schelkunoff". – Fonte de Baixa Impedância.

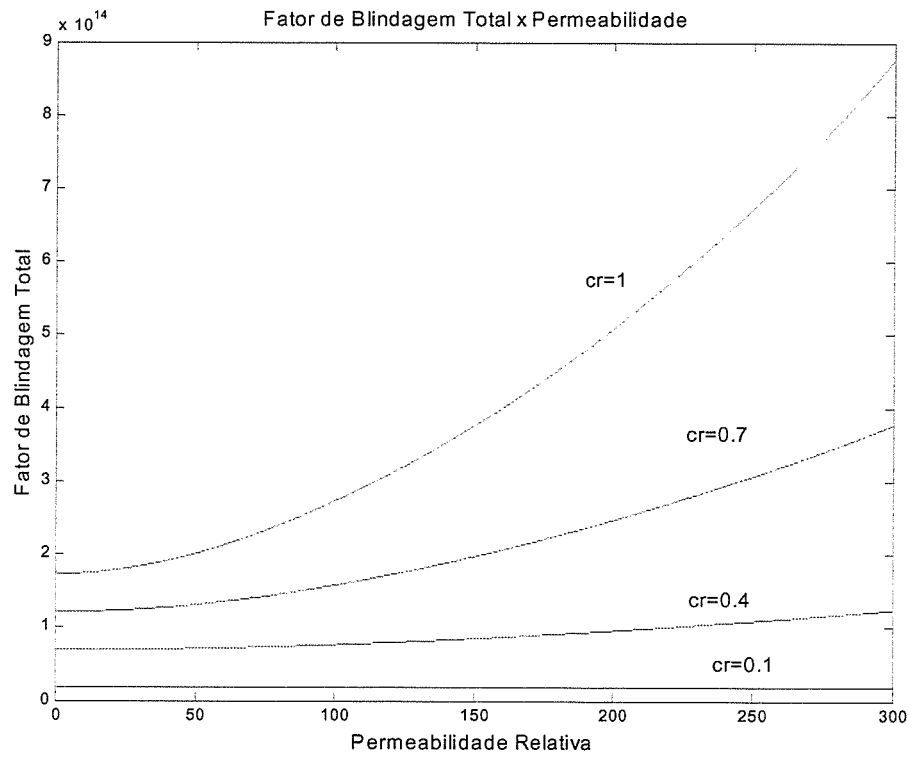


Figura 2.10: Fator de blindagem total x permeabilidade, pelo método de "Schelkunoff". – Fonte de Alta Impedância.

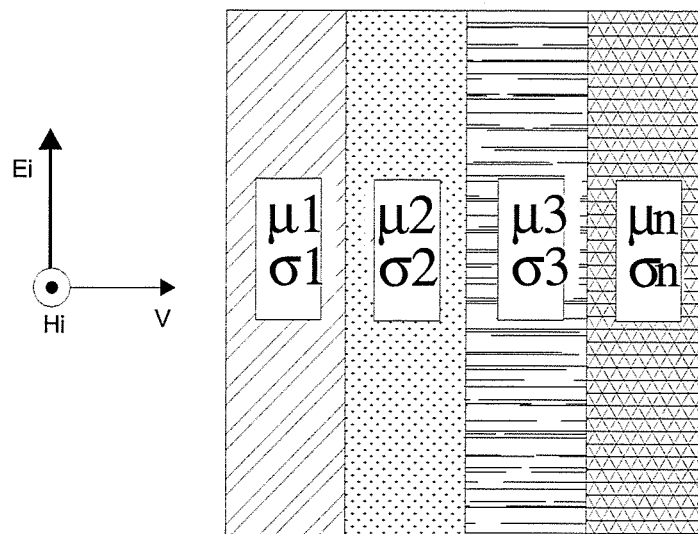


Figura 2.11: Blindagem utilizando materiais com propriedades diferentes.

O fator de blindagem total para a figura 2.11, de acordo com o método de "Schelkunoff", é:

$$FB_t = FB_1 \times FB_2 \times FB_3 \dots \times FB_n \quad (2.11)$$

onde: $FB_1, FB_2, FB_3 \dots$ são os fatores de blindagem total de cada camada isolada.

Esta técnica de blindagem é chamada de blindagem "sanduíche".

2.5- A Blindagem Ativa versus Chapas metálicas.

A blindagem ativa consiste basicamente na criação de um campo de igual amplitude e defasado de 180° daquele que se deseja atenuar [7]. A aplicação de fontes externas para a criação deste campo pode ser utilizada.

Uma alternativa para a blindagem ativa utilizada pelo grupo de Compatibilidade Eletromagnética da Universidade de Minas Gerais [7] é apresentada na figura 2.12.

A técnica proposta consiste em um sistema auxiliar com os condutores posicionados paralelamente aos condutores do sistema principal. Os sistemas principal e auxiliar são interligados por um transformador de corrente conforme mostra a figura 2.12.

O núcleo do transformador de corrente deve ser enrolado de tal forma que o campo magnético resultante produzido pelos dois sistemas seja mínimo. A relação de espiras deve ser próxima de 1:1.

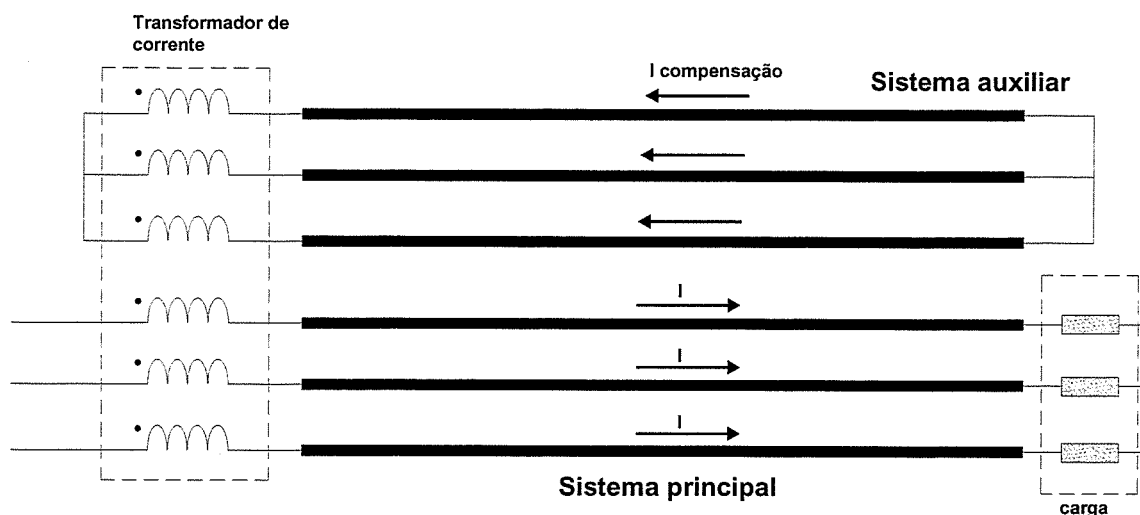


Figura 2.12: Blindagem ativa com sistema auxiliar paralelo com a fonte de campo principal.

Um estudo detalhado do emprego da blindagem ativa é feito em [7].

O emprego de chapas metálicas e a blindagem ativa possuem vantagens e desvantagens cada um sendo que a opção da utilização de um ou outro método depende de cada caso.

A seguir são apresentadas as principais características de cada um dos dois métodos de blindagem.

Blindagem ativa:

- Necessita de um sistema de cabos auxiliar para a geração do campo;
- É fortemente dependente da geometria do sistema, ou seja, fontes geradoras de campos com geometrias complexas dificultam a implementação do sistema;
- Apresenta melhores desempenhos do que o método de blindagem com chapas metálicas principalmente em regiões mais afastadas da fonte de campo;
- O seu desempenho para fontes de baixa impedância deve ainda ser objeto de estudos;
- Pode apresentar menores custos de implantação do que chapas metálicas, dependendo da geometria e tamanho da fonte de campo;
- É um método de blindagem a ser empregado somente nas fontes de campo e não sobre os equipamentos a serem protegidos, pois a proximidade do

sistema auxiliar do principal (fonte de campo) [7] é fundamental para o bom desempenho da blindagem.

Blindagem com chapas metálicas.

- Geralmente apresenta menor desempenho do que a técnica de blindagem ativa principalmente em regiões afastadas da fonte de campo;
- Pode ser empregada mais facilmente para fontes de campo magnético com geometrias mais complexas;
- O peso da blindagem é um fator limitador nos projetos de blindagem;
- Dependendo do fator de blindagem pretendido no projeto, o custo da utilização de chapas pode ser proibitivo;
- Apresenta resultados semelhantes quando utilizado na blindagem de fontes de alta e baixa impedância;
- Deve ser ainda estudado o efeito causado pela presença de materiais próximos do sistema elétrico (fonte de campo) devido a alteração na impedância do sistema causado pelo campo magnético gerado pelas correntes induzidas no metal.

2.6 - Considerações Finais.

Alguns métodos de análise do fenômeno da blindagem eletromagnética foram apresentados neste capítulo.

O método de elementos finitos tem ganhado destaque com a crescente evolução dos computadores, mas ainda sim a análise deste tipo de problema consome bastante tempo para os cálculos.

O cálculo da corrente induzida no metal é um método que, além de possibilitar a análise da atenuação do campo, facilita o estudo da determinação da absorção de potência da fonte de campo pela blindagem [14].

A maior parte deste capítulo foi dedicada ao método de "Schelkunoff" por ser este, sem dúvida, o método predileto usado por autores de livros de compatibilidade eletromagnética [11,12] e que muitas vezes é também usado em projetos [10].

Alguns autores chegam a afirmar que atenuações de campos eletromagnéticos produzidos por fontes de alta impedância são bastante elevadas e que o problema da contenção destes campos não representa nenhum problema na prática. Isto se

deve a uma primeira avaliação da figura 2.10, onde é sugerido um fator de blindagem total da ordem de 10^{13} vezes no valor do campo magnético podendo atingir até 10^{14} vezes em materiais com maior condutividade elétrica. Estes resultados não têm sido confirmados na prática [7,8,9].

É importante deixar claro que o método de "Schelkunoff" é uma aproximação dos resultados obtidos por outros métodos como, por exemplo, o método da determinação da corrente induzida no metal, citado neste capítulo.

Tais simplificações se concentram na dedução da equação do fator de reflexão para campos próximos, tornando-as inválidas para um estudo como o deste trabalho onde ondas não planas são consideradas.

Estas simplificações são listadas a seguir:

- A onda eletromagnética dentro da blindagem é considerada sem componentes de campo na direção de propagação sendo utilizada uma abordagem de cálculo semelhante ao usado no cálculo de reflexões de tensão e corrente em linhas de transmissão. Este fato não é verdadeiro, pois na região de campo próximo existem componentes de campo (elétrico ou magnético) na direção de propagação da onda;
- Não é considerada qualquer variação na impedância de onda ao transpor a chapa metálica (a chapa é considerada muito fina);
- Os componentes de campos elétrico e magnético são considerados como sendo totalmente contidos no plano da chapa metálica (onda plana);
- A onda eletromagnética é considerada uniforme.

Fica claro que o método de "Schelkunoff" não é adequado quando blindagens metálicas são posicionadas muito próximas à fonte de campo magnético de baixa frequência.

Apesar de o número de trabalhos a respeito de novas técnicas de blindagem de campos magnéticos de 60 Hz ter aumentado, os casos na prática ainda têm se mostrado de difícil solução.

As diferentes técnicas de blindagem apresentadas (blindagem ativa e utilização de chapas) deverão ser implementadas em função do caso em questão.

O próximo capítulo apresenta uma abordagem mais detalhada e completa dos fenômenos envolvidos na blindagem da fonte de campo com chapas metálicas.

3- O Método de Análise da Blindagem pelo Potencial Vetor Magnético.

3.1- Introdução.

É apresentado neste capítulo um método de análise do fenômeno de blindagem eletromagnética baseado na resolução da equação de difusão do potencial vetor magnético e da utilização das condições de interface do problema.

Além de ser um problema aberto, a análise da influência dos parâmetros na blindagem como permeabilidade magnética, condutividade elétrica e espessura das chapas, é apresentada posteriormente em forma de gráficos, o que torna, como já foi dito, a utilização de programas numéricos de cálculo de campo como os baseados em elementos finitos e/ou elementos de fronteira difícil devido à grande quantidade de simulações necessárias.

O método do potencial vetor magnético pode ser uma alternativa para a análise dos já citados parâmetros através de gráficos, pois demanda um menor esforço computacional. Tal método é desenvolvido aqui de maneira a contemplar dois níveis de blindagem para os dois tipos de configurações de fonte de campo magnético.

As referências [14] e [19] adotam o método do potencial vetor para o cálculo do campo magnético na presença de uma blindagem metálica, no entanto, não o fazem de maneira a contemplar dois níveis de blindagem sendo que a referência [14] apresenta equações simplificadas cujos resultados não coincidem com os valores experimentais que são apresentados neste trabalho.

De uma maneira geral, o estudo teórico do fenômeno da blindagem de campos magnéticos é muito complexo principalmente devido aos diversos tipos de configurações geométricas das fontes de campo levando conseqüentemente as mais variadas configurações de blindagens.

São estudadas aqui, as configurações de blindagem e fontes de campo mais encontradas na prática que são:

- Chapas metálicas planas blindando condutores longos de correntes (fonte de campo de alta impedância) e "loops" circulares de corrente (fonte de campo de baixa impedância);
- Cilindros metálicos blindando condutores longos de corrente.

Em todos os casos é discutida a utilização de somente um nível de blindagem como também a técnica de blindagem "sanduíche", de dois níveis.

Mesmo nas configurações relativamente simples de fonte e blindagem tratadas, neste primeiro momento de análise, algumas simplificações ainda se fazem necessárias a fim de tornar o problema matematicamente tratável. São elas:

- A não linearidade das propriedades dos materiais ferromagnéticos como a saturação e histerese, torna a solução das equações bastante complicadas e não será abordada como também a anisotropia magnética que a maioria dos aços possui;
- No caso da blindagem com chapas metálicas, estas são consideradas infinitas em extensão e largura. Este fato será novamente salientado quando o problema for analisado nos próximos capítulos;
- Não é considerado o efeito do diâmetro finito dos condutores de corrente na geração do campo magnético.

Apesar destas simplificações, os resultados apresentados por este método são bem próximos tanto dos resultados obtidos por um "software" baseado no método de elementos finitos (em duas dimensões) como dos resultados experimentais conforme é analisado no próximo capítulo.

O método do potencial vetor pode ainda ser aperfeiçoado para contemplar blindagens de tamanho finito. Um primeiro passo neste sentido foi desenvolvido por [15] que, no entanto, apresenta a simplificação de adotar os materiais constituintes das chapas ora condutores elétricos perfeitos, ora condutores magnéticos perfeitos.

Na prática, dizer que um material é condutor perfeito significa não levar em conta a penetração do campo magnético no interior do mesmo, ou seja, o único fenômeno envolvido na blindagem é a reflexão do campo no material.

Uma alternativa de continuidade deste trabalho seria a obtenção de uma solução analítica das equações, utilizando o método do potencial vetor, que considerem além

do tamanho finito das chapas também a condutividade finita dos materiais envolvidos na blindagem.

3.2- Blindagem do Campo Magnético Produzido por Fontes de Alta Impedância.

Como já discutido anteriormente, campos eletromagnéticos de alta impedância são aqueles gerados a partir de condutores longos de corrente.

Esta fonte de campo é comumente encontrada nos casos estudados na prática, onde barramentos trifásicos presentes em prédios e indústrias têm causado problemas de interferência em equipamentos sensíveis [6,10].

As configurações de blindagens mais usadas para este tipo de fonte de campo são as chapas e tubos metálicos envolvendo os condutores.

Aqui são analisados separadamente estes dois tipos de configurações de blindagens.

3.2.1- Blindagem com chapas metálicas.

É agora abordado o cálculo do campo magnético produzido por um sistema trifásico de corrente desequilibrado com condutor neutro na presença de chapas metálicas como meio único de blindagem.

Todas as equações são deduzidas considerando a presença de dois níveis de blindagem, ou seja, a presença de duas chapas metálicas de diferentes materiais (blindagem "sanduíche"). Uma pequena modificação, apresentada posteriormente, possibilitará a análise do fenômeno considerando apenas uma chapa (um nível de blindagem).

A figura 3.1 mostra a configuração geométrica do problema em questão, onde o sistema de condutores trifásico está posicionado no plano cartesiano " $y = 0$ " ($y_m=0$) e igualmente espaçados de " x_m " centímetros uns dos outros. As letras sobre os condutores (A,B,C e N) representam as fases e o condutor neutro respectivamente.

As regiões são numeradas conforme critério a seguir:

- Região 1: região onde se localiza a fonte de campo magnético (condutores);
- Regiões 2 e 3: representam a blindagem, ou seja, os dois materiais metálicos cada um com sua permeabilidade magnética e condutividade elétrica;

- Região 4: representa a região onde se deseja reduzir o valor do campo magnético. É a chamada "região blindada" do problema. O ponto "P", representado pelas coordenadas (x_p, y_p) é o ponto onde se deseja calcular o campo magnético conforme ficará claro nas equações deduzidas.

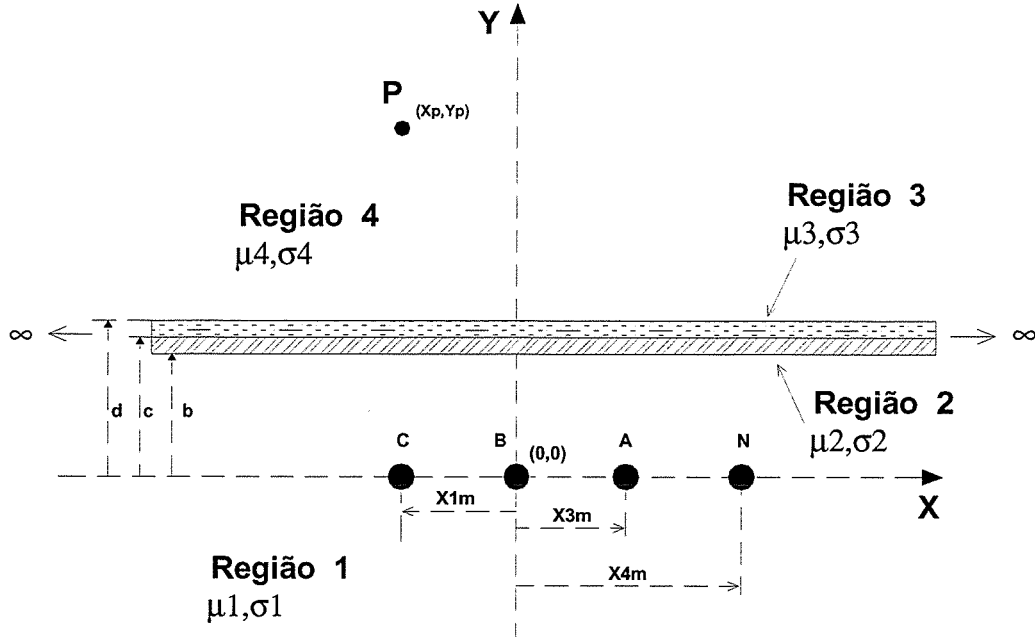


Figura 3.1: Configuração de blindagem representando as 4 regiões de interesse para a dedução das equações.

A indução magnética (ou campo magnético) é obtida através da solução da equação de difusão do potencial vetor magnético e da aplicação das condições de interface entre as regiões 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4.

Com a definição do potencial vetor magnético dado pela equação 3.1 [11], e considerando o sistema da figura 3.1 em coordenadas cartesianas, a equação da difusão do potencial vetor magnético toma a forma da equação 3.2.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{3.1}$$

$$\nabla^2 \vec{A}_n(x, y) - j\rho_n^2 \vec{A}_n(x, y) = 0 \tag{3.2}$$

onde:

$$\rho_n = \sqrt{2\pi f \mu_n \sigma_n} \tag{3.3}$$

sendo:

σ_n = condutividade elétrica da região "n";

μ_n = permeabilidade magnética da região "n".

Com a aplicação do método de separação de variáveis [16], a equação 3.2 pode ser escrita como:

$$\bar{A}_n(x, y) = A_x(x, n)A_y(y, n) \quad (3.4)$$

O índice "n" nas equações acima indica as regiões em estudo (1, 2, 3 ou 4) indicadas na figura 3.1.

Desta maneira, substituindo (3.4) em (3.2) obtemos duas equações com uma única variável cada uma:

$$\frac{d^2 A_{x,n}}{dx^2} = -k A_{x,n} \quad (3.5)$$

para a variável "x", e:

$$\frac{d^2 A_{y,n}}{dy^2} = \gamma_n^2 A_{y,n} \quad (3.6)$$

para a variável "y".

sendo:

$$\gamma_n = \sqrt{k^2 + jp_n^2} \quad (3.7)$$

Na equação 3.7, "k" e "p" são, respectivamente, os números de onda nas direções "x" e "y" que vão de zero ao infinito.

As soluções das equações 3.5 e 3.6 são conhecidas [14,16] sendo respectivamente:

$$A_{x,n} = G_m \cos k(d_m) \quad (3.8)$$

$$A_{y,n} = C_n e^{-\gamma_n y_p} + D_n e^{\gamma_n y_p} \quad (3.9)$$

Algumas observações relativas às equações 3.8 e 3.9 devem feitas:

- A constante " G_m " na equação 3.8 deve ser determinada pelas condições de contorno do problema. O índice " m " indica o número do condutor que está gerando o campo a ser determinado. No caso específico deste trabalho, a fonte de campo magnético é composta de quatro condutores. Na referência [14] é determinada esta constante que tem a forma:

$$G_m = \frac{\mu_n I_m e^{ky_m}}{2\pi} \quad (3.10)$$

A variável " y_m " indica a posição, em relação ao eixo " y ", dos condutores que, neste estudo, são posicionados sobre o eixo " x " tornando $y_m=0$;

- A variável " d_m " representa a distância, em relação ao eixo " x ", entre o ponto de cálculo do campo (x_p) e o ponto de localização do condutor (x_m). Desta maneira:

$$d_m = (x_p - x_m) \quad (3.11)$$

- Na equação 3.9, as constantes " C_n " e " D_n " devem ser determinadas pelas condições de interface entre as regiões indicadas na figura 3.1.

Substituindo as equações 3.8 e 3.9 na equação 3.4 e considerando as observações realizadas acima, pode-se agora determinar uma solução geral para o potencial vetor magnético para a configuração representada na figura 3.1. Esta solução envolve uma integral sobre " k " variando de zero ao infinito [14,17] e é escrita na forma:

$$A_n = \int_0^{\infty} [C_n e^{-\gamma_n y} + D_n e^{\gamma_n y}] \sum_{m=1}^M \frac{\mu_n I_m e^{ky_m}}{2\pi} \cos k(x_p - x_m) dk \quad (3.12)$$

No caso aqui estudado temos quatro condutores, com isto: $M=4$.

Com o auxílio das relações,

$$\bar{B}_{x,n} = \frac{\partial A_n(x,y)}{\partial y} \quad (3.13)$$

e,

$$\bar{B}_{y,n} = -\frac{\partial A_n(x,y)}{\partial x} \quad (3.14)$$

são determinados os componentes x e y da indução magnética em qualquer das quatro regiões mostradas na figura 3.1.

$$B_{x,n} = \int_0^{\infty} \gamma_n [-C_n e^{-\gamma_n y} + D_n e^{\gamma_n y}] \sum_{m=1}^M \frac{\mu_n I_m e^{k y_m}}{2\pi} \cos k(x_p - x_m) dk \quad (3.15)$$

$$B_{y,n} = \int_0^{\infty} k [C_n e^{-\gamma_n y} + D_n e^{\gamma_n y}] \sum_{m=1}^M \frac{\mu_n I_m e^{k y_m}}{2\pi} \sin k(x_p - x_m) dk \quad (3.16)$$

Resta agora a determinação das constantes " C_n " e " D_n " das equações (3.15) e (3.16) que são obtidas através da aplicação das condições de interface entre os meios, são elas:

$$\bar{B}_{y,n} = \bar{B}_{y,n+1} \quad (3.17)$$

que indica a continuidade do componente normal da indução magnética e,

$$\frac{\bar{B}_{x,n}}{\mu_n} = \frac{\bar{B}_{x,n+1}}{\mu_{n+1}} \quad (3.18)$$

que indica a continuidade do componente tangencial do vetor campo magnético (" \mathbf{H} ") entre os meios em questão.

Substituindo as equações 3.15 e 3.16 nas relações 3.17 e 3.18 para cada interface entre as regiões mostradas na figura 3.1, são obtidas as igualdades 3.19 a 3.24 que permitem a resolução de um sistema linear para a obtenção das constantes " C_n " e " D_n " para qualquer uma das quatro regiões da figura 3.1.

Na interface entre as regiões 1 e 2 temos:

$$-\frac{\mu_0 \mu_{r1} \gamma_1}{\mu_1} C_1 e^{-\gamma_1 b} + \frac{\mu_0 \mu_{r1} \gamma_1}{\mu_1} D_1 e^{\gamma_1 b} = -\frac{\mu_0 \mu_{r2} \gamma_2}{\mu_2} C_2 e^{-\gamma_2 b} + \frac{\mu_0 \mu_{r2} \gamma_2}{\mu_2} D_2 e^{\gamma_2 b} \quad (3.19)$$

$$\mu_0\mu_{r1}kC_1e^{-\gamma_1b} + \mu_0\mu_{r1}kD_1e^{\gamma_1b} = \mu_0\mu_{r2}kC_2e^{-\gamma_2b} + \mu_0\mu_{r2}kD_2e^{\gamma_2b} \quad (3.20)$$

Na interface entre as regiões 2 e 3 temos:

$$-\frac{\mu_0\mu_{r2}\gamma_2}{\mu_2}C_2e^{-\gamma_2c} + \frac{\mu_0\mu_{r2}\gamma_2}{\mu_2}D_2e^{\gamma_2c} = -\frac{\mu_0\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3}C_3e^{-\gamma_3c} + \frac{\mu_0\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3}D_3e^{\gamma_3c} \quad (3.21)$$

$$\mu_0\mu_{r2}kC_2e^{-\gamma_2c} + \mu_0\mu_{r2}kD_2e^{\gamma_2c} = \mu_0\mu_{r3}kC_3e^{-\gamma_3c} + \mu_0\mu_{r3}kD_3e^{\gamma_3c} \quad (3.22)$$

Na interface entre as regiões 3 e 4 temos:

$$-\frac{\mu_0\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3}C_3e^{-\gamma_3d} + \frac{\mu_0\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3}D_3e^{\gamma_3d} = -\frac{\mu_0\mu_{r4}\gamma_4}{\mu_4}C_4e^{-\gamma_4d} + \frac{\mu_0\mu_{r4}\gamma_4}{\mu_4}D_4e^{\gamma_4d} \quad (3.23)$$

$$\mu_0\mu_{r3}kC_3e^{-\gamma_3d} + \mu_0\mu_{r3}kD_3e^{\gamma_3d} = \mu_0\mu_{r4}kC_4e^{-\gamma_4d} + \mu_0\mu_{r4}kD_4e^{\gamma_4d} \quad (3.24)$$

As constantes "c", "b" e "d" acima são as coordenadas "y" da localização das interfaces entre os meios conforme indicado na figura 3.1.

Com as igualdades 3.19 a 3.24, é escrito um sistema de seis equações com oito incógnitas, no entanto, uma análise mais detalhada nos leva a concluir que a constante "D₄" vale zero por representar um campo magnético gerado por uma fonte de campo localizada da região 4, o que não faz sentido, já que esta região se estende até o infinito e não possui fontes de campo nem barreiras para refletir o campo de volta.

Pode-se mostrar, por inspeção com a equação da indução magnética produzida por um fio infinito de corrente, que a constante "C₁" vale 1/γ₁. O campo magnético, nesta região, viaja na direção positiva do eixo "y" e ainda não sofreu interação com a blindagem metálica.

Com os valores de "C₁" e "D₄" determinados, a resolução de um sistema de seis equações nos leva a determinação das incógnitas restantes.

É de interesse neste trabalho o conhecimento de "C₄" para a determinação do campo magnético (ou indução) na região 4 (região blindada). Isto pode servir

posteriormente para uma avaliação do desempenho dos materiais metálicos na blindagem.

Com as devidas simplificações matemáticas, o sistema de seis equações (3.25), escrito a partir das equações 3.19 a 3.24, vem a seguir:

$$\begin{aligned}
 \frac{\mu_{r1}\gamma_1}{\mu_1} D_1 e^{\gamma_1 b} + \frac{\mu_{r2}\gamma_2}{\mu_2} C_2 e^{-\gamma_2 b} - \frac{\mu_{r2}\gamma_2}{\mu_2} D_2 e^{\gamma_2 b} &= \frac{\mu_{r1}}{\mu_1} e^{-\gamma_1 b} \\
 \mu_{r1} D_1 e^{\gamma_1 b} - \mu_{r2} C_2 e^{-\gamma_2 b} - \mu_{r2} D_2 e^{\gamma_2 b} &= \frac{-\mu_{r1} e^{-\gamma_1 b}}{\gamma_1} \\
 -\frac{\mu_{r2}\gamma_2}{\mu_2} C_2 e^{-\gamma_2 c} + \frac{\mu_{r2}\gamma_2}{\mu_2} D_2 e^{\gamma_2 c} + \frac{\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3} C_3 e^{-\gamma_3 c} - \frac{\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3} D_3 e^{\gamma_3 c} &= 0 \quad (3.25) \\
 \mu_{r2} C_2 e^{-\gamma_2 c} + \mu_{r2} D_2 e^{\gamma_2 c} - \mu_{r3} C_3 e^{-\gamma_3 c} - \mu_{r3} D_3 e^{\gamma_3 c} &= 0 \\
 -\frac{\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3} C_3 e^{-\gamma_3 d} + \frac{\mu_{r3}\gamma_3}{\mu_3} D_3 e^{\gamma_3 d} + \frac{\mu_{r4}\gamma_4}{\mu_4} C_4 e^{-\gamma_4 d} &= 0 \\
 \mu_{r3} C_3 e^{-\gamma_3 d} + \mu_{r3} D_3 e^{\gamma_3 d} - \mu_{r4} C_4 e^{-\gamma_4 d} &= 0
 \end{aligned}$$

Resolvendo o sistema (3.25) pela regra de "Cramer" e considerando a simplificação vinda de: $\mu_n = \mu_r \mu_0$, sendo μ_r a permeabilidade relativa do material e μ_0 a permeabilidade do vácuo.

Determinantes semelhantes podem ser calculados objetivando determinar as outras incógnitas do sistema 3.25.

$$\Delta_H = \begin{vmatrix}
 \gamma_1 e^{\gamma_1 b} & \gamma_2 e^{-\gamma_2 b} & -\gamma_2 e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & 0 \\
 \mu_{r1} e^{\gamma_1 b} & -\mu_{r2} e^{-\gamma_2 b} & -\mu_{r2} e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\gamma_2 e^{-\gamma_2 c} & \gamma_2 e^{\gamma_2 c} & \gamma_3 e^{-\gamma_3 c} & -\gamma_3 e^{\gamma_3 c} & 0 \\
 0 & \mu_{r2} e^{-\gamma_2 c} & \mu_{r2} e^{\gamma_2 c} & -\mu_{r3} e^{-\gamma_3 c} & -\mu_{r3} e^{\gamma_3 c} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\gamma_3 e^{-\gamma_3 d} & \gamma_3 e^{\gamma_3 d} & \gamma_3 e^{-\gamma_4 d} \\
 0 & 0 & 0 & \mu_{r3} e^{-\gamma_3 d} & \mu_{r3} e^{\gamma_3 d} & -\mu_{r4} e^{-\gamma_4 d}
 \end{vmatrix} \quad (3.26)$$

A fim de determinar o coeficiente "C4":

$$\Delta C_4 = \begin{vmatrix} \gamma_1 e^{-\gamma_1 b} & \gamma_2 e^{-\gamma_2 b} & -\gamma_2 e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & e^{-\gamma_1 b} \\ \mu_{r1} e^{\gamma_1 b} & -\mu_{r2} e^{-\gamma_2 b} & -\mu_{r2} e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & -\mu_{r1} e^{-\gamma_1 b} \\ 0 & -\gamma_2 e^{-\gamma_2 c} & \gamma_2 e^{\gamma_2 c} & \gamma_3 e^{-\gamma_3 c} & -\gamma_3 e^{\gamma_3 c} & \gamma_1 \\ 0 & \mu_{r2} e^{-\gamma_2 c} & \mu_{r2} e^{\gamma_2 c} & -\mu_{r3} e^{-\gamma_3 c} & -\mu_{r3} e^{\gamma_3 c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma_3 e^{-\gamma_3 d} & \gamma_3 e^{\gamma_3 d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{r3} e^{-\gamma_3 d} & \mu_{r3} e^{\gamma_3 d} & 0 \end{vmatrix} \quad (3.27)$$

Desta maneira o cálculo do coeficiente "C₄" é feito calculando a razão entre os determinantes 3.26 e 3.27.

$$C_4 = \frac{\Delta C_4}{\Delta_H} \quad (3.28)$$

Com o coeficiente "C₄", a solução para a indução magnética na região 4 (região blindada) agora é:

$$B_{x,4} = \int_0^{\infty} \gamma_4 C_4 e^{-\gamma_4 y} \sum_{m=1}^M \frac{\mu_4 I_m e^{k y_m}}{2\pi} \cos k(x_p - x_m) dk \quad (3.29)$$

para o componente da indução na direção "x" e,

$$B_{y,4} = \int_0^{\infty} k C_4 e^{-\gamma_4 y} \sum_{m=1}^M \frac{\mu_4 I_m e^{k y_m}}{2\pi} \sin k(x_p - x_m) dk \quad (3.30)$$

para o componente da indução na direção "y".

A indução magnética resultante é a soma vetorial dos componentes 3.29 e 3.30:

$$\vec{B}_{r,4} = B_{x,4} + B_{y,4} \quad (3.31)$$

Para a obtenção do campo magnético na região 4, basta dividir a equação 3.31 pela permeabilidade magnética do meio (μ_4).

Em algumas situações nas quais a determinação da impedância de onda no interior do material é necessária, a indução magnética dentro da blindagem metálica deve ser determinada calculando-se as constantes das equações 3.15 e 3.16.

Considerando a figura 3.1, a indução magnética no interior da região 2 (chapa metálica mais próxima da fonte) fica:

$$B_{x,2} = \int_0^{\infty} \gamma_2 [-C_2 e^{-\gamma_2 y} + D_2 e^{\gamma_2 y}] \sum_{m=1}^M \frac{\mu_2 I_m e^{k y_m}}{2\pi} \cos k(x_p - x_m) dk \quad (3.32)$$

$$B_{y,2} = \int_0^{\infty} k [C_2 e^{-\gamma_2 y} + D_2 e^{\gamma_2 y}] \sum_{m=1}^M \frac{\mu_2 I_m e^{k y_m}}{2\pi} \sin k(x_p - x_m) dk \quad (3.33)$$

3.2.2- Blindagem com tubos cilíndricos metálicos.

A utilização de tubos cilíndricos envolvendo totalmente os condutores é também uma configuração de blindagem bastante usada e seu estudo teórico vem sendo feito há bastante tempo [18].

A dedução da indução magnética com a presença desta configuração de blindagem é complicada, no entanto, equações aproximadas têm apresentado bons resultados quando comparados a métodos numéricos de cálculo como o método de elementos finitos.

É mostrado pelas equações, que o fator de blindagem, definido anteriormente pela equação 2.1, não é influenciado pelo número de condutores envolvidos pela blindagem cilíndrica.

A figura 3.2 mostra um esquema deste tipo de configuração de blindagem com os condutores em seu interior.

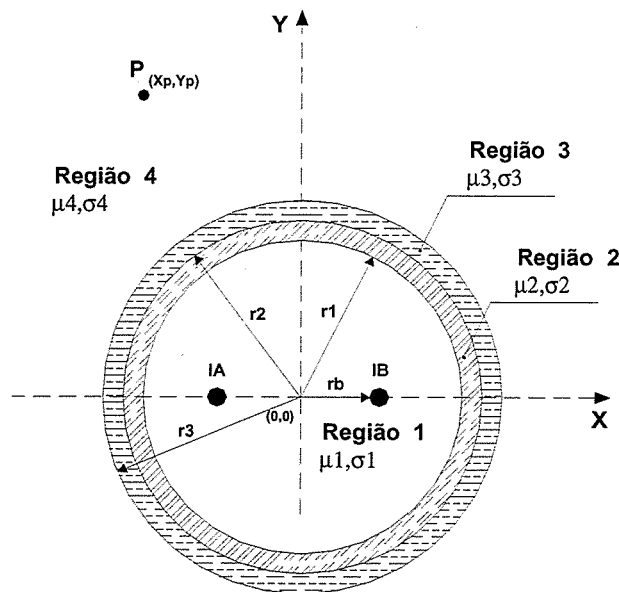


Figura 3.2: Configuração de blindagem cilíndrica envolvendo os condutores.

Assim como no caso anterior onde chapas metálicas foram utilizadas, a indução magnética é calculada com a utilização das equações 3.29 a 3.31 sendo, o coeficiente "C₄", agora determinado pela equação [18]:

$$C_4 = \frac{1}{S_1 \times S_2 \times S_3} \quad (3.34)$$

sendo:

$$S_1 = \frac{\sqrt{2}R_{2a}}{(1 - i0.5R_{2a}^2) \sinh(R_{1a} + iR_{1a}) + (1 - i)R_{2a} \cosh(R_{1a} + iR_{1a})} \quad (3.35)$$

$$S_2 = \frac{\sqrt{2}R_{2b}}{(1 - i0.5R_{2b}^2) \sinh(R_{1b} + iR_{1b}) + (1 - i)R_{2b} \cosh(R_{1b} + iR_{1b})} \quad (3.36)$$

$$S_3 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\mu_{r2}\sigma_3}{\mu_{r3}\sigma_2}}} \quad (3.37)$$

onde:

$$R_{1a} = \frac{r_2 - r_1}{\delta_2}; \quad R_{2a} = \frac{\mu_{r2} \delta_2}{r_2}; \quad R_{1b} = \frac{r_3 - r_2}{\delta_3}; \quad R_{3b} = \frac{\mu_{r3} \delta_3}{r_3}.$$

μ_{r2} = permeabilidade magnética relativa da região 2;

μ_{r3} = permeabilidade magnética relativa da região 3;

δ_2 =profundidade de penetração do campo na região 2;

δ_3 = profundidade de penetração do campo na região 3.

O conceito de profundidade de penetração já foi discutido no capítulo 2 e definido pela equação 2.5.

As simplificações adotadas para o cálculo analítico do coeficiente "C" com o intuito de tornar o problema matematicamente mais tratável limitam a validade dos resultados às condições:

- O espaçamento entre os condutores deve ser muito menor que a distância entre o ponto de observação do campo (ponto "P" da figura 3.2) e a origem das coordenadas (ponto (0,0));
- O afastamento dos condutores da origem, representado na figura 3.2 por " r_b ", deve ser muito menor do que a distância entre o ponto de observação ("P"), ambos referenciados com a origem das coordenadas (0,0);
- O valor de " p ", definido pela equação 3.3, dos materiais que constituem a blindagem devem ser muito maior do que 1. Isto geralmente ocorre para os materiais mais comuns utilizados como o alumínio ($p \cong 132$) e o aço carbono ($p \cong 800$);
- Por fim, as equações 3.34 a 3.37 são válidas somente quando o material no interior da blindagem for paramagnético e o exterior ferromagnético como o alumínio e o aço [18].

Mesmo mantendo-se as condições acima estabelecidas, a referência [18] salienta que erros de 5 a 10% no valor da indução magnética ou campo na presença da blindagem cilíndrica podem ser comuns devido às simplificações adotadas nas deduções.

O fator de blindagem apresentado pela configuração cilíndrica não é influenciado com a posição de observação do campo (ponto "P"); isto não acontece com a utilização de chapas metálicas.

3.3- Blindagem do Campo Magnético Produzido por Fontes de Baixa Impedância.

As fontes de baixa impedância também estão presentes nos sistemas de potência. Os enrolamentos dos transformadores caracterizam este tipo de fonte de campo magnético conforme já foi dito.

A contenção de campos magnéticos produzidos por este tipo de fonte é tão problemática quanto no caso das fontes de alta impedância, justificando seu estudo.

A fonte de campo é representada aqui por único "loop" circular de corrente posicionado sobre o plano "z" num sistema de coordenadas cilíndricas. A configuração de blindagem é a de chapas metálicas planas com um e dois níveis de blindagem como nas configurações anteriores.

A figura 3.3 apresenta o esquema da fonte de campo e blindagem descritos acima.

Novamente as equações apresentadas nos permitem determinar a indução magnética em qualquer das quatro regiões das figuras 3.3.

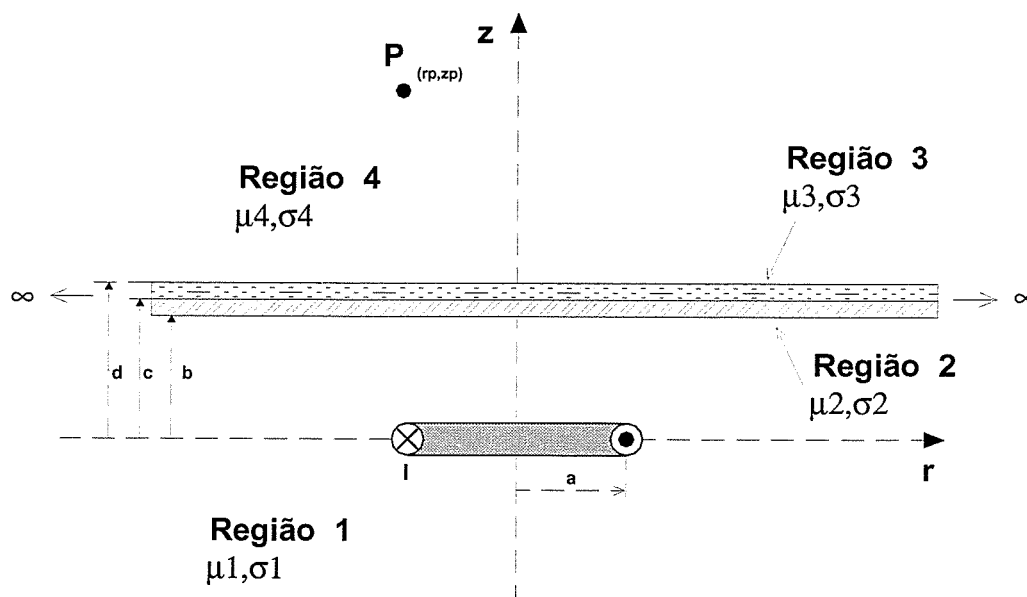


Figura 3.3: Configuração representando um "loop" de corrente com a blindagem (dois níveis).

Novamente a solução da equação de difusão do potencial vetor magnético (3.38) é necessária. Agora a geometria da fonte de campo sugere a utilização do sistema de coordenadas cilíndricas.

$$\nabla^2 \bar{A}_n(r, z) - j\rho_n^2 \bar{A}_n(r, z) = 0 \quad (3.38)$$

Com a simetria cilíndrica do problema pode ser observado que:

$$\bar{A} = A_\phi; A_r = 0; \frac{\partial}{\partial z} = 0 \quad (3.39)$$

assim,

$$\nabla \cdot \bar{A} = 0 \quad (3.40)$$

e:

$$\nabla \times \bar{A} = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z} \hat{r} + \left\{ \frac{\partial A_\phi}{\partial r} + \frac{1}{r} A_\phi \right\} \hat{z} \quad (3.41)$$

Com algumas manipulações matemáticas [19] e o auxílio da identidade vetorial

$$\nabla^2 \bar{A} = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla \times \nabla \times \bar{A} \quad (3.43)$$

a equação do vetor potencial magnético, em coordenadas cilíndricas, toma a forma:

$$\frac{\partial^2 A_\phi}{\partial z^2} - j\rho_n^2 A_\phi = \frac{1}{r^2} A_\phi - \frac{1}{r} \frac{\partial A_\phi}{\partial r} - \frac{\partial^2 A_\phi}{\partial r^2} \quad (3.43)$$

Com a aplicação da técnica de separação de variáveis e substituindo $A_\phi = A_r(r)A_z(z)$ em (3.43) é obtido, assim como no caso da fonte de alta impedância, duas equações com uma variável cada [19]:

$$\frac{d^2 A_{z,n}}{dz^2} = \gamma_n^2 A_{z,n} \quad (3.44)$$

para a variável z , e:

$$\frac{d^2 A_{r,n}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{r,n}}{dr} = -\left(k^2 - \frac{1}{r^2}\right) A_r \quad (3.45)$$

para a variável "r".

As variáveis " ρ_n " e " γ_n " já foram definidas respectivamente pelas equações 3.3 e 3.7.

As soluções das equações 3.5 e 3.6 são respectivamente [16,19]:

$$A_{z,n} = C_n e^{-\gamma_n z_p} + D_n e^{\gamma_n z_p} \quad (3.46)$$

$$A_{r,n} = B_n J_1(kr_p) + A_n Y_1(kr_p) \quad (3.47)$$

onde, J_1 e Y_1 representam as funções de "BESSEL" de primeira ordem do primeiro e segundo tipo respectivamente.

As constantes " B_n " e " A_n " na equação 3.47 foram determinadas, considerando as condições de contorno do problema, por [19] e valem:

$$B_n = \frac{\mu_n a l}{2} \frac{k}{\gamma_n} J_1(ka); \quad A_n = 0. \quad (3.48)$$

sendo:

a = raio do "loop" de corrente em metros;

l = corrente elétrica que circula no "loop".

Um raciocínio análogo quando da dedução da equação do potencial vetor magnético para fontes de alta impedância nos leva a:

$$\bar{A}_{\phi n} = \int_0^{\infty} [C_n e^{-\gamma_n z_p} + D_n e^{\gamma_n z_p}] \frac{\mu_n a l k}{2\gamma_n} J_1(ka) J_1(kr_p) dk \quad (3.49)$$

Aplicando 3.49 em 3.1, são determinados os componentes da indução magnética na direção "r" e "z" respectivamente:

$$\bar{B}_{r,n} = - \int_0^{\infty} \gamma_n [-C_n e^{-\gamma_n z_p} + D_n e^{\gamma_n z_p}] \frac{\mu_n a k}{2\gamma_n} J_1(ka) J_1(kr_p) dk \quad (3.50)$$

$$\bar{B}_{z,n} = \int_0^{\infty} [C_n e^{-\gamma_n z_p} + D_n e^{\gamma_n z_p}] \frac{\mu_n a k^2}{2\gamma_n} J_1(ka) J_0(kr_p) dk \quad (3.51)$$

Considerando, mais uma vez, a continuidade do componente normal do vetor indução magnética e do componente tangencial do vetor campo magnético entre as interfaces através das relações (3.52) e (3.53), pode – se armar dois sistemas análogos aos (3.25) e (3.26), representados conforme (3.54) e (3.55).

As considerações feitas a respeito das constantes "C₁" e "D₄" no caso da fonte de alta impedância são válidas também neste caso.

$$\bar{B}_{z,n} = \bar{B}_{z,n+1} \quad (3.52)$$

$$\frac{\bar{B}_{r,n}}{\mu_n} = \frac{\bar{B}_{r,n+1}}{\mu_{n+1}} \quad (3.53)$$

Assim a constante "C₄" é calculada de acordo com a equação (3.28), ficando a indução magnética na região quatro determinada pelas equações (3.56) e (3.57), sendo (3.56) o vetor indução magnética resultante em um ponto "P (r, z)" qualquer.

$$\Delta_H = \begin{vmatrix} \frac{\mu_1}{\gamma_1} e^{\gamma_1 b} & -\frac{\mu_2}{\gamma_2} e^{-\gamma_2 b} & -\frac{\mu_2}{\gamma_2} e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & 0 \\ e^{\gamma_1 b} & e^{-\gamma_2 b} & -e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\mu_2}{\lambda_2} e^{-\gamma_2 c} & \frac{\mu_2}{\lambda_2} e^{\gamma_2 c} & -\frac{\mu_3}{\lambda_3} e^{-\gamma_3 c} & -\frac{\mu_3}{\gamma_3} e^{\gamma_3 c} & 0 \\ 0 & -e^{-\gamma_2 c} & e^{\gamma_2 c} & e^{-\gamma_3 c} & -e^{\gamma_3 c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\mu_3}{\gamma_3} e^{-\gamma_3 d} & \frac{\mu_3}{\gamma_3} e^{\gamma_3 d} & -\frac{\mu_4}{\lambda_4} e^{-\gamma_4 d} \\ 0 & 0 & 0 & -e^{-\gamma_3 d} & e^{\gamma_3 d} & e^{-\gamma_4 d} \end{vmatrix} \quad (3.54)$$

$$\Delta C_4 = \begin{vmatrix} \frac{\mu_1}{\gamma_1} e^{-\gamma_1 b} & -\frac{\mu_2}{\gamma_2} e^{-\gamma_2 b} & -\frac{\mu_2}{\gamma_2} e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & -\frac{\mu_1}{\gamma_1} e^{-\gamma_1 b} \\ e^{\gamma_1 b} & e^{-\gamma_2 b} & -e^{\gamma_2 b} & 0 & 0 & e^{-\gamma_1 b} \\ 0 & \frac{\mu_2}{\lambda_2} e^{-\gamma_2 c} & \frac{\mu_2}{\lambda_2} e^{\gamma_2 c} & -\frac{\mu_3}{\lambda_3} e^{-\gamma_3 c} & -\frac{\mu_3}{\gamma_3} e^{\gamma_3 c} & 0 \\ 0 & -e^{-\gamma_2 c} & e^{\gamma_2 c} & e^{-\gamma_3 c} & -e^{\gamma_3 c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\mu_3}{\gamma_3} e^{-\gamma_3 d} & \frac{\mu_3}{\gamma_3} e^{\gamma_3 d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e^{-\gamma_3 d} & e^{\gamma_3 d} & 0 \end{vmatrix} \quad (3.55)$$

$$\bar{B}_{r,4} = \int_0^{\infty} \gamma_4 C_4 e^{-\gamma_4 z_p} \frac{\mu_4 a k}{2\gamma_4} J_1(ka) J_1(kr_p) dk \quad (3.56)$$

$$\bar{B}_{z,4} = \int_0^{\infty} C_4 e^{-\gamma_4 z_p} \frac{\mu_4 a k^2}{2\gamma_4} J_1(ka) J_0(kr_p) dk \quad (3.57)$$

$$\bar{B}_{R,4} = B_{z,4} + B_{r,4} \quad (3.58)$$

Para o cálculo da indução magnética dentro da blindagem metálica deve-se, assim como no caso da fonte de alta impedância, determinar as constantes "C₂" e "D₂" no caso da primeira chapa e "C₃" e "D₃" para o mesmo cálculo dentro da segunda blindagem.

3.4- Equações do Campo Magnético Considerando Somente um Nível ou a Ausência Total de Blindagem.

Para se obter a indução magnética na região blindada com o emprego de somente um nível de blindagem (uma chapa metálica) basta considerar, nas deduções das equações nos três casos apresentados, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica da região 3 (μ_3 e σ_3) iguais às da região quatro, ou seja, iguais às do vácuo.

Da mesma maneira, objetivando determinar a indução magnética resultante produzida por um conjunto de condutores retilíneos ou por um "loop" de corrente mostrado nas figuras 3.1 e 3.3 na ausência da blindagem metálica, deve-se também considerar os parâmetros constitutivos da segunda região (μ_2 e σ_2) iguais aos da região quatro. Neste caso, o coeficiente "C₄" nos casos apresentados se iguala a um e a indução magnética é calculada pelo conjunto de equações (3.59) a (3.62) a seguir.

Para no caso da fonte de baixa impedância ("loop" circular de corrente):

$$\bar{B}_{r,4} = \int_0^{\infty} \gamma_4 e^{-\gamma_4 z_p} \frac{\mu_4 a k}{2\gamma_4} J_1(ka) J_1(kr_p) dk \quad (3.59)$$

$$\bar{B}_{z,4} = \int_0^{\infty} e^{-\gamma_4 z_p} \frac{\mu_4 a k^2}{2\gamma_4} J_1(ka) J_1(kr_p) dk \quad (3.60)$$

Para o caso da fonte de alta impedância (condutores longos de corrente):

$$B_{x,4} = - \int_0^{\infty} \gamma_4 e^{-\gamma_4 y} \sum_{m=1}^M \frac{\mu_0 I_m e^{ky_m}}{2\pi} \cos k(x_p - x_m) dk \quad (3.61)$$

$$B_{y,4} = \int_0^{\infty} k e^{-\gamma_4 y} \sum_{m=1}^M \frac{\mu_0 I_m e^{ky_m}}{2\pi} \sin k(x_p - x_m) dk \quad (3.62)$$

3.5- Considerações Finais.

O objetivo principal deste capítulo foi apresentar um método alternativo de cálculo do campo magnético na presença de blindagens metálicas. Todas as equações deduzidas neste capítulo são facilmente implementadas com um tempo de cálculo bem menor daquele demandado no método de elementos finitos.

Apesar de não ficar explícito nas deduções das equações, a indução magnética ou campo magnético na presença da blindagem são, no caso da blindagem com chapas planas, completamente independentes da distância entre a blindagem e a

fonte. O mesmo não acontece, devido às simplificações usadas, quando o método de "Schelkunoff" é empregado.

No próximo capítulo é utilizado um programa baseado no método de elementos finitos em duas dimensões para que sejam validadas as equações deduzidas neste capítulo.

Fica claro que a concordância dos resultados para todos os tipos de fontes e configurações de blindagem é excelente.

4- Validação do Método do Potencial Vetor Magnético.

4.1- Introdução.

Este capítulo tem como tema central a validação computacional e experimental do método do potencial vetor magnético, utilizado na determinação da indução magnética (campo magnético) na presença da blindagem para fontes de alta e baixa impedância.

Para isto foram implementadas rotinas no Matlab[®] para a resolução das equações propostas no capítulo anterior e um "software" de distribuição livre (quando da realização deste trabalho), baseado no método de elementos finitos em duas dimensões ("FEMM[®]"), foi utilizado como meio de comparação computacional dos resultados.

Para a validação experimental, algumas medições realizadas no laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT) da UFMG foram feitas utilizando chapas de alumínio como material da blindagem. Na montagem, um sistema de condutores trifásicos desequilibrados a quatro fios serviu como fonte de campo de alta impedância e um "loop" circular de corrente como fonte de baixa impedância.

Apesar das restrições - abordadas oportunamente no transcorrer do capítulo - entre os cálculos computacionais e as medições, principalmente para fontes de alta impedância, os resultados mostraram que o método do potencial vetor oferece resultados confiáveis.

A proposta deste capítulo não é a comparação entre o desempenho dos materiais da blindagem nem entre as diferentes configurações, fatos estes que são abordados oportunamente ainda neste trabalho.

4.2- Materiais Utilizados na validação.

Foram usados nas simulações computacionais dois dos materiais mais utilizados em projetos de blindagem de campo magnético de 60 Hz: o alumínio 99.5% e o aço carbono SAE 1010.

Segue abaixo uma breve descrição destes dois materiais.

1- Aço carbono SAE 1010.

Apesar de não ser um aço produzido para fins elétricos, o SAE 1010 é um material constantemente citado em estudos de blindagem em baixas frequências, pois é barato e facilmente encontrado no mercado. São geralmente materiais vendidos em forma de chapas de 2 m de comprimento por 1 m de largura com espessura variando de 1 mm a 3 mm.

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 também muito utilizados em estudos de blindagem [11,20]. Em termos numéricos esta condutividade é da ordem de 5.76×10^6 S/m significando 10% ($\sigma_r=0.10$) da condutividade elétrica do cobre.

Alguns autores citam que a permeabilidade magnética relativa ao vácuo deste material pode variar de 200 a 500, dependendo do valor do campo magnético a que é submetido. Este fato influencia o desempenho destes materiais na blindagem podendo, em alguns casos, vir a ser prejudicial.

2- Alumínio 99,5%.

O alumínio puro é um dos materiais mais utilizados na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência. Sua alta condutividade elétrica em relação à maioria dos materiais ferromagnéticos lhe confere um bom desempenho na contenção do campo eletromagnético.

Em termos numéricos o valor de sua condutividade elétrica atinge 35×10^6 S/m ($\sigma_r=0.6$) o que significa um valor seis vezes maior que a do aço SAE 1010.

A maior condutividade elétrica faz com que o alumínio, mesmo possuindo permeabilidade magnética unitária, apresente melhor desempenho na blindagem do que o SAE 1010, principalmente em regiões mais afastadas da fonte de campo [8].

4.3- Validação Computacional.

A validação computacional do método do potencial vetor magnético foi feita através de comparações entre implementações no Matlab® e um programa de distribuição livre baseado no método de elementos finitos em duas dimensões chamado "FEMM®".

4.3.1- Considerações gerais.

Algumas considerações gerais a respeito das simulações computacionais devem ser salientadas. Tais considerações são válidas para todos os casos apresentados no decorrer do capítulo.

A tabela 4.1 apresenta as características físicas dos materiais utilizados nas simulações. A permeabilidade magnética é relativa ao vácuo e a condutividade elétrica é relativa ao cobre.

Os valores da permeabilidade magnética e da condutividade elétrica são representados pelos seus valores relativos ao vácuo e ao cobre respectivamente.

Materiais	Características físicas dos materiais		
	Condutividade	Permeabilidade	Espessura (mm)
Alumínio	0.60	1	0.5 ou 1
SAE 1010	0.10	300	0.5 ou 1

Tabela 4.1: Caracterização dos materiais usados nas simulações.

- Quanto ao método de elementos finitos devemos considerar:

1- A determinação do tamanho da região de cálculo associada a um número ideal de densidade de malha.

Estes dois parâmetros são fundamentais para a obtenção de resultados precisos. De uma maneira geral quanto maior a região delimitada para os cálculos e quanto mais densa estiver a malha, mais precisos são os resultados.

Nos casos simulados neste trabalho, estes dois fatores foram ajustados de maneira a não prejudicarem os resultados e nem solicitar um esforço computacional além da capacidade das máquinas disponíveis.

É recomendado [21] que em problemas envolvendo materiais condutores, a densidade da malha em seu interior seja tanto maior quanto menor for a profundidade de penetração do campo magnético no mesmo. Uma regra funcional diz que a espessura da malha deverá ser de 4 a 6 vezes menor que a profundidade de penetração. Isto foi respeitado em todas os casos que serão apresentados.

Fica claro a dificuldade de se utilizar o método de elementos finitos em situações que envolvam materiais com valores elevados de permeabilidade magnética e condutividade elétrica.

2- Escolha adequada da condição de contorno do problema.

O método de elementos finitos é mais bem aplicado em problemas onde as fronteiras são fechadas e nelas pode ser definido com precisão o valor do potencial vetor magnético.

Em um grande número de problemas, entre os quais os deste trabalho, a fronteira onde o potencial vetor é conhecido ($\mathbf{A}=0$) é somente no infinito e desta maneira uma região de cálculo infinita deveria ser estabelecida. Este tipo de problema é chamado aberto e condições de contorno com características especiais devem ser estabelecidas para não prejudicar os resultados.

Uma das mais usadas e indicadas é a condição de fronteira assintótica [21]. Nela são definidos alguns coeficientes que são função do tamanho da região adotada para os cálculos. Algumas condições para o seu emprego devem ser respeitadas, são elas:

- a- a região de cálculo deve ser circular ou na medida do possível, o mais próximo de um círculo;
- b- a fonte de campo deve estar localizada mais próxima possível do centro da região de cálculo.

A referência [21] descreve com detalhes a escolha das condições de fronteira para problemas abertos.

- Quanto à implementação numérica das equações do método do potencial vetor, deve-se considerar:

1- A indução magnética resultante é sempre determinada, conforme foi apresentado no capítulo anterior, através de uma integral variando de zero ao infinito e para ser possível a resolução numérica destas integrais, torna-se necessária a fixação de um limite superior de integração. Este limite é função da coordenada do ponto de observação, da separação entre os condutores (fonte de alta impedância) e do raio do "loop" de corrente (fonte de baixa impedância).

As figuras 4.1 e 4.2 exemplificam como o integrando dos componentes da indução magnética para fontes de alta impedância (equações 3.29 e 3.30) e de baixa impedância (equações 3.56 e 3.57) variam com a variável de integração " k ", para um ponto de observação com coordenadas, em centímetros, de (20,20).

A separação entre os condutores assim como o raio do "loop" são fixados em 10 cm e 11 cm respectivamente.

Fica claro pela observação das figuras 4.1 e 4.2 que o limite superior de integração, poderia ser fixado em " $k=50$ " para ambas as fontes uma vez que com este valor o integrando já se anulou não contribuindo mais para o valor final da integral.

Nas simulações apresentadas neste capítulo, tanto a separação dos condutores quanto o raio do "loop" de corrente são mantidos constantes, no entanto, o campo é calculado em diversos pontos o que leva a uma mudança no aspecto das figuras 4.1 e 4.2. e, conseqüentemente, no limite superior de integração.

Este fato é considerado nas implementações das equações e o limite de integração é sempre recalculado para cada novo ponto de cálculo.

Os resultados obtidos nas simulações serão apresentados e discutidos ainda neste capítulo.

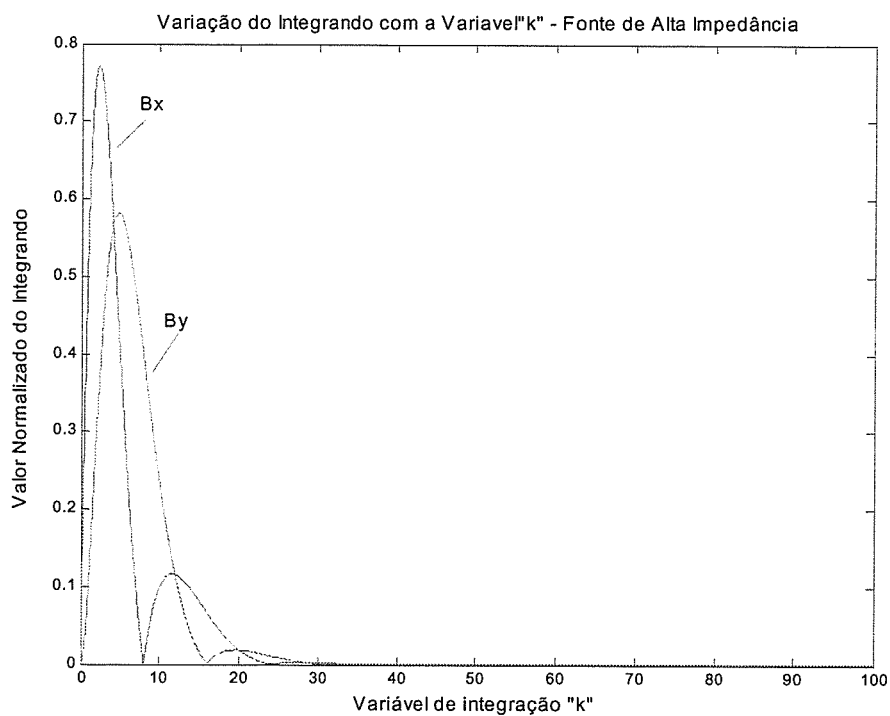


Figura 4.1: Variação do integrando em função da variável de "k" – fonte de alta impedância.

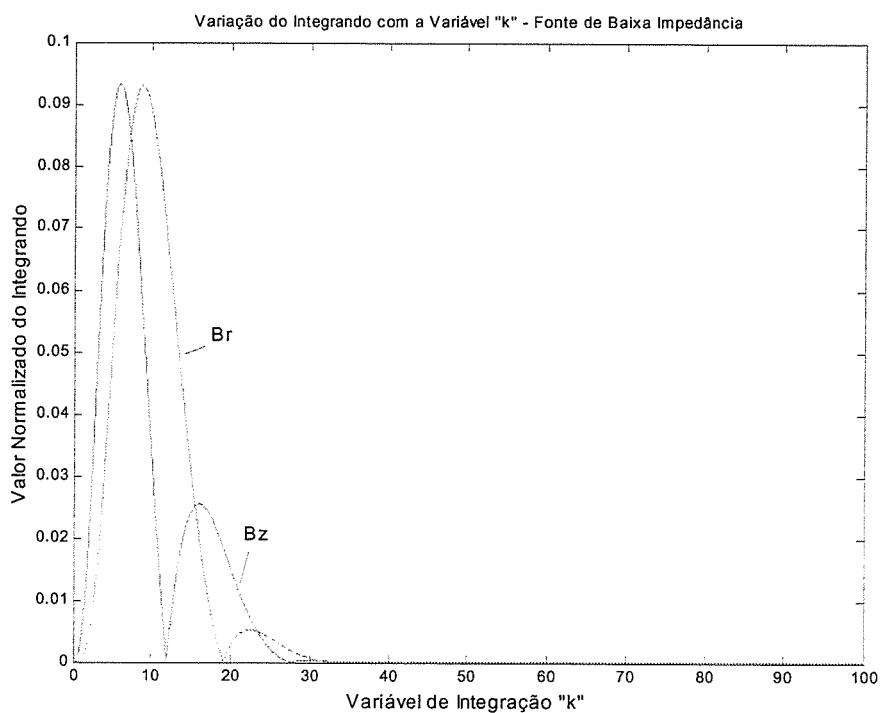


Figura 4.2: Variação do integrando em função da variável de "k" – fonte de baixa impedância.

4.3.2- Sistema de condutores trifásico – fonte de alta impedância.

Neste tópico, as equações deduzidas no capítulo anterior para o cálculo da indução magnética para um sistema de condutores trifásico são avaliadas nas configurações de blindagem empregando chapas metálicas e cilindros; para um e dois níveis de blindagem.

Nas simulações realizadas, a espessura total da blindagem foi sempre de 1mm, sendo que na blindagem “sanduíche” a espessura de cada material foi de 0.5 mm cada.

Os valores de correntes considerados em cada condutor para as simulações foram, em todos os casos, de: $I_a=100\angle 0^\circ$; $I_b=100\angle -120^\circ$; $I_c=90\angle 120^\circ$ e $I_n=-(I_a+I_b+I_c)$.

A indução magnética foi determinada ao longo de três linhas comprimento de 2 m cada e distantes de 20, 40 e 60 cm dos condutores conforme está representado na figura 4.4.

Nos gráficos, as siglas “FEM” e “MPV” se referem à respectivamente aos resultados do método de elementos finitos e do método do potencial vetor magnético.

1. Configuração com chapas metálicas.

O método do potencial vetor magnético para esta configuração de blindagem considera a largura das chapas infinita o que é impossível de ser feito no “software” para a validação pelo método de elementos finitos. Para contornar este problema, os condutores foram espaçados de 1 cm e posicionados a 3 cm da blindagem de largura total de 3,4 m.

Desta maneira, para pontos não muito distantes da fonte de campo, a blindagem pode ser considerada infinita e os resultados comparados com sucesso.

A região de cálculo para os elementos finitos foi circular, de raio de 3 m, contendo um total de aproximadamente 190000 nós conforme a figura 4.3.

Com a blindagem posicionada o número de nós nas simulações foi de aproximadamente 300000.

Foram utilizados os materiais cujas respectivas características constitutivas são mostradas na tabela 4.1.

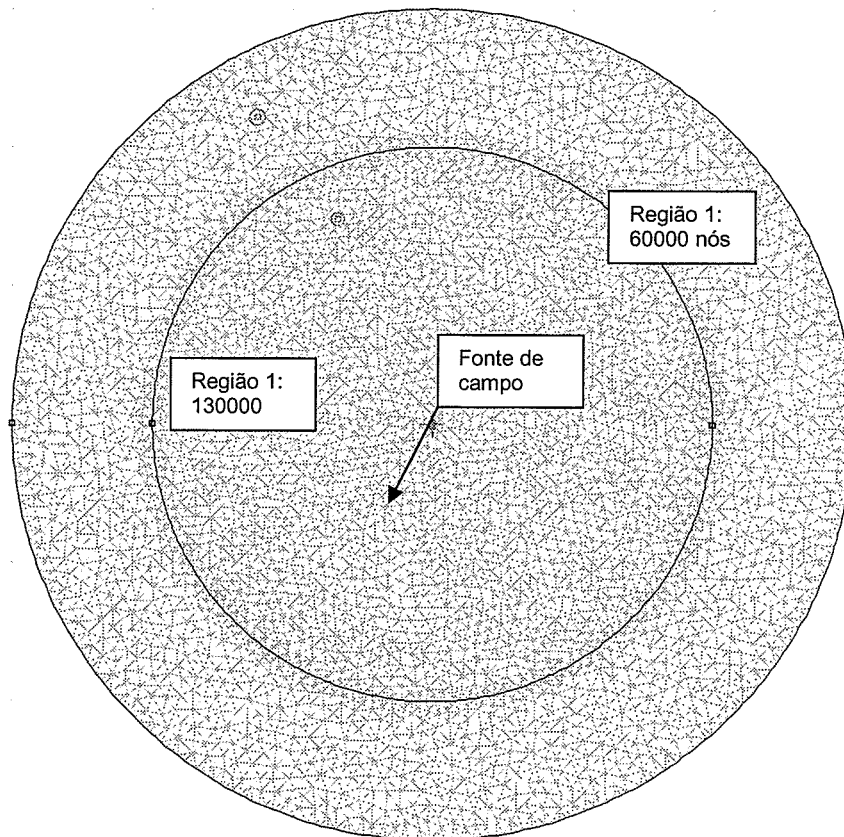


Figura 4.3: Região utilizada para o cálculo de elementos finitos. A malha de cálculo está representada na figura.

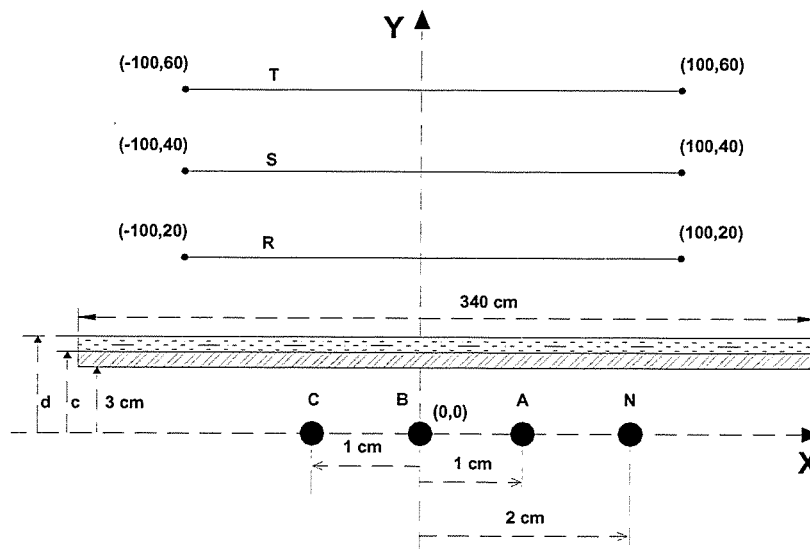


Figura 4.4: Esquema da configuração de blindagem com chapas metálicas planas usadas nas simulações.

Os cálculos foram feitos utilizando um material de cada vez como também a utilização destes em conjunto. As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram que existe uma excelente concordância entre os dois métodos de cálculo utilizados.

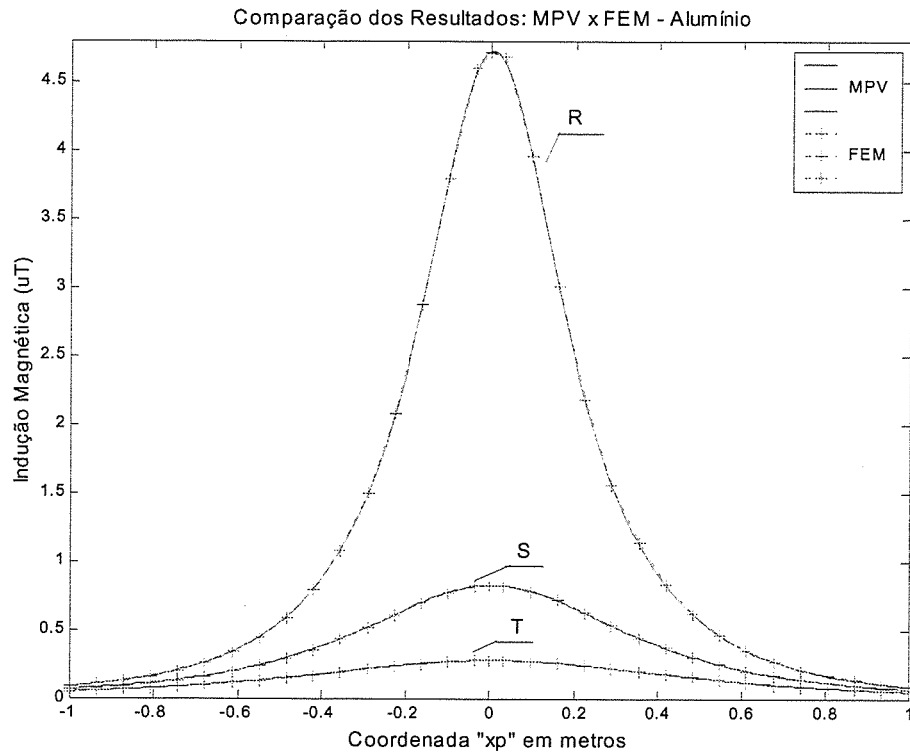


Figura 4.5: Comparação entre os métodos de cálculo: Alumínio 1mm de espessura.

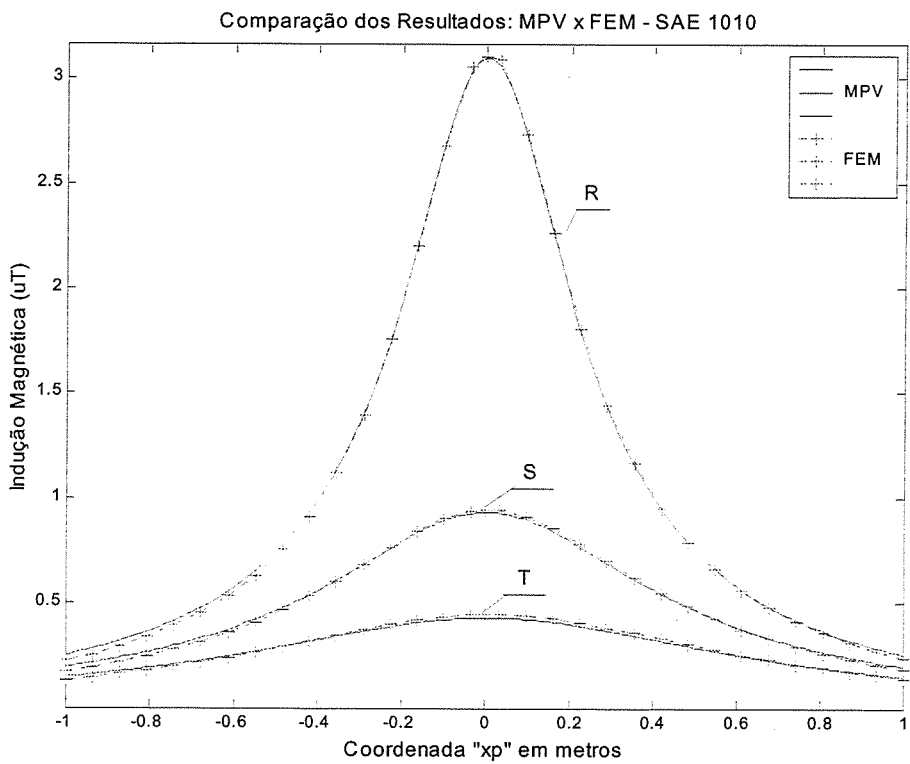


Figura 4.6: Comparação entre os métodos de cálculo: SAE 1010 1mm de espessura.

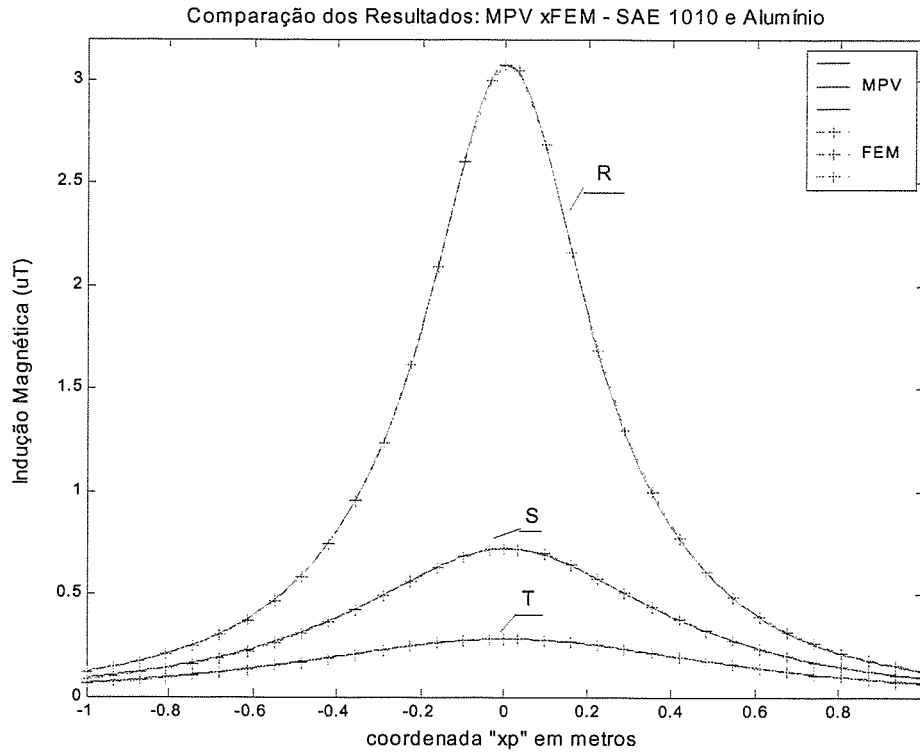


Figura 4.7: Comparação entre os métodos de cálculo: SAE 1010 (0.5 mm) e alumínio (0.5 mm). (Alumínio por cima).

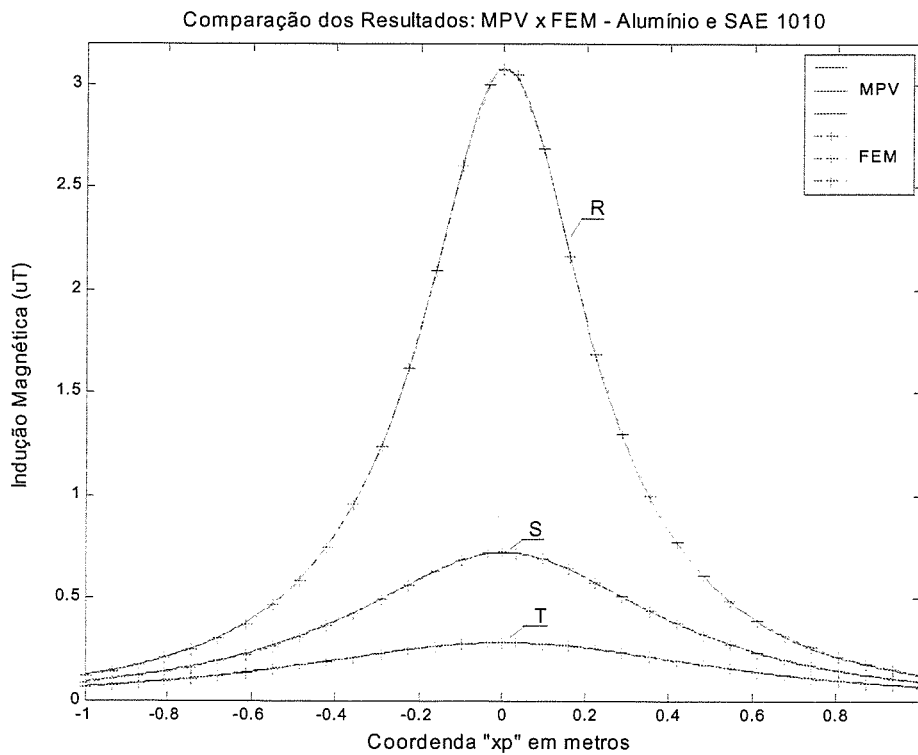


Figura 4.8: Comparação entre os métodos de cálculo: SAE 1010 (0.5 mm) e alumínio (0.5 mm) (SAE por cima)

As figuras 4.7 e 4.8 mostram que não há diferença com relação à ordem no posicionamento das chapas na blindagem “sanduíche”, ou seja, tanto faz o alumínio ser colocado sobre o aço ou o aço sobre o alumínio. Na prática isto deve ser considerado, uma vez que os materiais ferromagnéticos podem apresentar saturação para valores de campos magnéticos elevados e, quando isto acontecer, devem ser posicionados sobre o alumínio para diminuir o campo incidente nos mesmos.

2. Configuração com cilindros metálicos.

A figura 4.9 mostra o esquema adotado para a validação dos resultados.

Os materiais utilizados na blindagem, os espaçamentos entre os condutores e as correntes em cada um foram os mesmos utilizados na configuração de blindagem com chapas metálicas planas.

A região de cálculo para os elementos finitos desta vez foi de raio de 2 m. Este tamanho reduzido em relação à região utilizada no item anterior permitiu que uma maior densidade de malha fosse utilizada com o número de nós mantido em aproximadamente 300000 com a presença da blindagem metálica.

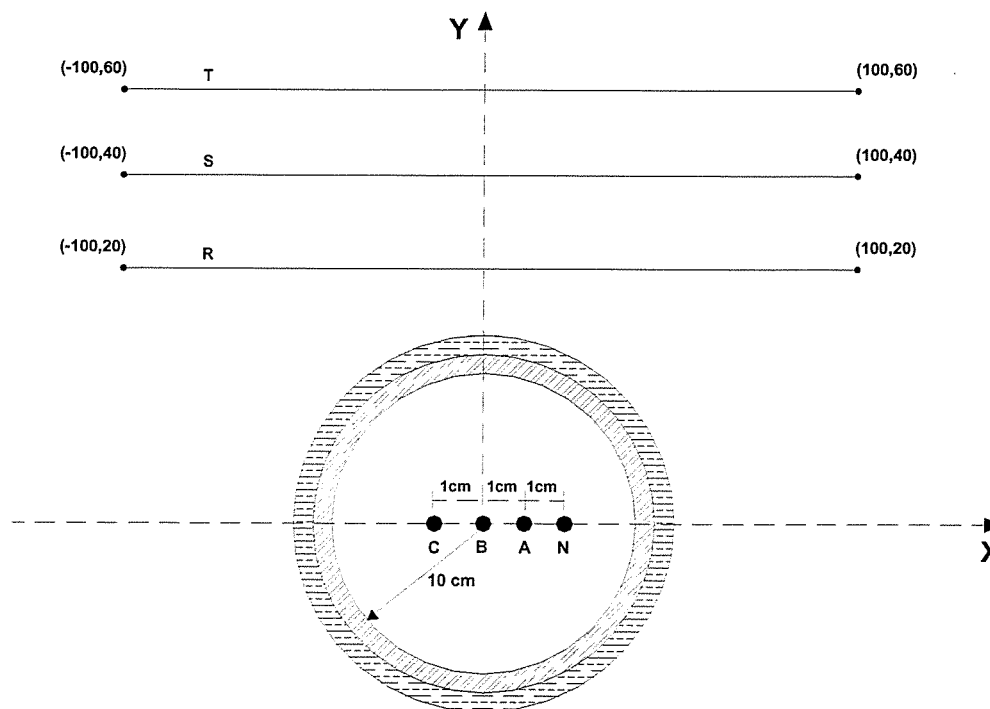


Figura 4.9: Esquema da configuração de blindagem com cilindro metálico usado nas simulações.

As figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram a comparação entre os resultados obtidos.

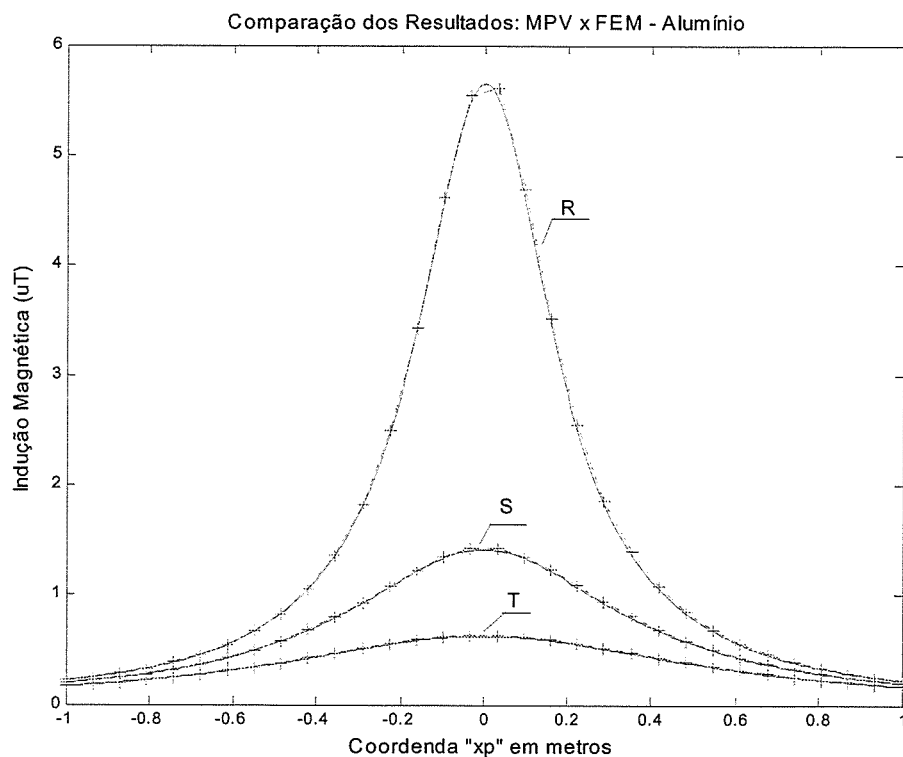


Figura 4.10: Comparação entre os métodos de cálculo: Alumínio 1mm de espessura.

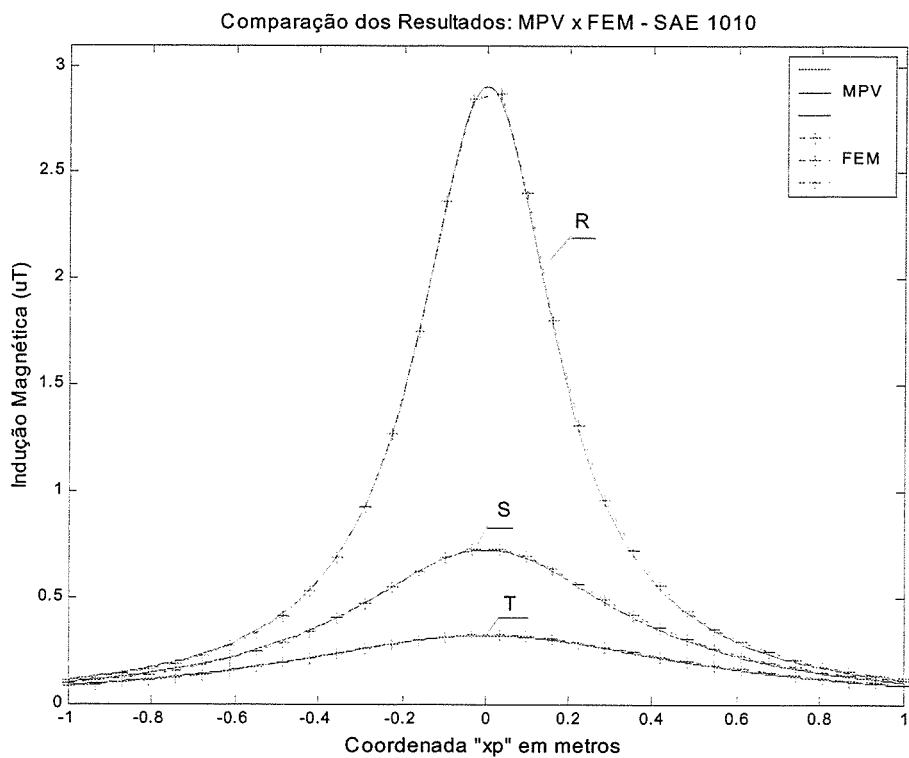


Figura 4.11: Comparação entre os métodos de cálculo: SAE 1010 1mm de espessura

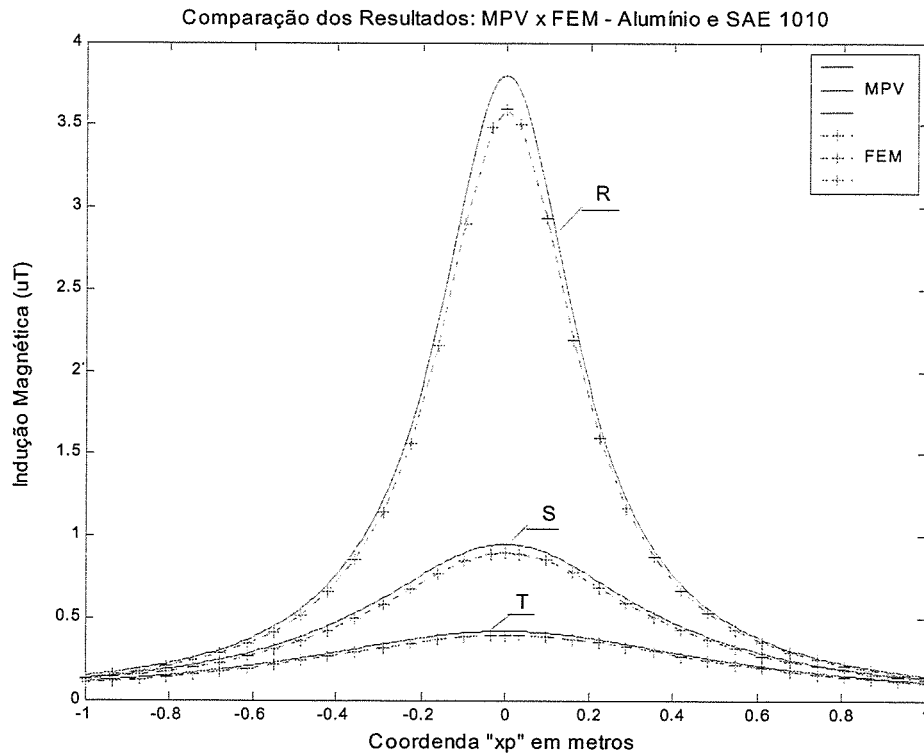


Figura 4.12: Comparação entre os métodos de cálculo: Alumínio (0.5 mm) e SAE 1010 (0.5mm) (SAE por cima)

Fica notório pela figura 4.12 que existe uma pequena diferença entre os resultados. Isto é devido às simplificações na dedução das equações do fator de blindagem. Ainda assim, em termos práticos, os resultados estão bastante próximos.

4.3.3- “Loop” de corrente – fonte de baixa impedância.

É agora apresentada a validação dos resultados obtidos pela aplicação do método do potencial vetor ao campo gerado por um “loop” de corrente para a configuração de blindagem com chapas metálicas planas.

A espessura total da blindagem utilizada nos cálculos foi sempre de 1 mm.

A indução magnética foi determinada ao longo de três linhas com comprimento de 1 m cada e distantes de 20, 40 e 60 cm dos condutores.

O valor da corrente elétrica no “loop” foi de 100 A em todos os casos.

A região de cálculo para os elementos finitos, foi circular de raio de 2.5 m, mas devido à simetria do problema, somente a metade da circunferência foi delimitada.

Pelo mesmo motivo já citado no caso da fonte de alta impedância, a largura (diâmetro) da blindagem foi de 1.6 m com a fonte de campo posicionada a 3 cm da mesma.

As figuras 4.13 e 4.14 mostram, respectivamente a região de cálculo com as malhas e o esquema utilizado nas simulações.

O número de nós foi aproximadamente 150000 com a presença da blindagem. As figuras 4.14 a 4.17 mostram os resultados.

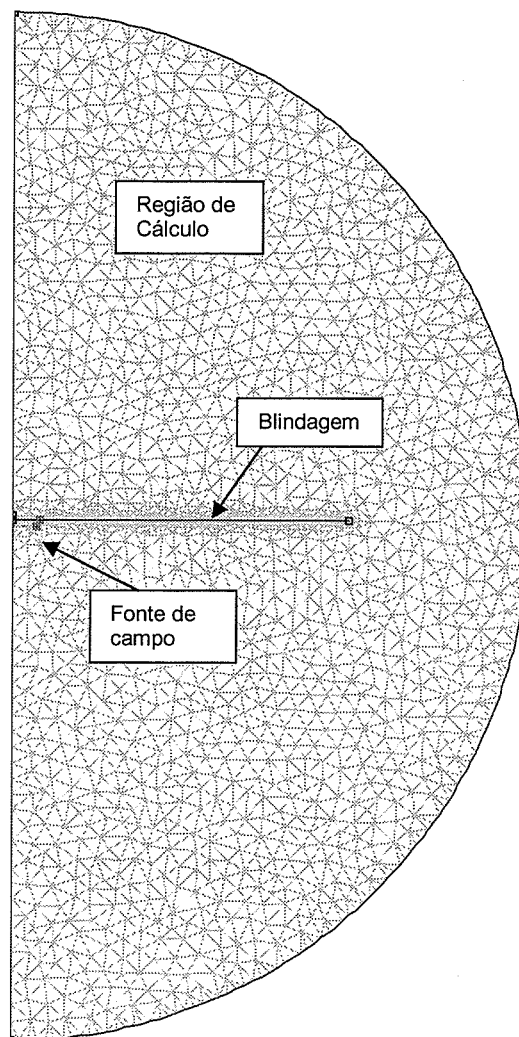


Figura 4.13: Esquema região de cálculo de elementos finitos para a fonte de baixa impedância.

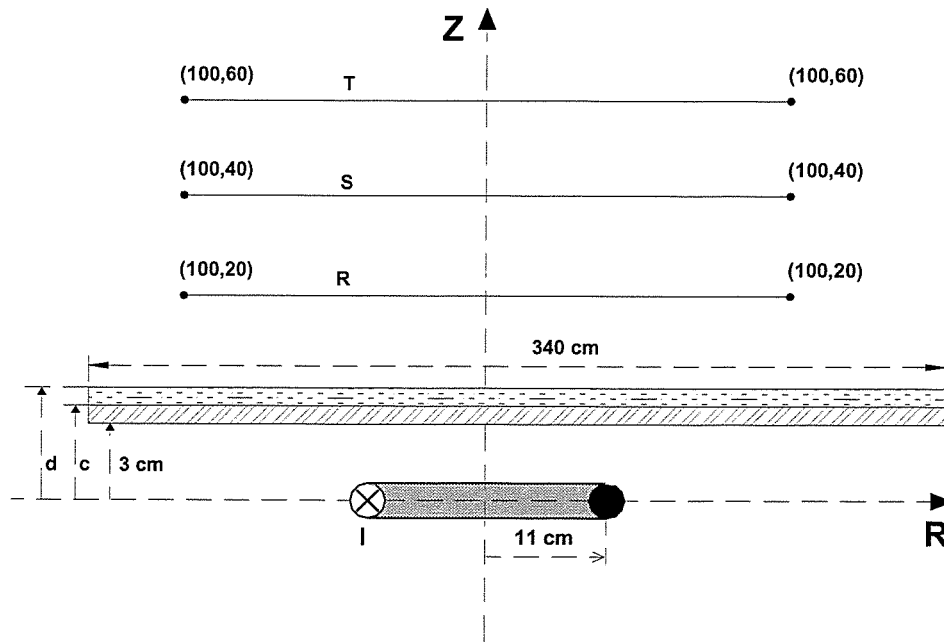


Figura 4.14: Esquema da configuração de blindagem com chapas metálicas usadas nas simulações.

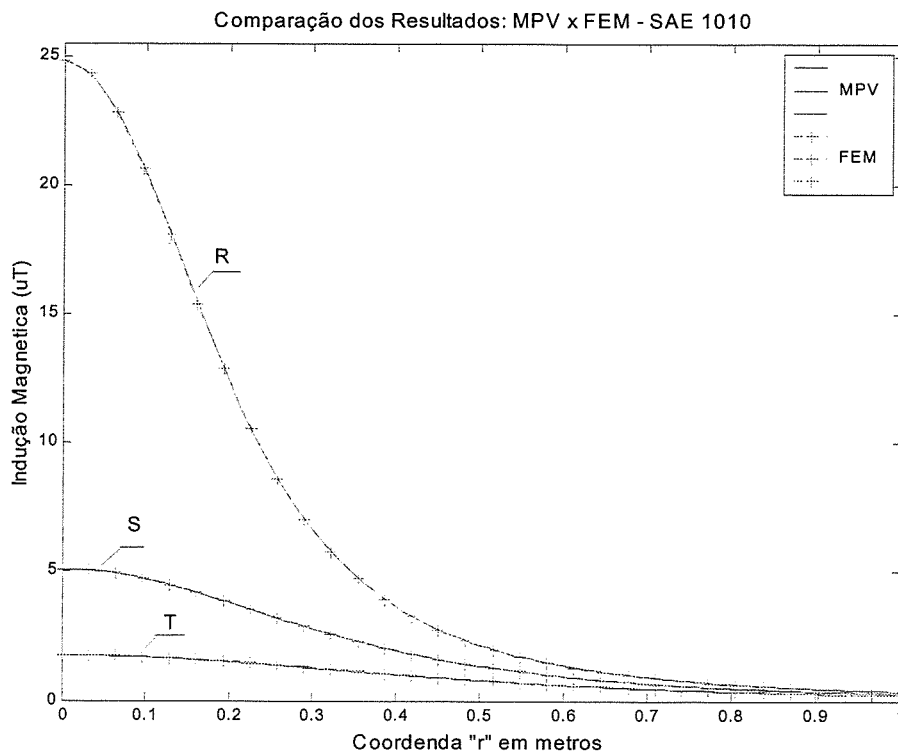


Figura 4.15: Comparação entre os métodos de cálculo: SAE 1010 1mm de espessura.

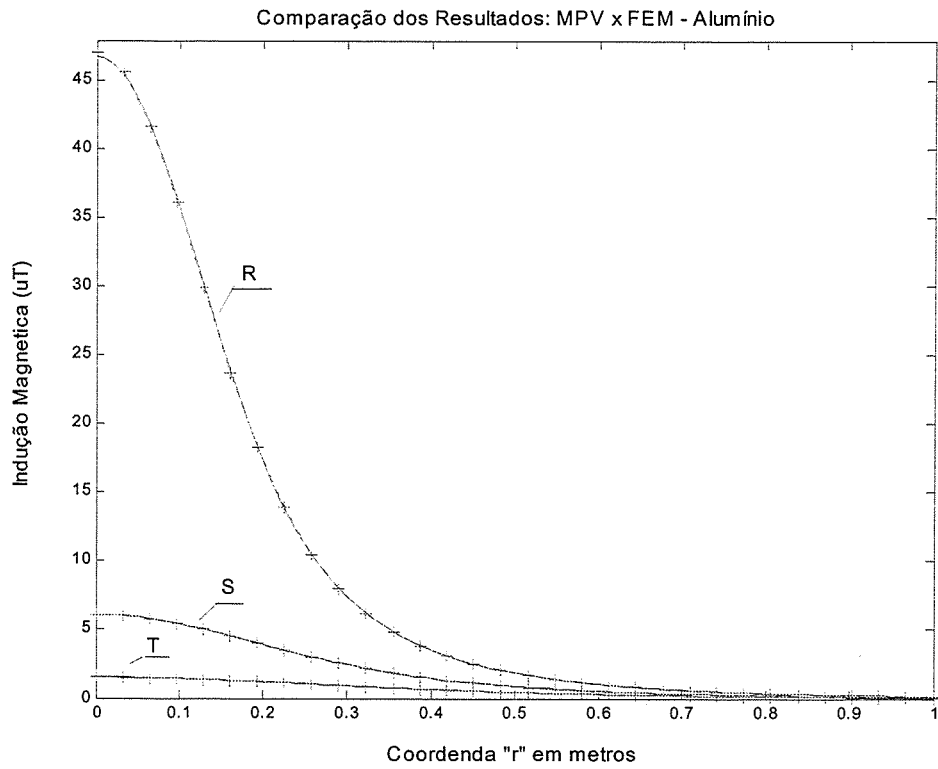


Figura 4.16: Comparação entre os métodos de cálculo: Alumínio 1mm de espessura.

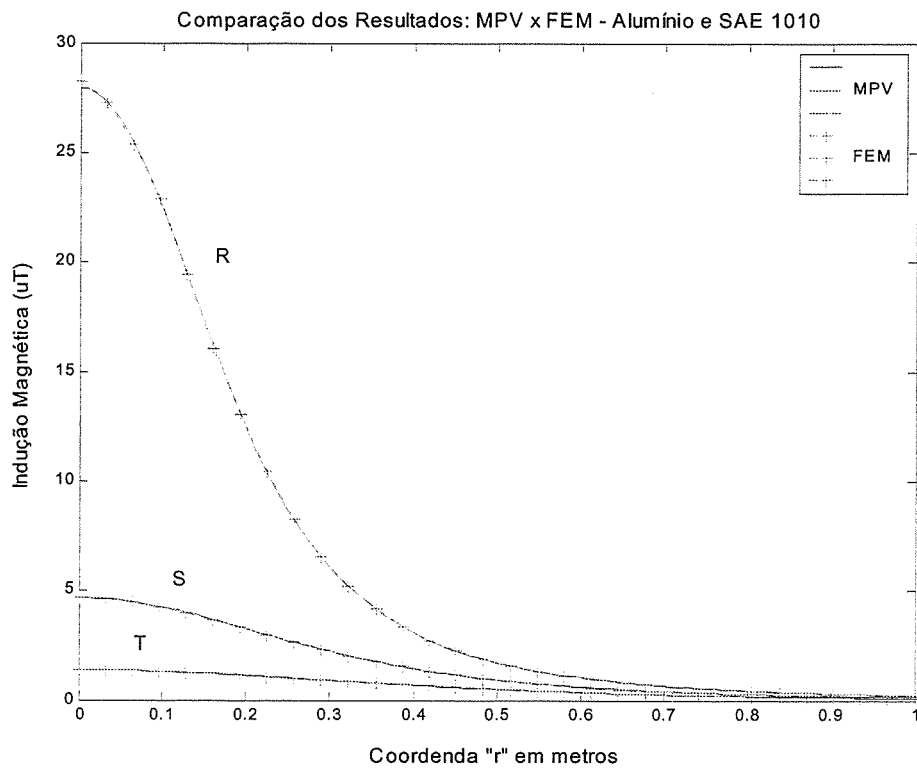


Figura 4.17: Comparação entre os métodos de cálculo: Alumínio (0.5 mm) e SAE 1010 (0.5 mm) (SAE por cima).

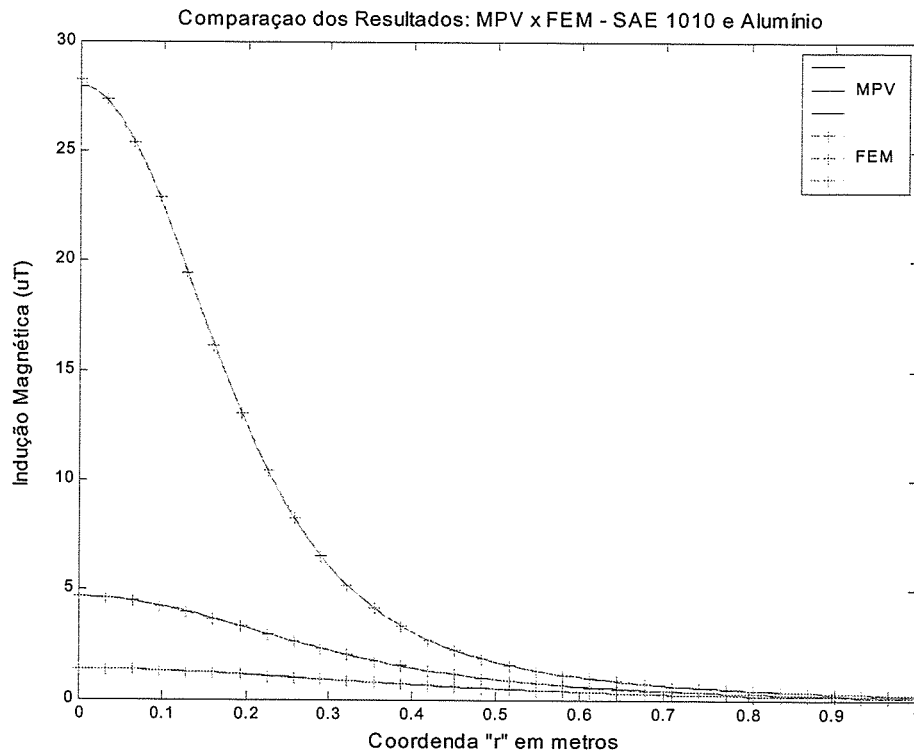


Figura 4.18: Comparação entre os métodos de cálculo: Alumínio (0.5mm) e SAE 1010(0.5 mm) (SAE por cima).

4.4- Validação Experimental.

A validação experimental do método do potencial vetor foi feita através de medições realizadas no Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG (LEAT) para fontes de alta e baixa impedância. A configuração de blindagem utilizada foi a de chapas metálicas planas.

4.4.1- Considerações gerais.

Um dos principais problemas da avaliação do desempenho de materiais ferromagnéticos na blindagem é a determinação da permeabilidade magnética.

É sabido [11] que na maioria dos materiais ferromagnéticos a permeabilidade varia conforme o campo magnético em que o material é submetido. Para cada tipo de material existe uma curva onde a partir desta a permeabilidade é determinada.

Até o momento o método do potencial vetor não contempla a não linearidade dos materiais ferromagnéticos, sendo assim para validá-lo experimentalmente foi utilizado somente o alumínio nos testes.

4.4.2- Bancada de testes – aspectos físicos.

A figura 4.19 mostra o aspecto físico da bancada de testes com o sistema de condutores trifásico posicionado. Foram utilizados condutores de alumínio com 6 m de comprimento cada como fonte de alta impedância e um cabo de cobre também de 1 cm de diâmetro formando um "loop" com raio " r_a " como fonte de baixa impedância conforme mostra a figura 4.20.

Para as medições do campo na vertical foi usada uma estrutura de material não metálico devidamente graduada, que garante a mobilidade do sensor de campo até uma altura de 3,2 m dos condutores.

Medições realizadas no laboratório de Extra Alta Tensão [10,18] têm mostrado que os erros encontrados são menores quando altos valores de indução magnética são medidos. Vale lembrar que os condutores entre as fontes de campo e o transformador são enrolados.

Sendo o campo magnético proporcional ao valor da corrente elétrica, esta deve ser a maior possível a fim de garantir precisão nas medições, sobretudo em regiões afastadas da fonte onde a interferência do campo magnético externo é maior.

Um outro parâmetro que pode aumentar a intensidade da indução magnética é o aumento da separação dos condutores e do raio do "loop" de corrente.

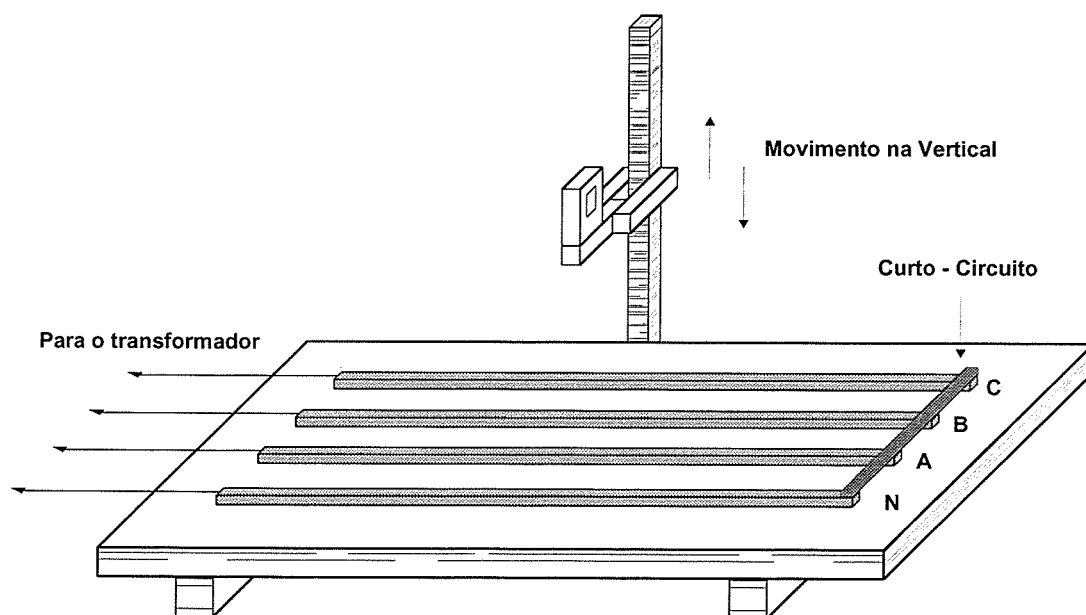


Figura 4.19: Bancada de testes com o sistema de condutores trifásicos a quatro fios.

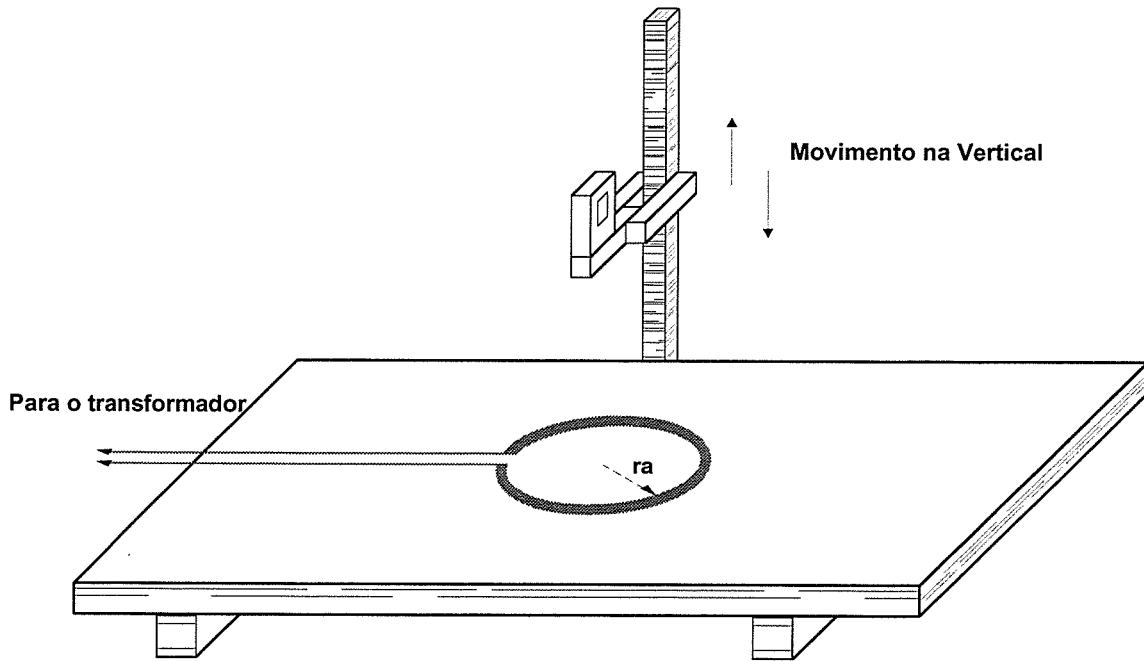


Figura 4.20: Bancada de testes com "loop" de corrente.

No entanto, as dimensões finitas da chapa metálica usada como blindagem não permitem que estes dois últimos parâmetros sejam demasiadamente grandes devido ao fato de que as equações deduzidas no capítulo anterior consideram as dimensões da blindagem muito maiores que as da fonte de campo.

Desta maneira, o espaçamento entre os condutores foi fixado em 10 cm e o raio do "loop" em 11 cm, permitindo uma boa concordância entre os valores medidos e os previstos pelas equações do método do potencial vetor como será mostrado.

As figuras 4.21 (a) e (b) mostram um perfil das fontes de campo posicionadas na bancada juntamente com a blindagem.

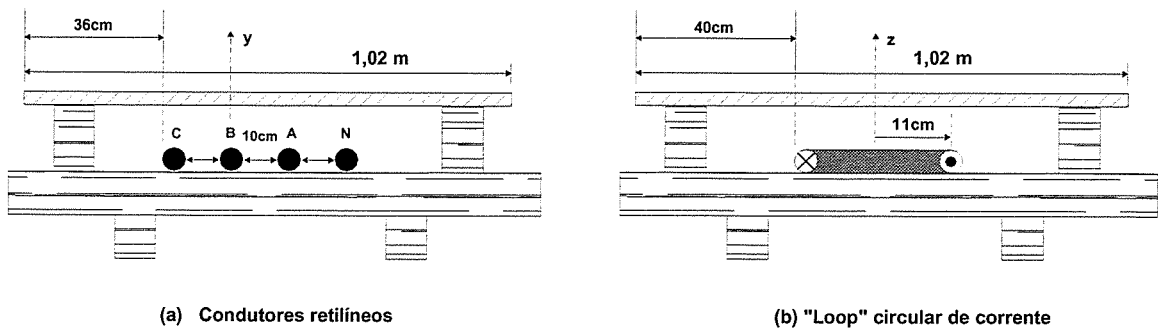


Figura 4.21 (a e b): Perfil das fontes de campo posicionadas na bancada com a presença da chapa metálica.

4.4.3- Sistema de geração e controle das correntes.

Um “varivolt” trifásico e um transformador foram os equipamentos usados para o controle da corrente elétrica das fontes.

A seguir estão listadas as características destes equipamentos:

➤ “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%.

4.4.4- Sistema de medição – características dos instrumentos.

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

As medições de corrente foram feitas utilizando-se os seguintes instrumentos, todos devidamente aferidos:

➤ Amperímetro digital:

Fabricante: Tektronix.

Modelo: DM 251.

➤ Tc - transformador de corrente:

Fabricante: HeB.

Tipo: Ti44-1.

Potência: 5 VA.

Primário: 600 A

Secundário: 5 A

➤ Amperímetro Alicate:

Fabricante: General Electric.

Fundo de escala: 300 A.

➤ Medidor de Campo Magnético:

Fabricante: Wandell & Goltermam.

Escala: 1nT a 100mT.

Faixa de freqüência do equipamento: 5 Hz a 30 kHz.

4.4.5- Medição da indução magnética – comparação dos resultados.

As medições foram realizadas ao longo do eixo “z” que coincidiu com o centro do “loop” de corrente e ao longo do eixo “y” coincidindo com a posição do condutor “B” no sistema trifásico conforme mostra a figura 4.21. As figuras 4.22 e 4.23 mostram o esquema de controle de corrente juntamente com a bancada de testes.

A espessura das chapas de alumínio foi de 4.76mm tendo, cada uma, 1.02 m de largura e 2 m de comprimento.

Como o comprimento do sistema trifásico é de 6 m, foi necessária a utilização de 3 chapas para a blindagem total da bancada no caso dos condutores trifásicos. No “loop” de corrente somente uma chapa foi o suficiente.

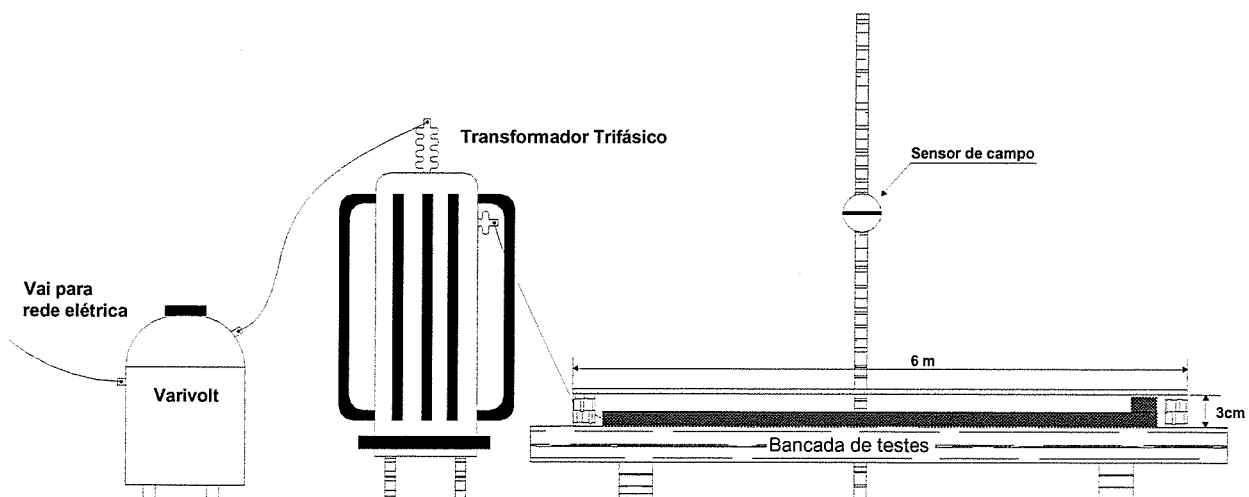


Figura 4.22: Perfil da bancada de testes com o sistema trifásico e blindagem metálica.

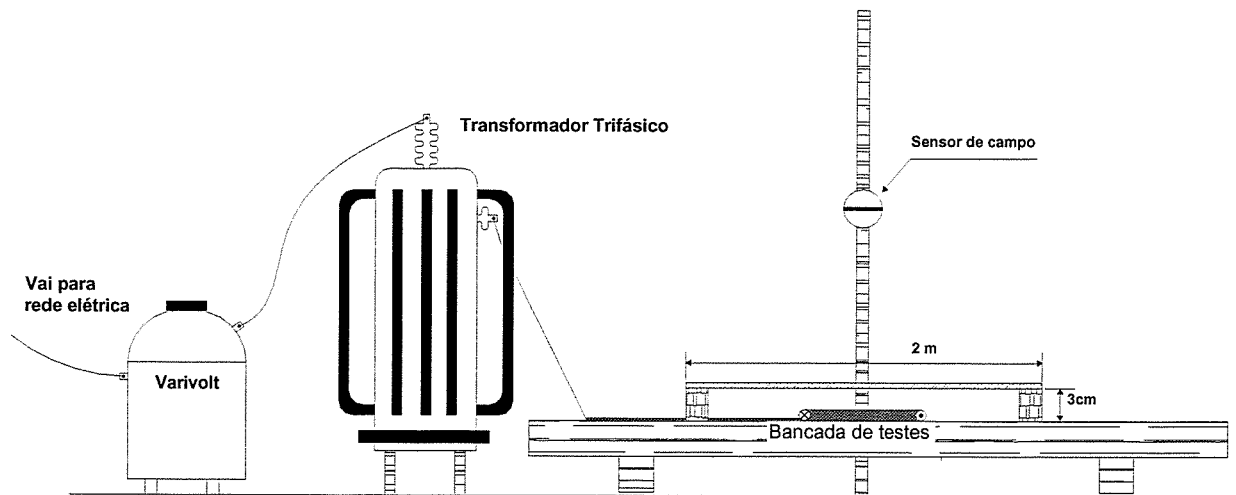


Figura 4.23: Perfil da bancada de testes com o "loop" de corrente e blindagem metálica.

As medições foram realizadas na vertical de 10 em 10 cm até uma altura de 1 m da fonte de campo.

As correntes medidas no sistema trifásico foram: $I_a=150.1A$; $I_b=150.1A$; $I_c=142.6A$ e $I_n=7.5A$. No "loop" a corrente foi fixada em 100 A.

As tabelas 4.2 e 4.33 apresentam a comparação dos resultados.

Valores de "B" após a blindagem (μT) - Fonte de Alta Impedância			
Distancia (m)	Calculado - "MPV"	Medido	Diferença %
0,20	21,85	20,90	4,5
0,30	7,78	7,90	1,5
0,40	3,53	3,46	2,0
0,50	1,87	2,12	11,8
0,60	1,10	1,52	27,6
0,70	0,70	1,28	45,3
0,80	0,47	1,02	53,9
0,90	0,33	0,95	65,3
1,00	0,24	0,80	70,0

Tabela 4.2: Comparação entre os valores medidos e calculados – fonte de alta impedância.

Valores de "B" após a blindagem (μT) - Fonte de Baixa Impedância			
Distancia (m)	Calculado - "MPV"	Medido	Diferença %
0.20	17,82	17,80	0,11
0.30	5,07	5,06	0,19
0.40	1,86	1,85	0,54
0.50	0,81	0,84	3,57
0.60	0,41	0,44	6,82
0.70	0,23	0,26	11,54
0.80	0,14	0,16	12,50
0.90	0,087	0,12	27,50
1,00	0,057	0,086	33,72

Tabela 4.3: Comparação entre os valores medidos e calculados – fonte de baixa impedância.

Como esperado, os valores medidos estão próximos dos calculados somente nos pontos próximos da blindagem, onde o efeito do tamanho finito das chapas é menor. A partir de uma distancia de 50 cm para a fonte de alta impedância e 70 cm para o "loop" de corrente os erros já começam a atingir valores acima de 10%.

No sistema trifásico, o efeito do tamanho finito das chapas metálicas é bem maior do que no "loop" de corrente. A maior proximidade dos condutores da borda da chapa metálica pode ajudar a explicar este fato.

4.5- Considerações finais.

Ficou claro neste capítulo que o método do potencial vetor magnético é bastante eficiente.

Uma desvantagem do método de elementos finitos é o maior tempo computacional demandado em relação ao método do potencial vetor, o que torna inviável o seu emprego. No entanto o método de elementos finitos apresenta a grande vantagem de considerar a blindagem finita e a não linearidade das propriedades dos materiais ferromagnéticos.

O tempo de cálculo demandado em média para cada caso simulado neste trabalho foi da ordem de uma hora em um computador com processador de 750

MHz e memória "RAM" de 512 Mb. O tempo de cálculo para o método do potencial vetor é em média 3 minutos.

Quanto à blindagem "sanduíche", os resultados mostraram que nenhuma diferença é percebida entre a colocação do alumínio sobre o aço e vice – versa.

Deve –se salientar que na prática, como a permeabilidade magnética dos materiais ferromagnéticos é função do campo incidente, alguma diferença deverá ocorrer. Este fato deve ser considerado em trabalhos futuros.

Para a realização de futuras medições, deve –se deixar bem claro que existem melhorias que devem ainda ser feitas com o intuito de aumentar a precisão e confiabilidade nos resultados, estão entre elas:

- Um estudo mais aprofundado da influência do solo do laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT) nas medições;
- Modificações na bancada de testes objetivando uma maior flexibilidade no posicionamento dos condutores e no aumento da largura das chapas usadas na blindagem;
- A utilização de equipamentos que suportem uma maior corrente elétrica para diminuir a influência do campo externo.

No próximo capítulo é analisada a influência das propriedades constitutivas dos materiais da blindagem para as configurações e tipos de fonte estudadas neste capítulo. O método do potencial vetor magnético é utilizado.

5- Parâmetros que Influenciam a Eficiência da Blindagem de Campos Magnéticos.

5.1- Introdução.

O método do potencial vetor magnético apresentado e validado nos capítulos anteriores é utilizado neste capítulo em um estudo dos parâmetros que influenciam a blindagem, nas diversas configurações de fontes, de um campo magnético de 60Hz.

Basicamente o estudo é dividido em duas partes: a primeira aborda a influência das principais variáveis entre as quais estão a permeabilidade magnética e condutividade elétrica, no desempenho dos materiais para as duas configurações de blindagem (chapas planas e cilindros) considerando somente um nível de blindagem. Na segunda parte, dois níveis de blindagem são considerados e o efeito benéfico da associação de materiais com altos valores de condutividade elétrica e permeabilidade magnética fica evidenciado confirmando as afirmações de diversos autores [8, 9,11] e medições já realizadas no LEAT [9, 8].

Os dois tipos de fonte de campo são abordados, ficando evidente que a dificuldade da atenuação do campo magnético não se restringe para as fontes de baixa impedância.

Por fim, a possibilidade da associação de altos valores de condutividade e permeabilidade em somente um material é destacada, uma vez que a blindagem com dois níveis ou blindagem "sanduíche" é muitas vezes de custo proibitivo para os projetos além de geralmente ser muito pesada.

Os resultados são apresentados em gráficos e tabelas com alguns comentários feitos a seguir.

Deve-se deixar bem claro que o objetivo deste capítulo não é de determinar - através de comparações entre o desempenho dos materiais - valores de espessura, permeabilidade magnética ou condutividade elétrica ideais para a blindagem. Isto é discutido no próximo capítulo.

Deve-se deixar claro que, devido às equações do método do potencial vetor magnético não contemplarem a não linearidade das propriedades dos materiais ferromagnéticos, são especificados valores fixos de permeabilidade e condutividades nos casos simulados.

5.2- Utilização de Somente um Nível de Blindagem – Blindagem Simples.

Os parâmetros cujos efeitos na blindagem estão analisados neste tópico são: espessura das chapas, permeabilidade magnética, condutividade elétrica, distância à fonte do ponto de cálculo, efeito das “bordas” da blindagem e o raio da blindagem no caso dos cilindros metálicos.

5.2.1- Considerações gerais.

Algumas informações gerais a respeito do estudo do desempenho dos materiais na blindagem devem ser antecipadas.

- As correntes nas fontes de campo, os espaçamentos entre os condutores e o raio da blindagem cilíndrica, quando não especificados, são os mesmos do tópico 4.3 "Validação Computacional";
- A espessura das blindagens, quando não especificada é de 2 mm;
- Os pontos de cálculo são, salvo alguma exceção, todos localizados ao longo dos eixos "y" e "z" (figuras 4.3, 4.8 e 4.12) a 2 m da fonte;
- Para a determinação do fator de blindagem é utilizada a equação 2.1.

5.2.2- Influência da permeabilidade magnética.

É aqui estudado o efeito da permeabilidade magnética no fator de blindagem para os materiais da tabela 5.1, cujas condutividades elétricas são as do aço ao silício GO (material 1), SAE 1010 (material 2) e o ferro puro (material 3).

Materiais	Condutividade elétrica	
	Relativa (σ_r)	Absoluta (MS)
1	0.03	1.73
2	0.10	5.76
3	0.17	9.80

Tabela 5.1: Materiais usados na análise do efeito da permeabilidade no fator de blindagem.

As figuras 5.1 a 5.3 mostram os resultados para os diferentes tipos de fontes e blindagens.

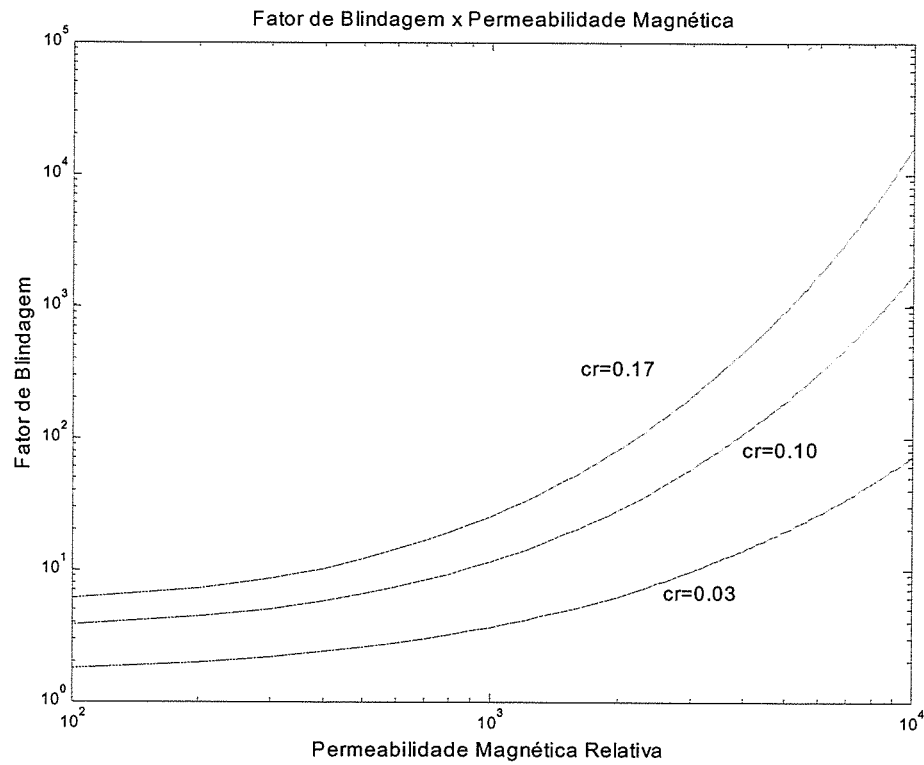


Figura 5.1: Efeito da permeabilidade magnética no fator de blindagem para a fonte de alta impedância – chapas planas.

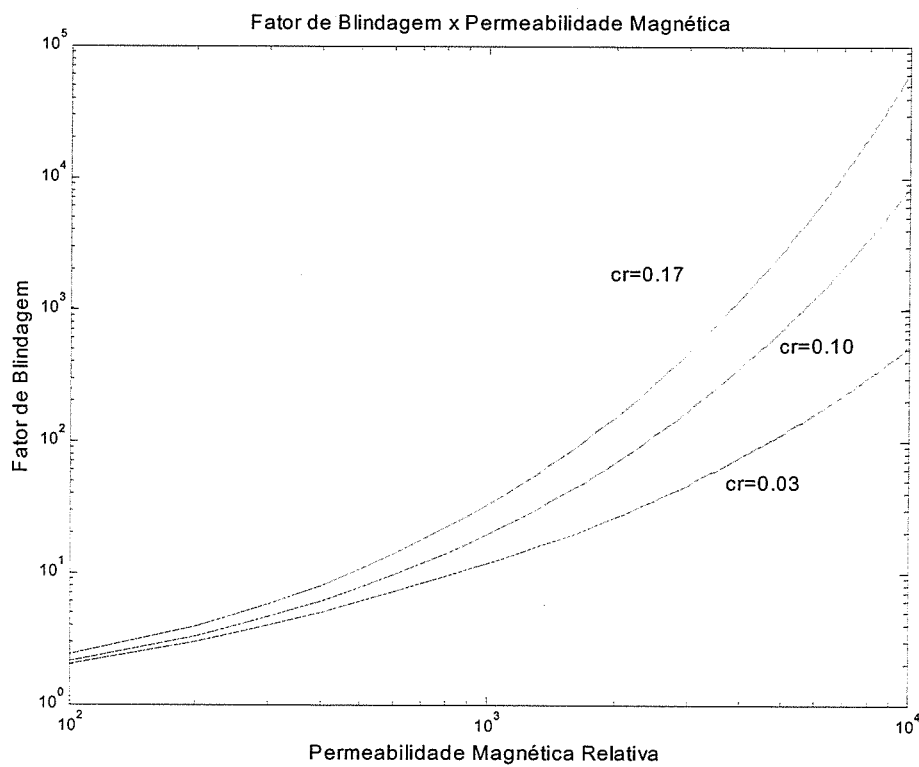


Figura 5.2: Efeito da permeabilidade magnética no fator de blindagem para a fonte de alta impedância – cilindro.

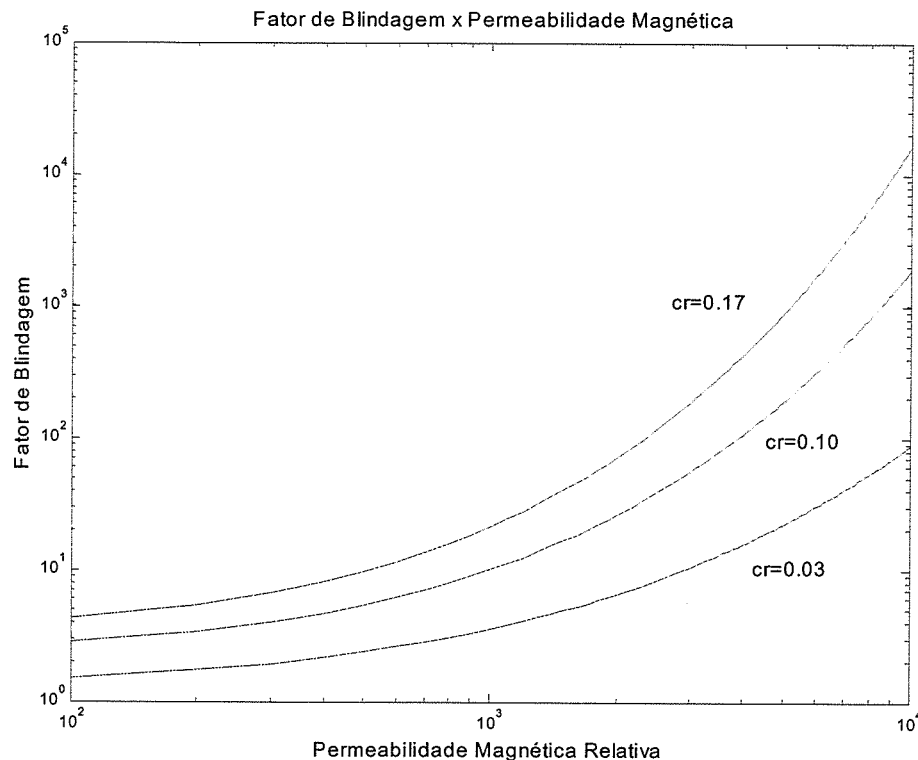


Figura 5.3: Efeito da permeabilidade magnética no fator de blindagem para a fonte de baixa impedância – chapas planas.

O aumento da permeabilidade magnética é acompanhado de uma melhora significativa no desempenho do material para todas as configurações de blindagens e fontes de campo analisadas. Reduções superiores a 10000 vezes são obtidas quando altos valores de permeabilidade são associados a altos valores de condutividade elétrica (ferro puro). Será discutido mais adiante, o fato de que os materiais que são fabricados com altos valores de permeabilidade magnética têm, devido às suas aplicações, pequenos valores de condutividade elétrica se comparados ao alumínio ou até mesmo ao ferro puro.

É notado que para um valor de permeabilidade magnética relativa de 6000, o fator de blindagem atinge valores superiores a 100 nos materiais 2 e 3. Estes valores são satisfatórios para a maioria dos projetos de blindagem na prática.

Vale lembrar que os aços ao silício apresentam valores de permeabilidade magnética geralmente superiores a 6000 quando submetidos a altos valores de campo magnético.

O desempenho dos materiais nos dois tipos de fontes de campo é semelhante para a configuração de blindagem com chapas planas.

5.2.3- Influência da condutividade elétrica.

Já no tópico anterior, ficou claro que um aumento da condutividade elétrica sempre é acompanhado de um aumento no fator de blindagem.

A influência da condutividade elétrica na blindagem é agora analisada para dois tipos de materiais: um paramagnético ($\mu_r \approx 1$) e outro ferromagnético ($\mu_r = 3000$).

Os resultados estão apresentados nas figuras 5.4 a 5.6.

Novamente fica evidenciado que grandes reduções no valor da indução magnética são obtidas com a associação de altos valores de permeabilidade magnética e condutividade elétrica.

A blindagem cilíndrica apresenta uma maior eficiência principalmente no caso do material ferromagnético. No caso do material paramagnético, mesmo para valores altos de condutividade, seu desempenho é muito inferior aos demais.

Os valores de condutividade representados nas figuras são relativos ao cobre.

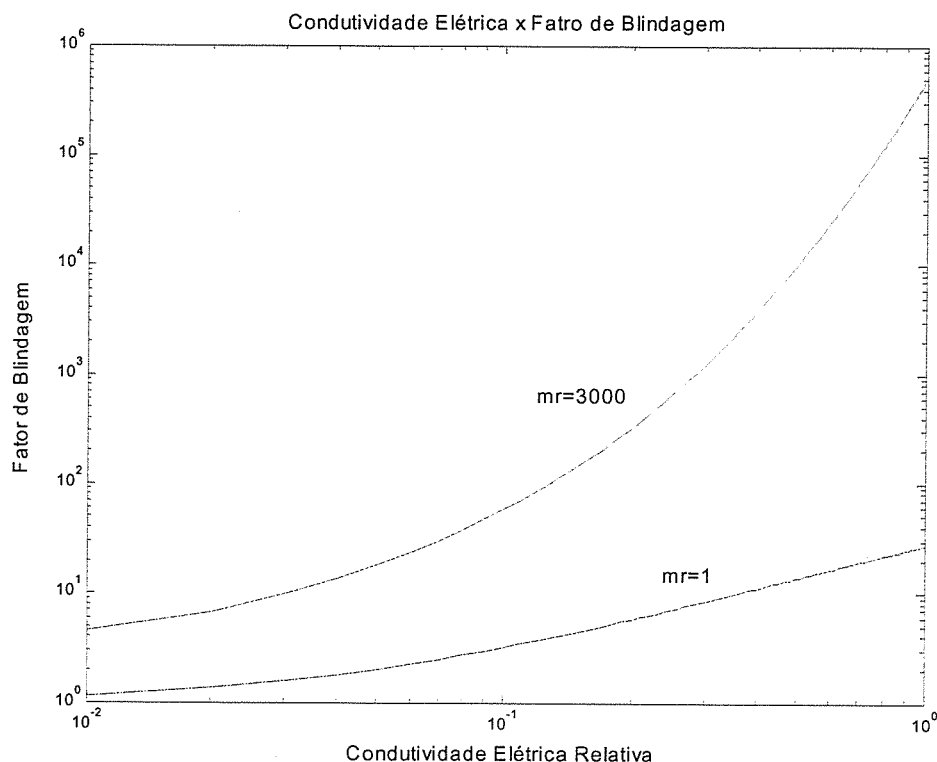


Figura 5.4: Efeito da condutividade elétrica no fator de blindagem fonte de alta impedância para dois valores de permeabilidade magnética relativa (m_r) – chapas planas.

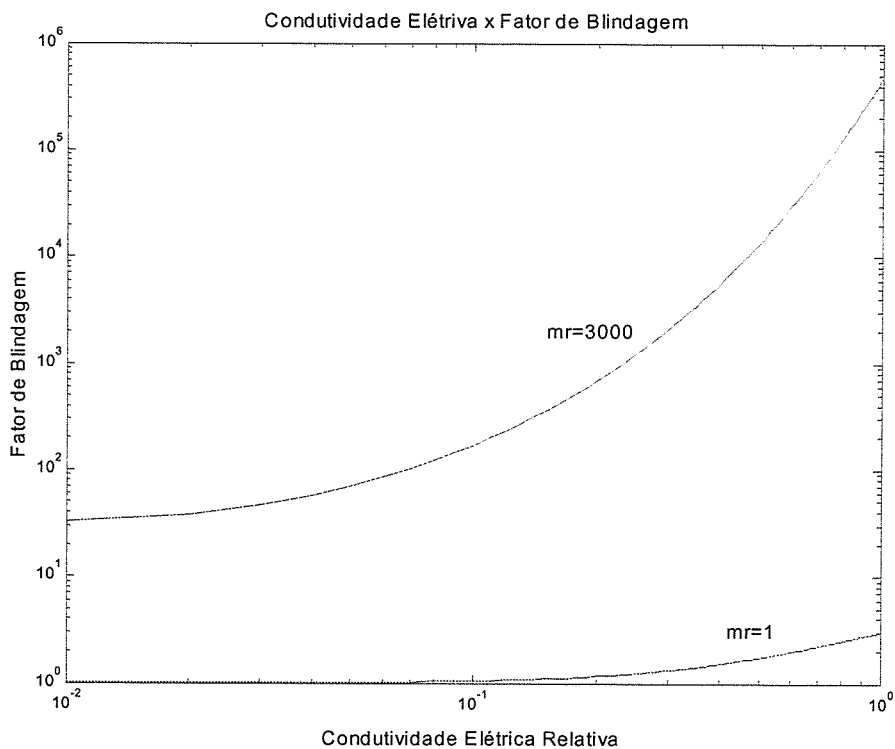


Figura 5.5: Efeito da condutividade elétrica no fator de blindagem de uma fonte de alta impedância para dois valores de permeabilidade magnética relativa (μ_r) – cilindro.

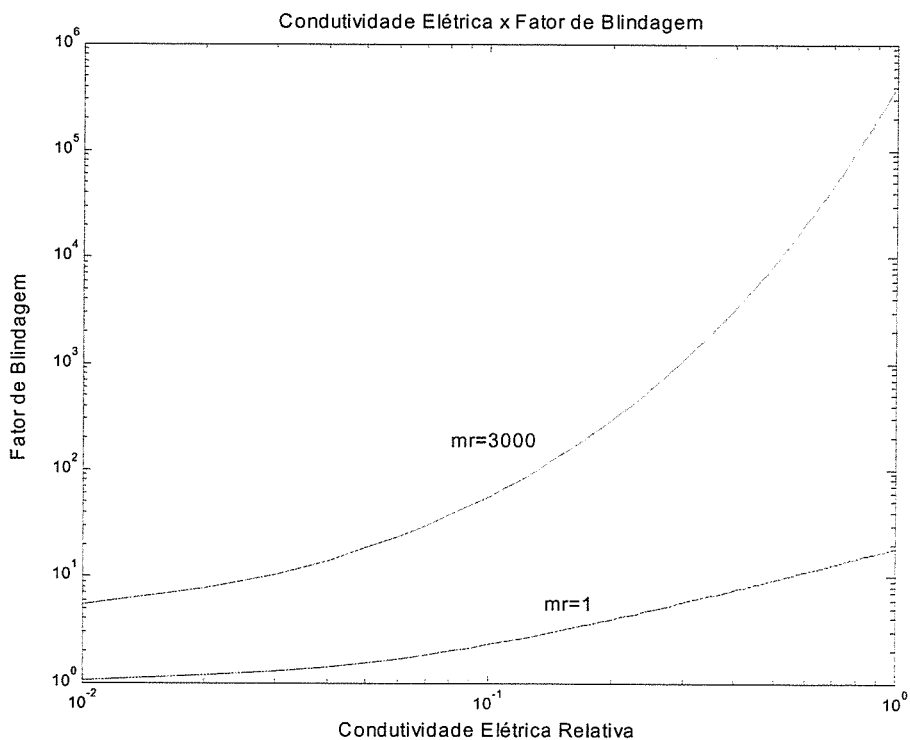


Figura 5.6: Efeito da condutividade elétrica no fator de blindagem de uma fonte de baixa impedância para dois valores de permeabilidade magnética relativa (μ_r) – chapa plana.

5.2.4- Influência da espessura da blindagem.

A utilização de material para blindagem com espessura superior a 3 mm deve ser evitada devido ao elevado custo e peso acarretado aos projetos.

A absorção do campo no interior da blindagem esta relacionada diretamente com a espessura do material e é esperado que quanto mais espessa for a blindagem maior será o fator de blindagem. As figuras 5.7 a 5.9 mostram a variação da espessura das chapas metálicas com o fator de blindagem para os dois dos materiais mais utilizados em projetos de blindagem: o alumínio ($\mu_r=1$, $\sigma_r=0.6$) e o SAE 1010 ($\mu_r=300$ e $\sigma_r=0.1$).

Com já era esperado, o aumento da espessura da blindagem para os três tipos de fonte é acompanhado por um aumento do fator de blindagem.

Um melhor desempenho é verificado para a fonte de alta impedância quando blindada por chapas planas. Fica claro que este tipo de blindagem apresenta uma igualdade no desempenho do alumínio e do aço SAE 1010 para aproximadamente uma espessura de 5 mm. Este fato não ocorre no caso da blindagem cilíndrica onde o desempenho do SAE 1010 é superior.

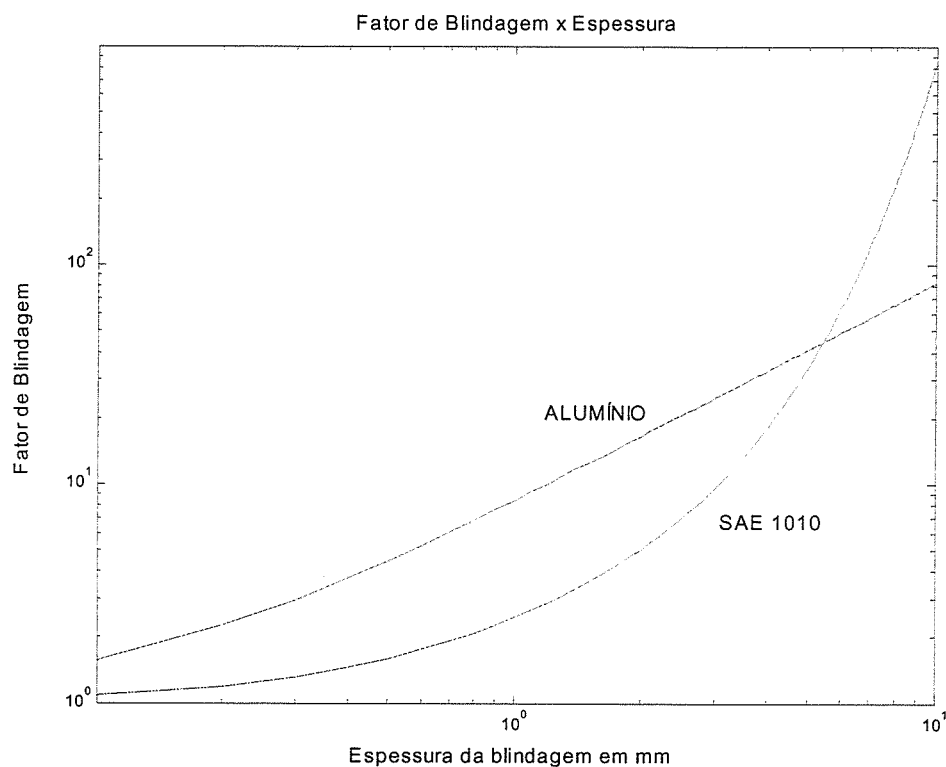


Figura 5.7: Efeito da espessura da chapa (em mm) no fator de blindagem para uma fonte de alta impedância – chapa plana.

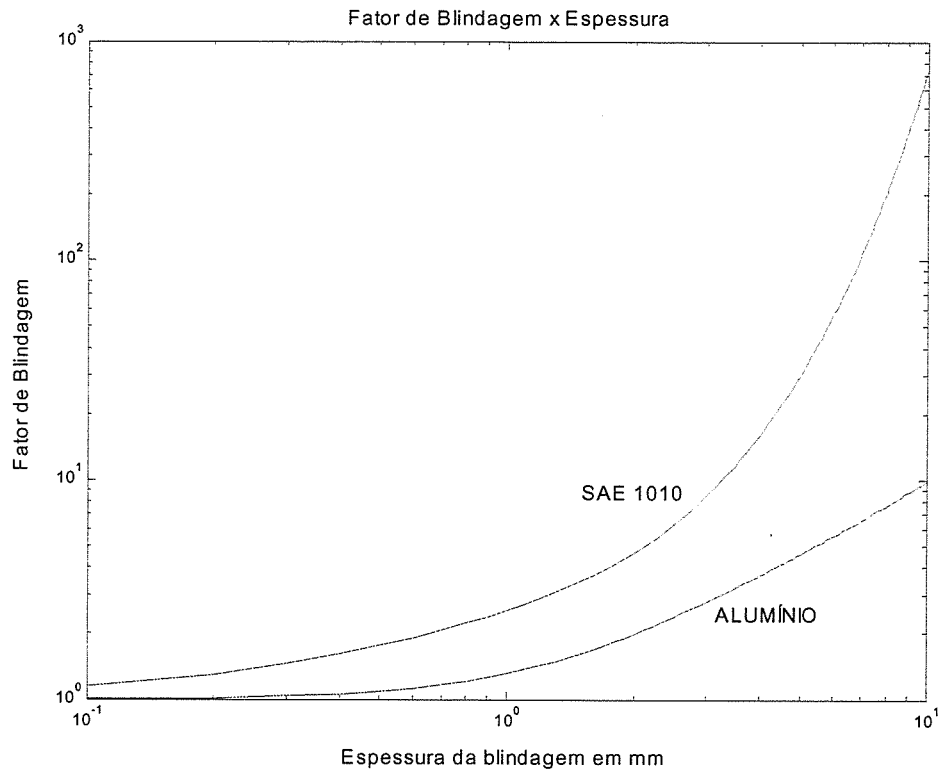


Figura 5.8: Efeito da espessura da chapa no fator de blindagem para uma fonte de alta impedância – cilindro.

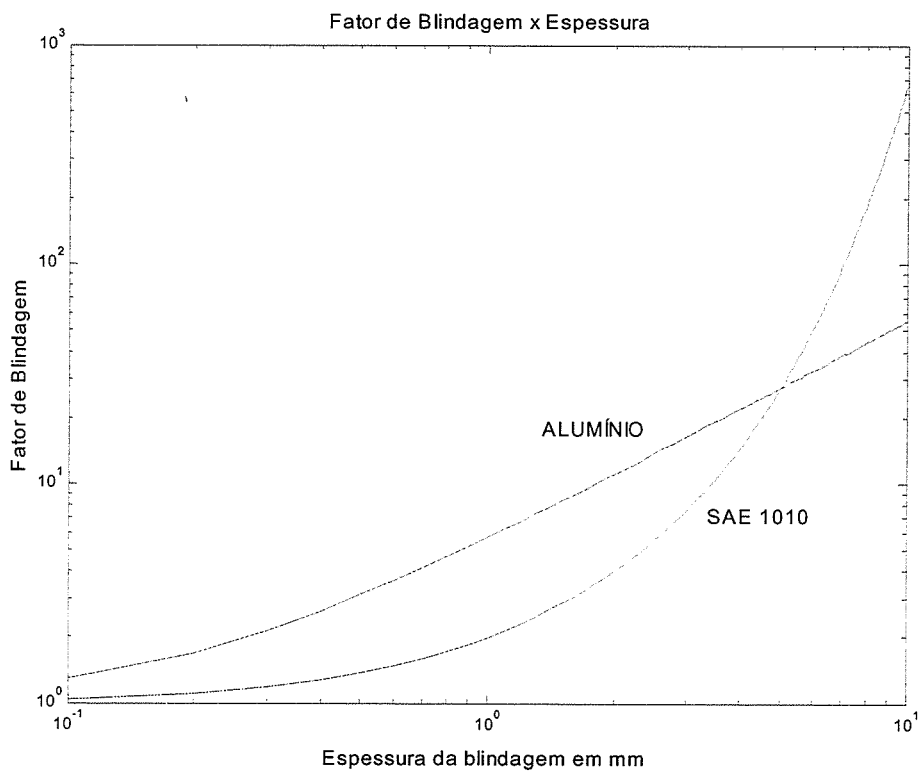


Figura 5.9: Efeito da espessura da chapa no fator de blindagem para uma fonte de baixa impedância – chapa plana.

A espessura de blindagem normalmente usada na prática varia de 1.0 a 2.0 mm onde o alumínio apresenta um desempenho superior ao aço no caso do uso de chapas planas. Já a configuração cilíndrica, a superioridade do SAE 1010 é verificada para toda a faixa de espessura analisada nos gráficos.

5.2.5- Influência da distância da fonte ao ponto de medição do campo.

Alguns trabalhos [8,9] que utilizaram chapas metálicas na blindagem mostraram que o desempenho dos materiais varia conforme a distância do ponto de medição à fonte. As equações 3.33 a 3.35, indicam que na configuração cilíndrica este fato não ocorre.

As figuras 5.10 e 5.11 mostram a variação do fator de blindagem para os dois tipos de fonte. Os materiais utilizados para a análise são os da tabela 5.2.

Materiais	Propriedades Constitutivas	
	Condutividade (σ_r)	Permeabilidade (μ_r)
1 - Alumínio	0.60	1
2 - SAE 1010	0.10	300
3 - Aço ao Silício	0.03	3000

Tabela 5.2: Materiais usados na análise do efeito da distancia no fator de blindagem.

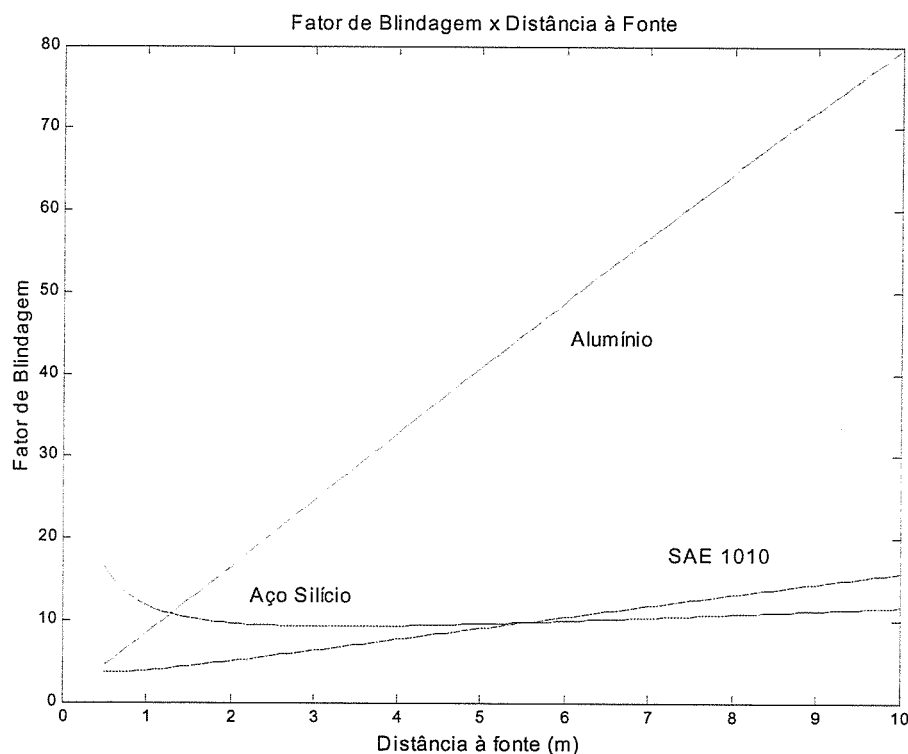


Figura 5.10: Efeito da distancia no fator de blindagem: fonte de alta impedância.

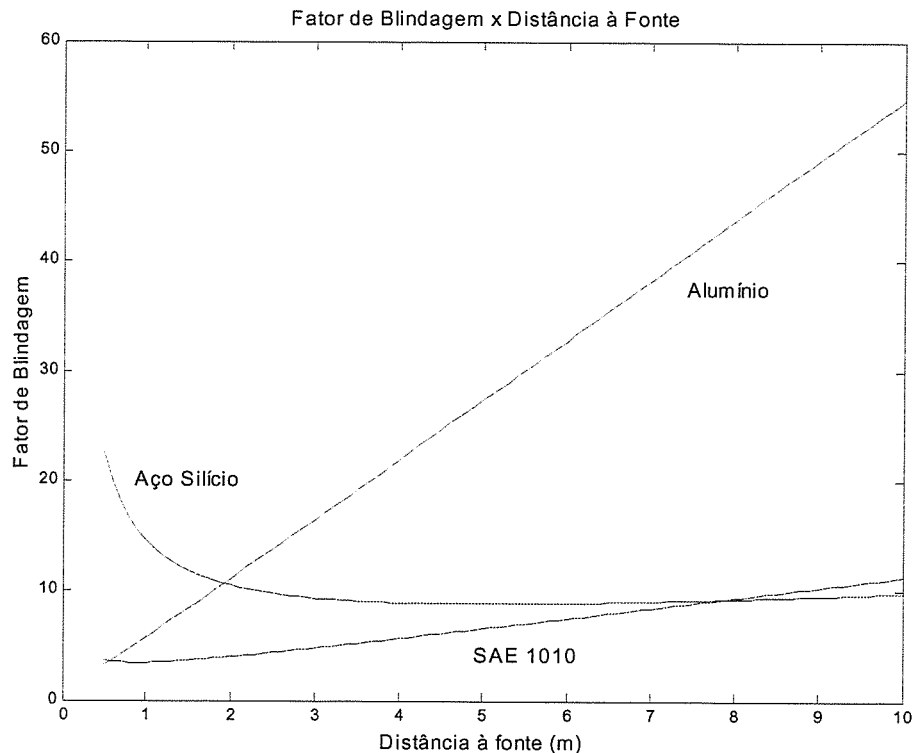


Figura 5.11: Efeito distancia no fator de blindagem: fonte de baixa impedância.

O aspecto dos gráficos é o mesmo, pode-se observar a maior eficiência dos materiais na contenção do campo produzido pela fonte de alta impedância.

O aumento do fator de blindagem com a distância é abordado por [18] que cita, baseado em equações simplificadas, o fato do campo magnético obtido quando da utilização do alumínio como blindagem decair mais rapidamente com a distância do que o campo radiado no espaço livre. O mesmo não ocorre para materiais ferromagnéticos de menor condutividade que o alumínio como os aços.

É oportuno dizer que em medições já realizadas no LEAT – UFMG [8,9] - quando foram utilizados diferentes materiais ferromagnéticos e o alumínio - ficou constatado que o desempenho de todos eles na blindagem, diferentemente do que mostram as figuras 5.10 e 5.11, caiu com o aumento da distância.

Este fato pode ser justificado pelo efeito das bordas devido ao tamanho finito das chapas utilizadas nas medições. Este efeito será abordado oportunamente ainda neste trabalho.

5.2.6- Influência do tamanho do raio da blindagem cilíndrica.

Na configuração cilíndrica para blindagens de fontes de alta impedância, o raio do cilindro é um fator que influencia diretamente o desempenho dos materiais.

De maneira geral, materiais com altos valores de permeabilidade magnética apresentam um desempenho decrescente com o aumento do raio, acontecendo o contrário para materiais paramagnéticos de alta condutividade elétrica como o alumínio.

As simplificações usadas para a dedução das equações 3.33 a 3.35 no capítulo 3, sugerem que o aumento do raio da blindagem faz com que os resultados se aproximem ainda mais dos valores reais [18].

Os materiais analisados neste tópico são os da tabela 5.2.

A figura 5.12 mostra os resultados obtidos, sendo estes semelhantes aos apresentados por [13].

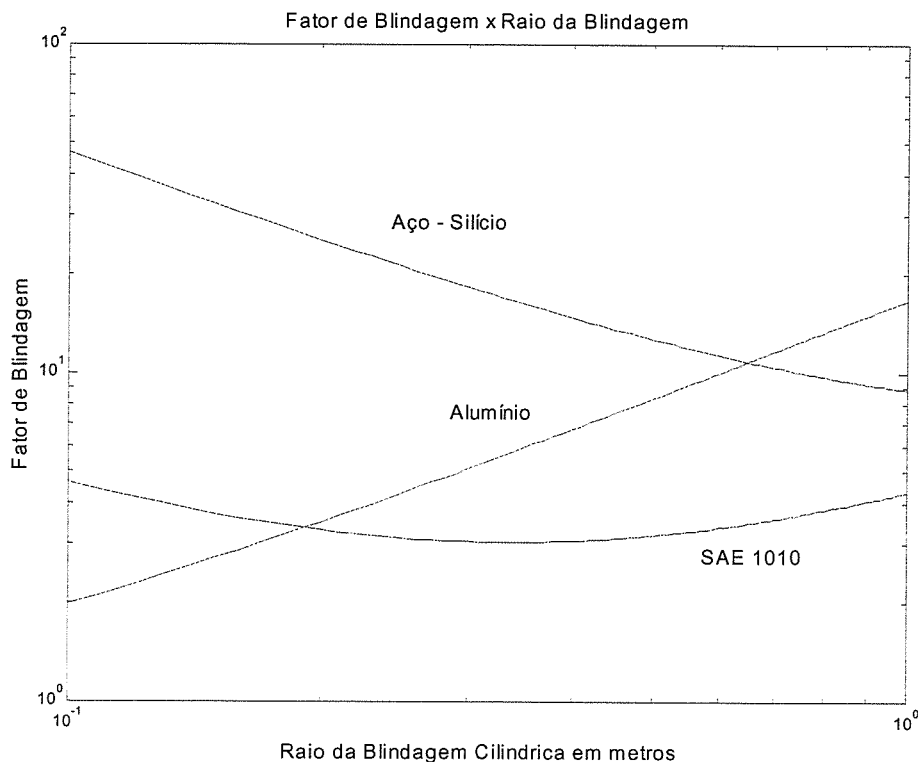


Figura 5.12: Efeito do raio no fator de blindagem: fonte de alta impedância – cilindro.

A variação do fator de blindagem em função do tamanho do raio é bastante distinta para cada tipo de material. No alumínio o desempenho da blindagem

aumenta com o raio enquanto que para o aço ao silício o inverso acontece. No SAE 1010 o fator de blindagem atinge um mínimo para um valor de raio perto de 35 cm.

Deve-se salientar que o raio da blindagem deve ser muito maior que a separação entre os condutores para que os resultados aqui apresentados sejam condizentes com a prática, por questões de custo, peso e até mesmo estética, isto nem sempre é possível.

5.2.7- Influência do tamanho finito das chapas metálicas – efeito das “bordas”

O método do potencial vetor magnético (MPV) apresentado no capítulo 3, considera o tamanho da blindagem infinito desprezando qualquer influência das bordas das chapas no fator de blindagem.

Com o auxílio de um "software" ("FEMM[®]") que emprega os elementos finitos (FEM) em duas dimensões é, neste momento, estudado o erro devido a tal consideração uma vez que na prática a blindagem é sempre de tamanho finito.

A figura 5.13 (a e b) mostra as dimensões da blindagem assim como o espaçamento entre os condutores usados nas simulações com elementos finitos. A espessura dos materiais utilizados é de 1 mm.

O número de nós, tamanho da região de cálculo assim como a condição de contorno são os mesmos do tópico 4.3 "Validação Computacional".

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram uma comparação entre o método do potencial vetor magnético (MPV), que considera a blindagem de tamanho infinito, e o método de elementos finitos (FEM).

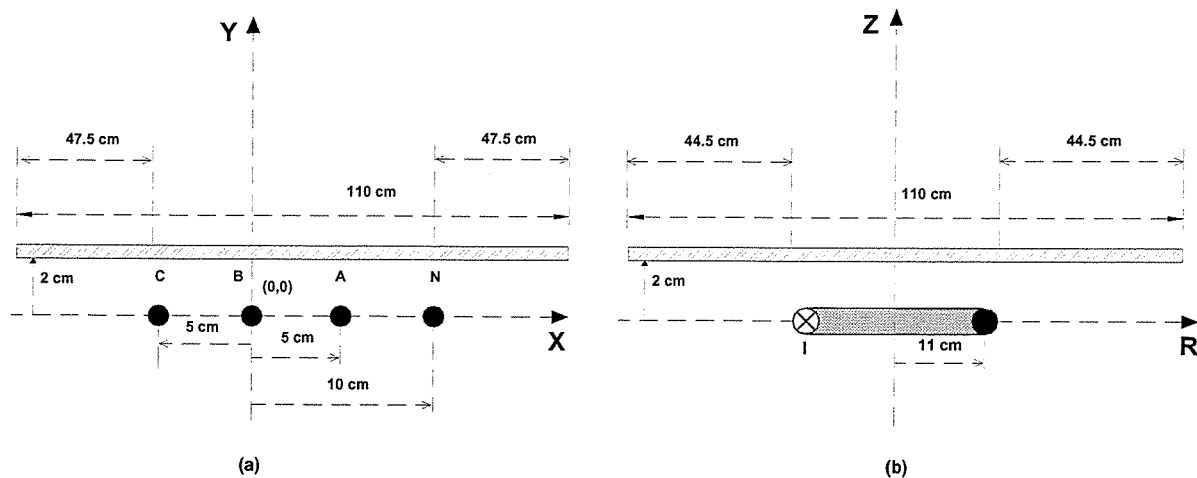


Figura 5.13: Configurações (vistas de perfil) utilizadas nas simulações com o método de elementos finitos.

O valor da indução magnética sem a presença da blindagem é também apresentado para efeito de comparações.

A diferença entre os resultados é bastante significativa para os dois tipos de fonte, principalmente com o uso dos materiais ferromagnéticos. É notado que quanto menor a condutividade elétrica do material, mais significativo é o efeito da borda, fato já comprovado em outras oportunidades em medições realizadas no LEAT [8].

Distância da fonte (cm)	Indução sem blindagem	Indução (μT) – Fonte de Alta Impedância					
		Aço Silício		Alumínio		SAE 1010	
		FEM	MPV	FEM	MPV	FEM	MPV
5	377.14	15.61	14.31	337.6	336.4	96.28	95.38
20	36.02	4.69	3.39	23.13	23.00	16.12	15.28
40	9.19	2.46	1.39	4.32	4.09	5.33	4.64
60	4.10	1.61	0.79	1.62	1.38	2.69	2.14
80	2.31	1.13	0.52	0.83	0.62	1.61	1.19
100	1.48	0.84	0.37	0.50	0.33	1.10	0.79
120	1.07	0.64	0.27	0.34	0.20	0.78	0.50

Tabela 5.3: Análise do efeito das bordas das chapas finitas – fonte de alta impedância.

Distância da fonte (cm)	Indução sem blindagem	Indução (μT) – Fonte de Baixa Impedância					
		Aço Silício		Alumínio		SAE 1010	
		FEM	MPV	FEM	MPV	FEM	MPV
5	430.95	23.09	22.14	356.1	359.0	148.1	148.8
20	63.93	5.49	4.38	47.32	46.77	25.42	24.7
40	10.65	1.93	1.15	6.36	6.10	5.47	5.09
60	3.35	0.98	0.48	1.71	1.54	1.98	1.77
80	1.44	0.57	0.25	0.68	0.55	0.94	0.79
100	0.75	0.36	0.15	0.33	0.24	0.52	0.43
120	0.43	0.24	0.10	0.19	0.12	0.31	0.24

Tabela 5.4: Análise do efeito das bordas das chapas finitas – fonte de baixa impedância.

Em regiões mais afastadas da blindagem os valores da indução magnética calculada pelos diferentes métodos diferem em mais de 50 %.

Estudos objetivando reduzir este efeito deverão ser realizados. Uma alternativa, como será demonstrado é a utilização da blindagem na configuração cilíndrica.

5.3- Utilização de Dois Níveis de Blindagem – Blindagem "Sanduíche".

Este tipo de configuração de blindagem, chamada por diversos autores de blindagem "sanduíche", geralmente propicia maiores reduções na indução magnética do que a configuração de blindagem simples com somente um nível.

5.3.1- Considerações gerais.

Algumas considerações iniciais a respeito do estudo da blindagem sanduíche devem ser feitas.

- As correntes nas fontes de campo, os espaçamentos entre os condutores e o raio da blindagem cilíndrica, quando não especificados, são os mesmos do tópico 4.3 "Validação Computacional";
- Os pontos de cálculos são, salvo alguma exceção, todos localizados ao longo dos eixos "y" e "z" (figuras 4.3, 4.8 e 4.12) a 2 m da fonte;
- A disposição dos materiais na blindagem é: alumínio e SAE 1010 e alumínio e aço ao silício, sempre com o alumínio voltado para o lado da fonte de campo (chapa interna da blindagem);
- As espessuras das blindagens são todas de 2 mm (1 mm para cada material), salvo algum caso particular.

O efeito das propriedades constitutivas dos materiais foi avaliado no tópico 5.2 e não é novamente analisado. A eficiência da blindagem "sanduíche" é avaliada pelos parâmetros: espessura de cada material, distância da fonte ao ponto de medição e efeito das bordas pela consideração da blindagem finita.

5.3.2- Influência da distância da fonte ao ponto de medição do campo.

As figuras 5.14 e 5.15 mostram o efeito da distância da fonte de campo ao ponto de medição para os dois tipos de fontes, na configuração de chapas planas.

Para os dois tipos de fontes de campo o aumento do fator de blindagem é praticamente linear na faixa de distância analisada. Para a fonte de alta impedância o desempenho da blindagem é superior em regiões mais afastadas da fonte.

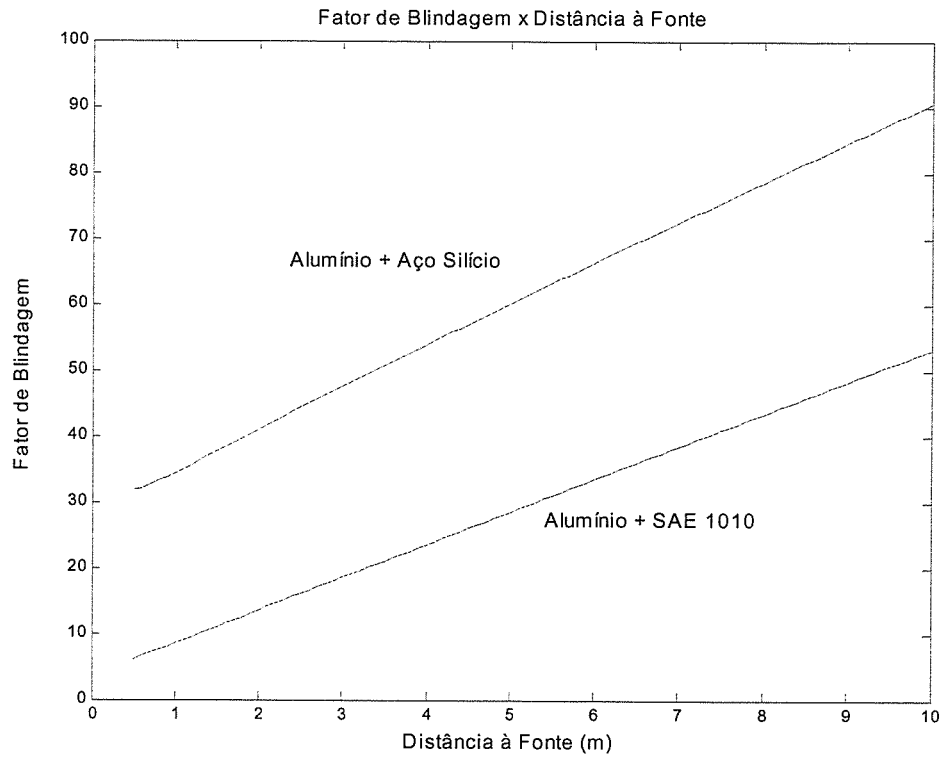


Figura 5.14: Efeito da distancia na blindagem para a fonte de alta impedância. Cada material com 1 mm de espessura.

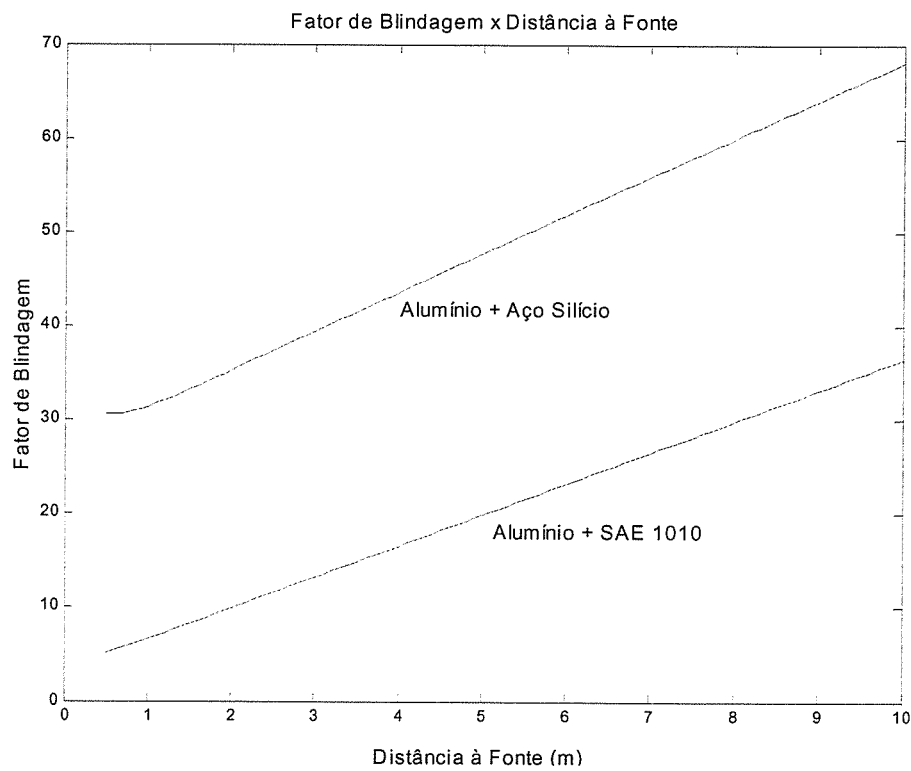


Figura 5.15: Efeito da distancia na blindagem para a fonte de baixa impedância. Cada material com 1 mm de espessura.

Fica aqui mais uma vez evidente que a associação de altos valores de permeabilidade magnética com condutividade elétrica é um fator decisivo para o desempenho dos materiais na blindagem. Nesta análise, o alumínio contribui com o alto valor da condutividade enquanto os materiais ferromagnéticos com a alta permeabilidade magnética.

A associação do alumínio com o aço ao silício e com o SAE 1010 proporciona um desempenho superior a todos estes materiais quando utilizados individualmente conforme no tópico 5.2.5, figuras 5.10 e 5.11.

A característica apresentada pelo alumínio de melhorar o fator de blindagem com o aumento da distância quando utilizado individualmente (figuras 5.10 e 5.11 do tópico 5.2.5) é também observada.

5.3.3- Influência da espessura dos níveis de blindagem.

É analisada agora, a influência da espessura de cada material no desempenho da blindagem em dois níveis.

As figuras 5.16 a 5.18 mostram os resultados do fator de blindagem em função da espessura do alumínio. Em todos os casos, a espessura do material ferromagnético é complementar à do alumínio até atingir 2 mm de espessura total.

O comportamento da blindagem cilíndrica é totalmente diferente dos demais.

Na blindagem com chapas planas, para ambos os tipos de fonte, o comportamento do fator de blindagem é parecido atingindo um pico, para a configuração alumínio e aço ao silício, em aproximadamente 1 mm de espessura para cada material.

A utilização SAE 1010 isoladamente é, exceto para a blindagem cilíndrica, pior do que a utilização do alumínio, fato já evidenciado pelas figuras 5.10 e 5.11 onde o desempenho deste material é inferior ao do alumínio na distância de 2 m da fonte.

Na utilização de chapas planas na blindagem sanduíche, onde um dos materiais possui alta permeabilidade magnética e o outro possui alta condutividade elétrica, é necessária a determinação de uma espessura ótima para cada um dos materiais.

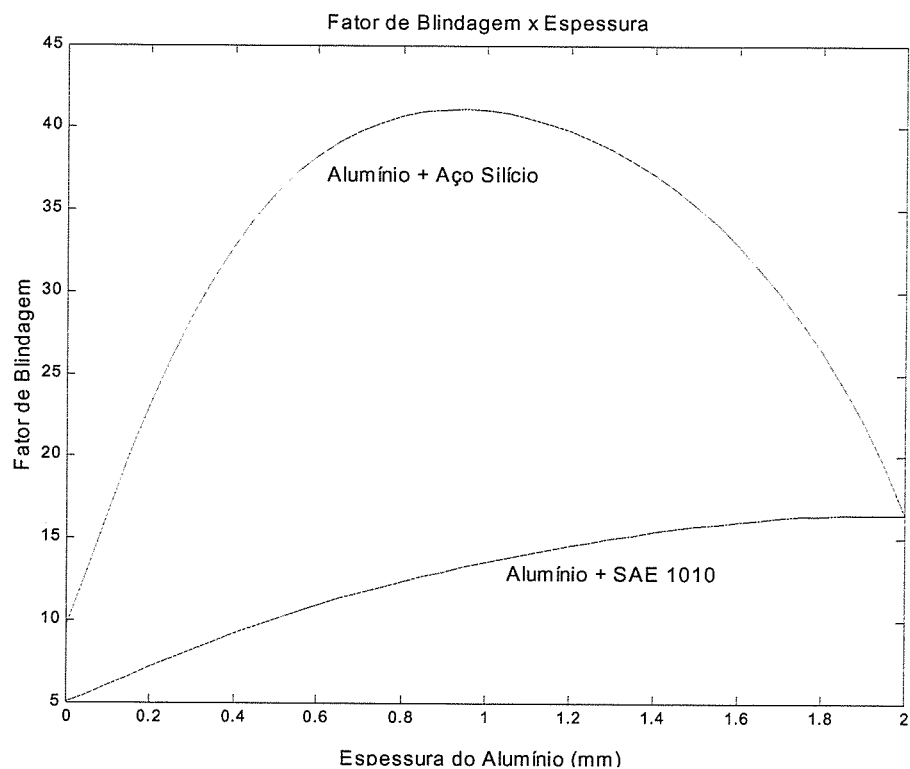


Figura 5.16: Efeito espessura no fator de blindagem: fonte de alta impedância – chapas planas.

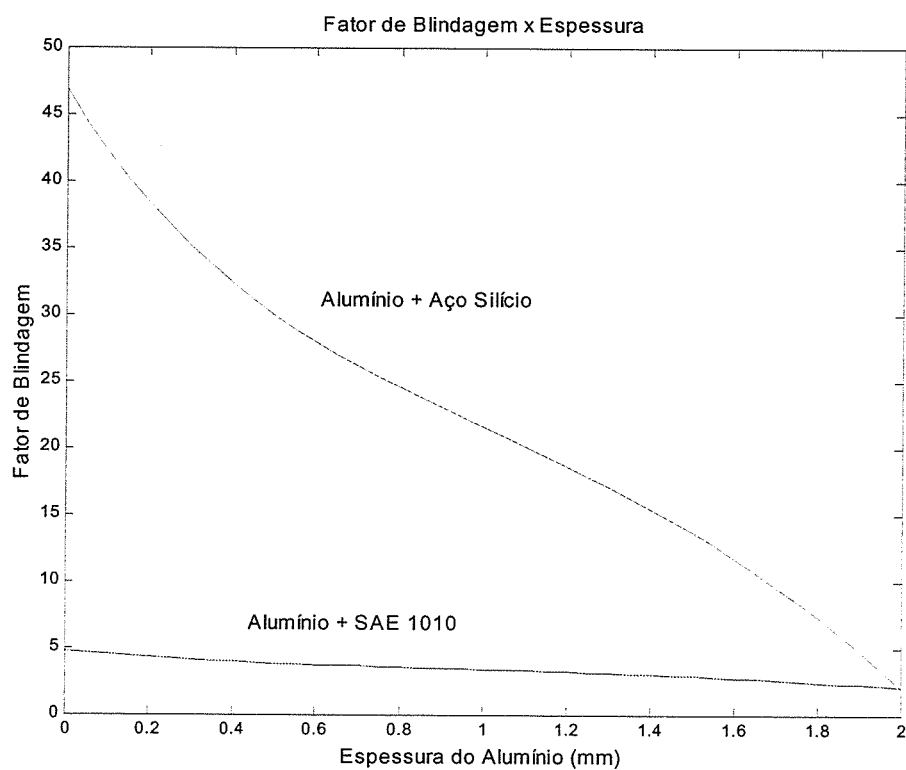


Figura 5.17: Efeito espessura no fator de blindagem: fonte de alta impedância – cilindro.

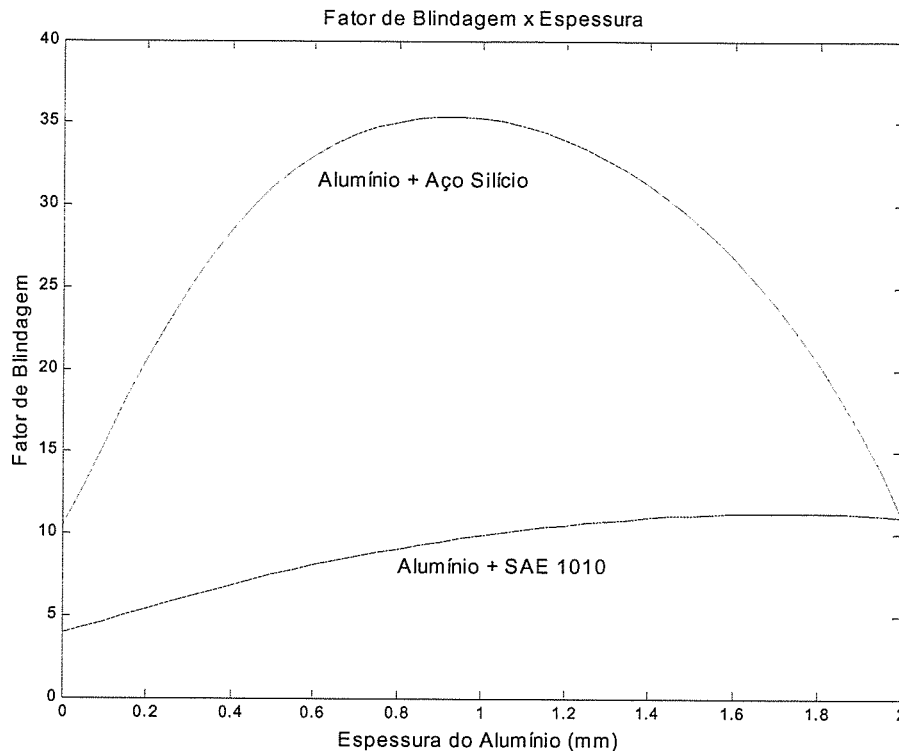


Figura 5.18: Efeito espessura no fator de blindagem: fonte de baixa impedância.

Na blindagem cilíndrica, o aço ao silício quando utilizado isoladamente apresenta um desempenho muito maior do que quando da presença do alumínio. Sua alta permeabilidade magnética em relação aos demais materiais compensa a sua baixa condutividade elétrica em relação aos outros materiais.

5.3.4- Influência do tamanho finito das chapas metálicas – efeito das bordas.

Aqui, a espessura de cada material é de 0.5 mm totalizando 1 mm de espessura total de blindagem.

Novamente é utilizado o método de elementos finitos para a simulação com a largura da blindagem finita. As configurações para as fontes de alta e baixa impedância são as indicadas na figura 5.13 "a" e "b".

O número de nós, a condição de contorno e o tamanho das regiões de cálculo são os mesmos do tópico 4.3 "Validação Computacional".

As tabelas 5.5 e 5.6 mostram a comparação dos resultados.

Novamente o fato de a blindagem ser de largura finita, uma discrepância entre os valores apresentados pelos dois métodos de cálculo, principalmente para pontos mais afastados da fonte de campo, pode ser observada.

Uma solução imediata seria o aumento da largura da blindagem acarretando um aumento nos custos e peso do projeto.

A aproximação dos condutores de corrente, para o caso de fontes de alta impedância pode também diminuir o efeito de bordas.

Distância da fonte (cm)	Indução sem blindagem	Indução (μT) – Fonte de Alta Impedância			
		Al + SAE 1010		Al + Aço Si	
		FEM	MPV	FEM	MPV
5	377.14	128.2	129.27	21.11	21.00
20	36.02	15.48	15.09	3.71	3.28
40	9.19	4.00	3.58	1.37	0.97
60	4.10	1.77	1.41	0.76	0.43
80	2.31	1,00	0.70	0.50	0.24
100	1.48	0.64	0.40	0.35	0.15
120	1.07	0.45	0.25	0.26	0.10

Tabela 5.5: Análise do efeito das bordas das chapas finitas – fonte de alta impedância.

Distância da fonte (cm)	Indução sem blindagem	Indução (μT) – Fonte de Baixa Impedância			
		Al + SAE 1010		Al + Aço Si	
		FEM	MP	FEM	MP
5	430.95	196.6	194.40	34.84	34.14
20	63.93	28.63	27.96	5.96	5.49
40	10.65	5.01	4.87	1.44	1.10
60	3.35	1.63	1.38	0.61	0.36
80	1.44	0.72	0.55	0.32	0.16
100	0.75	0.37	0.26	0.19	0.08
120	0.43	0.22	0.14	0.12	0.047

Tabela 5.6: Análise do efeito das bordas das chapas finitas – fonte de baixa impedância.

5.4 - Considerações Finais.

Com as simulações apresentadas neste capítulo, ficou claro que não existe um desempenho muito maior da blindagem para fontes de alta impedância em relação às fontes baixa impedância.

O aspecto dos gráficos para ambos os tipos de fonte é o mesmo, e as dificuldades na blindagem de campos magnéticos produzidos por "loops" de corrente também ocorrem para longos condutores de correntes.

O valor de um fator de blindagem ideal varia com o caso em questão. Existem situações onde a presença de equipamentos sensíveis exige uma redução do valor do campo de até 40 vezes em outras, no entanto, uma redução de 2 a 3 vezes já é suficiente para acabar com a interferência nos equipamentos. Neste caso específico um simples rearranjo geométrico dos condutores já é suficiente [9].

Nas simulações apresentadas no transcorrer deste capítulo, fatores de blindagem da ordem 10^4 ou ainda maiores foram algumas vezes obtidos sempre em casos onde altos valores de condutividade elétrica e permeabilidade magnética estavam associados. Valores desta magnitude atenderiam os requisitos de qualquer projeto de blindagem.

Os materiais que possuem elevados valores de permeabilidade magnética disponíveis no mercado são utilizados em transformadores e motores elétricos. Neles, o valor da condutividade elétrica deve ser o menor possível a fim de reduzir as perdas devido as correntes parasitas. Para tal, um elevado teor de silício é adicionado ao material fazendo com que sua condutividade elétrica caia a valores até 5 vezes menores do que as do ferro puro.

Os materiais com elevados valores de condutividade elétrica como o alumínio e o cobre possuem permeabilidade magnética relativa igual a 1.

Não é conhecido no mercado, algum material que possui elevados valores de permeabilidade magnética como os aços ao silício ($\mu_r \approx 4000$) e valores também altos de condutividade elétrica ($\sigma_r \approx 0.11$).

Nos próximos capítulos serão especificados alguns valores de condutividade elétrica e permeabilidade magnética que, se associados em um mesmo material,

seriam capazes de atender as expectativas de atenuação do campo magnético de baixa frequência nas diversas configurações de fontes e blindagens.

6- Análise dos Materiais Utilizados Atualmente em Projetos de Blindagem.

6.1- Introdução.

Este capítulo aborda o desempenho dos principais materiais hoje utilizados em projetos de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência.

Geralmente em situações onde o campo magnético ambiente apresenta valores elevados a ponto de prejudicar equipamentos eletrônicos, a solução é a utilização de grandes espessuras de materiais na blindagem o que eleva o custo e o peso dos projetos.

Entre os principais materiais utilizados nos projetos, pode-se destacar o alumínio, os aços carbono SAE 1010 e SAE 1006 e, em alguns casos, o aço ao silício de grãos orientados e não orientados.

Alguns autores [22] sugerem o emprego de materiais como as ligas de níquel – ferro conhecidas pelos nomes de “Mumetal[®]”, “Supermalloy[®]”, “Permalloy[®]”. Tais ligas, apesar de apresentarem condutividade elétrica cerca de cinco vezes menor do que os aços carbono possuem uma permeabilidade magnética muito maior do que os aços ao silício justificando a princípio a utilização.

Não é conhecido um material que apresente ao mesmo tempo as características ideais para a utilização na blindagem, ou seja, altos valores de condutividade elétrica como o alumínio e altos valores de permeabilidade magnética como os aços ao silício ou ligas de níquel - ferro.

No transcorrer do capítulo são apresentados ábacos que mostram o desempenho de diversos materiais na blindagem de campos magnéticos produzidos por fonte de campo de alta e baixa impedância para as configurações de blindagens mais comuns. Medições realizadas no Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade de Minas Gerais (LEAT) darão sustentação experimental aos resultados apresentados. Os ábacos objetivam o auxílio nos projetos de blindagem.

O próximo capítulo é dedicado à apresentação das características, obtidas em laboratório, de um material fabricado pela Usiminas que poderá ser utilizado nos projetos com desempenho melhor do que a maioria dos aços ao silício de grãos não orientados.

6.2- Materiais mais Utilizados nos Projetos de Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Frequência.

A seguir são descritas as características eletromagnéticas dos materiais utilizados nos ábacos.

1 - Aços ao carbono SAE 1010 e SAE 1006.

Os aços ao carbono SAE 1010 e SAE 1006 apresentam curva de magnetização – figuras 6.1 e 6.2 – pouco inclinadas nas regiões de baixos valores de campo magnético, isto indica um valor de permeabilidade magnética baixo nesta região.

Conforme já dito em tópicos anteriores, estes aços, por conterem um baixo valor de carbono e silício possuem um alto valor de condutividade elétrica se comparado com os aços ao silício.

Estes dois materiais não são produzidos visando a utilização em transformadores e máquinas elétricas justificando sua alta condutividade elétrica. São utilizados em projetos de blindagens em espessuras que pode chegar a até três mm.

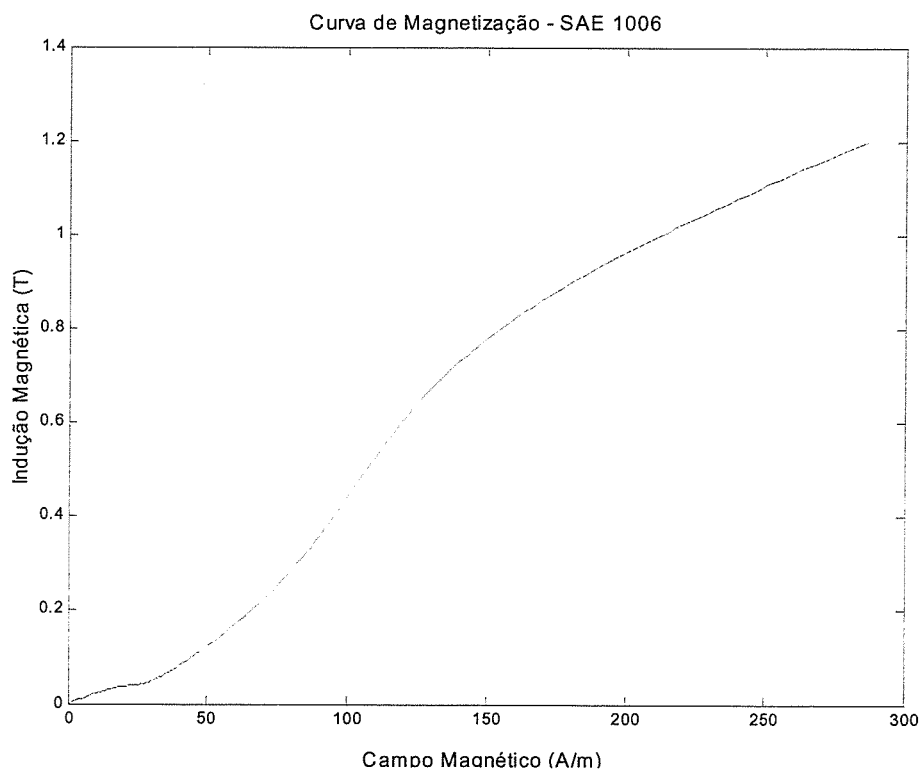


Figura 6.1: Curva de magnetização – SAE 1010. Retirada da referência [21].

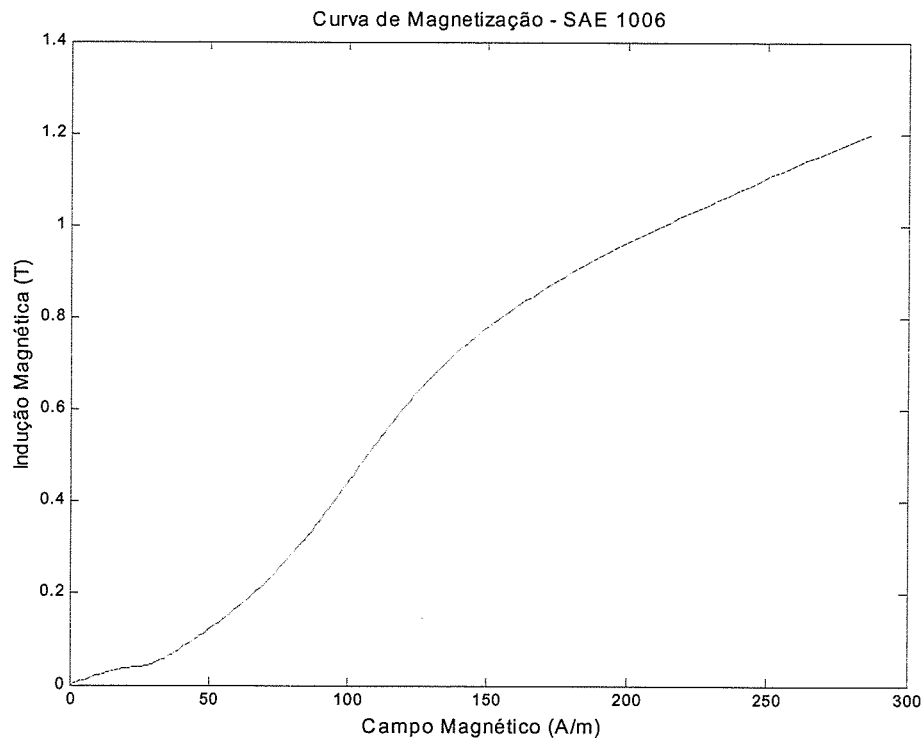


Figura 6.2: Curva de magnetização – SAE 1006. Retirada da referência [21].

2- Alumínio.

O alumínio, conforme dito no capítulo 4, é um dos materiais mais utilizados em projetos de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência. A utilização do alumínio puro (99,5%) se dá devido ao seu alto valor de condutividade elétrica em relação aos outros materiais.

3 - Aços ao silício.

Os aços ao silício, chamados também de aços elétricos, são materiais destinados ao uso em núcleos de transformadores e máquinas elétricas. São produzidos no Brasil pela Acesita. Os aços ao silício são divididos em duas categorias, a saber:

- Aços ao silício 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 à superfície da chapa e com a direção de magnetização espontânea [100] paralela à direção de

laminação. Tal textura é chamada textura de "Goss" (figura 6.3) [23] em homenagem a Norman Goss responsável por pesquisas nesta área na década de 30.

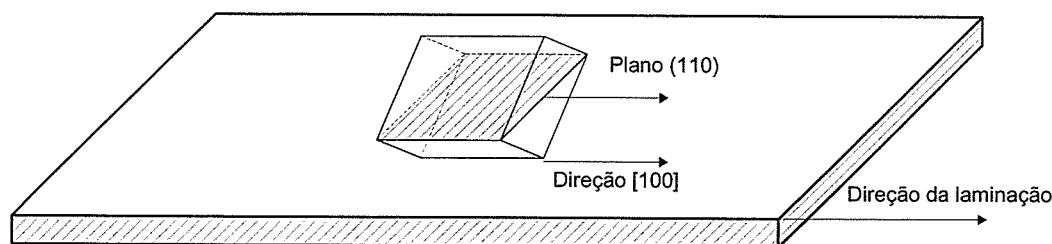


Figura 6.3: Textura de "Goss" em aço ao silício GO.

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.

- Aços 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. São divididos em aços totalmente processados e semiprocessados [23].

Somente os materiais totalmente processados serão de interesse neste trabalho. Testes já realizados [8] em aços semiprocessados indicaram a total ineficiência dos mesmos na blindagem.

As figuras 6.4 e 6.5 mostram as curvas de magnetização de um aço elétrico de grãos orientados e não orientados respectivamente.

Com uma simples observação nas figuras 6.4 e 6.5 nota-se uma maior inclinação da curva de magnetização do aço de grãos orientados o que indica uma maior permeabilidade magnética.

As denominações "E - 170 GNO" e "E - 004 GO" são especificações do fabricante, a Acesita S/A.

Os materiais que apresentam uma maior perda por corrente parasita tendem a ter um maior desempenho na blindagem de campos magnéticos [8].

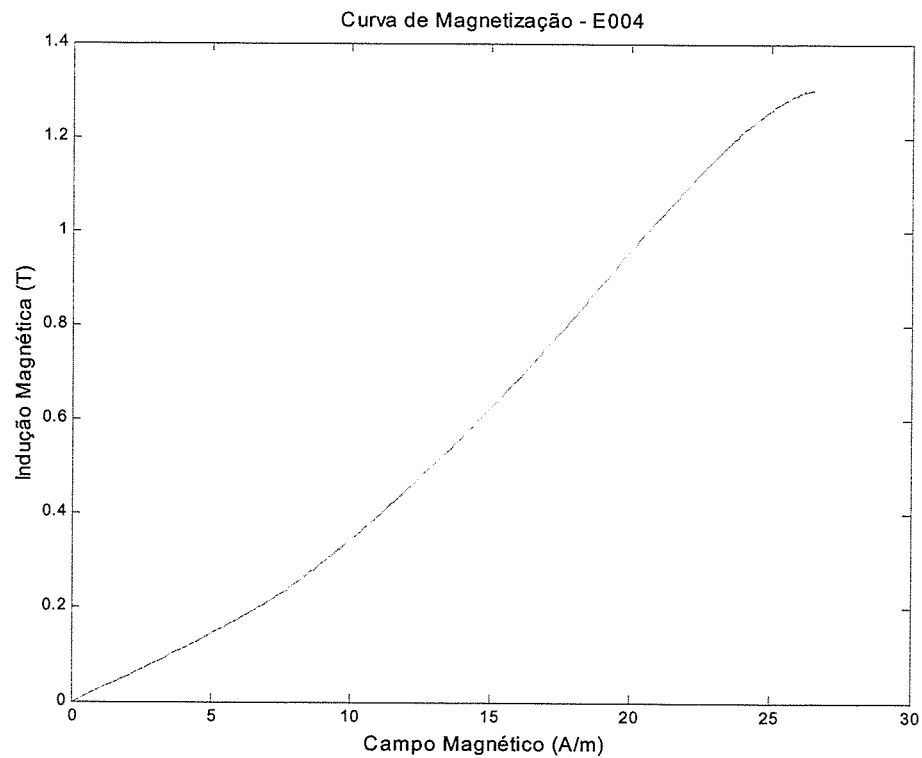


Figura 6.4: Curva de magnetização – Grão Orientados – E 004. (Pontos da curva fornecidos pela Acesita).

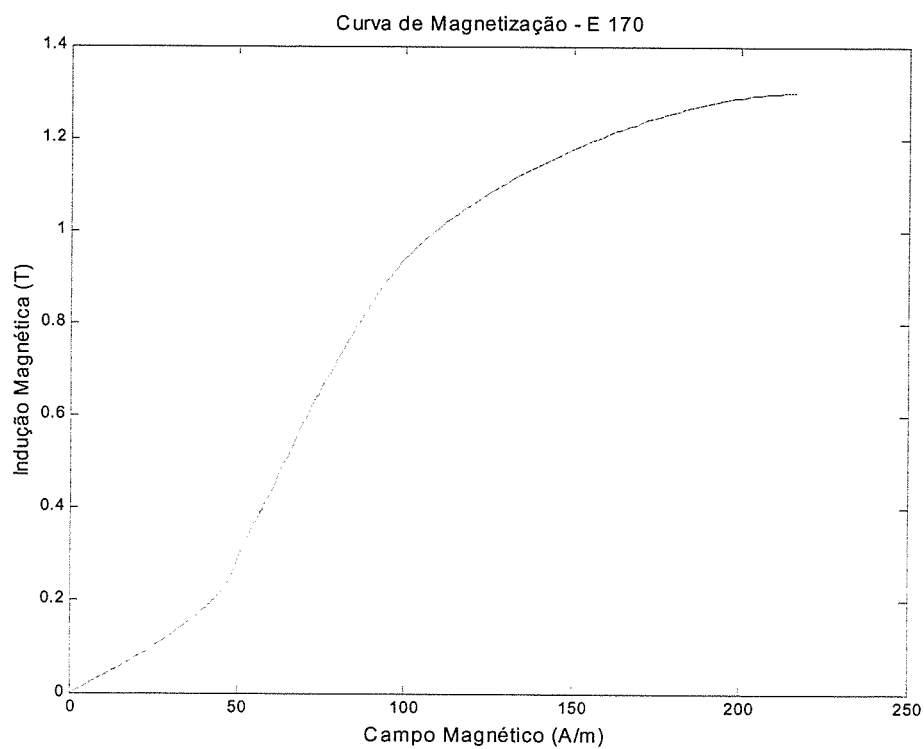


Figura 6.5: Curva de magnetização – Grão não Orientados –E 170. (Pontos da curva fornecidos pela Acesita).

4 – Ligas de níquel -ferro.

Existem no mercado outros materiais (ligas metálicas) que, devido aos altos valores de permeabilidade magnética na região de baixos valores de campo, são utilizados em projetos de blindagem de campos magnéticos de 60 Hz [22]. A maioria destas ligas é composta de aproximadamente 15% de ferro, 80% de níquel e os 5% restantes de cromo, cobre e molibdênio. São comercializadas com os nomes de “Supermalloy[®]”, e “Mumetal[®]” [22].

Devido à presença destes elementos na composição química destes materiais, a condutividade elétrica pode atingir valores ainda menores do que os tradicionais aços ao silício, o que é um fator prejudicial para a blindagem.

As figuras 6.6 e 6.7 mostram as curvas de magnetização destes dois materiais.

O Mumetal apresenta uma característica linear na região de campo magnético analisada o que indica uma permeabilidade magnética constante para baixos valores de campo. Como nos projetos de blindagem os campos magnéticos nos quais são submetidas as chapas são baixos isto é uma vantagem.

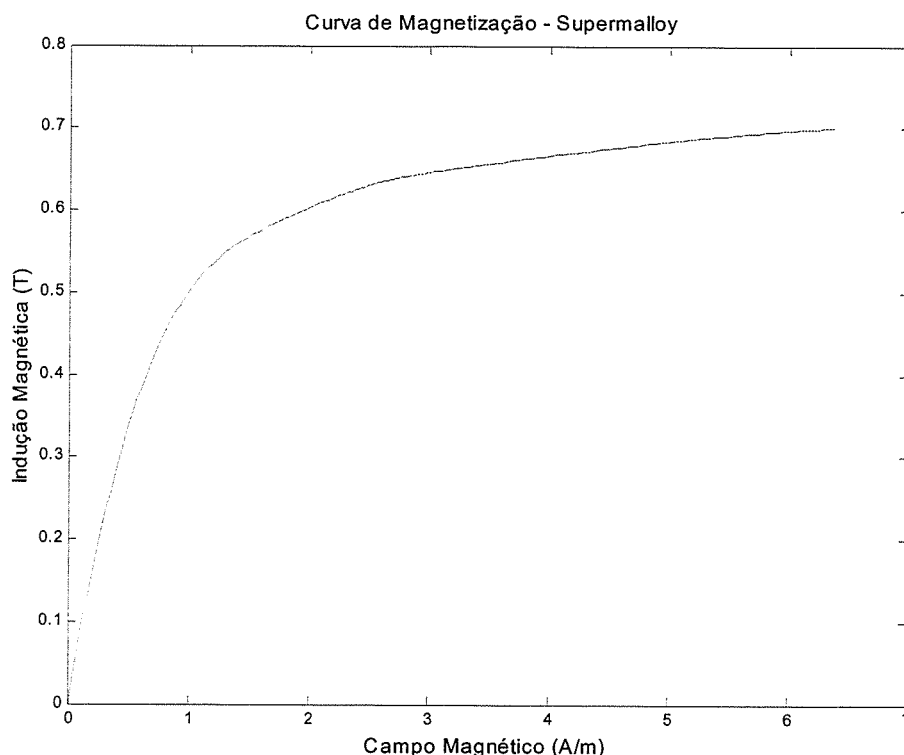


Figura 6.6: Curva de magnetização – Supermalloy. Retirada da referência [21].

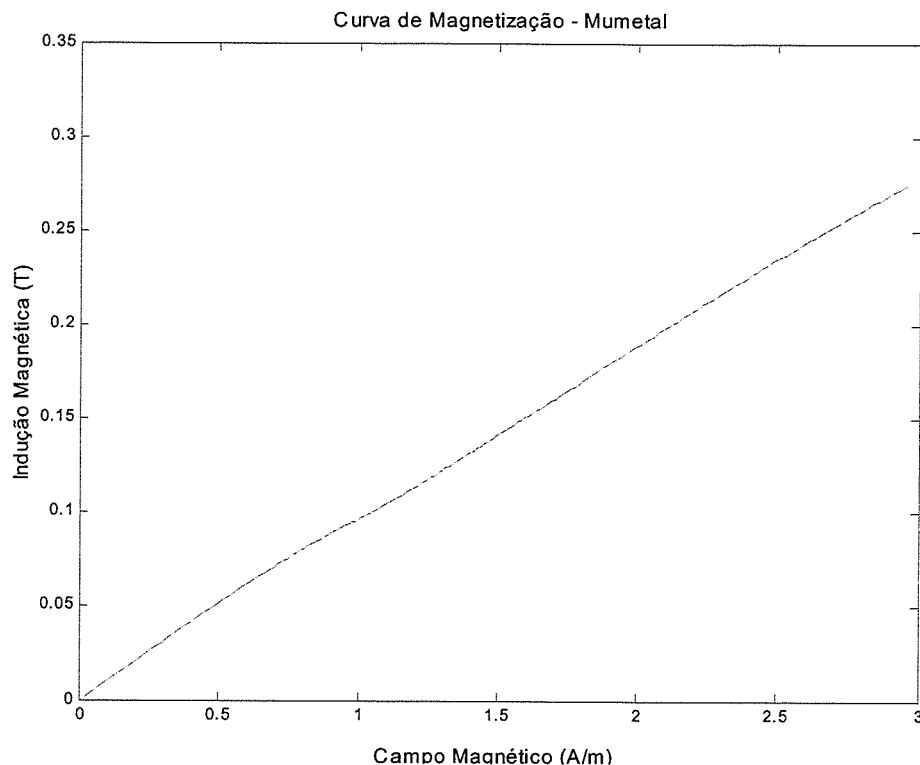


Figura 6.7: Curva de magnetização – Mumetal. Retirada da referência [21].

O alto preço das ligas de níquel – ferro, em comparação com os outros materiais de alta permeabilidade magnética como os aços ao silício de grãos orientados (GO) e não orientados (GNO) é um outro fator que tem que ser considerado nos projetos de blindagem.

Uns dos tipos de fontes de campos magnéticos mais comuns são os longos condutores ou barramentos de correntes presentes em edificações e em subestações. Neste tipo de fonte, devido ao tamanho, seria necessária uma grande quantidade de material que aumentaria o custo dos projetos.

A tabela 6.1 a seguir mostra uma comparação entre os preços, em reais, de alguns dos materiais mais usados na blindagem e as ligas de níquel - ferro.

Materiais	*Preço/Kg	Espessura (mm)	Chapa (1mx1m)
E 004 – GO	7.20	0.27	14.10
E 170 - GNO	3.40	0.50	9.30
SAE 1010	0.80	2.0	18.72
Alumínio	7.30	2.0	98.40
Mumetal	300.00	0.10	262.20

Tabela 6.1: Comparação dos preços dos materiais utilizados na blindagem.

*dados fornecidos pelos revendedores dos materiais.

Os valores apresentados na tabela 6.1 podem ser modificados dependendo da quantidade de material a ser adquirida.

É enorme a diferença entre os preços dos materiais. Apesar das ligas de níquel - ferro, devido ao elevado valor da permeabilidade magnética, necessitarem de uma menor espessura na blindagem, o preço ainda não é compensador.

Apesar do elevado preço em relação aos tradicionais aços ao silício, as ligas de níquel - ferro possuem a vantagem de possuir baixa anisotropia magnética o que facilitaria os projetos quando campos magnéticos em varias direções coexistirem.

6.3- Verificação Experimental do Método de Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Blindagem.

É apresentada neste tópico uma comparação entre o "software" utilizado na construção dos ábacos e algumas medições realizadas no laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG, conforme descrito em [8].

A fonte de campo utilizada foi o sistema de condutores trifásico. O tamanho da região limitada para as simulações é a apresentada no tópico 4.4 deste trabalho.

A figura 6.8 apresenta o esquema utilizado nas medições e simulações.

As medições foram realizadas de 20 cm em 20 cm ao logo do eixo "y" mostrado na figura até a altura de 2 m.

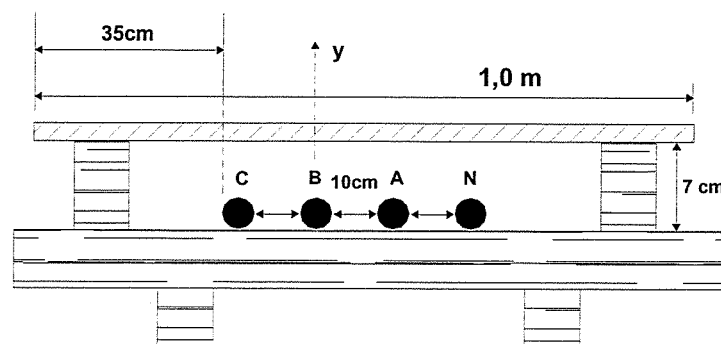


Figura 6.8: Perfil da bancada de testes utilizada em [eu].

As correntes medidas foram de 140 A nas fases "A" e "B" e 130 A na fase "C". No neutro foi medida uma corrente de 10 A.

Os materiais utilizados em [8] são: SAE 1010, E-004 GO e E 170 GNO.

As figuras a seguir apresentam os resultados.

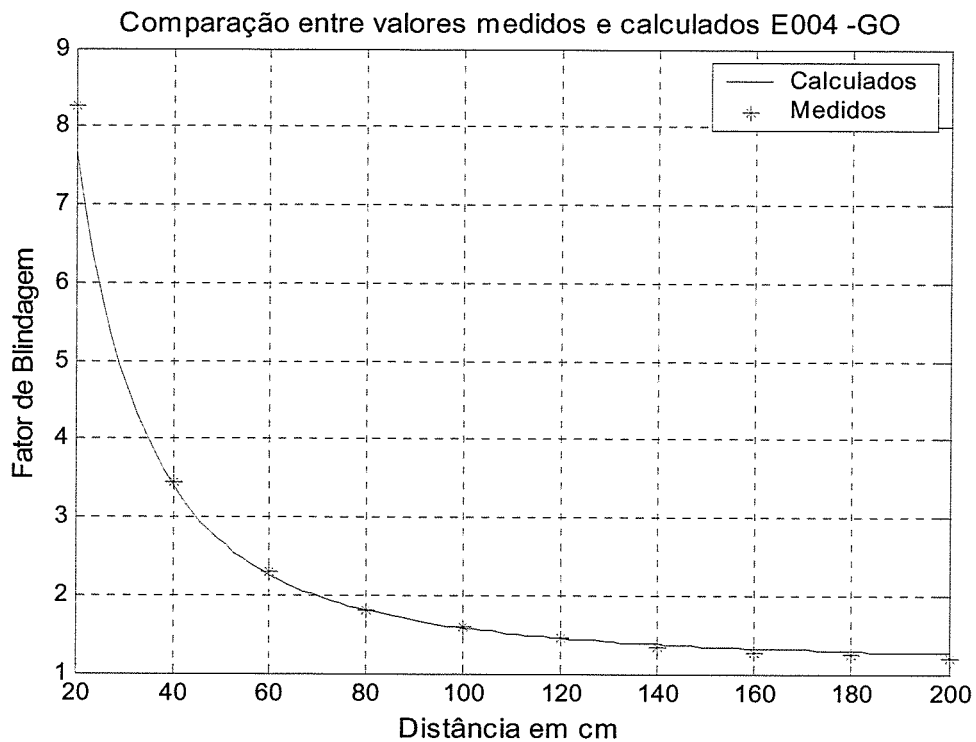


Figura 6.9: Valores medidos x calculados E 004 GO, 0.27 mm de espessura.

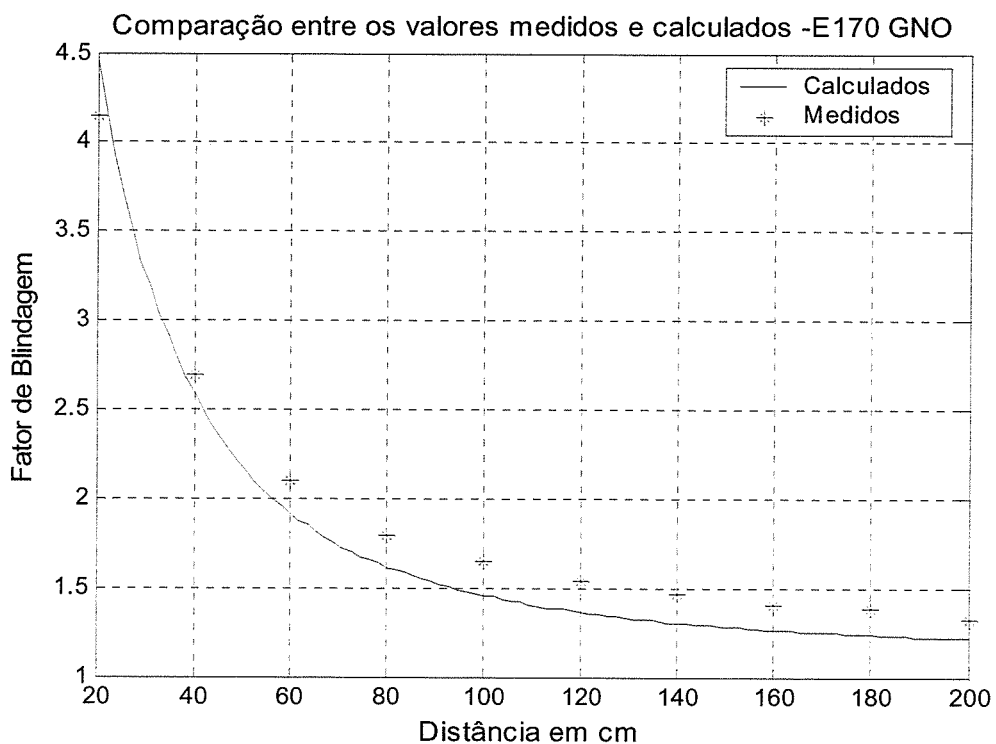


Figura 6.10: Valores medidos x calculados E 170 GNO, 0.5 mm de espessura.

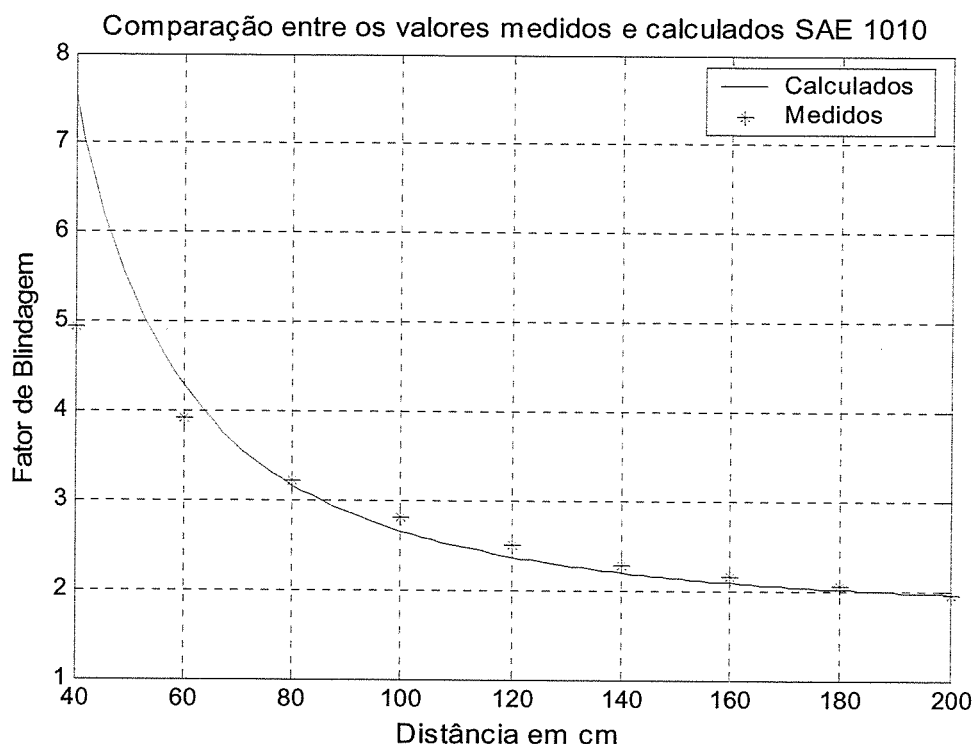


Figura 6.11: Valores medidos x calculados SAE 1010, 2 mm de espessura.

Os resultados mostram a proximidade entre os valores medidos e calculados.

A maior diferença entre os resultados é encontrada para distâncias mais próximas à fonte de campo. Nesta região as medições são mais difíceis de serem realizadas, pois uma pequena variação da posição do medidor significa uma grande diferença de valores medidos.

6.4- Análise do Desempenho dos Materiais Através da Construção de Ábacos.

Existem na literatura especializada [12], vários ábacos elaborados especialmente com o objetivo de auxiliar nos projetos de blindagem eletromagnética para altas e baixas frequências considerando as regiões de campo próximo e distante.

Todos os ábacos consideram somente fontes de campo de baixa impedância ("loops" de corrente) e, além do mais, utilizam o método de "Schelkunoff" para a determinação do fator de blindagem na região de campo próximo, introduzindo erros conforme já discutido no capítulo 2.

A seguir são apresentados alguns ábacos relacionando o fator de blindagem com: o tipo de material, a espessura da blindagem e a configuração da blindagem. São apresentados ábacos para as fontes de alta e baixa impedância na maioria dos casos.

6.4.1- Considerações gerais.

O método de elementos finitos em duas dimensões foi utilizado como ferramenta para o cálculo do campo magnético. O software utilizado - FEMM® [21] - permite que as características não lineares dos materiais, ou seja, as curvas de magnetização sejam introduzidas no programa para os cálculos.

A malha e o tamanho da região de cálculo foram os mesmos do tópico 4.3, figuras 4.3 e 4.13.

Medições realizadas no Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG dão suporte experimental aos resultados.

Os instrumentos de medição e geração de corrente foram os descritos no tópico 4.4. O aspecto físico da bancada de testes está representado nas figuras 4.19 e 4.20, porém sem a haste de sustentação do medidor de campo.

As correntes medidas e usadas nas simulações foram:

- Sistema de condutores trifásico (fonte de alta impedância): $I_a = 100 \angle 0^\circ$ A, $I_b = 100 \angle -120^\circ$ A, $I_c = 90 \angle 120^\circ$ A e $I_n = 10$ A.
- "Loop" circular (fonte de baixa impedância): $I = 100$ A.

A tabela 6.2 apresenta as características dos materiais utilizados nos ábacos.

Materiais	Condutividade relativa (σ_r)	Espessura (mm)
E 004 – GO	0.03	0.27
E 170 - GNO	0.03	0.50
SAE 1010	0.10	2.0 / 3.0
SAE 1006	0.10	2.0
Alumínio	0.60	2.0 / 4.76
Mumetal	0.02	0,10

Tabela 6.2: Características dos materiais utilizados nos ábacos.

6.4.2 – Chapas planas.

A configuração de blindagem utilizando chapas planas é a mais utilizada nos projetos. É a forma na qual as chapas são fabricadas e não é necessário nenhum

tipo de conformação nas mesmas para o emprego nos projetos. A maioria das fontes de campo magnético possui geometria tal que permite a utilização de chapas planas.

Os cálculos do fator de blindagem foram realizados a uma distância de 1 m para a fonte de alta impedância e 1,10 m para a fonte de baixa impedância em torno da fonte campo tomando-se como referência o condutor "B" para a fonte de alta impedância e o centro do "loop" de corrente para a fonte de baixa impedância. As linhas traçadas nos ábacos representam o fator de blindagem.

6.4.2.1 – Fonte de alta impedância.

Os materiais utilizados foram: o alumínio, os aços ao carbono SAE 1010 e SAE 1006, os aços elétricos "E - 170 GNO" e "E - 004 GO" e o Mumetal. Os termos GNO e GO significam respectivamente grãos não orientados e grãos orientados.

As curvas de magnetização, assim como a condutividade elétrica dos materiais ferromagnéticos foram fornecidas pela Acesita – MG e pela referência [21].

A configuração geral da fonte de campo magnético e da blindagem é apresentada na figura 6.8.

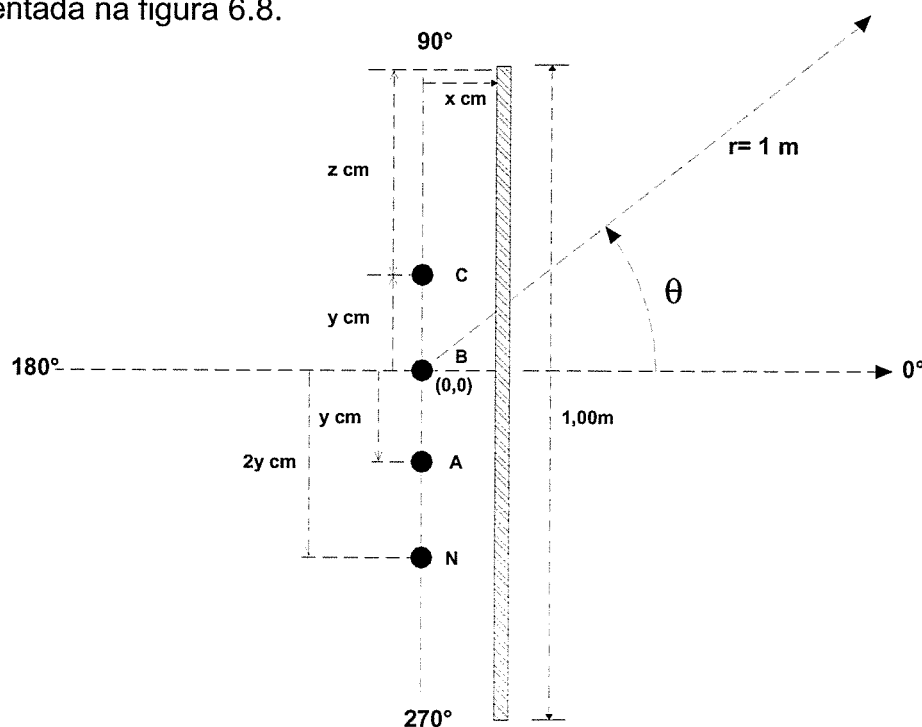
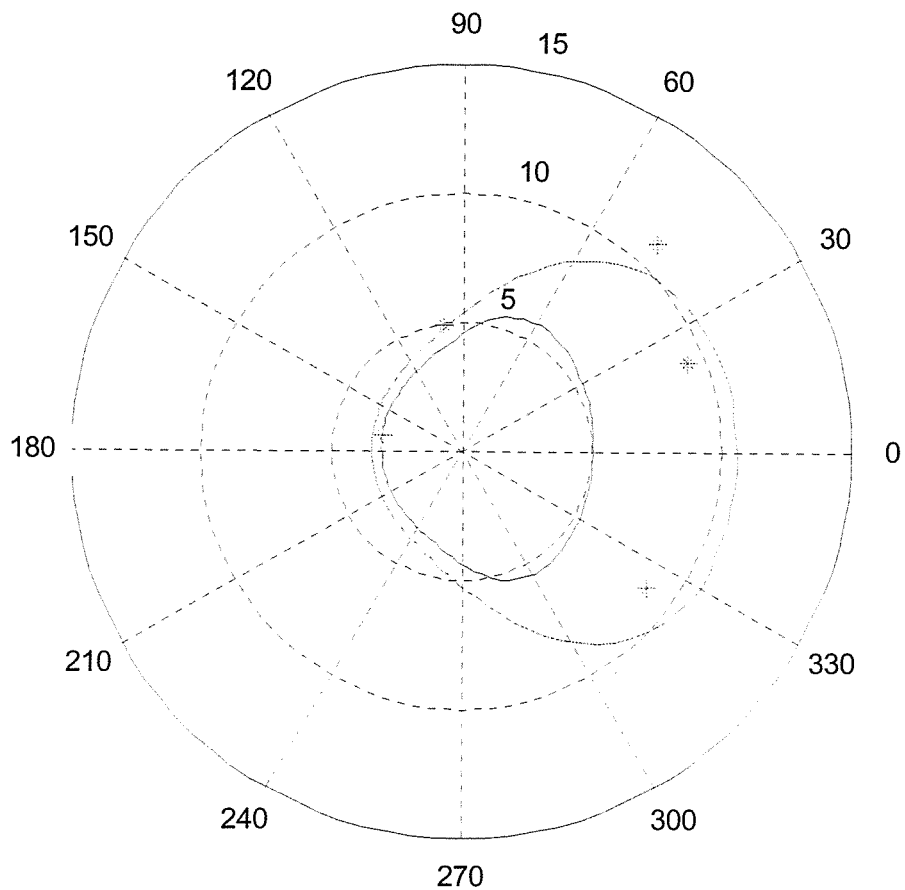
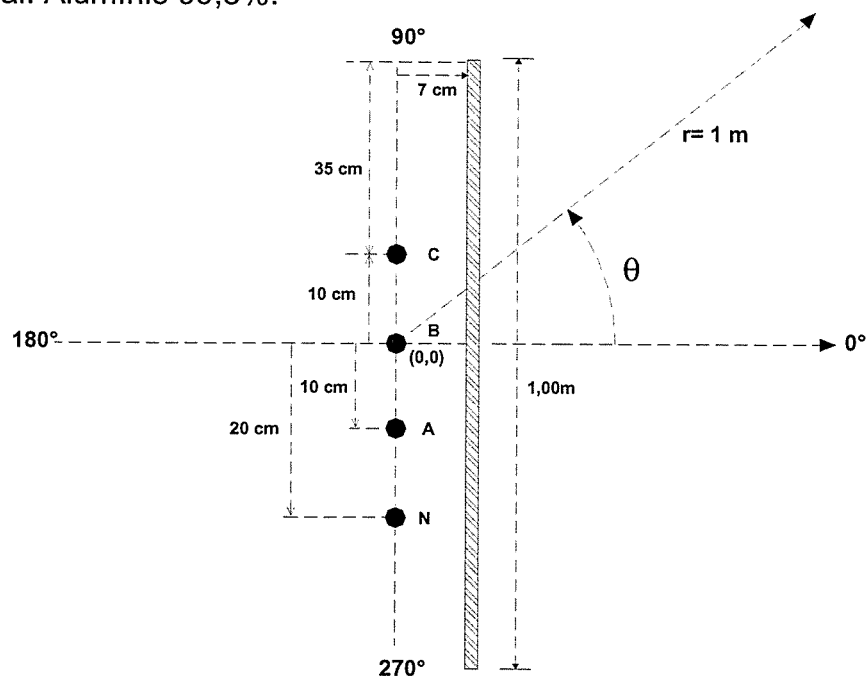


Figura 6.8: Fonte de alta impedância.

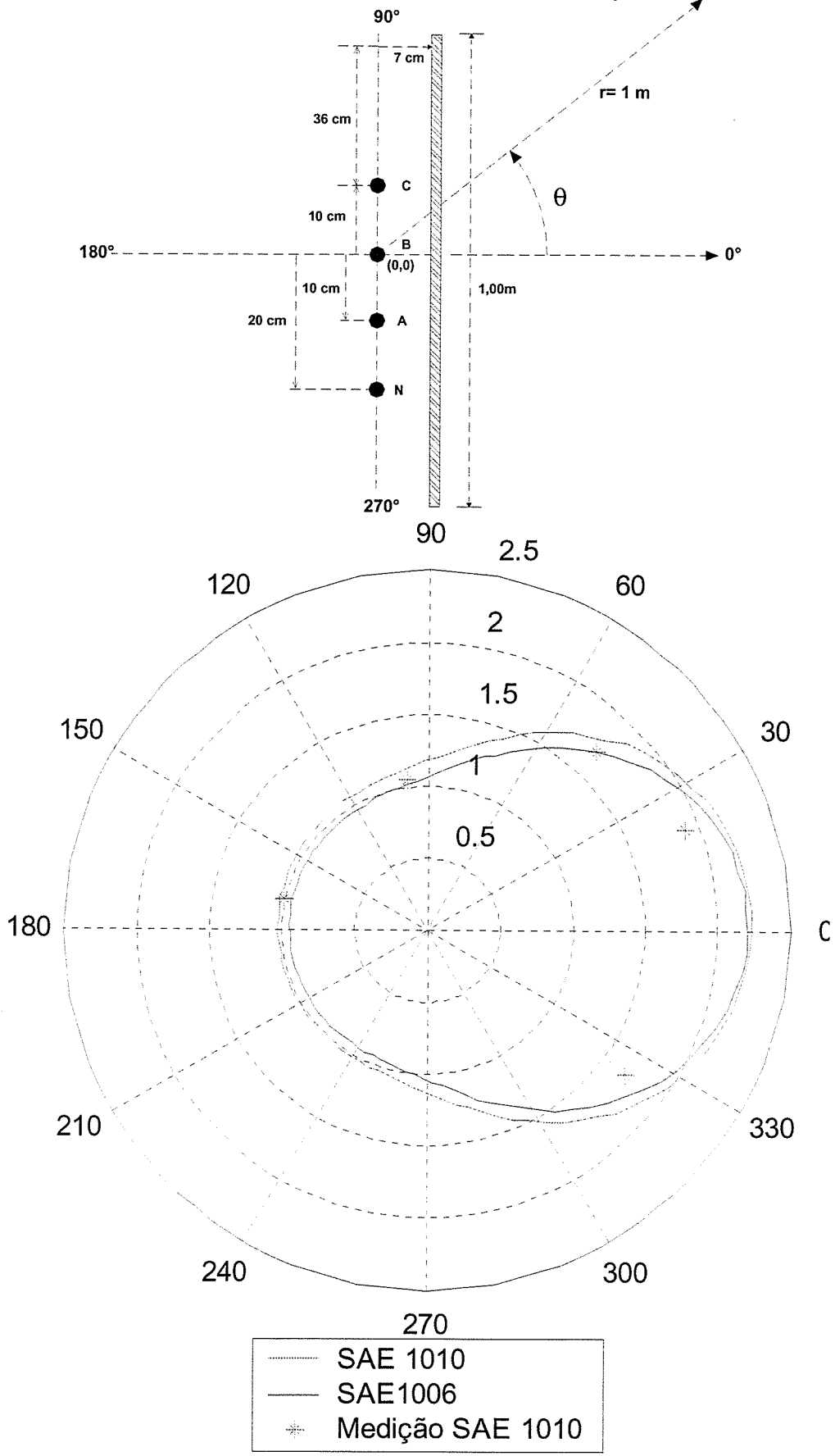
Sequem os ábacos obtidos.

Material: Alumínio 99,5%.

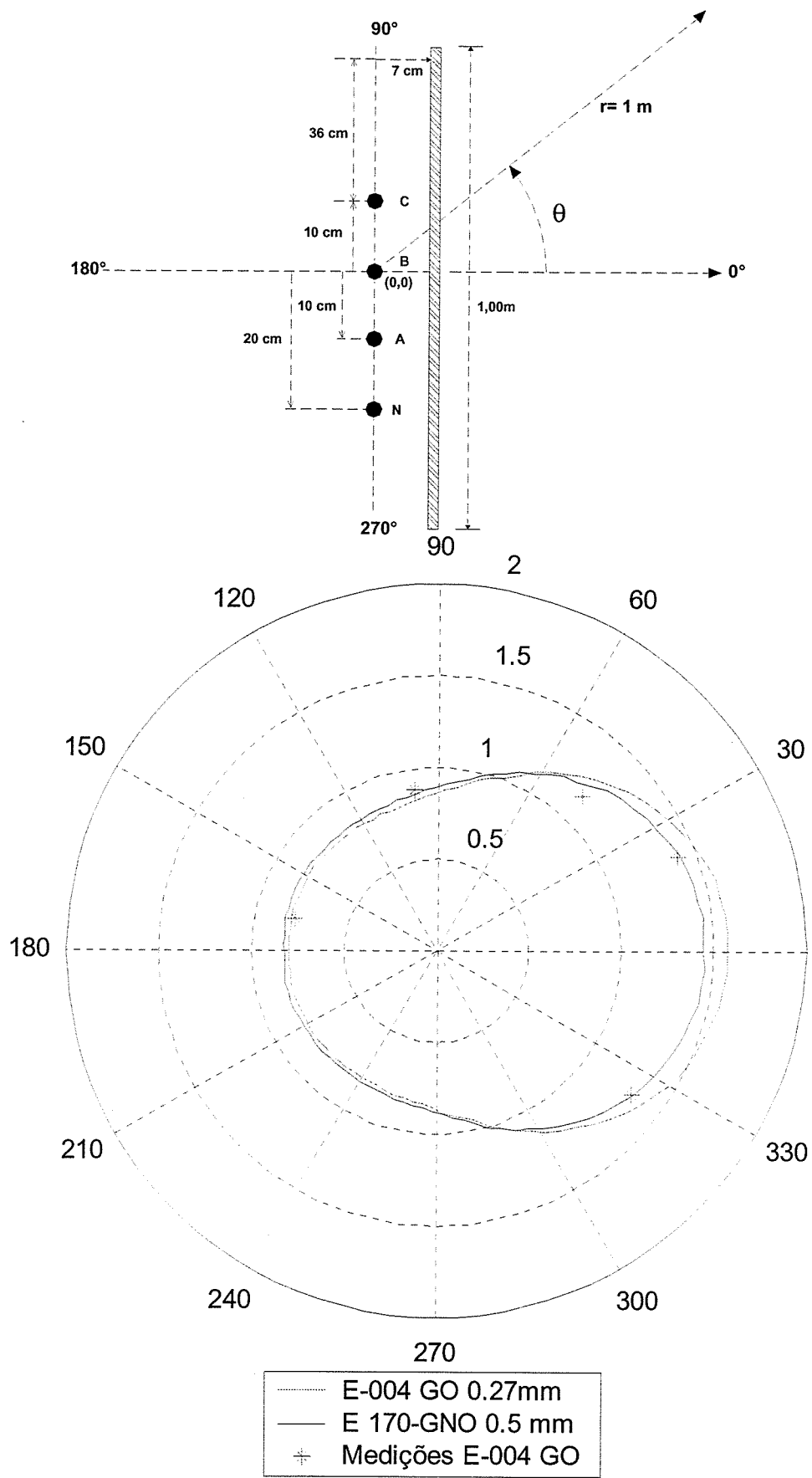


-----	Alumínio 99,5% - 4.76mm
————	Alumínio 99,5% - 2mm
+	Medições - Alumínio 4.76mm

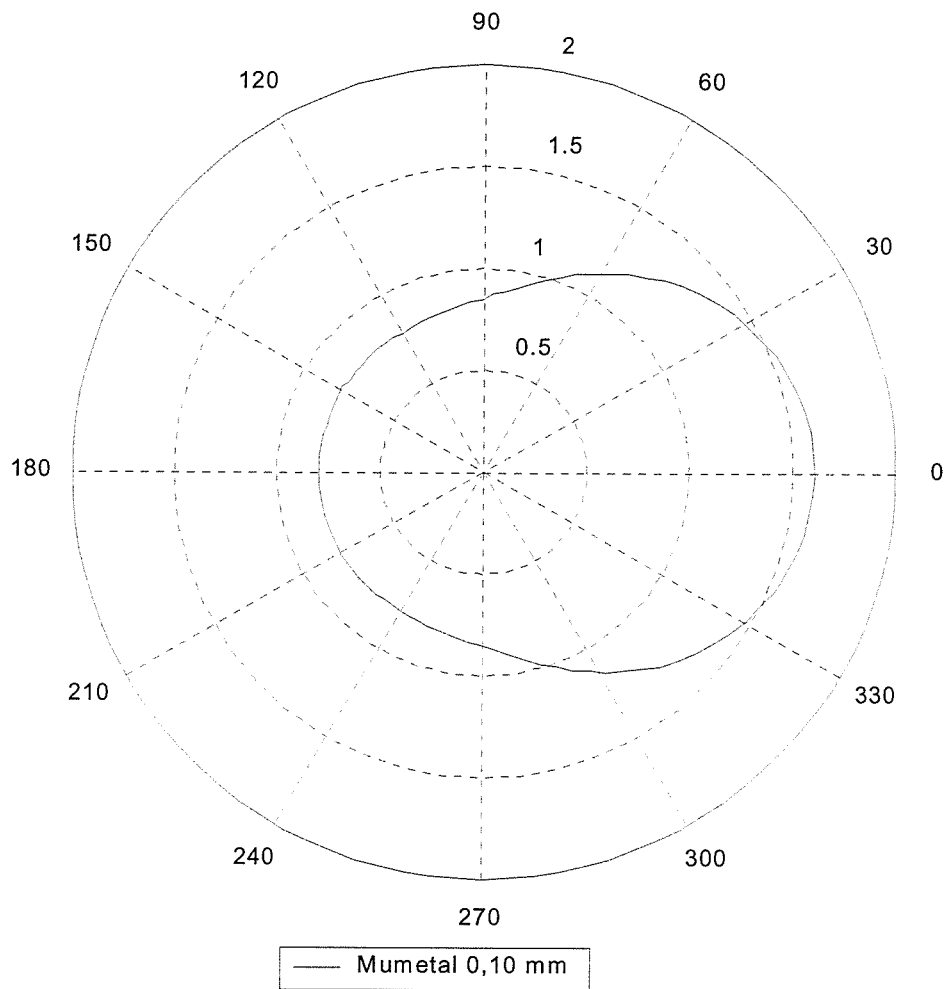
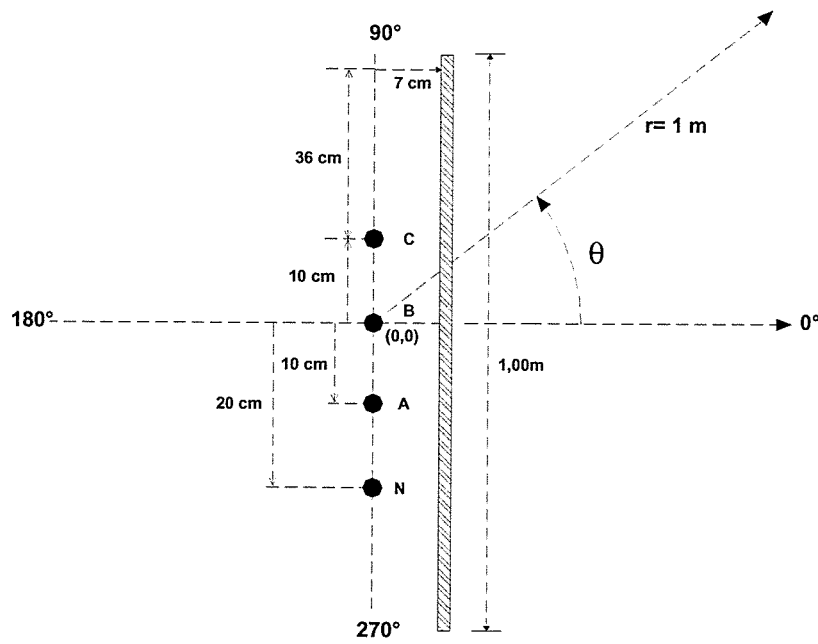
Materiais: Aços ao Carbono SAE 1010 e SAE 1006. Espessura 2 mm



Materiais: Aços Elétricos "E -004 GO" e "E 170 GNO"



Material: Mumetal



6.4.2.2 – Fonte de baixa impedância.

Os materiais utilizados foram os mesmos do tópico anterior. A configuração geral da fonte de campo magnético e da blindagem é apresentada na figura 6.9.

Nas simulações o sistema de coordenada utilizado é o cilíndrico devido à simetria do problema.

Para o alumínio e o SAE 1010 foram utilizadas duas chapas de 2 m de comprimento e 1 m de largura cada, de maneira a juntas formarem uma blindagem quadrada de 2 m de lado.

Para os aços elétricos foram utilizadas 4 chapas de 1 m de lado cada, formando também uma blindagem quadrada de 2 m de lado .

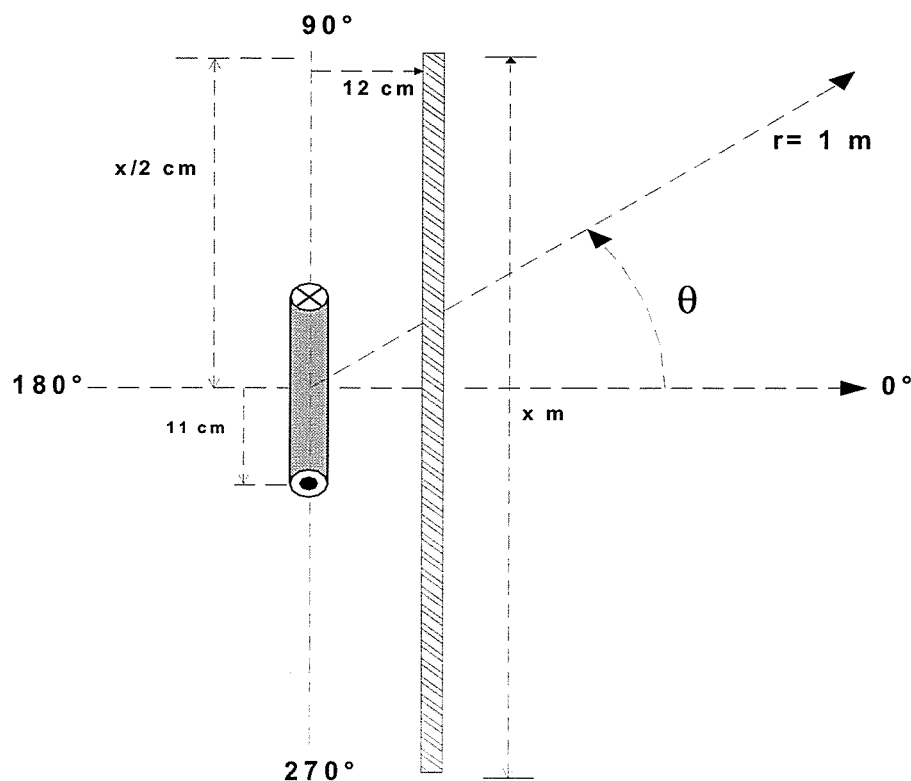
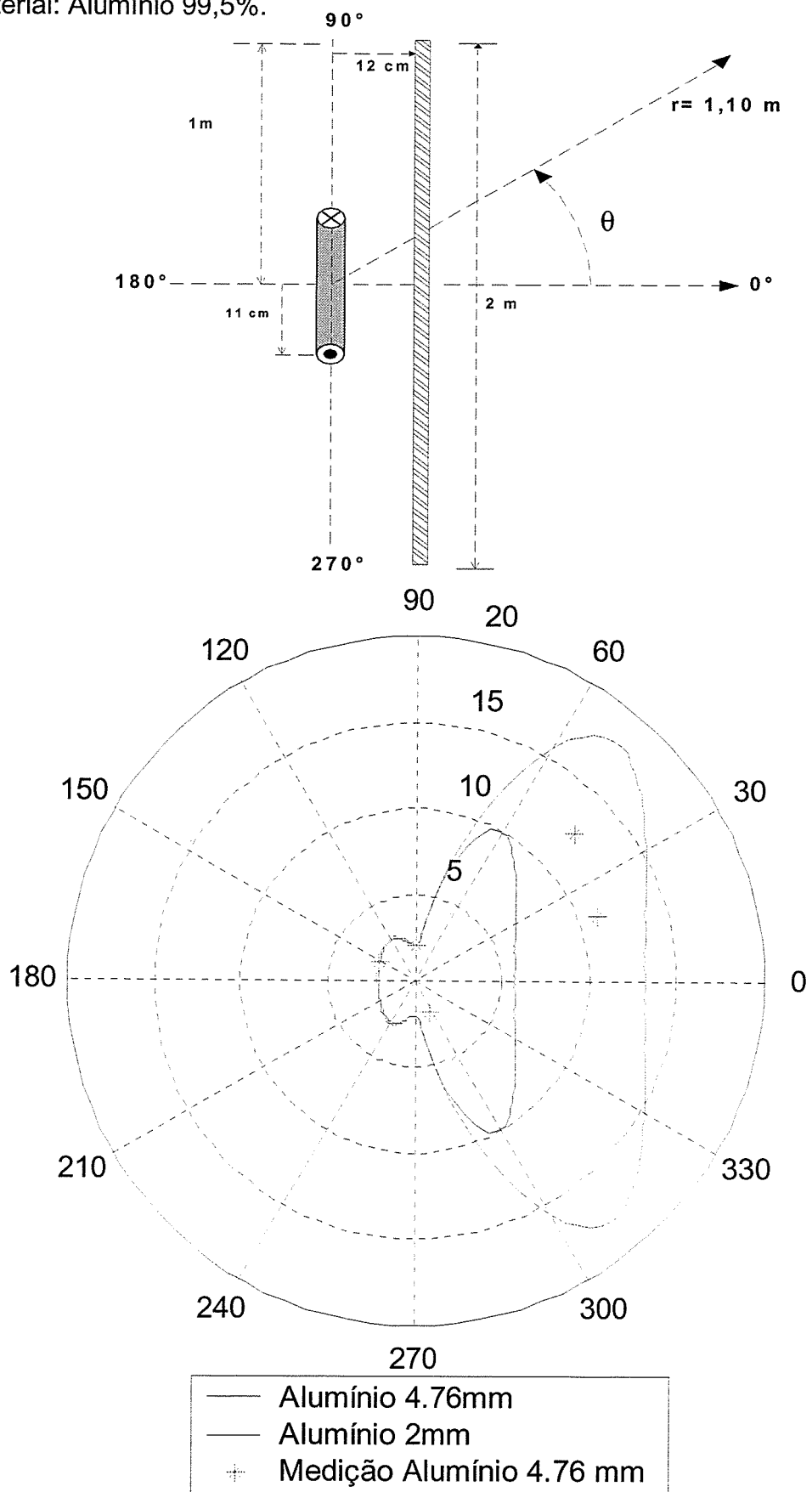


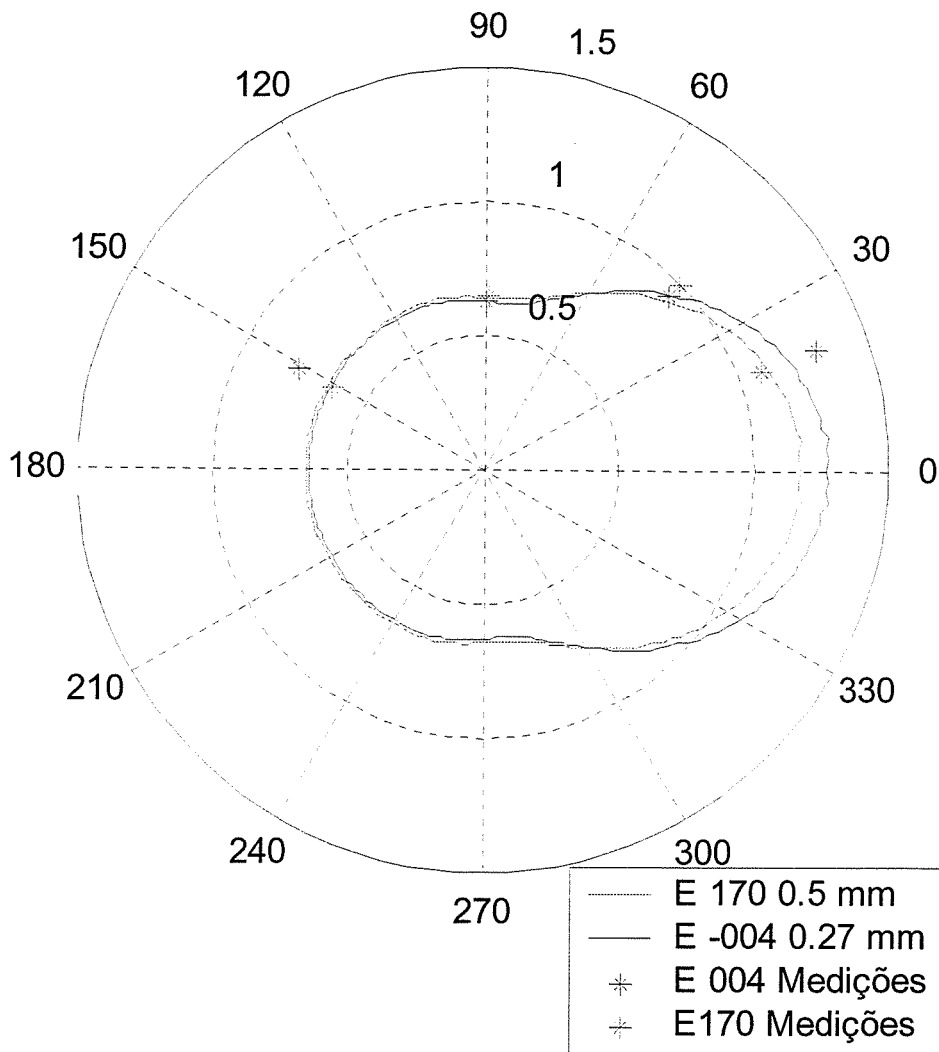
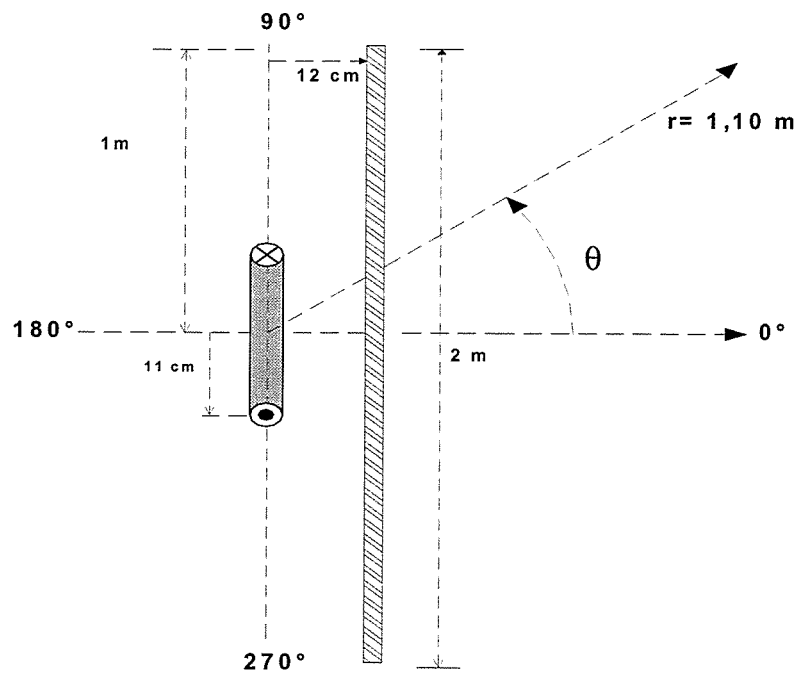
Figura 6.9: Fonte de baixa impedância.

Seguem os ábacos obtidos.

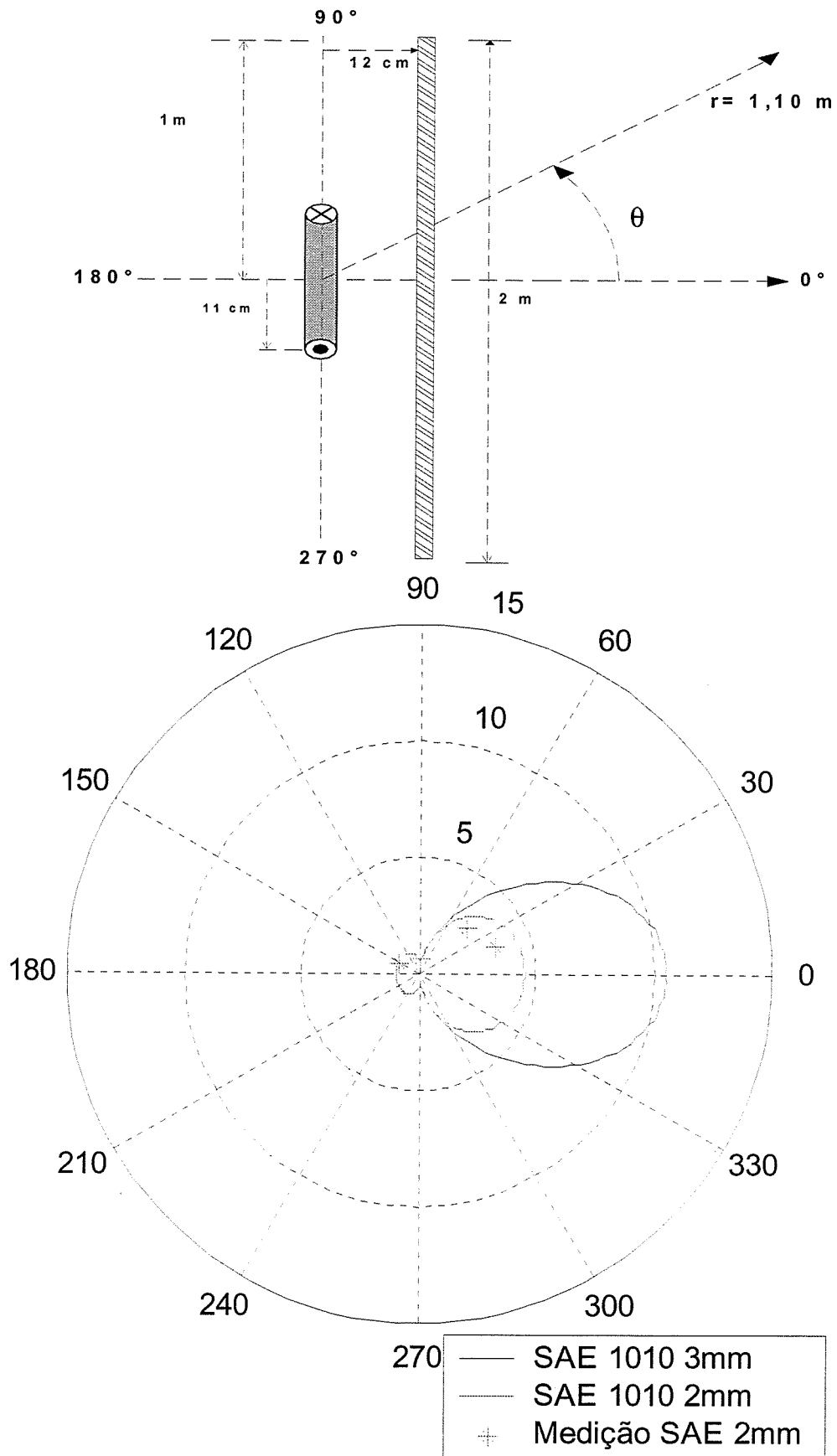
Material: Alumínio 99,5%.



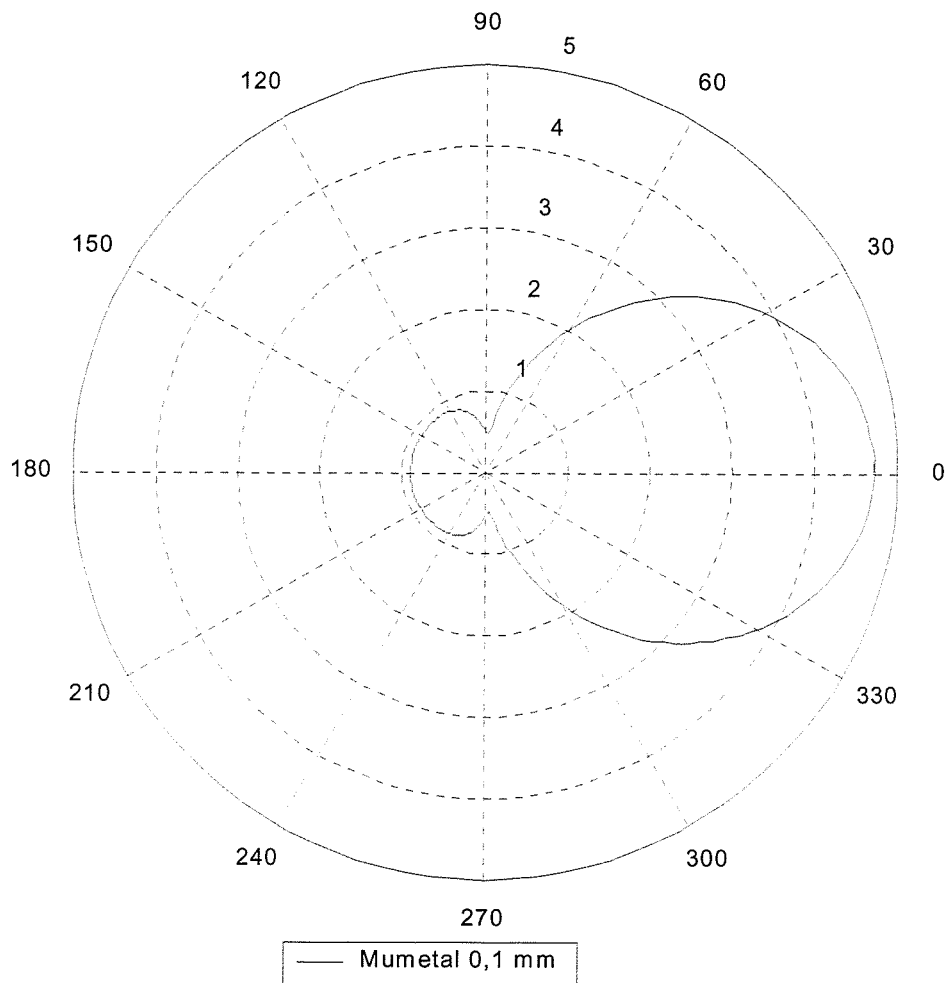
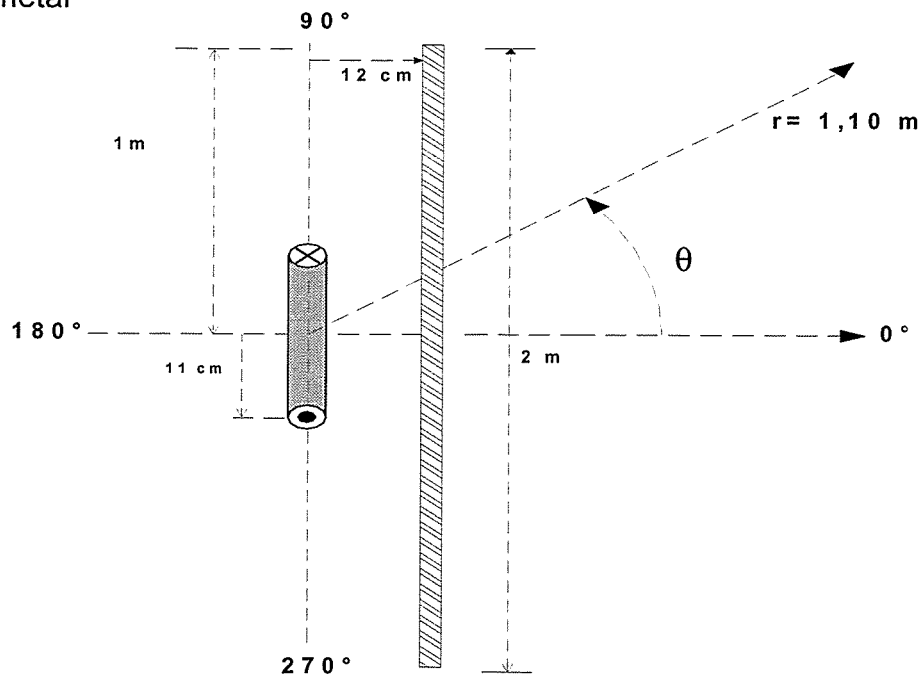
Materiais: Aços ao Silício "E 170 GNO" e "E 004 GO".



Material: Aços ao Carbono SAE 1010.



Material: Mumetal



6.4.3 – Cilindros metálicos.

A configuração de blindagem utilizando cilindros metálicos é mais difícil de ser implementada, pois os materiais mais utilizados na blindagem (aços ao silício, aços ao carbono e alumínio) são geralmente fabricados na forma de chapas planas. Deve-se, neste tipo de configuração, utilizar materiais com espessuras mais finas.

A geometria da fonte de campo magnético é outro fator que deve ser considerado uma vez que a forma cilíndrica só deverá servir para condutores longos de corrente, ou seja, fontes de alta impedância.

O processo de conformação de uma chapa metálica plana em um cilindro para ser utilizada como blindagem deve ser estudado, pois nos materiais ferromagnéticos o aquecimento das chapas pode influenciar na estrutura metalográfica do material fazendo com que as propriedades magnéticas sejam alteradas.

Uma alternativa para este possível problema seria a utilização de outro tipo de emenda como parafusos metálicos no lugar da solda tradicional.

As correntes nas fases foram às mesmas utilizadas na configuração de chapas planas (tópico 6.3.2.1).

A figura 6.10 apresenta a configuração da blindagem na qual foram traçados os ábacos.

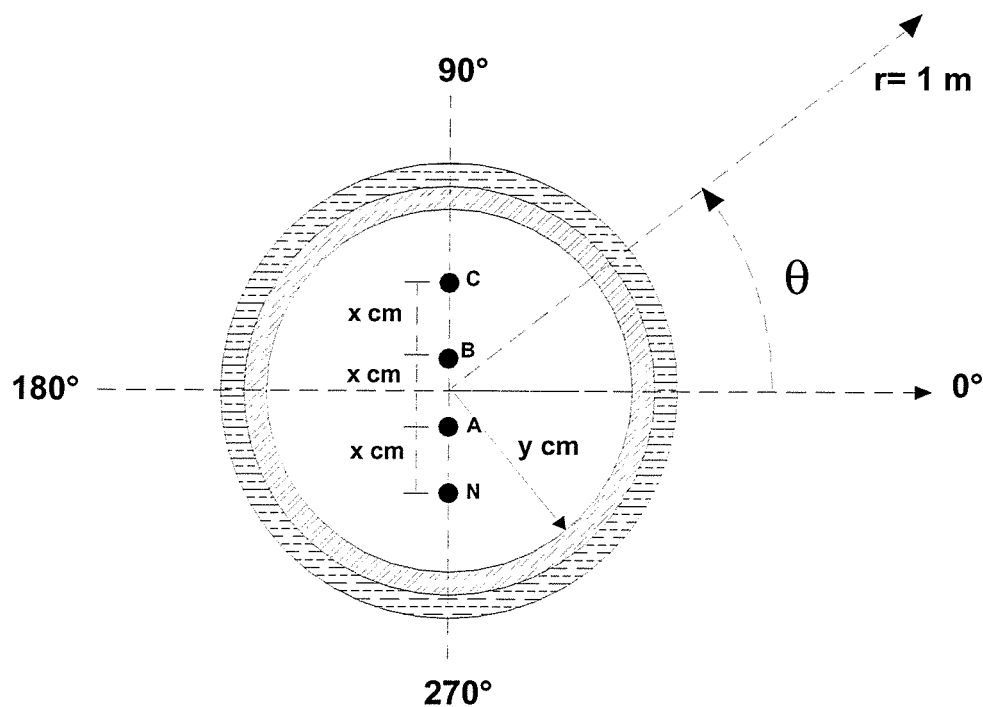
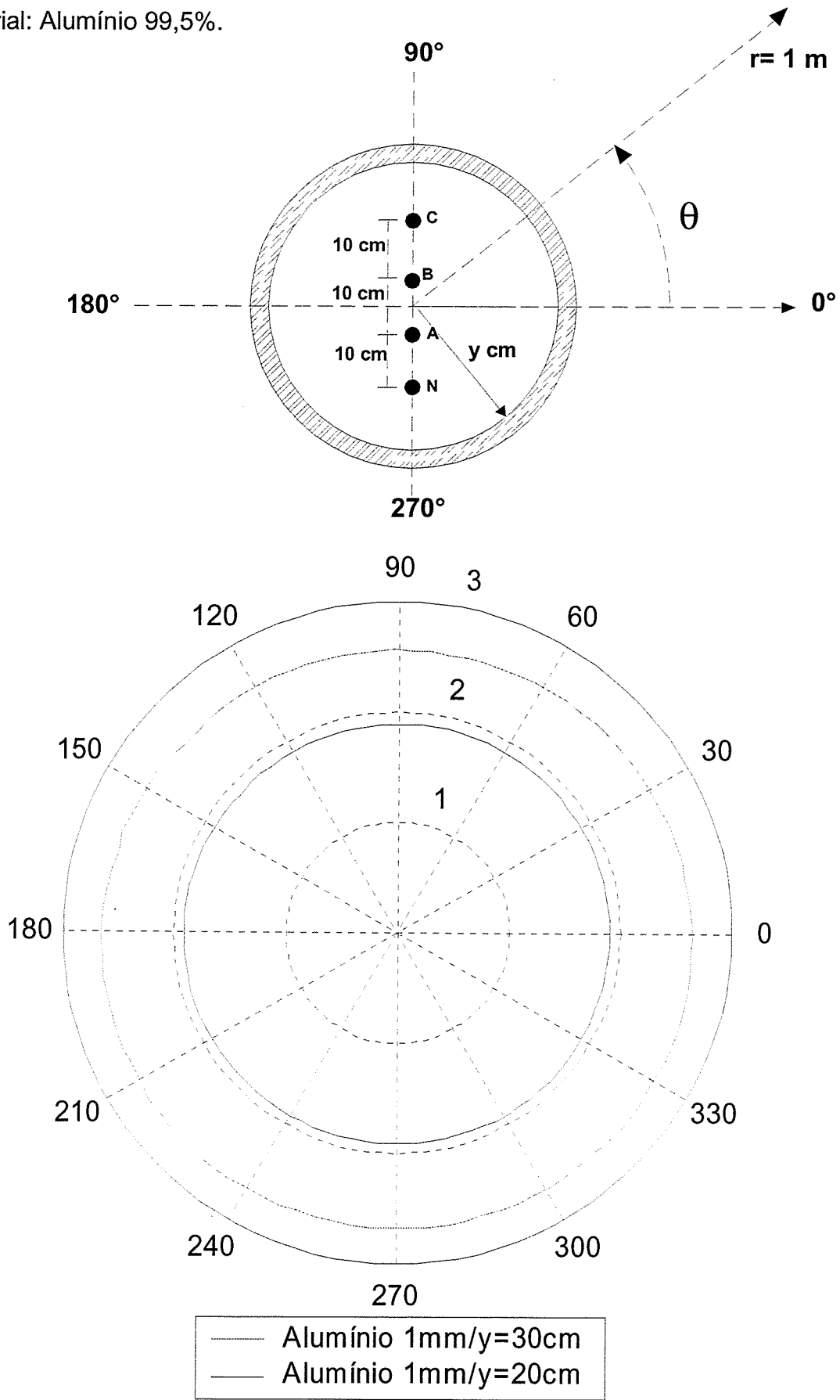
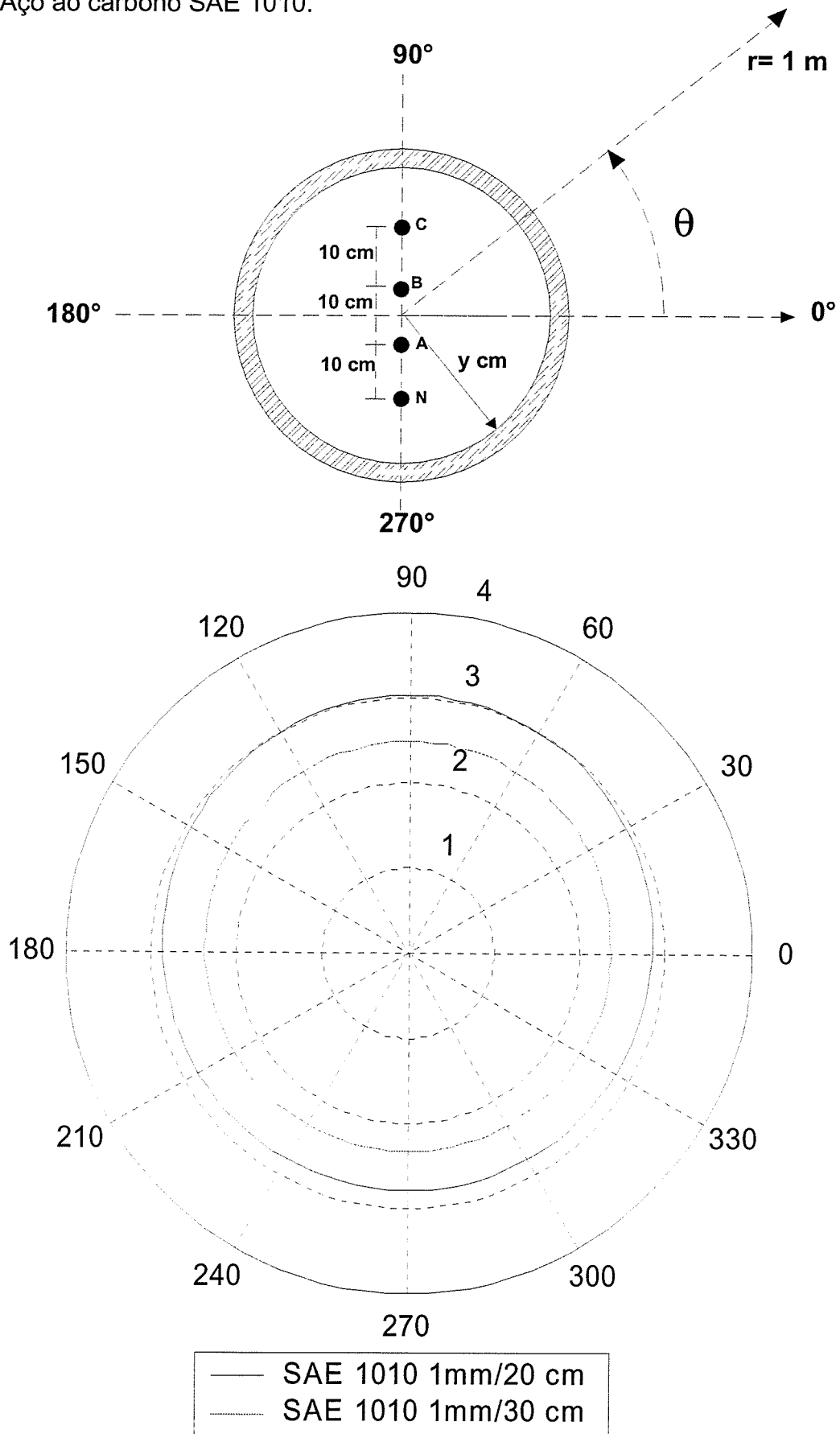


Figura 6.10: Fonte de alta impedância - configuração cilíndrica.

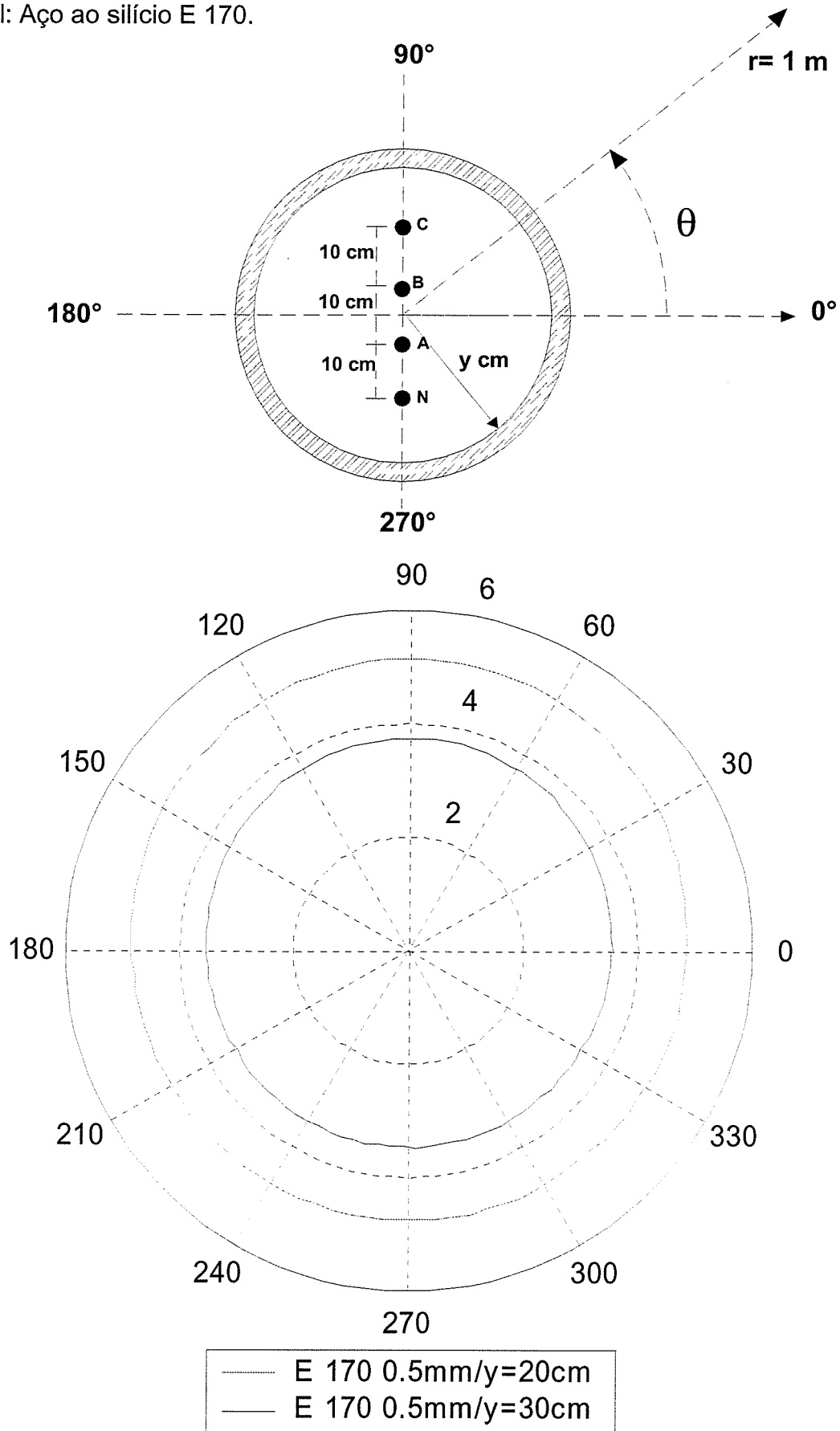
Material: Alumínio 99,5%.



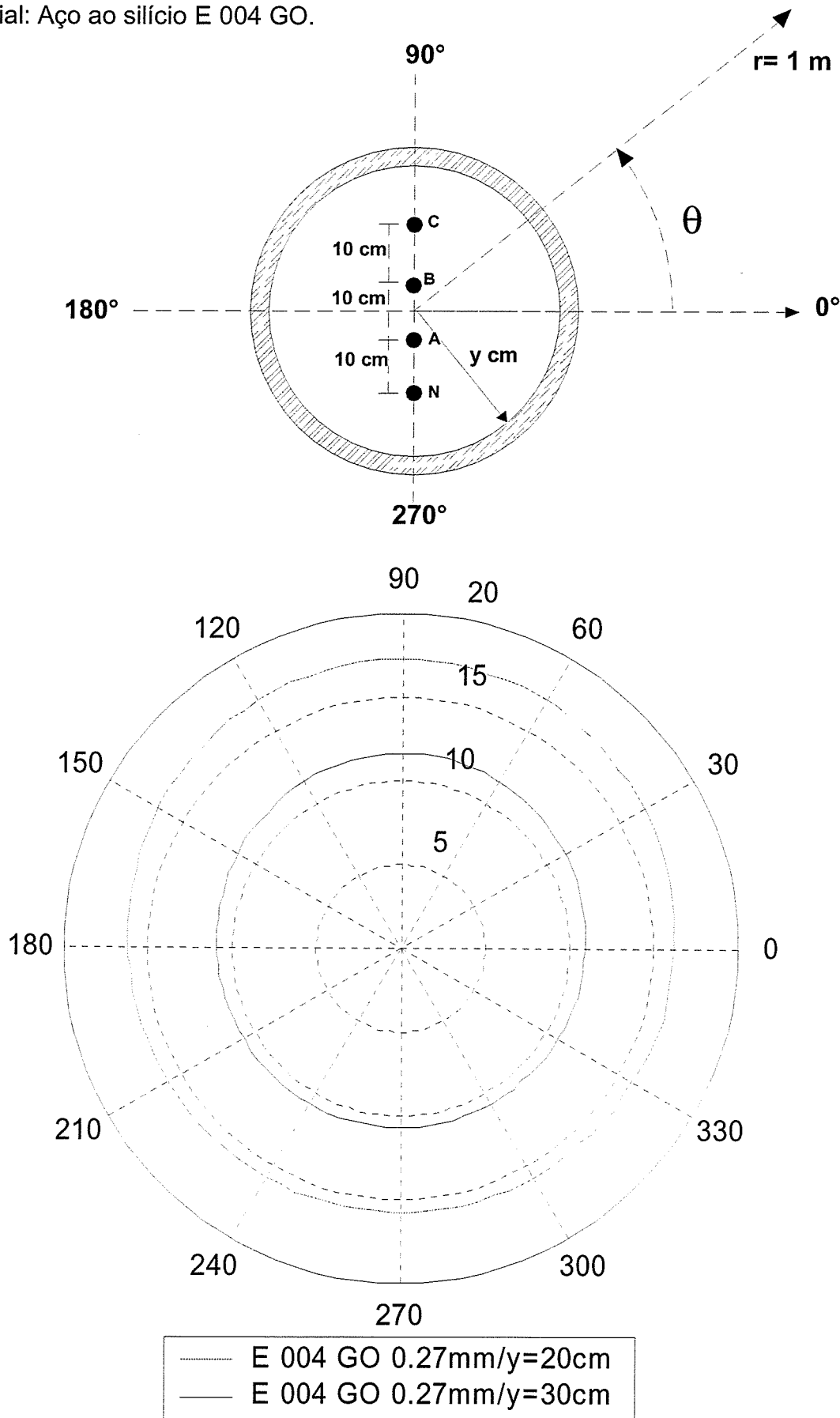
Material: Aço ao carbono SAE 1010.



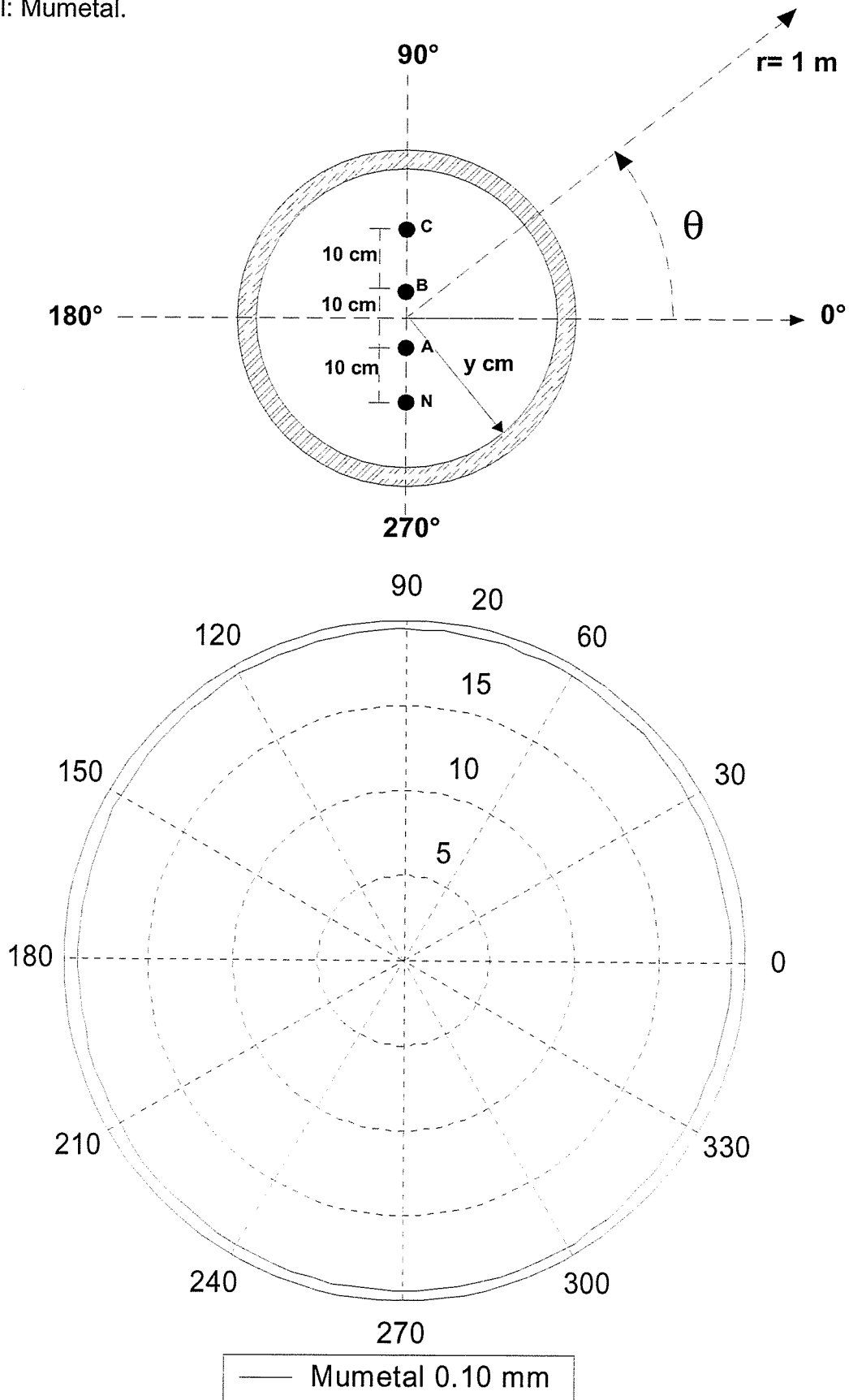
Material: Aço ao silício E 170.



Material: Aço ao silício E 004 GO.



Material: Mumetal.



6.5 – Considerações Finais.

Este capítulo apresentou alguns ábacos relacionando os desempenhos dos materiais mais utilizados nos projetos de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência. Os resultados do fator de blindagem mostrados nos ábacos diferem bastante dos obtidos por alguns autores [12] que abordam o problema pelo método de "Schelkunoff".

Os resultados mostraram que a configuração da blindagem é um fator determinante no desempenho dos materiais. O desempenho dos materiais ferromagnéticos é maior, na configuração de blindagem cilíndrica quando o raio do cilindro é menor, o oposto ocorre com o alumínio. Este fato já foi discutido no capítulo 5 e deve ser considerado nos projetos.

A configuração cilíndrica tem a vantagem de conferir um fator de blindagem uniforme em torno da fonte de campo, porém o projeto deste tipo de configuração envolve uma etapa extra que é a de conformar as chapas que são, para os tipos de materiais utilizados, naturalmente fabricadas planas.

Os materiais ferromagnéticos quando utilizados na forma de chapas planas, em especial os aços elétricos, apresentam um fator de blindagem menor do que um em determinadas regiões em torno da fonte de campo, isto pode ser explicado pela reflexão em fase com o campo incidente do campo na blindagem. O alumínio, no entanto, reduz o campo em qualquer região em torno da fonte para toda as configurações de blindagens testadas no trabalho.

Até o momento foram avaliados com medições os desempenhos de diversos materiais e técnicas de blindagem e os resultados não foram satisfatórios ora devido ao baixo fator de blindagem [8], ora devido ao custo proibitivo da técnica analisada.

Os materiais disponíveis no mercado ou são demasiadamente caros como as ligas de níquel – ferro ou não apresentam valores de permeabilidade magnética e condutividade elétrica adequados para a função como os aços elétricos, que são propositalmente fabricados com baixa condutividade elétrica objetivando o emprego em máquinas elétricas e transformadores.

Uma exceção é o Mumetal que apresentou um desempenho na blindagem superior aos demais na configuração cilíndrica mesmo sendo utilizado na espessura de 0,1 mm. O altíssimo preço deste material torna sua utilização inviável

principalmente quanto as fontes de campos forem extensas como é o caso dos condutores trifásicos de correntes.

Nos próximos capítulos será apresentado um aço fabricado pela USIMINAS que apresenta um desempenho melhor e um custo mais baixo do que a maioria dos materiais testados até aqui.

7- Proposta de um Material para Blindagem do Campo Magnético de 60 Hz.

7.1- Introdução.

As simulações realizadas no capítulo anterior mostraram que ainda não é satisfatório o desempenho dos materiais nas configurações de blindagem mais utilizadas em projetos. Ficou claro até aqui que os parâmetros condutividade elétrica e permeabilidade magnética devem ser elevados.

Na blindagem "sanduíche" é comum o emprego de dois materiais que possuam estas características separadamente como o aço (alta permeabilidade magnética) e o alumínio (alta condutividade elétrica), mas como já foi dito, esta técnica de blindagem é evitada devido ao elevado peso e custo dos materiais envolvidos.

Um estudo teórico da influência da microestrutura e dos elementos químicos presentes nos aços elétricos como o alumínio e o silício na condutividade e permeabilidade é feito, onde é mostrado que são prejudiciais à blindagem.

O processo de fabricação dos aços semi processados é descrito brevemente assim como as etapas de um tratamento térmico de recozimento e descarbonetação para otimização das propriedades magnéticas do material.

Um aço semi processado, fabricado pela USIMINAS - USICORE 450 - é proposto como alternativa para substituir os materiais mais utilizados na blindagem sendo que, neste capítulo, é analisado seu desempenho antes do tratamento térmico final de recozimento e descarbonetação.

Por fim, são apresentadas a estrutura metalográfica e a composição química resultante do tratamento térmico aplicado junto com os procedimentos na obtenção da curva de magnetização e da condutividade elétrica.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de simulações e medições deste material após a realização do tratamento térmico.

7.2- Fatores que Influenciam a Permeabilidade Magnética e a Condutividade Elétrica dos Aços.

Conforme já discutido no capítulo 5, altos valores de permeabilidade magnética associados a altos valores de condutividade elétrica são fundamentais para um bom desempenho do material na blindagem do campo magnético.

A microestrutura e a composição química são os principais fatores que influenciam as propriedades elétrica e magnética dos materiais ferrosos [23].

Segue uma avaliação destes dois fatores.

1- Composição química.

A composição química tem importância fundamental nas características elétrica e magnética dos materiais ferrosos. O principal elemento presente nos aços elétricos é o silício que pode chegar a teores de até 3,50% [23].

O efeito do silício é diminuir a condutividade elétrica dos materiais ferrosos e são adicionados em teores elevados nos aços elétricos tornando-os adequados ao uso em motores e transformadores. Elevados valores de condutividade elétrica causam grandes perdas devido à presença das correntes parasitas.

A tabela 7.1 [11,23] mostra como varia a condutividade dos aços com o teor de silício e alumínio. A terceira coluna representa os valores de condutividade relativa ao cobre (57.6MS/m).

Teor de Si +Al (%)	Condutividade MS/m	σ_r
0.00	9.80	0,170
0.06	8.12	0,141
0.15	5.88	0,102
0.45	5.00	0,087
0.80	4.17	0,072
1.25	3.45	0,060
1.50	3.13	0,054
2.05	2.63	0,046
2.90	2.08	0,036
3.25	1.96	0,034
3.60	1.82	0,032
3.65	1.79	0,031
3.75	1.75	0,030

Tabela 7.1: Variação da condutividade dos aços silício em função do teor de silício.

As três últimas linhas representam teor de silício presente nos aços elétricos sendo a última o aço elétrico de grãos orientados.

O teor de silício de 0,06% é do aço SAE 1006 (que também possui 0,06% de carbono) material muito comum no mercado que não possui altos valores de permeabilidade magnética o que impede o seu emprego na blindagem.

De uma maneira geral, qualquer elemento presente na composição química dos aços tende a diminuir a condutividade elétrica. A primeira linha da tabela 7.1 indica o valor máximo da condutividade elétrica dos aços, nesta situação não existe nenhum elemento que não o ferro na composição química do material.

A influência da composição química na permeabilidade magnética nos aços é menor do que na condutividade elétrica. De uma maneira geral, a adição de elementos como o silício e o alumínio tende a diminuir a permeabilidade magnética e a indução magnética de saturação fazendo com que o material atinja a saturação para valores menores de campo magnético aplicado [23].

2- Microestrutura – tamanho dos grãos e precipitados.

Diferentemente da composição química, as características microestruturais como o tamanho dos grãos e a presença de precipitados afetam muito mais a permeabilidade magnética do que a condutividade elétrica dos aços.

A permeabilidade magnética dos materiais está diretamente relacionada com a capacidade de rotação das paredes dos domínios magnéticos, ou seja, quanto menores 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 [24].

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 [23]:

$$\bar{H}_c = \frac{3}{4} \pi \frac{\gamma}{M_s} \frac{1}{d} \quad (7.1)$$

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" [24].

A tabela 7.2 mostra o tamanho típico dos grãos para os tipos de aços mais usados em projetos de blindagem juntamente com a permeabilidade determinada no joelho da curva de magnetização [25].

Material	Permeabilidade relativa	Tamanho dos grãos (μm)
SAE 1010	500	15 a 20
E 230 TP*	6000	130 a 170
E125 TP*	8000	130 a 170
E004- GO*	40000	4000

Tabela 7.2: Permeabilidade magnética e o tamanho dos grãos de alguns tipos de aços.

*dados obtidos após tratamento térmico final.

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.

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.

É também constatado que, quanto maiores os grãos, maior a condutividade elétrica dos aços.

Podem-se destacar duas características fundamentais de um material que, de acordo com o exposto até agora, teria um bom desempenho na contenção de campos magnéticos de baixa frequência:

- A presença de silício e alumínio deve ser de todo evitada, pois estes são diretamente responsáveis pela diminuição da condutividade elétrica nos aços. O teor de carbono também deve ser baixo para minimizar a presença de carbonetos;

- O tamanho dos grãos deve ser o maior possível objetivando altos valores de permeabilidade magnética e condutividade elétrica. O aumento do tamanho dos grãos é feito com tratamentos térmicos adequados após a laminação final das chapas.

No próximo tópico será utilizado o método do potencial vetor magnético no estudo do desempenho de um material na blindagem com valores elevados de permeabilidade magnética e condutividade.

7.3- Especificação das Características Elétrica e Magnética Ideais para Blindagem do Campo Magnético de 60 Hz.

Os valores de condutividade elétrica dos aços variam bastante conforme o teor de silício como já foi dito.

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.

A seguir é determinado o fator de blindagem pelo método do potencial vetor de um material submetido a campos magnéticos produzidos por fontes de alta e baixa impedância nas configurações de blindagem com chapa plana e cilíndrica. Para tal, são especificadas faixas de permeabilidade magnética e condutividade elétrica, possíveis de serem obtidas na prática, dentro das quais o fator de blindagem apresente valores satisfatórios.

A faixa de condutividade elétrica é de $0.17 > \sigma_r > 0.10$. Estes valores, de acordo com a tabela 7.2, são as do ferro puro e do SAE 1010. Já os valores de permeabilidade magnética estão dentro da faixa $10000 > \mu_r > 4000$ que são valores que podem ser encontrados nos aços elétricos conforme tabela 7.2.

A configuração da blindagem com as fontes de campo utilizadas nas simulações deste tópico estão representadas nas figura 7.1.

A espessura da blindagem é de 1.5 mm e as correntes nas fontes de campo são as mesmas do tópico 6.4.

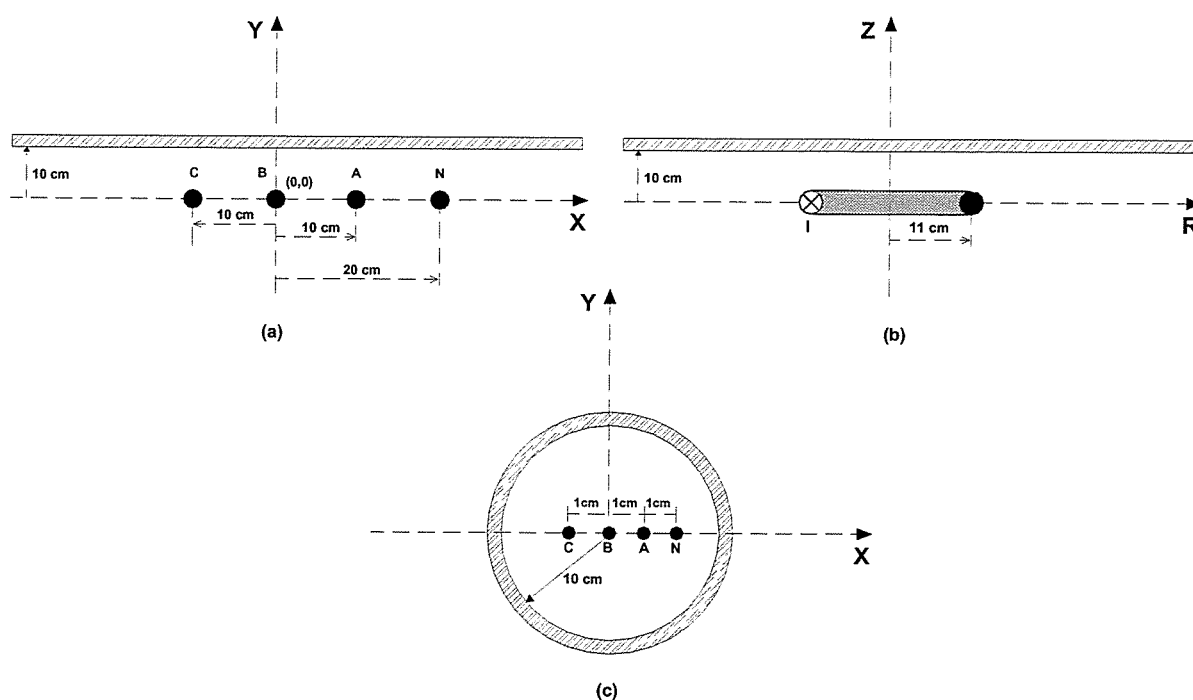


Figura 7.1: a) Fonte de alta impedância, b) Fonte de baixa impedância, c) Fonte de alta impedância blindagem cilíndrica.

O fator de blindagem é determinado sobre os eixos “y” e “z”, em um ponto distante 2 metros das fontes de campo. As figuras 7.2, 7.3 e 7.4 mostram os resultados.

Para todos os tipos de fontes de campo e configurações de blindagem a redução do campo magnético foi superior a 50 vezes indicando que o material que possuir qualquer dos valores de condutividade e permeabilidade magnética dentro da faixa especificada atenderá as exigências em um projeto de blindagem em baixa frequência.

Vale lembrar que aos resultados das figuras 7.2 a 7.4 não contemplam o efeito de borda no caso das chapas planas finitas. Este fato será considerado em tópicos seguintes.

É também considerada, neste trabalho, a dificuldade de se obterem altos valores de permeabilidade magnética, para os níveis de campos magnéticos geralmente medidos nos projetos de blindagem.

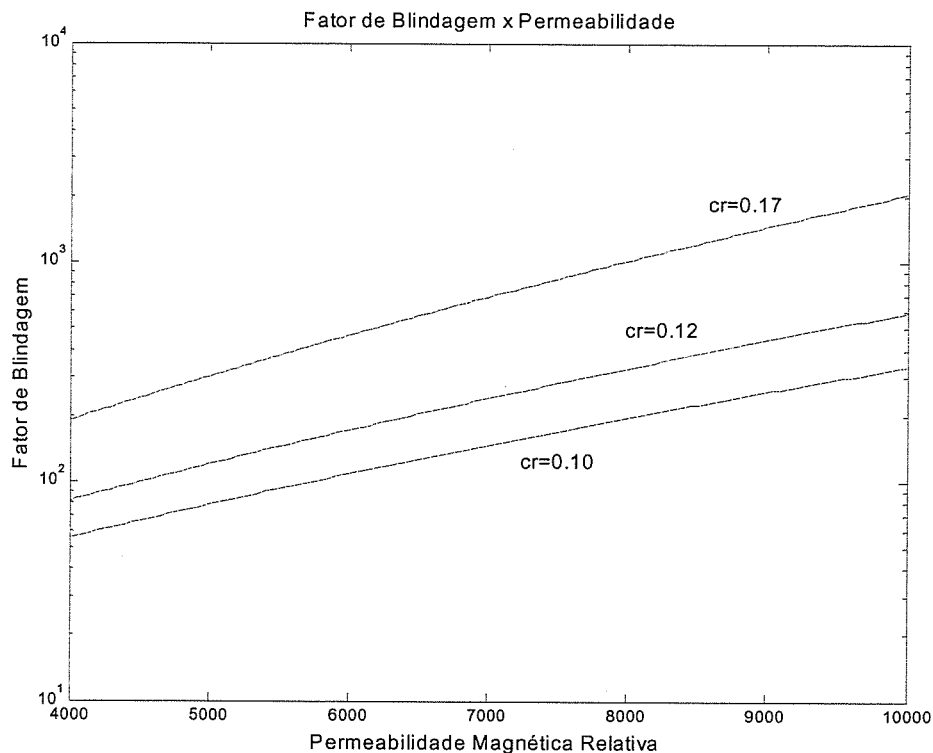


Figura 7.2: Fator de Blindagem x permeabilidade para 3 valores de condutividade - fonte de alta impedância chapa plana.

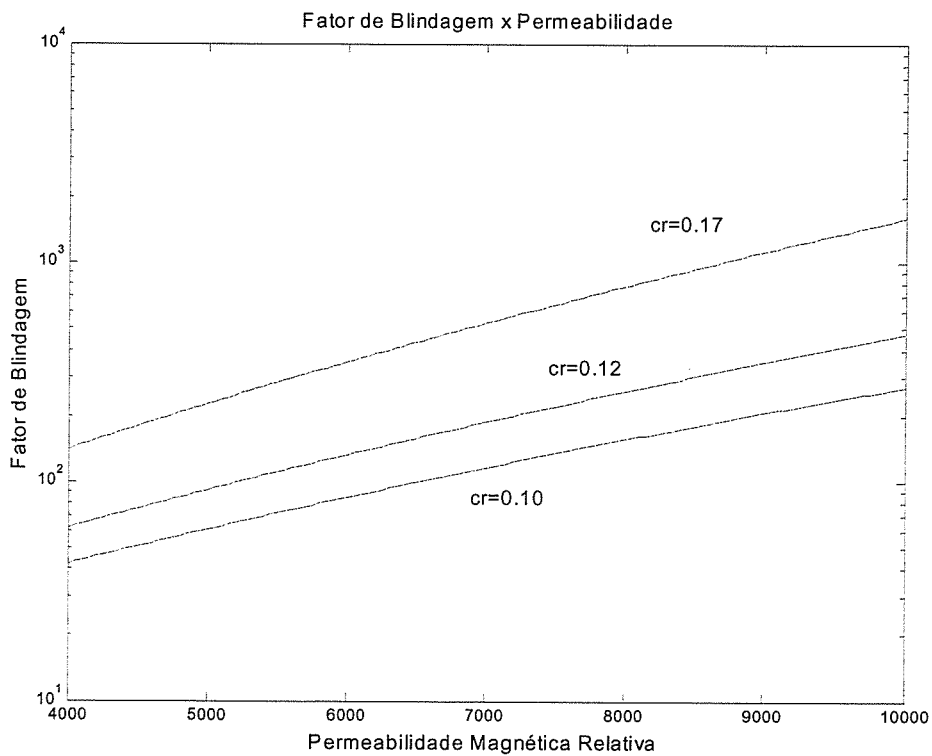


Figura 7.3: Fator de Blindagem x permeabilidade para 3 valores de condutividade - fonte de baixa impedância

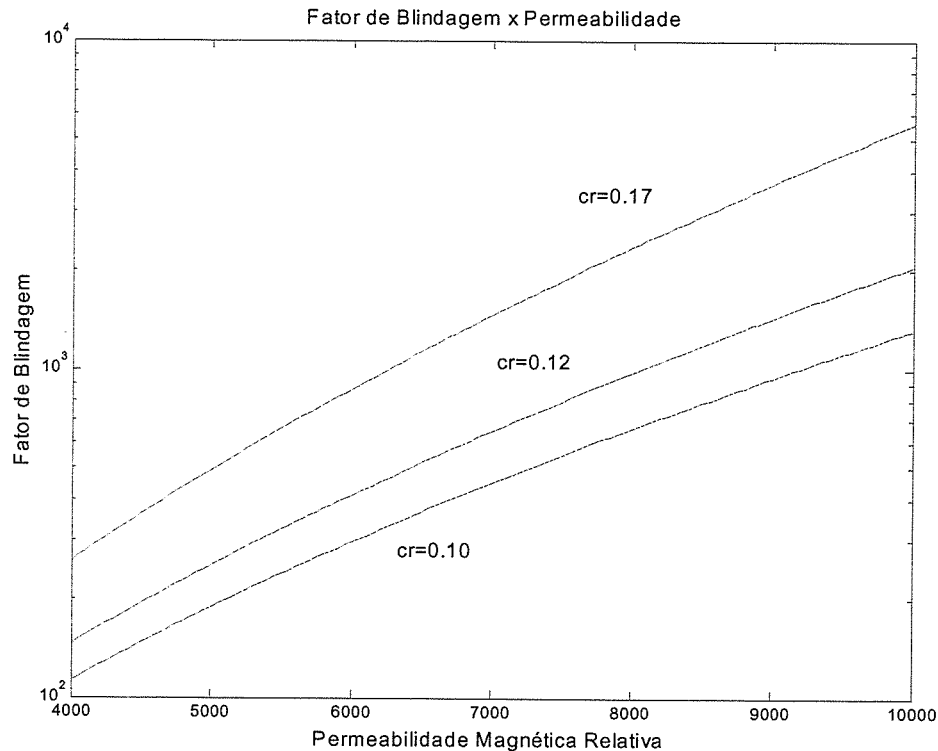


Figura 7.4: Fator de Blindagem x permeabilidade para 3 valores de condutividade - fonte de alta impedância cilindro.

Conforme demonstrado no tópico 5.2.5 (figuras 5.10 e 5.11) quando materiais ferromagnéticos são utilizados o fator de blindagem aumenta à medida que os pontos se aproximam da fonte assim é esperado um desempenho ainda maior destes materiais para pontos localizados mais próximos à fonte.

Na possibilidade de fabricação de um material com as características abordadas no presente tópico, alguns aspectos como a influência do teor de silício no processo de fabricação e tratamento térmico final são estudados.

7.4- Procedimentos para a fabricação de um Material com Características Ideais para Blindagem do Campo Magnético de 60 Hz.

São abordados neste tópico os procedimentos para se obter um material ferromagnético com as propriedades ideais para a blindagem.

A idéia inicial é a utilização de um material de baixo teor de silício garantindo bons valores de condutividade elétrica ($\sigma_r \geq 0,1$) como também elevados valores de permeabilidade magnética para os níveis de campo magnético comuns em projetos

de blindagem. É feita uma breve descrição do processo de fabricação de um aço semi processado.

É destacada a seguir a importância do tratamento térmico para a otimização dos valores de permeabilidade magnética dos aços semi processados.

7.4.1- O processo de fabricação dos aços semi processados.

São apresentadas a seguir, de forma resumida, as principais etapas para a obtenção de um aço semi processado [23].

1. Refino de impurezas no metal líquido.

As principais impurezas presentes nos aços são os elementos oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S). O carbono, presente em todos os aços, pode ser considerado nos casos dos aços elétricos uma impureza já que prejudica a recristalização do material no tratamento térmico final.

A tabela 7.3 apresenta os teores comuns de cada uma das impurezas assim como o meio utilizado para reduzi-las.

Impureza	Teor comum.	Meio para se obter o teor comum
Enxofre	0.005 %	Dessulfuração do aço na panela.
Nitrogênio	30 ppm	Desgaseificador.
Oxigênio	50 ppm	Adição de silício ou alumínio.
Carbono	50 ppm	Desgaseificador.

Tabela 7.3: Impurezas presentes nos aços.

O fósforo (P) é considerado impureza em muitos aços, mas pode ser utilizado nos aços elétricos para aumentar a resistividade se inserido em teores adequados.

2. Acerto da composição química.

Esta etapa é realizada antes do lingotamento do material. O aço líquido é derramado em uma panela adequada contendo os elementos.

Os elementos geralmente adicionados para a correção da composição química são os seguintes:

- Manganês (Mn): têm a função de diminuir as trincar durante a laminação a quente ou, em teores acima de 0,3%, pode melhorar a permeabilidade magnética;

- Fósforo (P): melhora a estampabilidade se adicionado em teor menor de 0,15%;
- Silício (Si): serve para aumentar a resistividade elétrica. A sua adição deve ser evitada nos materiais utilizados para a blindagem de campos magnéticos;
- Alumínio (Al): é adicionado em baixos teores para desoxidar e em altos teores para melhorar a permeabilidade magnética e aumentar a resistividade;
- Antimônio (Sb): serve para melhorar a permeabilidade magnética.

3. Acerto da composição química.

Processo no qual o material em seu estado líquido é armazenado em lingotes para posterior processo de laminação. Os aços elétricos semi processados são produzidos por lingotamento contínuo e são geralmente desoxidados com alumínio para evitar a formação de bolhas de CO.

4. Laminação a quente.

Após o lingotamento o material, geralmente em forma de placas de 20 cm de espessura, sofre uma primeira etapa de laminação chamada de laminação a quente.

O aço é aquecido até uma temperatura de aproximadamente 1200° C para facilitar a redução da espessura.

Os principais parâmetros da laminação a quente são [23]:

- A temperatura de aquecimento da placa;
- A temperatura de acabamento;
- A temperatura de bobinamento.

A laminação a quente é importante para as propriedades magnéticas do material, pois influencia na textura final do aço [23].

5. Laminação a frio.

Antes de passar pela etapa de laminação a frio, o material sofre um processo denominado decapagem que elimina os óxidos superficiais.

Na laminação a frio, geralmente as bobinas partem de uma espessura de 2,5mm e através de uma seqüência de laminadores atinge a espessura de 0,5mm.

Evidentemente com a redução da espessura, o material sofre um aumento no comprimento.

O grau de redução no qual o aço foi submetido deve ser determinado pela equação 7.2 [23].

$$\% \text{redução} = \frac{e_i - e_f}{e_i} \times 100 \quad (7.2)$$

onde:

e_i = espessura inicial do material;

e_f = espessura final após a laminação a frio.

O material sofre um aumento na sua dureza com a laminação a frio. Quanto maior a redução maior o aumento da dureza e do campo coercivo H_c .

É dito que o material neste estado está encruado.

6. Recozimento na Usina.

Geralmente os aços semi processados após a laminação a frio sofrem um tratamento térmico denominado de recozimento ainda dentro da usina.

Este tratamento térmico tem como objetivo a recristalização do material. Esta etapa produz um tamanho de grãos da ordem de 20 μ m.

Nos aços semi processados após este tratamento térmico, é realizada uma nova laminação a frio onde o material sofre um novo encruamento que irá adequá-lo para o recozimento final - realizado pelo cliente - onde as propriedades magnéticas são otimizadas.

No próximo tópico será abordado com maior detalhe o tratamento térmico denominado de recozimento e descarbonetação realizado nos aços elétricos semi processados.

7. Passe de Encruamento ou "Skin - Pass".

É mais uma etapa de laminação a frio que sofre o aço semi processado antes de ser fornecido ao cliente.

A deformação do material nesta etapa fica em torno de 8% e tem a função de acelerar a recristalização após o recozimento final a ser realizado pelo cliente [23].

8. Recozimento final realizado pelo cliente.

Etapa na qual a permeabilidade magnética do aço semi processado é otimizada.

No tópico a seguir são abordados alguns aspectos que devem ser considerados no tratamento térmico para se obter um material com altos valores de permeabilidade magnética.

É nesta etapa que ocorre a descarbonetação (redução no teor de carbono) do aço semi processado.

7.4.2- O tratamento térmico de recozimento final e a otimização das propriedades magnéticas dos aços elétricos.

Nos aços semi processados, a otimização das propriedades magnéticas é feita através de tratamento térmico (termo-químico) denominado de recozimento e descarbonetação [23] que tem como objetivos:

- Redução no teor de carbono no material - descarbonetação;
- Alívio de tensões;
- Recristalização;
- Formação da camada dielétrica, etapa denominada de azulamento [23];
- Desenvolvimento de textura.

A melhora da permeabilidade magnética do material se dá principalmente devido à diminuição do teor de carbono (descarbonetação) e recristalização do material [23].

As etapas de um ciclo de tratamento térmico típico para os aços semi processados [26] são apresentadas na figura 7.4.

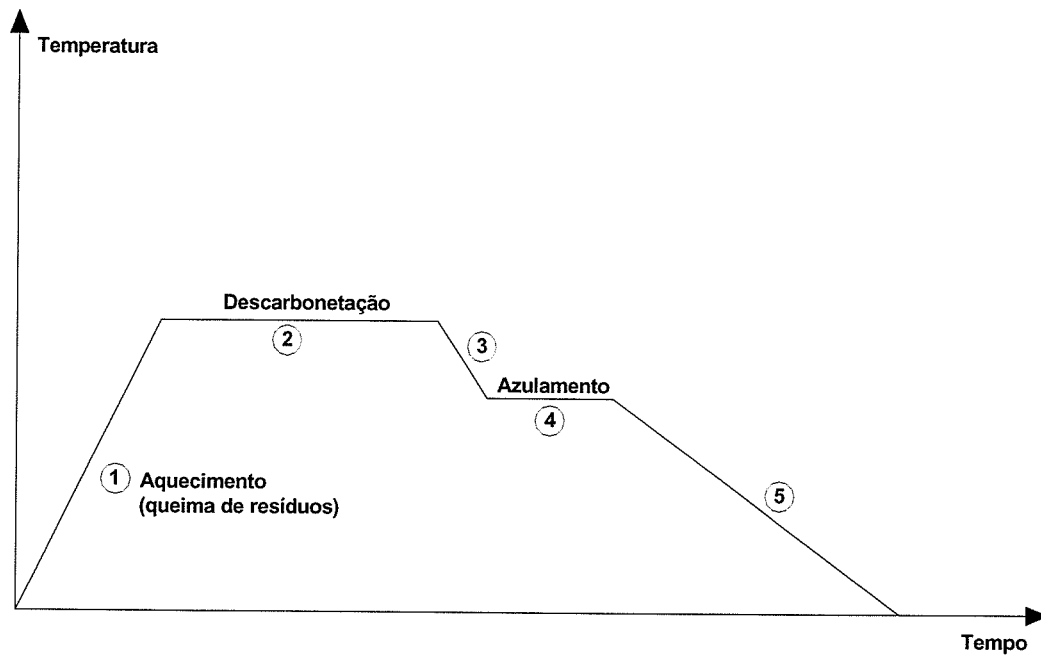


Figura 7.5: Ciclo de tratamento térmico comum em aços semi processados.

- Etapa 1: Aquecimento e queima de resíduos.

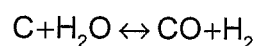
Indica o aquecimento do material até a temperatura onde ocorrerá a retirada do carbono. São removidas todas as impurezas devido aos processos de laminação e, se for o caso, devido ao processo de estampagem.

- Etapa 2: Descarbonetação

Nesta etapa ocorre a descarbonetação propriamente dita. É acrescentado no forno vapor de água até atingir o ponto de orvalho de cerca de 30°C [23] (correspondendo a cerca de 4,2% em volume de água) que pode variar de acordo o material e a temperatura na qual ocorre o tratamento.

A descarbonetação promove a melhoria das propriedades magnéticas por causar a redução do teor de carbono em solução sólida e a diminuição da fração volumétrica de carbonetos na matriz metálica.

A descarbonetação se dá pela reação do vapor de água com o carbono dissolvido no aço obedecendo à reação química [23]:



A difusão do carbono do interior do metal para a superfície propiciando a reação ocorre segundo a lei de "Fick" [26].

A temperatura de descarbonetação varia geralmente entre 750°C a 800°C atingindo ao campo bifásico da austenita e ferrita [26].

A utilização de uma atmosfera oxidante (vapor de água) pode levar a formação de um óxido de ferro FeO, que é prejudicial ao processo. Uma temperatura indicada par o processo de descarbonetação é de 760°C.

A referência [23] descreve com maiores detalhes o processo de descarbonetação nos aços semi processados assim como a importância do ponto de orvalho no tratamento térmico.

- Etapa 4: Azulamento

Após o resfriamento referente à etapa 3, é formado uma camada de óxido superficial no aço, basicamente o óxido de ferro Fe₃O₄. O ponto de orvalho nesta etapa é aumentado para aproximadamente 85°C [23].

A temperatura na qual ocorre o azulamento é em torno de 550°C. O óxido formado é bastante aderente e sua espessura geralmente é de 1µm.

A função do Fe₃O₄ formado nesta etapa é proteger o material contra a corrosão externa e auxiliar o desempenho dos aços nos motores e transformadores, pois é um isolante elétrico e ajuda a minimizar as perdas devido as correntes parasitas.

- Etapa 5: Resfriamento.

Geralmente deve ser lento de modo que todo o carbono ainda existente dentro do material se precipite. A retirada do carbono é importante para minimizar o envelhecimento magnético [23,26].

O tamanho do grão no final do recozimento é determinante no valor da permeabilidade magnética do material, desta maneira, o ciclo de tratamento térmico escolhido, conforme mostra a figura 7.5, é fundamental.

Os principais fatores que influenciam o tamanho final dos grãos após o recozimento final são: o passe de encruamento final e o teor de carbono após a descarbonetação [23,26].

A referência [26] descreve a influências de diversas variáveis no tratamento térmico como: temperatura e tempo de descarbonetação, ponto de orvalho e o tipo de atmosfera utilizada na descarbonetação.

O material estudado na referência [26] é um aço semi processado fabricado pela USIMINAS cuja denominação comercial é USICORE 260.

Os parâmetros devem variar para diferentes tipos de materiais.

Um fato que deve ser lembrado nos aços semi processados é que existe um tamanho de grão ótimo no qual são minimizadas as perdas totais (parasíticas, histeréticas e anômalas) no material [23].

É sabido que, quanto maior o tamanho dos grãos, menores as perdas histeréticas e maiores as perdas anômalas. Para um material contendo cerca de 0,5% de silício o tamanho do grão de cerca de 150 μm está associado com os menores valores de perdas totais. O teor de silício influência diretamente o valor ótimo do tamanho dos grãos.

No caso da utilização dos aços nos projetos de blindagem de campos magnéticos, deve-se procurar um tamanho máximo dos grãos, para maximizar a permeabilidade magnética e diminuindo, como conseqüência, as perdas histeréticas.

A seguir é analisado o desempenho de um aço semi processado na blindagem de um campo eletromagnético gerado por uma fonte de baixa impedância antes e depois do tratamento térmico de recozimento.

7.5- Teste Experimental do Material antes do Tratamento Térmico de recozimento.

São agora apresentados os resultados experimentais quando da utilização de um aço semi processado fabricado pela USIMINAS na contensão do campo magnético de 60 Hz antes do tratamento térmico final.

O material submetido aos experimentos é o Usicore 450 que tem composição química, antes do tratamento térmico, conforme a tabela 7.4.

A análise química foi realizada na Universidade Federal de Minas Gerais e o laudo se encontra no Anexo I. Pode ser observado que o teor de silício, elemento que eleva a resistividade elétrica, é muito menor que do os teores encontrados nos aços elétricos totalmente processados que pode atingir até 3%.

Elemento Químico.	Teores Encontrados (%)
Carbono	0,052
Silício	<0,01
Alumínio	<0,05
Manganês	0,212
Enxofre	0,007

Tabela 7.4: Composição Química antes do tratamento térmico.

O material foi fornecido pela Usiminas após o passe de encruamento final, pronto para sofrer o tratamento térmico para recristalização.

Antes de ser submetido ao tratamento térmico de recozimento para otimização da permeabilidade magnética, foram realizadas algumas medições do desempenho do material na blindagem de um campo magnético produzido por uma fonte de campo de baixa impedância.

Foram fornecidas ao todo seis chapas quadradas de um metro de lado e espessura de 0,5 mm cada uma.

A figura 7.6 apresenta as configurações utilizadas nas medições.

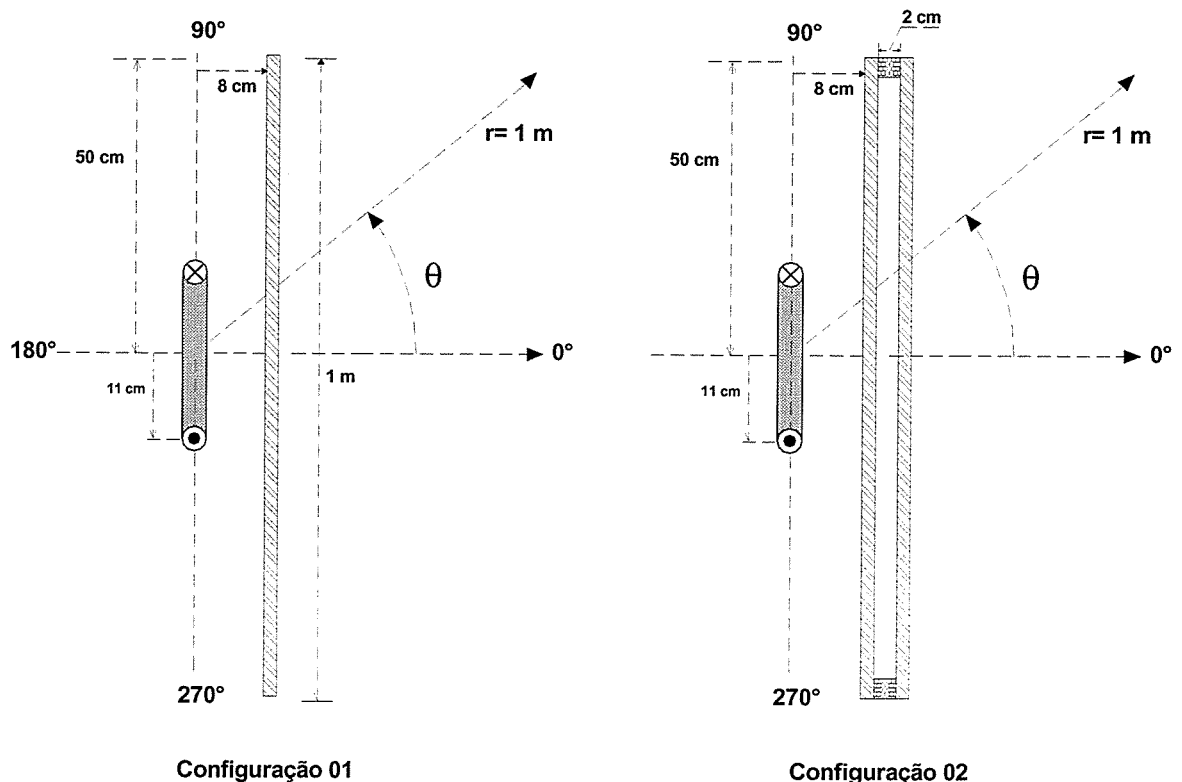


Figura 7.6: Configurações de blindagem utilizadas para o Usicore 450 antes do tratamento térmico.

O forno para tratamento térmico utilizado não comporta uma chapa quadrada de um metro de lado, sendo assim, para efeito de comparação com os resultados que serão obtidos após o tratamento do material, as chapas utilizadas nas medições foram já cortadas em 25 quadrados de aproximadamente 20 cm de lado cada um.

A corrente medida na fonte de campo foi de 100 A. Os instrumentos de controle e medição de correntes são os mesmos representados na figura 4.23 do capítulo 4.

A indução magnética "B" foi medida antes e depois do posicionamento das chapas sendo que o fator de blindagem foi calculado pela equação 2.1.

As medições foram feitas em volta da bancada a 1 m da mesma.

Segue na figura 7.7 os resultados obtidos.

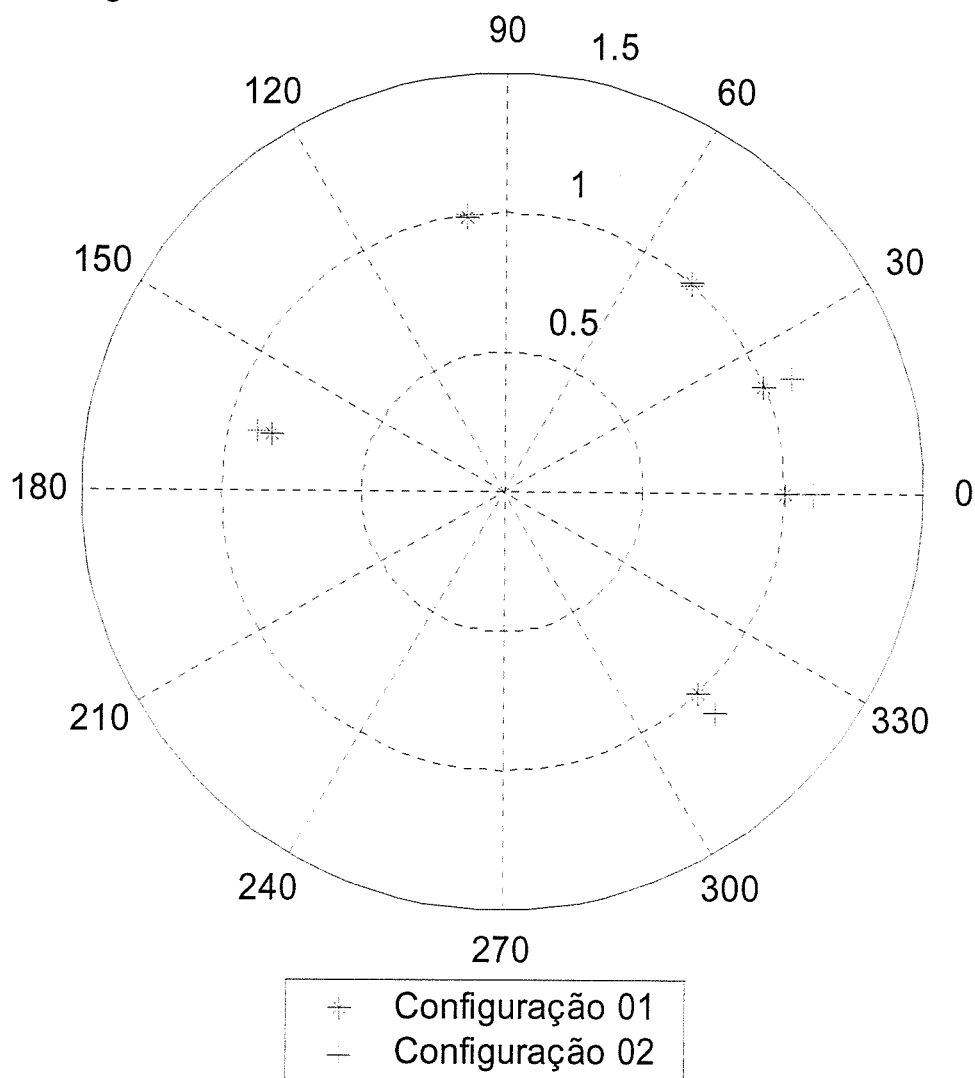


Figura 7.7: Resultados apresentados pelo aço semi processado para as configurações da figura 7.6.

O desempenho do aço semi processado Usicore 450 sem a otimização da permeabilidade magnética é insuficiente (fator de blindagem praticamente igual a 1 em todos os pontos em volta da bancada). Praticamente não houve diminuição no campo magnético gerado pela fonte de campo nas duas configurações testadas.

No próximo capítulo será analisado o desempenho do mesmo material após o recozimento final.

7.6- O Ciclo de Tratamento Térmico e Levantamento da Curva de Magnetização do Material.

O ciclo de tratamento térmico aplicado no material deve ser tal que proporcione, no caso do material destinado ao uso em projetos de blindagens, o maior tamanho final de grãos possível.

O tratamento térmico no material foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. A caracterização das propriedades magnéticas do material foi feita pelo levantamento da curvas de magnetização.

O anexo II mostra os detalhes do tratamento térmico e os procedimentos utilizados para a obtenção das características magnéticas (curvas de magnetização e permeabilidade magnética) do material.

Conforme será mostrado em tópicos posteriores, a curva de magnetização será utilizada nas simulações realizadas por um "software" [21] que aplica o método de elementos finitos para a determinação do campo magnético em problemas de blindagem de baixa frequência.

7.7 - A determinação da Condutividade Elétrica do Material Antes e Depois do Tratamento Térmico.

Para a determinação da condutividade elétrica do aço semi processado Usicore 450 é empregado o método dos quatro pontos [20] que é brevemente descrito a seguir.

O método dos quatro pontos consiste na determinação da corrente e tensão na amostra pelo contato de dois pontos para a aplicação da corrente e mais dois pontos

para a medição da tensão sobre a amostra, conforme apresentado na figura 7.8. a seguir.

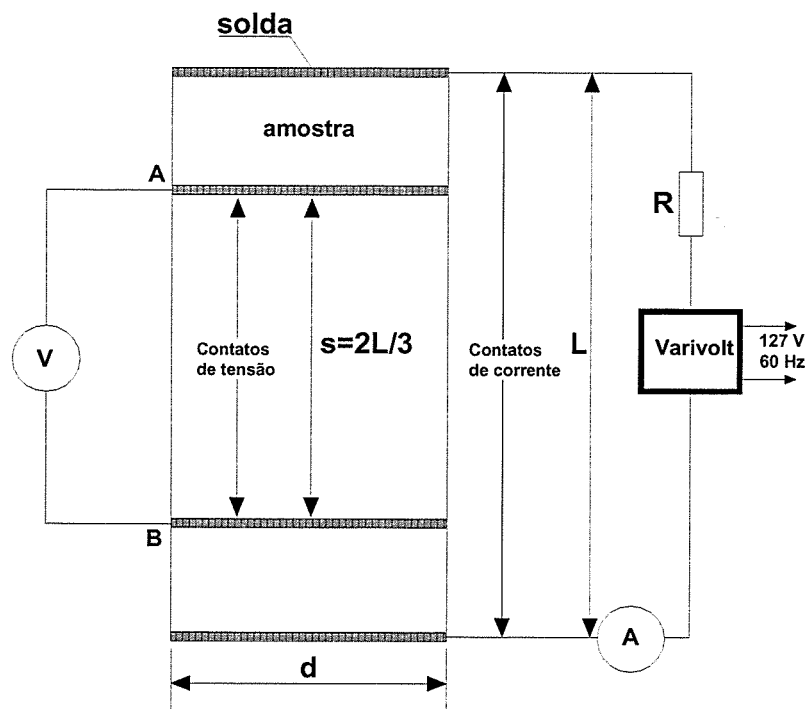


Figura 7.8: Montagem do circuito para as medições da condutividade da amostra.

Para garantir um bom contato e a distribuição uniforme de corrente na amostra, todos os contatos da figura 7.8 são soldados.

Alguns procedimentos para minimizar os erros de medições da tensão e corrente devem ser considerados [20]:

- O comprimento da amostra deve ser maior ou igual do que quatro vezes a largura;
- A espessura deve ser igual ou menor do que a metade da largura;
- A separação dos contatos de potencial deve ser, no máximo igual a dois terços da distância entre os contatos de corrente;
- Na preparação da amostra, esta deve ser devidamente lixada e limpa com acetona no sentido do comprimento "L";
- Os contatos de corrente e tensão devem ser devidamente soldados de modo a ocuparem toda a seção perpendicular ao comprimento "L", facilitando a distribuição uniforme de corrente na amostra e garantindo um bom contato.

Os instrumentos de controle e medição de corrente e tensão são os descritos abaixo:

- Multímetro: modelo 179 True RMS, Fabricante: "Fluke Corporation" ;
- "Varivolt" monofásico com variação de tensão de 0 V a 100 V;
- Resistor de 1Ω e potência de 10 W. Utilizado para limitar o valor da corrente no circuito.

A figura 7.9 mostra as dimensões das amostras utilizadas.

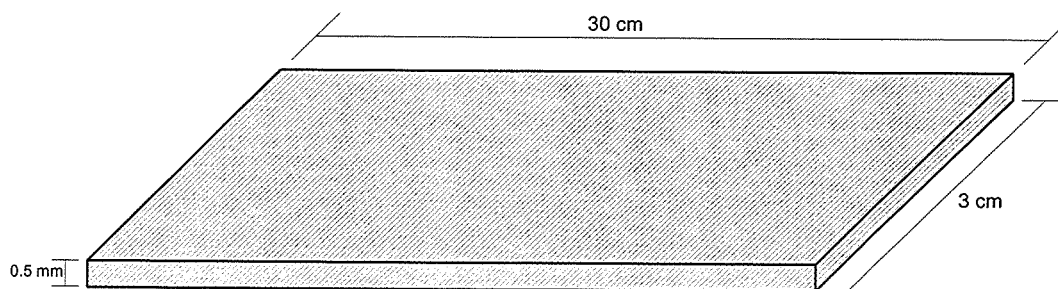


Figura 7.9: Dimensões da amostra.

Para a determinação da condutividade elétrica da amostra, é injetada uma tensão variada pelo "varivolt" sendo a corrente resultante no circuito determinada pelo multímetro.

A diferença de potencial entre os contatos de tensão mostrados na figura 7.8 é determinada também por um multímetro.

A resistência entre os contatos de tensão é determinada pela lei de ohm:

$$R_{ab} = \frac{V_{ab}}{I} \quad \Omega \quad (7.3)$$

A condutividade elétrica do material é então determinada pela equação:

$$\sigma = \frac{s}{R_{ab}A} \quad \Omega m \quad (7.4)$$

onde:

s = comprimento entre os contatos de tensão;

A = área da seção retangular da amostra, perpendicular ao comprimento "L".

As equações 7.3 e 7.4 são válidas somente para o caso onde a densidade de corrente, na vizinhança dos contatos de potencial é uniforme e dirigida longitudinalmente à chapa [20].

Foram determinadas as condutividades de duas amostras do material antes do tratamento térmico final: uma delas cortada de maneira longitudinal à direção de laminação da chapa e outra de maneira transversal. O mesmo procedimento foi adotado nas amostras após o tratamento.

A condutividade relativa apresentada na última linha de cada tabela foi calculada com base na condutividade elétrica do cobre ($\sigma_r = 57.8 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}$). Seguem os resultados.

Amostra antes do tratamento térmico - corte transversal.					
V_{ab} (mV)	4.71	5.90	7.40	9.30	10.0
I (A)	2.08	2.61	3.60	4.63	4.98
R (m Ω)	2.30	2.30	2.10	2.00	2.00
σ (M $\Omega\cdot\text{m}$)	5.89	5.90	6.49	6.64	6.64
Média (σ)	6.31 MS/m ($\sigma_r = 0.109$)				

Tabela 7.5: Condutividade determinada antes do tratamento térmico - corte transversal.

Amostra antes do tratamento térmico - corte longitudinal.					
V_{ab} (mV)	4.90	6.30	7.30	8.00	9.10
I (A)	2.21	2.98	3.56	3.92	4.53
R (m Ω)	2.20	2.10	2.10	2.00	2.00
σ (M $\Omega\cdot\text{m}$)	6.01	6.31	6.50	6.53	6.64
Média (σ)	6.40 MS/m ($\sigma_r = 0.110$)				

Tabela 7.6: Condutividade determinada antes do tratamento térmico - corte longitudinal.

Amostra após o tratamento térmico - corte transversal.					
V_{ab} (mV)	4.10	5.50	7.60	9.50	10.1
I (A)	1.71	2.41	3.44	4.30	4.70
R (m Ω)	2.40	2.30	2.20	2.20	2.10
σ (M $\Omega\cdot\text{m}$)	5.56	5.84	6.04	6.04	6.20
Média (σ)	5.94 MS/m ($\sigma_r = 0.103$)				

Tabela 7.7: Condutividade determinada após do tratamento térmico - corte transversal.

Amostra após o tratamento térmico - corte longitudinal.					
V_{ab} (mV)	4.50	5.90	7.50	9.60	10.8
I (A)	1.80	2.53	3.30	4.38	4.95
R (m Ω)	2.50	2.30	2.30	2.20	2.20
σ (M $\Omega\cdot\text{m}$)	5.33	5.72	5.87	6.08	6.11
Média (σ)	5.88 MS/m ($\sigma_r = 0.101$)				

Tabela 7.8: Condutividade determinada após do tratamento térmico - corte longitudinal.

Os resultados estão próximos do que mostra a literatura [11,20].

A condutividade do material é muito próxima dos aços ao carbono SAE 1010 e SAE 1006, o que já era esperado pelos teores baixos de silício destes materiais.

As medições foram todas realizadas no Laboratório de Circuitos Elétricos do Centro Universitário de Belo Horizonte - UNI BH.

7.8- Análise Metalográfica do Material Após o Tratamento Térmico Final.

A análise metalográfica e determinação do tamanho médio dos grãos foram feitas no Laboratório de Análises Metalográficas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Foram selecionadas duas amostras uma das chapas de aço utilizadas na blindagem e outra das laminas que foram utilizadas na determinação da curva de magnetização e determinação da condutividade elétrica. As fotos (figuras 7.10, 7.11 e 7.12) mostram a estrutura metalográfica das amostras.

O tamanho médio dos grãos obtido foi de 114 μm para a amostra das chapas e 122 μm das amostras do corpo de prova.

Observa-se uma estrutura ferrítica conforme já era esperado.

Na amostra obtida das chapas (amostra "b"), é notado uma heterogeneidade maior dos tamanhos dos grãos.

A tabela 7.9 mostra a composição química do material após o tratamento térmico de recozimento. A análise foi realizada pelo Instituto Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. O laudo oficial da análise está no anexo III.

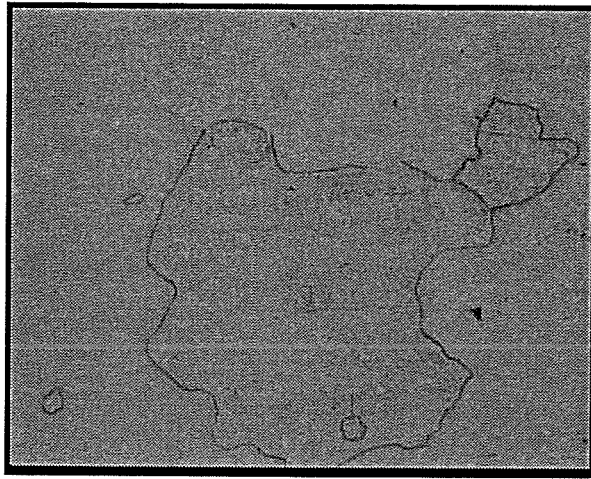
É evidente a redução no teor de carbono da amostra, fator decisivo para o crescimento dos grãos [23].

A quantidade final de carbono está de acordo com a literatura especializada.

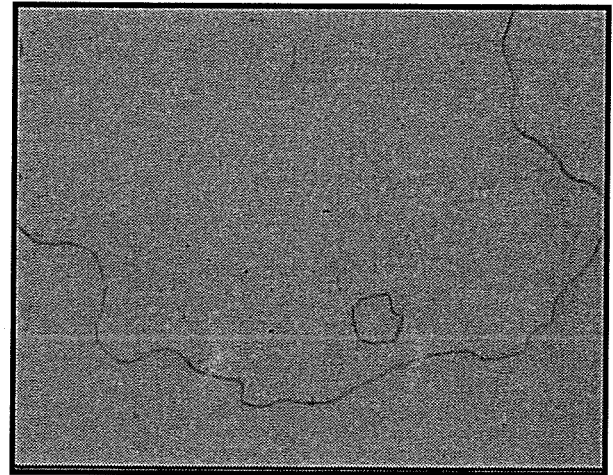
A referência [26] aponta para teores parecidos de carbono quando descreve o tratamento térmico de recozimento e descarbonetação para um tipo de aço semi processado também fabricado pela Usiminas - Usicore - 260.

Elemento Químico.	Teores Encontrados
Carbono (ppm)	30 \pm 6
Silício (%)	0.014 \pm 0.001
Alumínio (%)	0.052 \pm 0.001
Enxofre (ppm)	58 \pm 5

Tabela 7.9: Composição Química após o tratamento térmico.

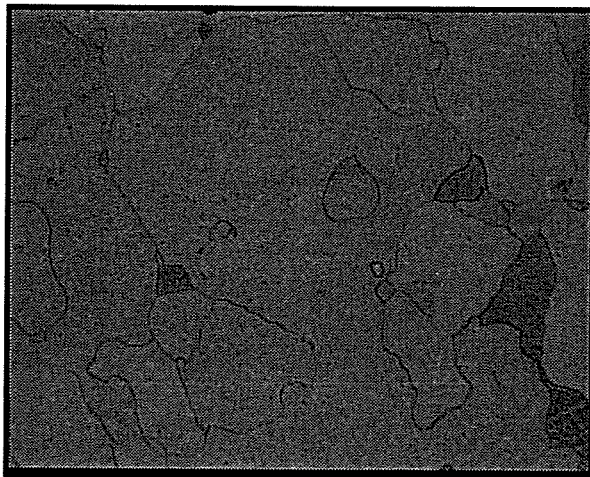


a)

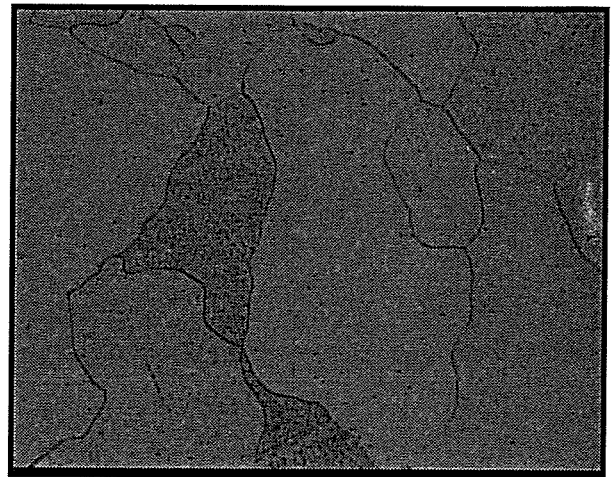


b)

Figura 7.10: Amostra ("a") do corpo de prova. a) aumento de 100 x; b) aumento de 200 x

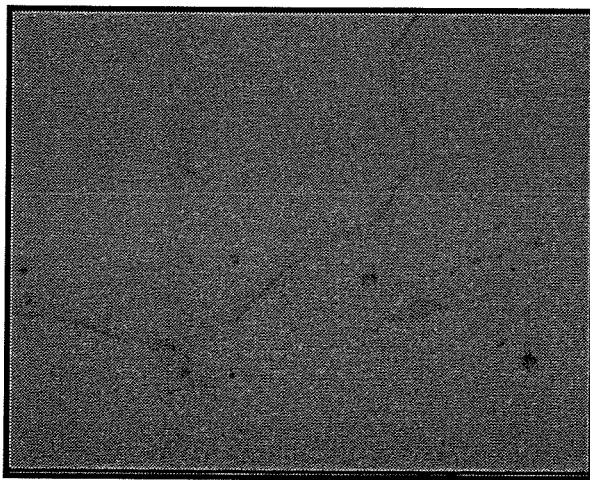


a)

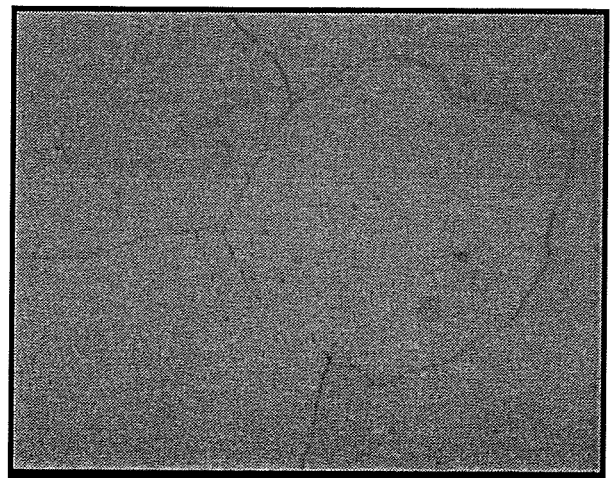


b)

Figura 7.11: Amostra ("b") das chapas. a) aumento de 100 x; b) aumento de 200 x



a)



b)

Figura 7.12: Aumento de 500 x: a) chapa; b) corpo de prova.

7.9- Considerações Finais.

O objetivo principal deste capítulo foi caracterizar o aço semi processado Usicore 450 cujo desempenho na blindagem será avaliado no capítulo seguinte.

A figura 7.7 mostrou que o fator de blindagem do material sem tratamento térmico é próximo de um para todos pontos analisados.

O ciclo de tratamento utilizado no material neste trabalho (anexo II) foi recomendado pela Usiminas mas, objetivando um tamanho de grãos ainda maior, poderá ter alguns de seus parâmetros reajustados como: encruamento final antes do tratamento, temperatura de encharque, ponto de orvalho, atmosfera descarbonetante e tempo de aquecimento modificados [26].

Vale lembrar que para os fins que o material é fabricado (utilização em motores e transformadores) não é recomendável um tamanho de grãos acima de $150\mu\text{m}$ [23] devido ao aumento das perdas.

As análises metalográfica e química indicaram que o tratamento térmico cumpriu com seu objetivo de recristalização e descarbonetação. O tamanho dos grãos, o teor de carbono e as propriedades magnéticas correspondem a valores típicos dos aços elétricos semi processados após o tratamento térmico conforme está relatado no anexo II.

O próximo capítulo é dedicado à análise dos resultados apresentados pelo Usicore 450 após a realização do tratamento térmico.

O ganho do desempenho do material nas mesmas configurações analisadas neste capítulo fica evidente.

8- Resultados Finais.

8.1- Introdução.

O objetivo central deste capítulo é apresentar o desempenho do aço semi processado Usicore 450, após a realização do tratamento térmico de recozimento e descarbonetação, na blindagem do campo magnético de 60 Hz produzido por fontes de baixa e alta impedância para vários tipos de configurações de blindagem.

O desempenho do material na blindagem, como poderá ser observado, é significativamente maior do que o desempenho do mesmo apresentado no capítulo anterior antes do tratamento térmico.

Medições experimentais para a fonte de baixa impedância e a configuração de chapas planas dão suporte aos resultados teóricos que são obtidos através de simulações realizadas pelo "software" baseado no método de elementos finitos "FEMM®" [21].

Devido à quantidade de chapas que sofreu tratamento térmico, não foi possível a análise experimental para a fonte de alta impedância.

Mesmo que materiais com características ideais para a contenção do campo magnético sejam obtidos, alguns problemas como a influência do tamanho finito da blindagem (efeito das bordas das chapas planas), a influência da solda nas propriedades magnéticas dos materiais ainda devem ser solucionados.

Algumas configurações alternativas, como a blindagem em caixa, visando minimizar este efeito são sugeridas no final deste capítulo.

Como proposta de continuação do trabalho, são apresentadas algumas sugestões para melhorar ainda mais o desempenho do USICORE 450 na blindagem de campos magnéticos de baixa frequência.

8.2 - Resultados na Blindagem do Campo Magnético de 60 Hz Utilizando o Usicore 450.

São agora apresentados os resultados do desempenho do Usicore 450, após o tratamento térmico descrito no anexo II, na blindagem de um campo magnético de 60 Hz produzido por fontes de alta e baixa impedância em diversas configurações de blindagem.

Os resultados obtidos computacionalmente são validados por medições experimentais realizadas dentro do Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal de Minas Gerais. Nas simulações foi utilizado um "software" "FEMM®" [21] que emprega o método dos elementos finitos, conforme descrito no tópico 4.3 deste trabalho.

As curvas de magnetização obtidas para o material, que estão apresentadas no anexo 2, são consideradas nas simulações uma vez que o "software" utilizado permite considerar a não linearidade das propriedades dos materiais ferromagnéticos nos cálculos de campo magnético.

Foram determinadas três curvas de magnetização: uma obtida para o sentido de laminação das chapas (longitudinal), outra para o sentido perpendicular ao da laminação (transversal) e a última considerando os dois sentidos.

As condutividades elétricas consideradas em todos os casos, nas simulações SÃO: 1.72 MS/m para o E 170 GNO e 5.88 MS/m para o Usicore 450.

O fator de blindagem é sempre determinado pela razão dos campos ou induções magnéticas medidos ou calculados antes e depois da colocação das chapas conforme equação 2.1.

8.2.1- "Loop" de corrente - fonte de baixa impedância.

A corrente injetada no "loop" de corrente foi de 100 A. Conforme já foi dito anteriormente, as chapas tiveram que ser cortadas em pedaços quadrados de aproximadamente 20 cm de lado para que coubessem dentro do forno de tratamento térmico. Foi empregado um molde de madeira para apoiar as chapas sobre a fonte de campo fazendo com que a blindagem tivesse o tamanho total de um quadrado de 1 m de lado.

As medições foram realizadas a uma distância fixa de um metro em volta da blindagem conforme já explicado no tópico 6.4 deste trabalho.

A malha utilizada nas simulações e o tamanho da região de cálculo foram os mesmos do tópico 4.3, figura 4.13.

Os sistemas de geração, controle das correntes e medição de campo foram os mesmos descritos no tópico 4.4.3 e 4.4.4 deste trabalho.

Os resultados são apresentados em forma de ábacos e a figura 8.2 apresenta as configurações nas quais foram obtidos nos resultados das simulações e medições.

Nas simulações, devido à configuração das linhas de campo magnético produzida pela fonte em questão, a curva de magnetização utilizada foi a mista (curva obtida considerando o sentido de laminação e o sentido perpendicular ao de laminação da chapa).

A figura 8.1 mostra os detalhes da bancada nas três configurações testadas.

A espessura da chapa é de 0.5 mm sendo que nas configurações 02 e 03 foram utilizadas duas chapas sobrepostas.

O desempenho na blindagem do aço E 170 GNO é apresentado nos ábacos para efeito de comparações.

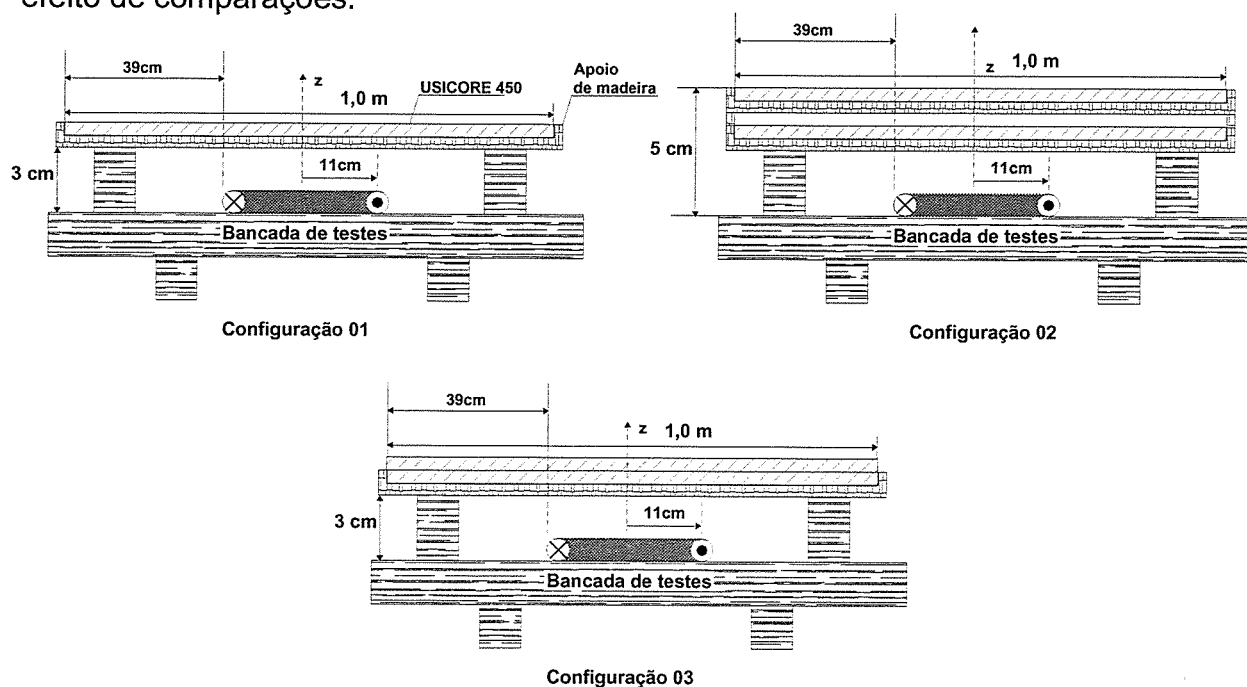


Figura 8.1: Detalhes das configurações da bancada de testes para a fonte de baixa impedância.

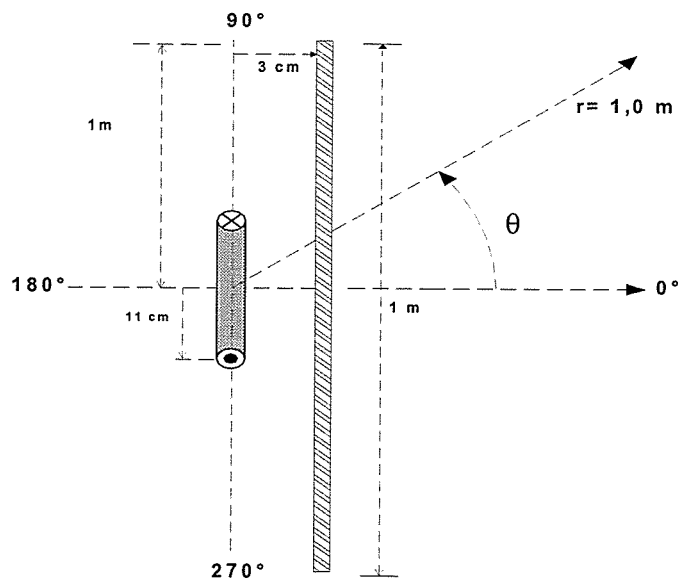


Figura 8.2: Sistema de referência para as medições e simulações - configuração 01.

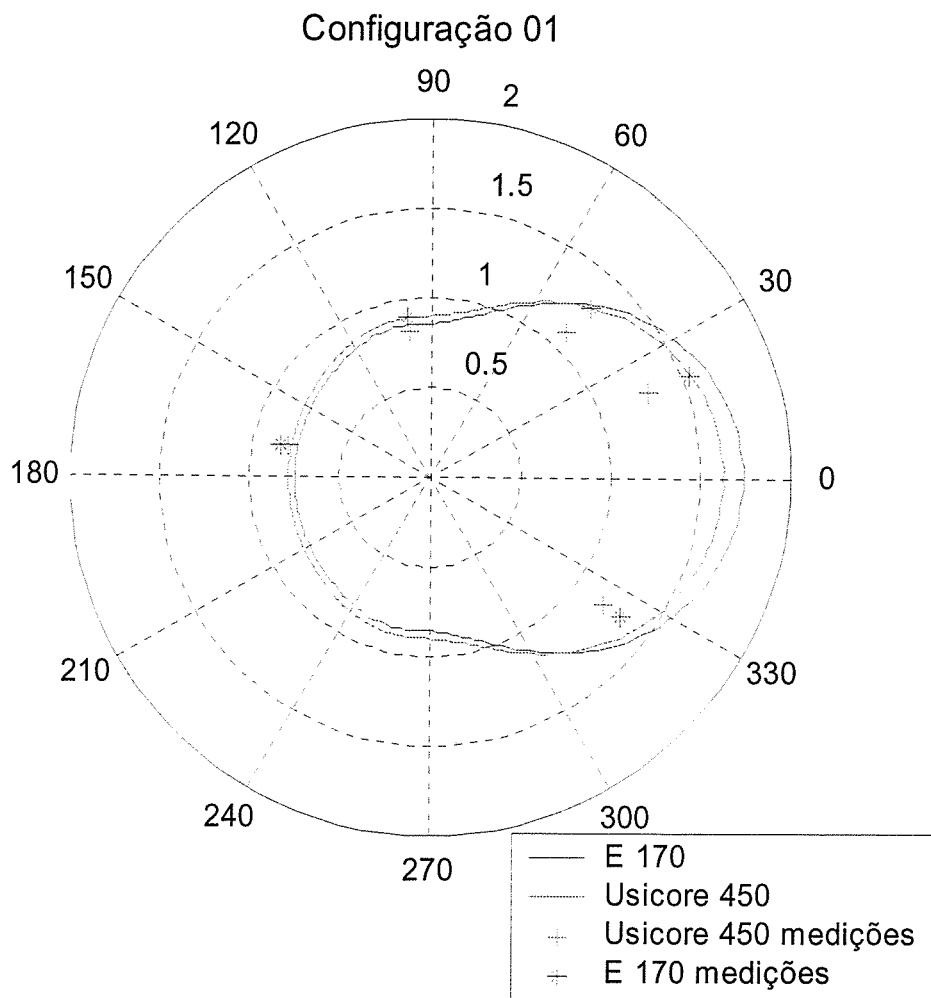


Figura 8.3: Fator de blindagem para a configuração 01.

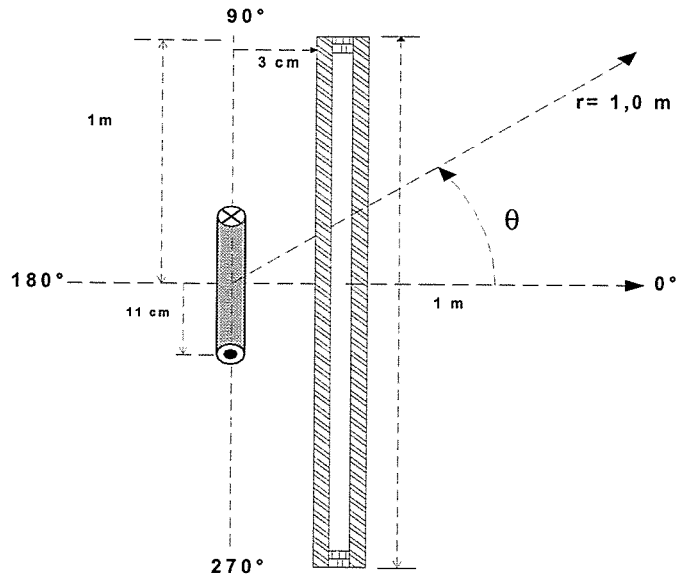


Figura 8.4: Sistema de referência para as medições e simulações - configuração 02.

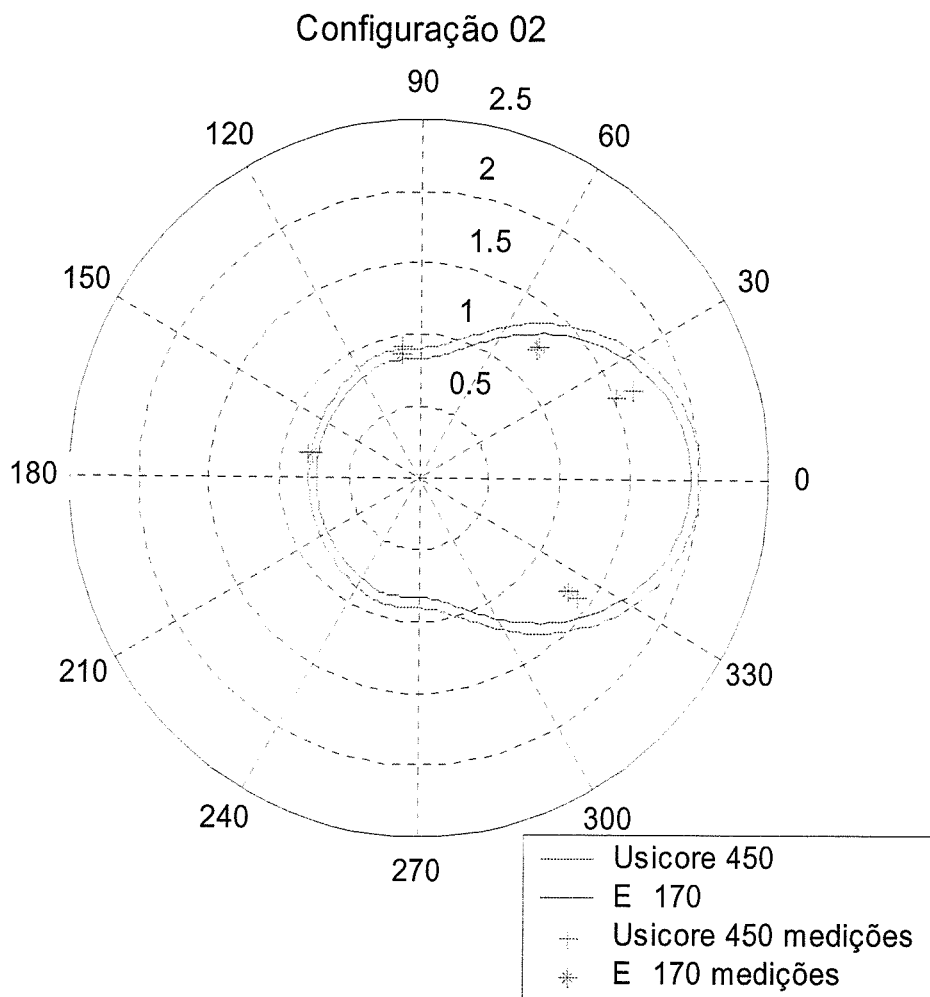


Figura 8.5: Fator de blindagem para a configuração 02

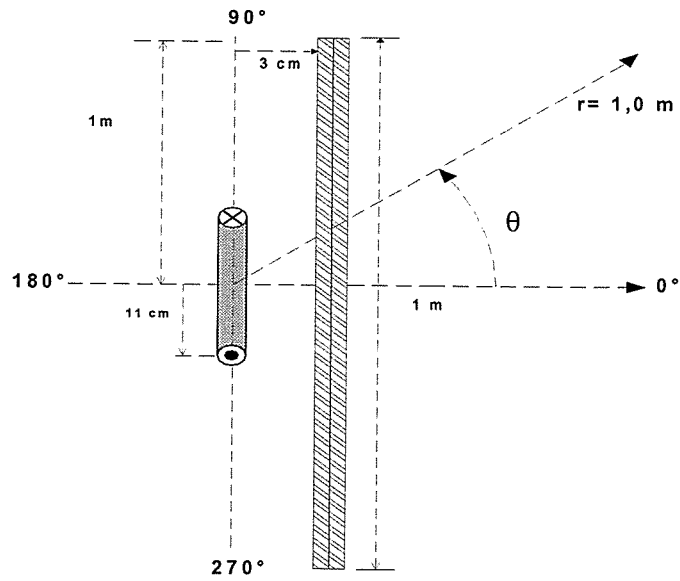


Figura 8.6: Sistema de referência para as medições e simulações - configuração 03.

Configuração 03

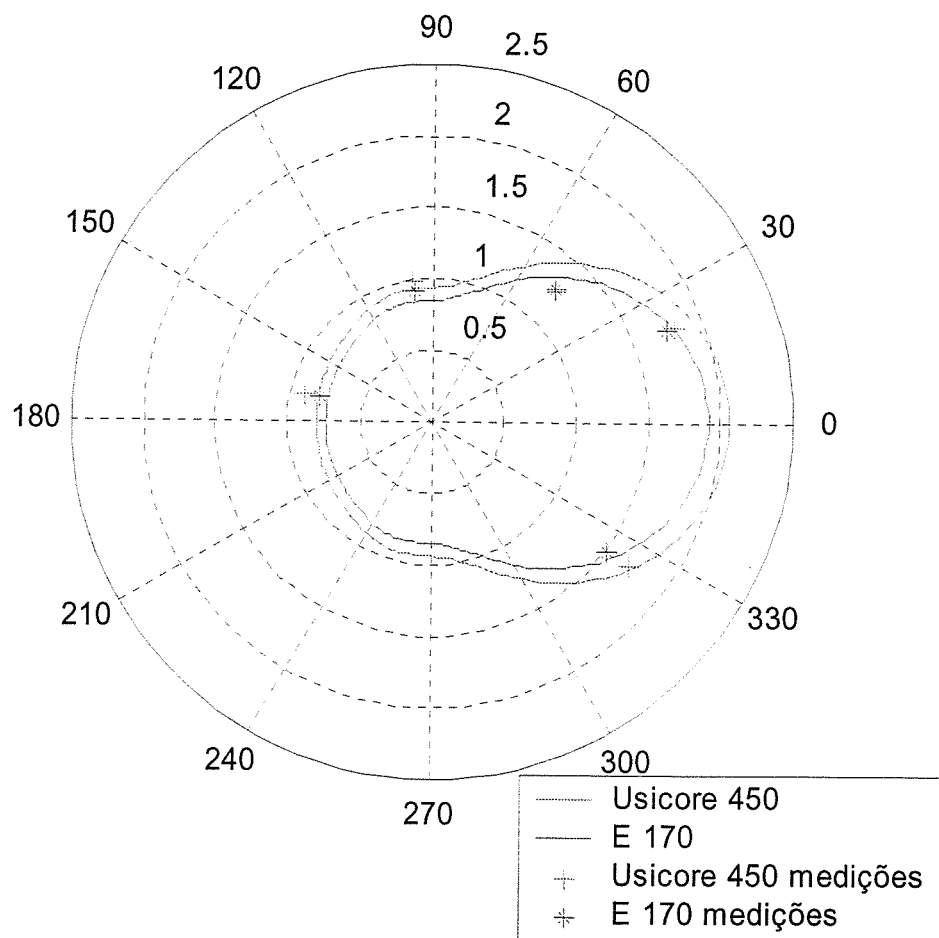


Figura 8.7: Fator de blindagem para a configuração 03.

O desempenho do material após o tratamento térmico é nitidamente maior nas três configurações de blindagem com a fonte de baixa impedância, sobretudo na região frontal à fonte de campo.

Nota-se em todas as três configurações que o fator de blindagem é menor do que um em regiões atrás da blindagem significando que houve amplificação do campo na região devido à presença da chapa metálica. Um fato que pode explicar este fenômeno é a reflexão em sobreposição de fase do campo magnético incidente na blindagem.

O desempenho deste material nas três configurações de campo ainda não atende à maioria dos projetos de blindagem em baixa frequência.

8.2.2- Sistema de condutores retilíneos - fonte de alta impedância.

Para a fonte de alta impedância foi verificado o desempenho do Usicore 450 para as configurações de blindagem com chapas planas e cilíndricas.

Nas simulações, a curva de magnetização utilizada foi a longitudinal (curva obtida para o material no sentido de laminação). Nesta configuração de fonte, sempre é possível, na prática, posicionar as chapas de maneira com que o sentido de maior permeabilidade magnética seja paralelo às linhas de campo magnético [8].

As figuras 8.8 e 8.9 detalham o posicionamento e o dimensionamento da blindagem para as configurações de chapas. Cada chapa tem 0.5 mm de espessura.

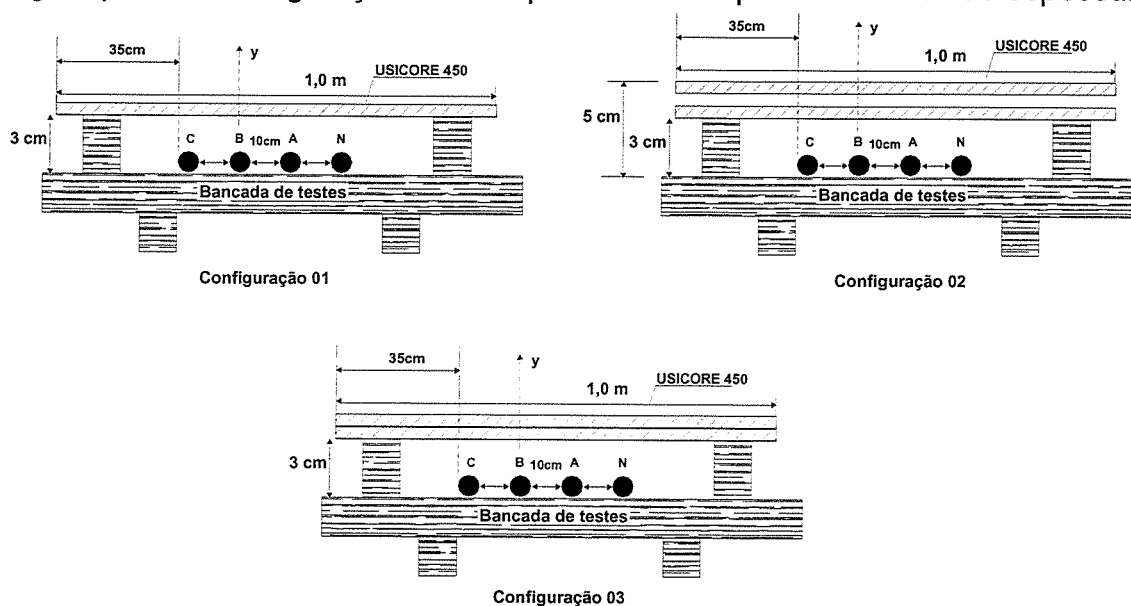


Figura 8.8: Detalhes das configurações da bancada de testes para a fonte de alta impedância - chapas planas.

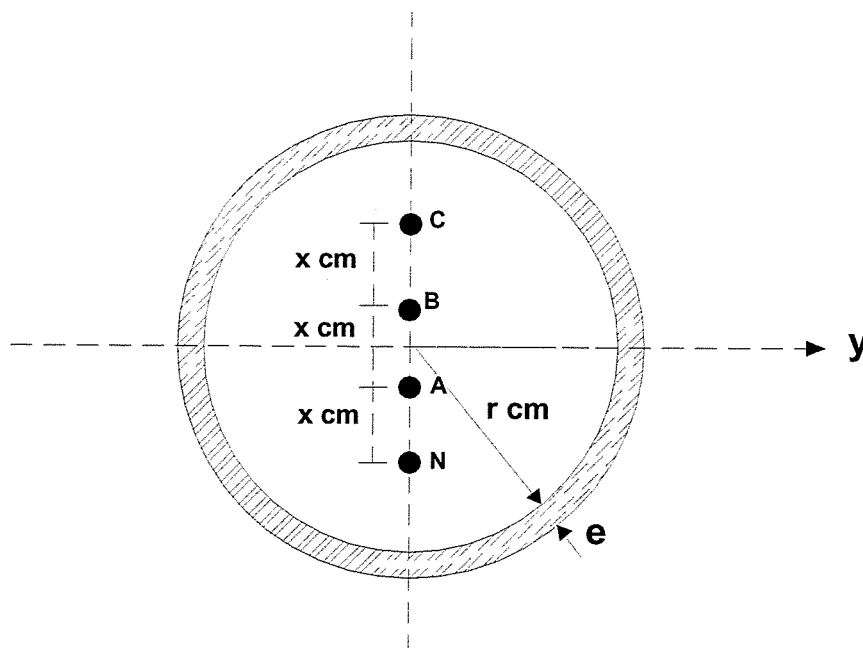


Figura 8.9: Detalhes das configurações da bancada de testes para a fonte de alta impedância - cilindro.

Desta vez não foi possível a verificação experimental dos resultados devido a quantidade de material tratado e a dificuldade de se obter uma configuração em forma de cilindro com as chapas.

Os ábacos contemplam somente os resultados das simulações. Deve-se deixar claro que, pela comparação entre os resultados simulados e as medições realizadas em tópicos anteriores, o "software" ("FEMM[®]") utilizado nas simulações fornece resultados confiáveis.

Na configuração cilíndrica os resultados simulados são confrontados com os obtidos pelo método do potencial vetor apresentado no capítulo 3.

As correntes nos condutores foram: $I_a=100\angle 0^\circ$; $I_b=100\angle -120^\circ$; $I_c=90\angle 120^\circ$ e $I_n=-(I_a+I_b+I_c)$ em todos os casos simulados neste tópico.

Novamente o desempenho na blindagem do aço totalmente processado E - 170 GNO é apresentado como comparação.

Em cada caso a configuração de blindagem utilizada é detalhada juntamente com os resultados.

As figuras 8.10 a 8.25 a seguir apresentam os resultados.

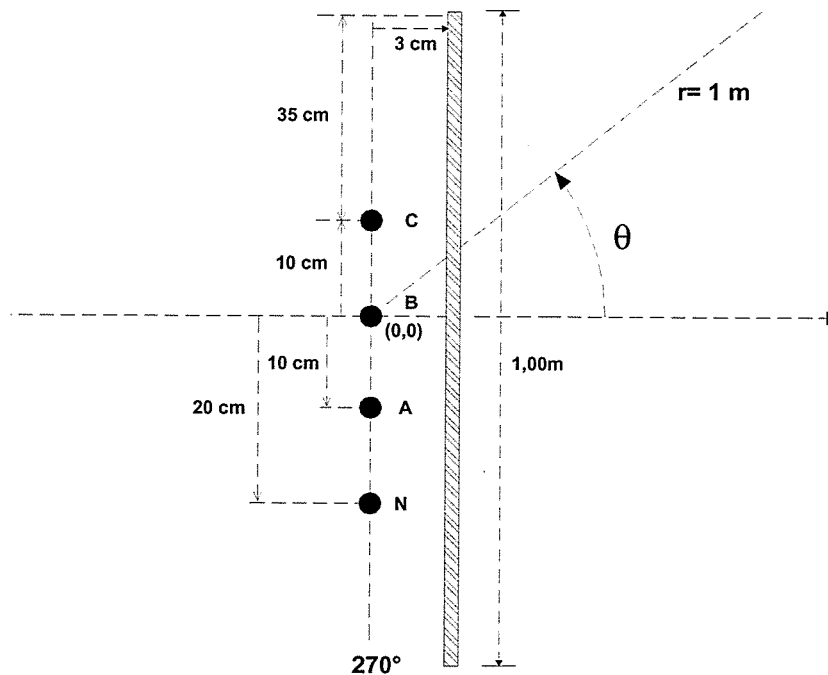


Figura 8.10: Sistema de referência para as simulações - configuração 01 da figura 8.8.

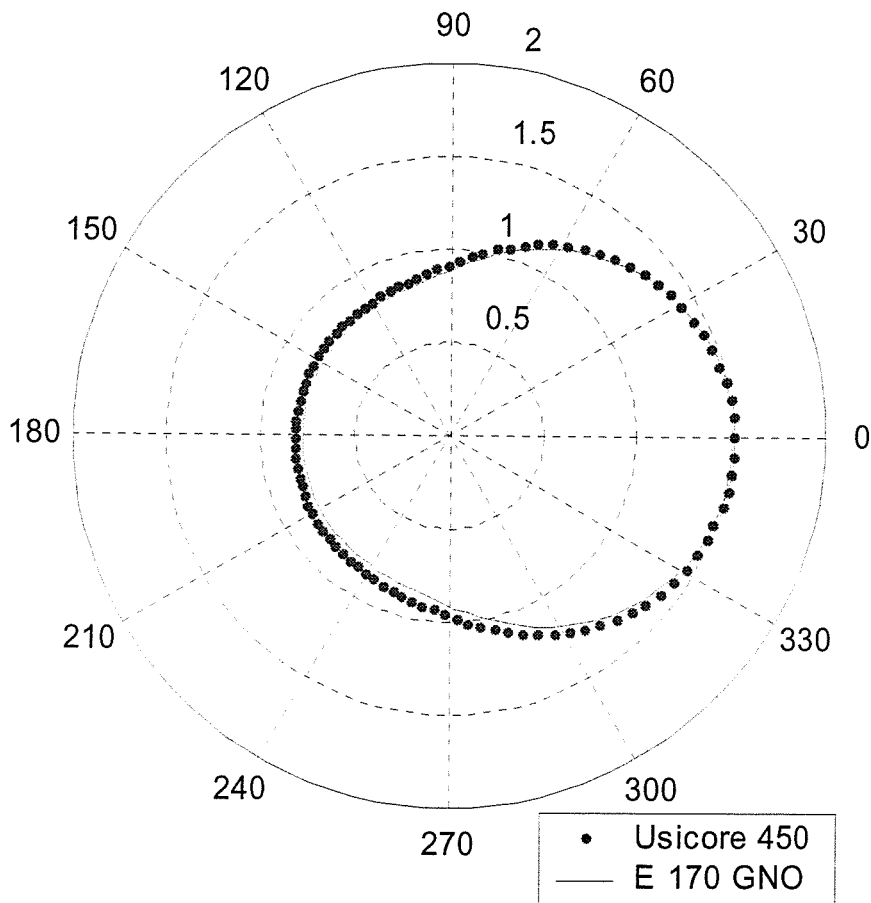


Figura 8.11: Fator de blindagem para a configuração 01 da figura 8.8.

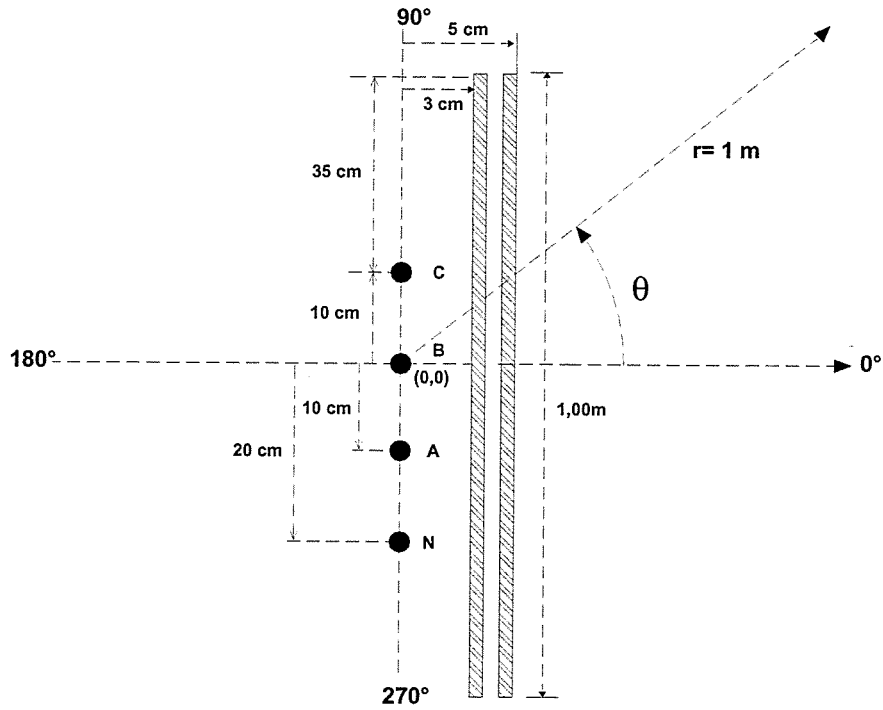


Figura 8.12: Sistema de referência para as simulações - configuração 02 da figura 8.8.

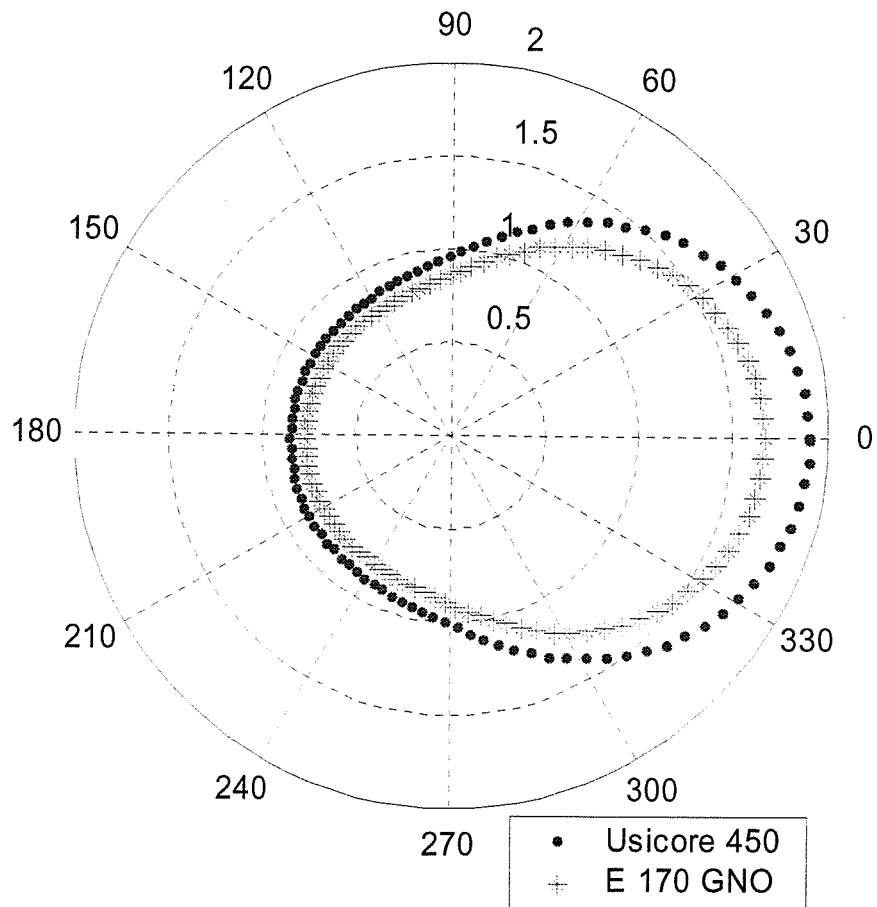


Figura 8.13: Fator de blindagem para a configuração 02 da figura 8.8.

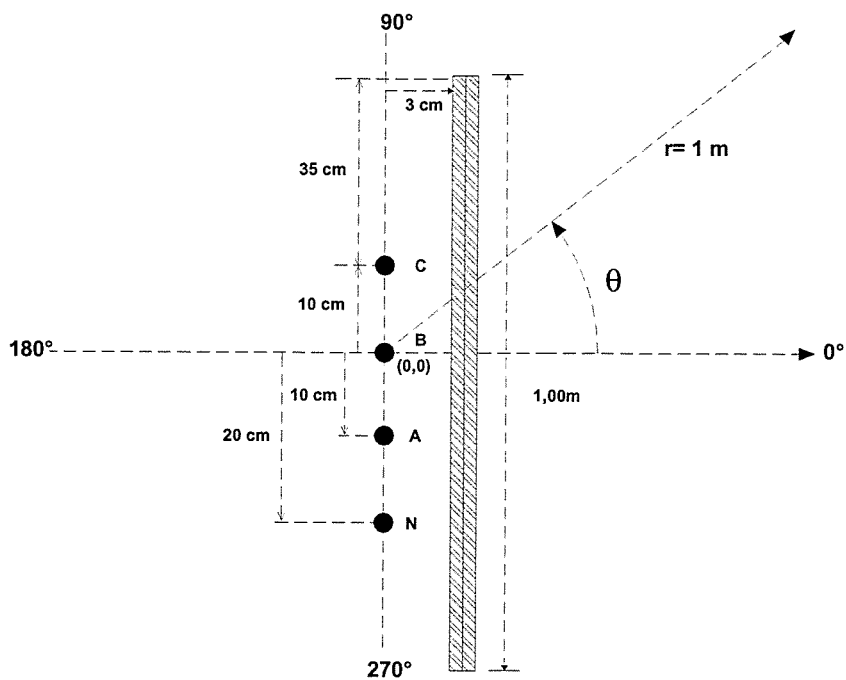


Figura 8.14: Sistema de referência para as simulações - configuração 03 da figura 8.8.

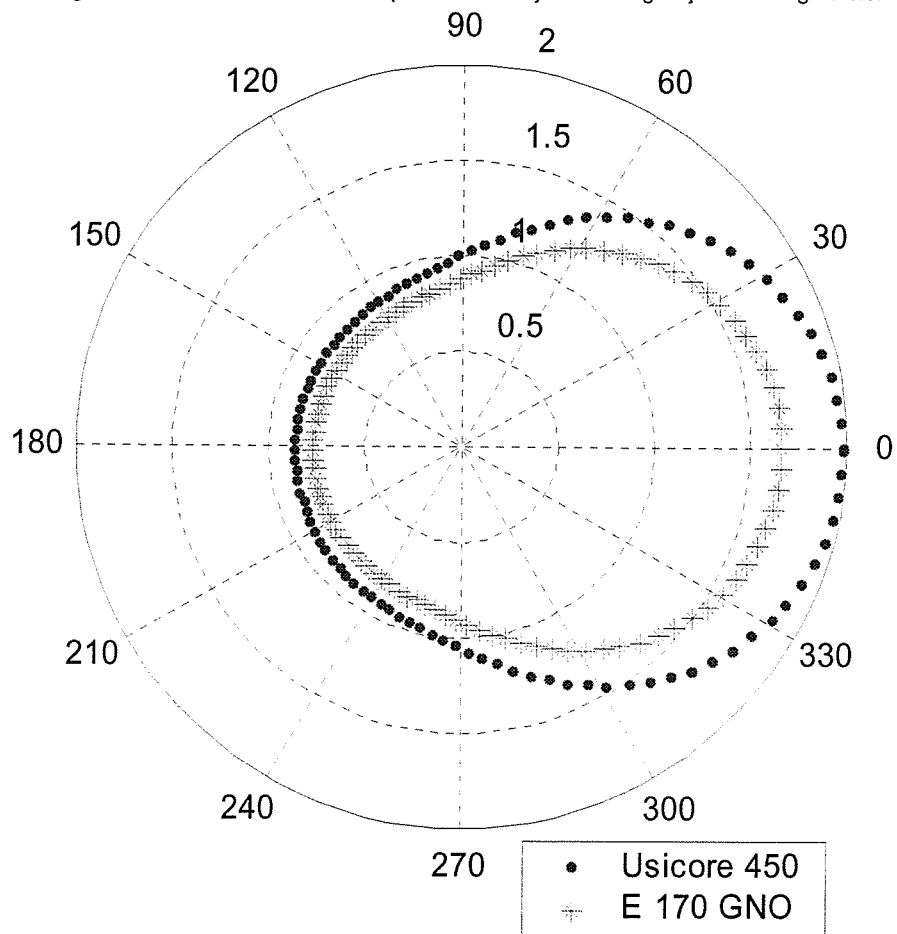


Figura 8.15: Fator de blindagem para a configuração 03 da figura 8.8.

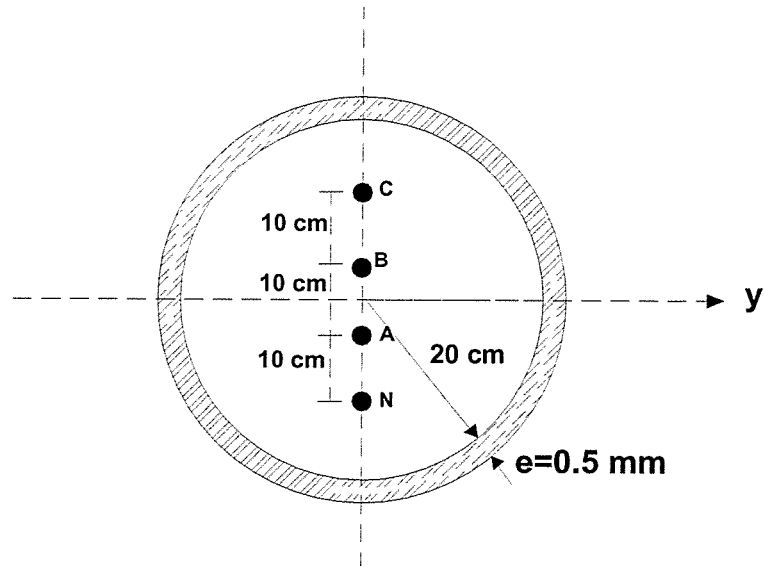


Figura 8.16: Sistema de referência para as simulações - cilindro.

Método do potencial vetor: E 170 GNO 4.80
 Usicore 450: 3.60

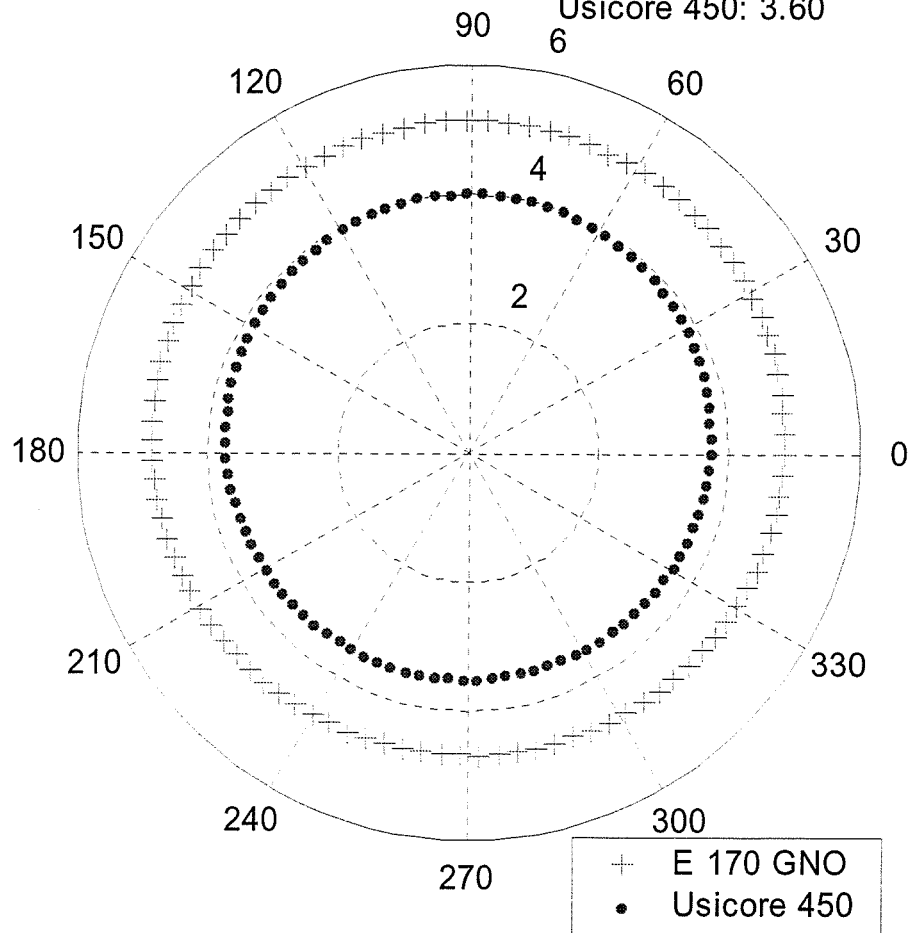


Figura 8.17: Fator de blindagem para a configuração da figura 8.16.

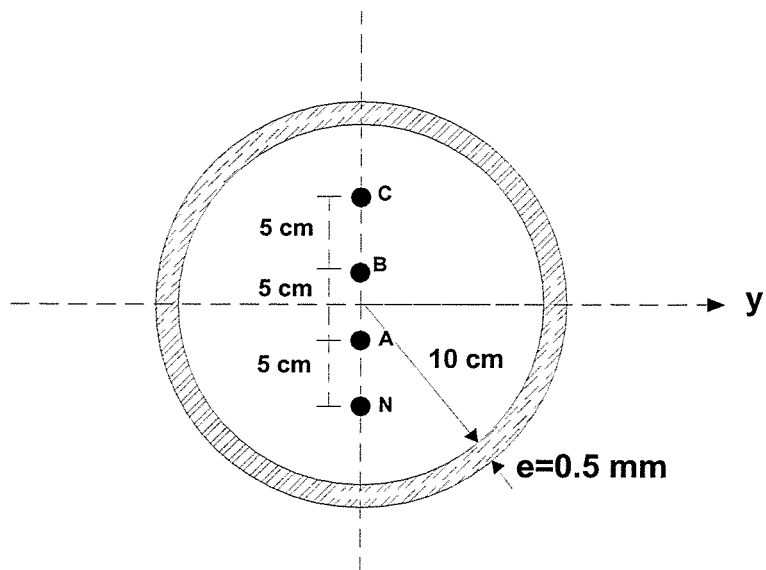


Figura 8.18: Sistema de referência para as simulações - cilindro.

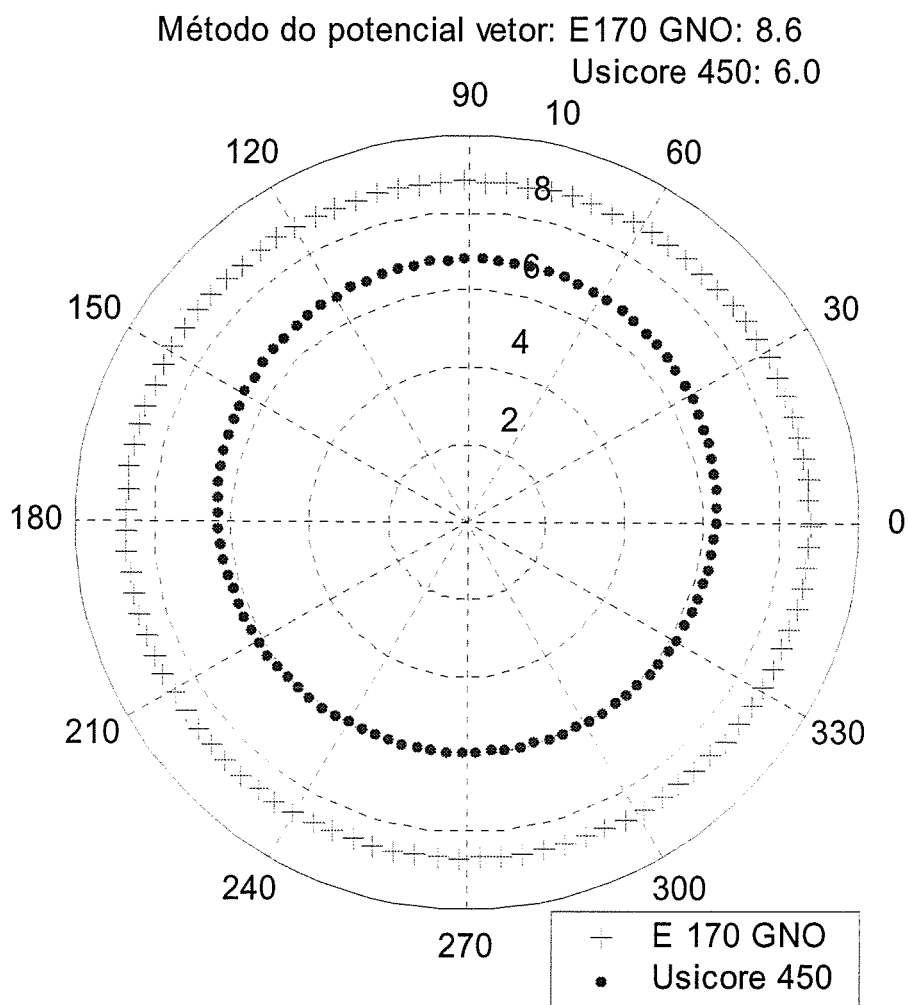


Figura 8.19: Fator de blindagem para a configuração da figura 8.18.

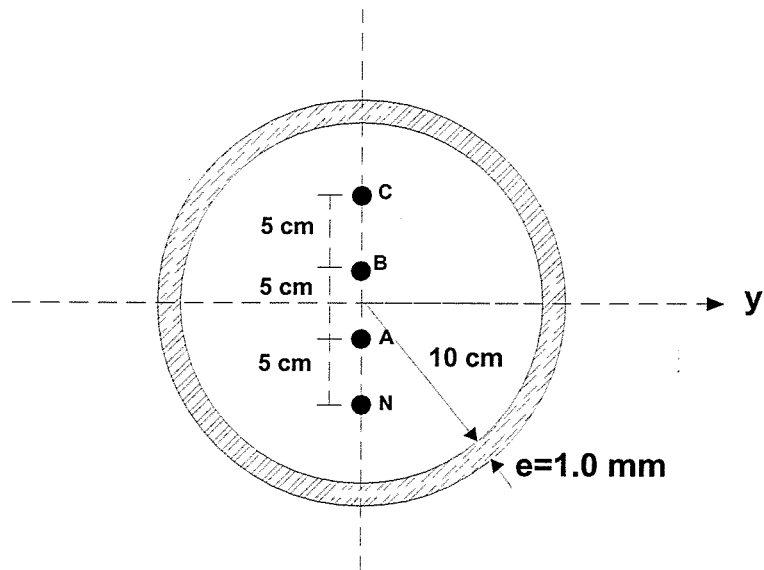


Figura 8.20: Sistema de referência para as simulações - cilindro.

Método do potencial vetor: E 170 GNO: 16.6
 Usicore 450: 13.2

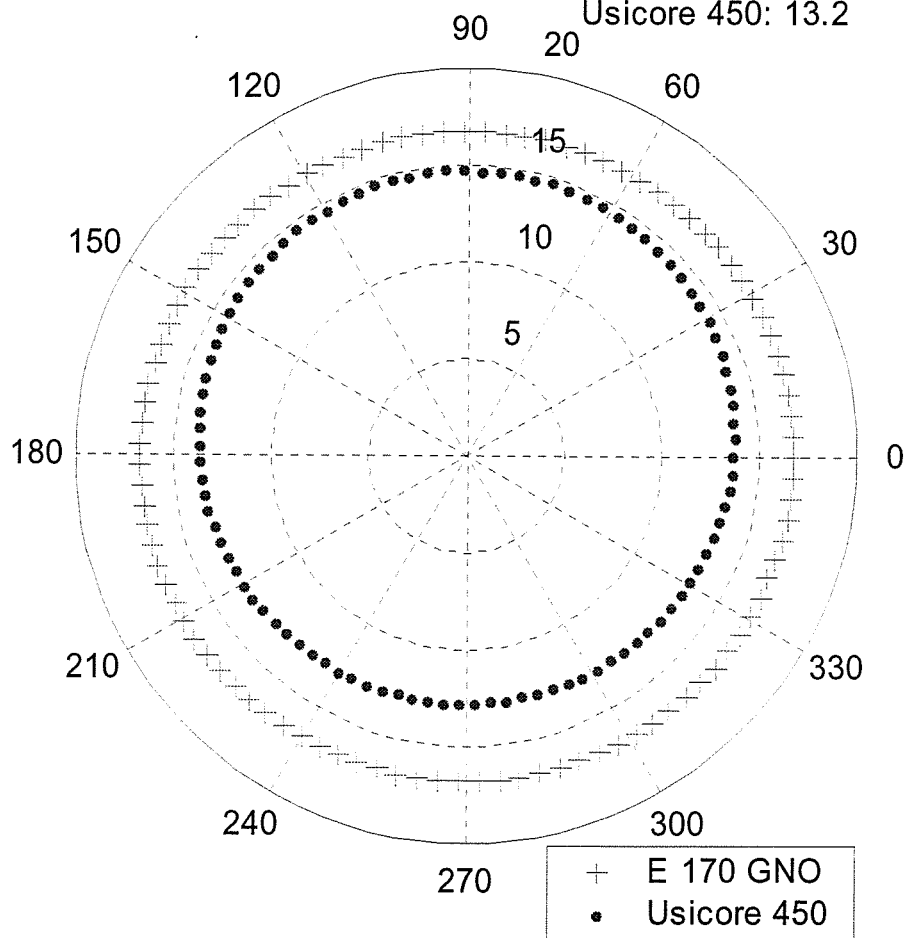


Figura 8.21: Fator de blindagem para a configuração da figura 8.20.

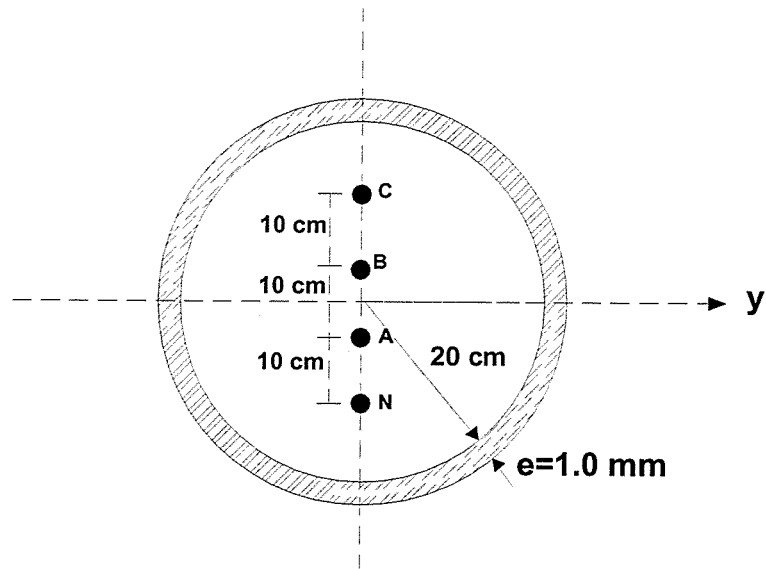


Figura 8.22: Sistema de referência para as simulações - cilindro.

Método do Potencial Vetor: E 170 GNO: 9.1

Usicore 450: 8.0

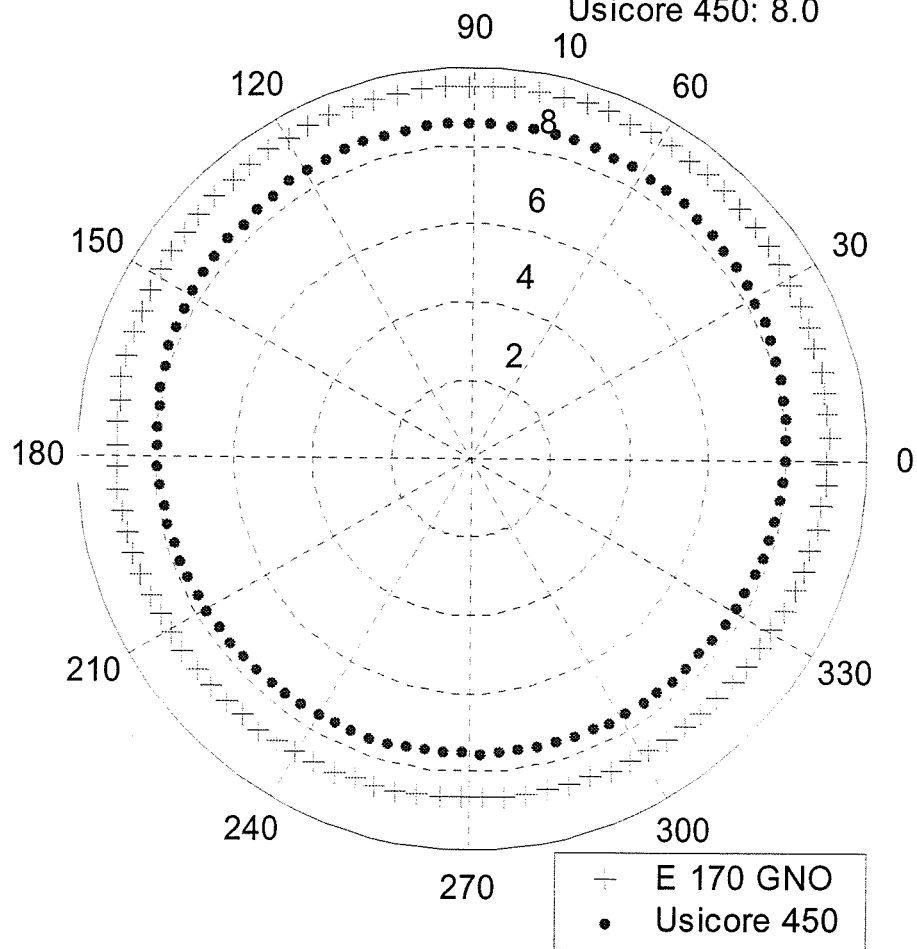


Figura 8.23: Fator de blindagem para a configuração da figura 8.22.

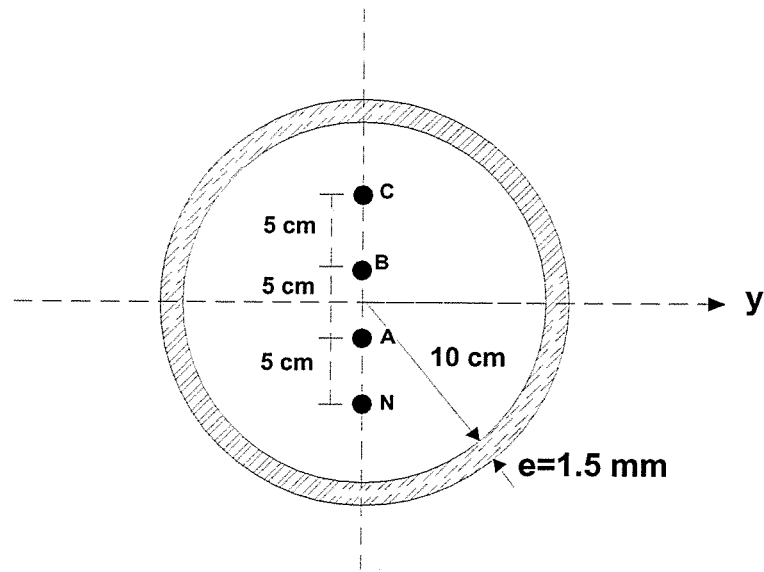


Figura 8.24: Sistema de referência para as simulações - cilindro.

Método do potencial vetor: E 170 GNO: 27.6

Usicore 450: 29.0

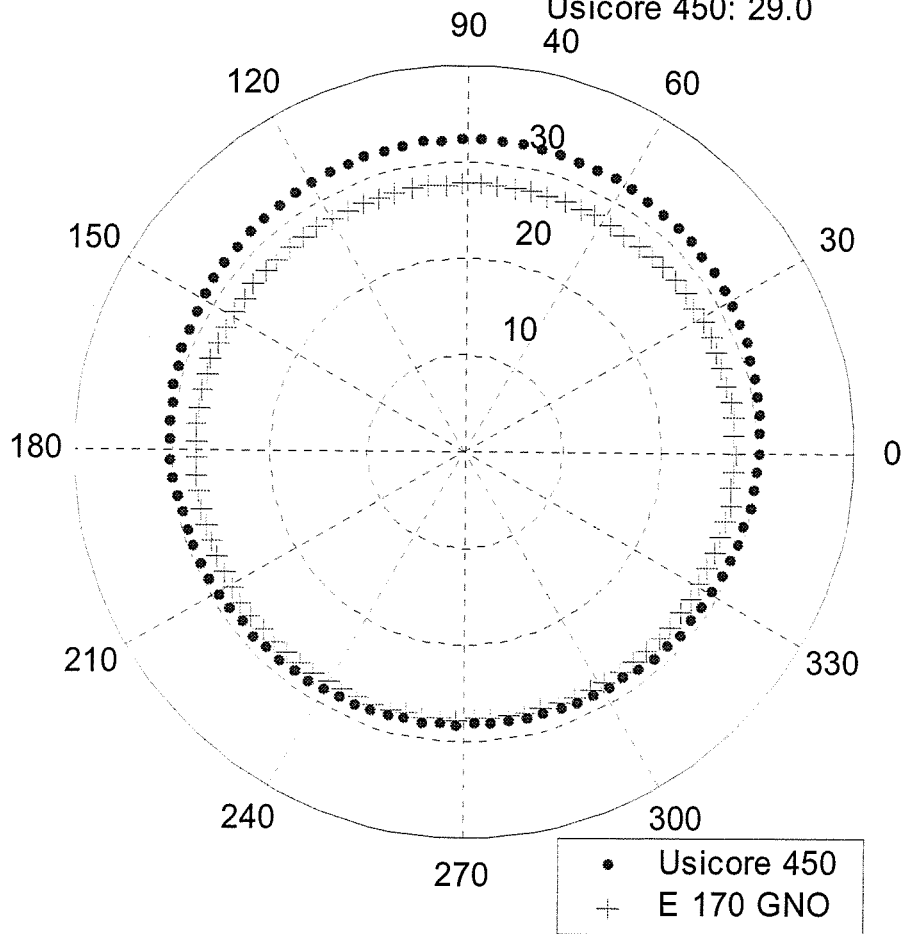


Figura 8.25: Fator de blindagem para a configuração da figura 8.22.

Pelas análises das figuras o desempenho dos materiais E 170 GNO e Usicore 450 é semelhante.

Apesar de possuir uma maior condutividade elétrica, o Usicore 450 apresentou em alguns casos um desempenho menor do que o E 170 - GNO. Este fato pode ser explicado pela maior permeabilidade magnética do material totalmente processado.

8.3 - Análise da Permeabilidade Magnética dos Materiais na Presença do Campo Magnético.

A permeabilidade magnética é um parâmetro que depende do valor do campo magnético no qual o material está submetido.

Os níveis de campos e induções magnéticas comuns nos projetos de blindagem são da ordem de 50 A / m a 80 A / m (63 μ T a 100 μ T de indução). Estes valores de campo magnético estão bem no início da curva de magnetização e nesta região, geralmente a permeabilidade magnética, que é representada pela inclinação da curva no ponto, é menor do que em outras regiões.

A figura 8.26 mostra as curvas de magnetização de alguns materiais na região de baixos valores de campo magnético.

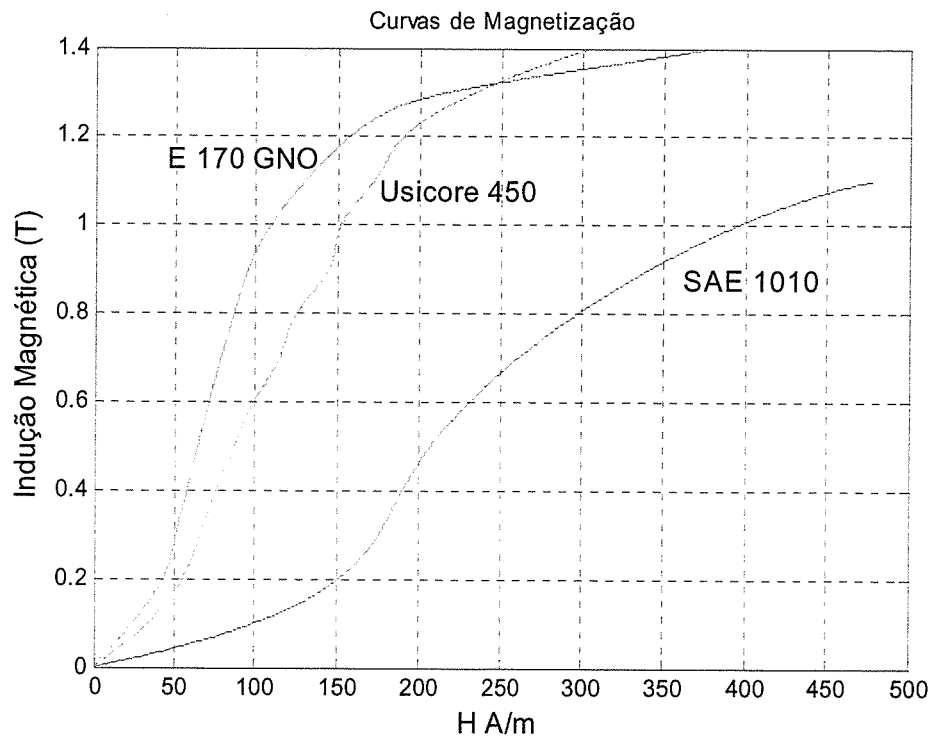


Figura 8.26: Curvas de magnetização nas regiões de baixos valores de campo.

As curvas de magnetização representadas na figura 8.26 são as utilizadas nas simulações deste trabalho.

Fica claro que a permeabilidade magnética para baixos valores de campo é maior nos aços elétricos do que no aço SAE 1010. A curva do aço totalmente processado, E 170 GNO, mostra uma inclinação maior ainda do que a do Usicore 450 indicando que este material têm uma permeabilidade magnética superior na região.

Para comprovar este fato a permeabilidade magnética dos aços elétricos são determinadas utilizando o software "FEMM[®]" [21] para duas das configurações de blindagens analisadas no tópico 8.2.

A permeabilidade magnética relativa é determinada pela razão entre os módulos da indução magnética e do campo magnético em cada ponto ao longo das linhas mostradas na figura 8.27.

As configurações de blindagem e fonte de campo nas quais foi baseado este estudo são as representadas nas figuras 8.10 (configuração de blindagem plana para fonte de alta impedância) e 8.20 (configuração de blindagem cilíndrica para fonte de alta impedância).

As espessuras das chapas são 0.5 mm para a chapa plana e 1 mm para a configuração cilíndrica, sendo que as linhas foram traçadas exatamente no meio da espessura das chapas.

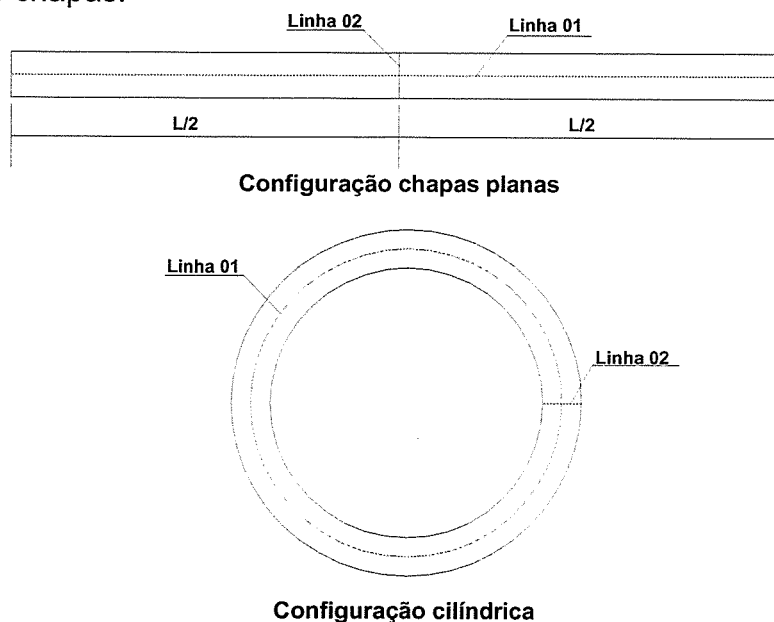


Figura 8.27: Linhas para a determinação da permeabilidade magnética dos materiais.

As figuras 8.28 e 8.29 mostram os valores de permeabilidade ao longo das linhas para o Usicore 450 e o E 170 GNO para a configuração de chapas planas.

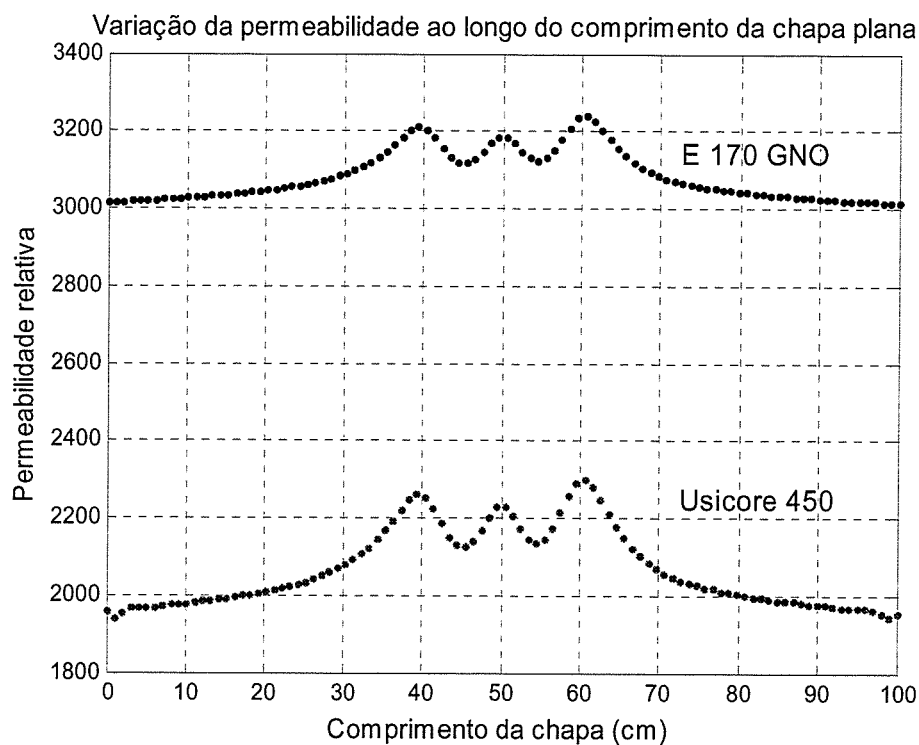


Figura 8.28: Variação da permeabilidade magnética ao longo do comprimento da chapa.

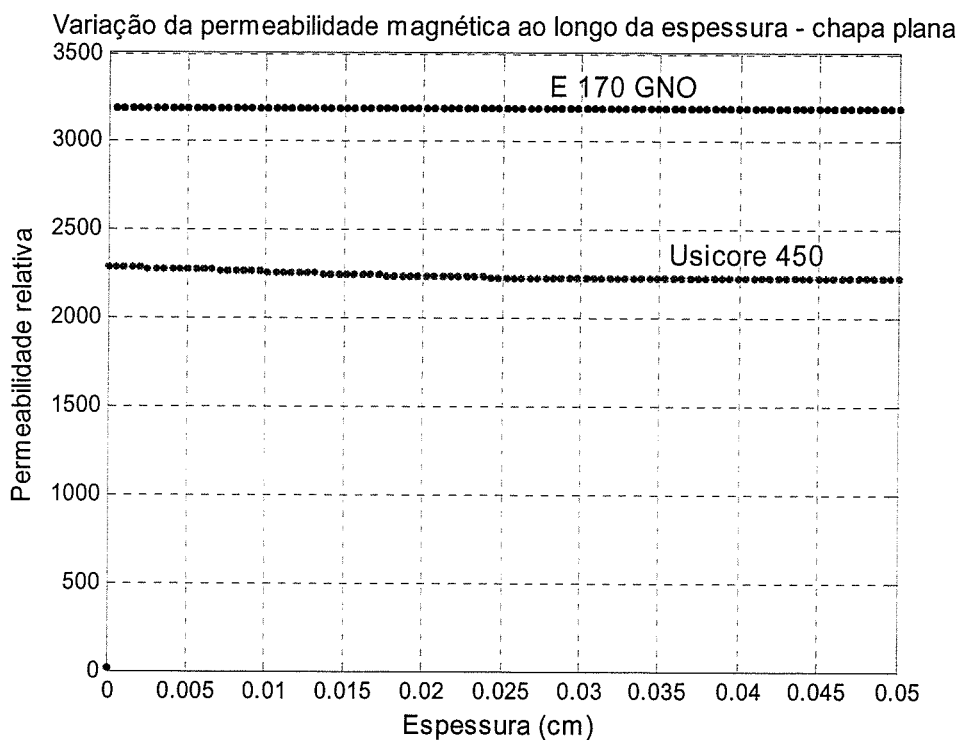


Figura 8.29: Variação da permeabilidade magnética ao longo da espessura da chapa.

As figuras 8.30 e 8.31 mostram os valores de permeabilidade ao longo das linhas para o Usicore 450 e o E 170 GNO para a configuração de chapas cilíndricas.

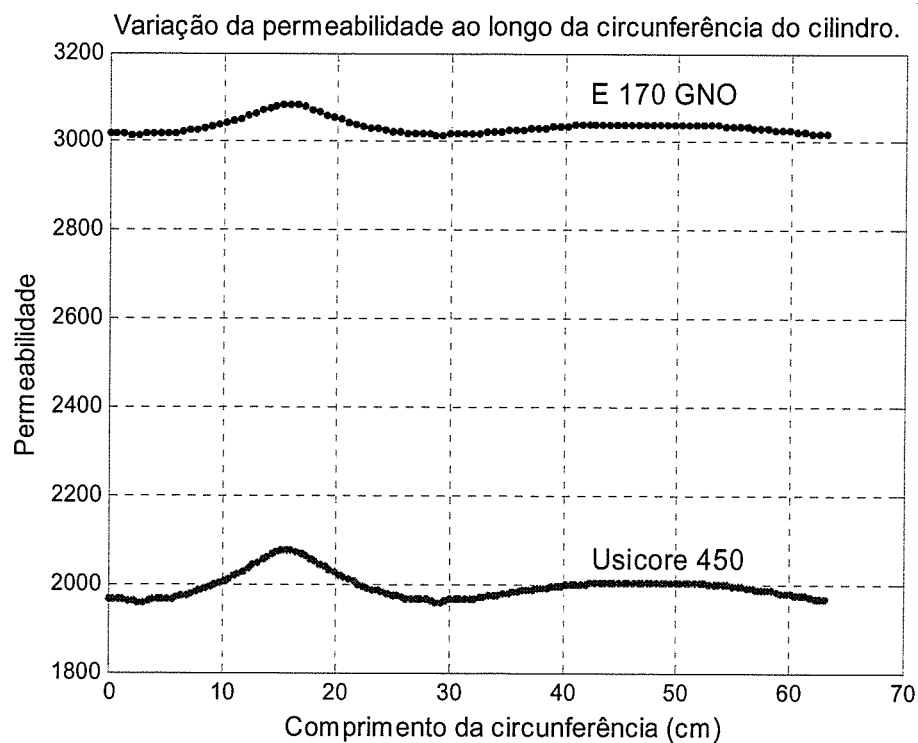


Figura 8.30: Variação da permeabilidade magnética ao longo do comprimento da circunferência do cilindro.

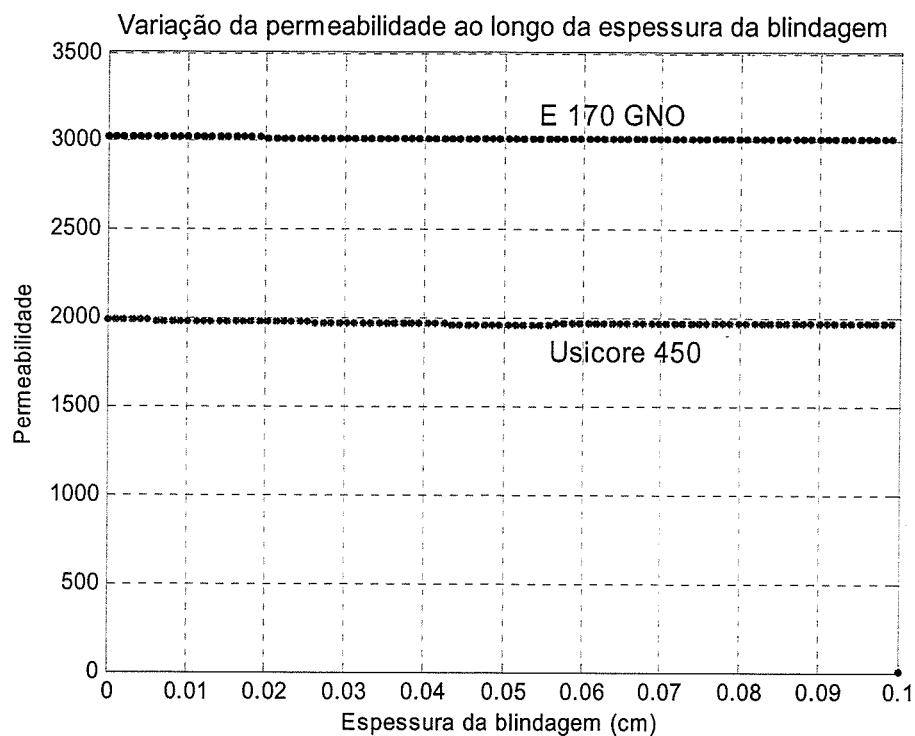


Figura 8.31: Variação da permeabilidade magnética ao longo da espessura da blindagem.

A permeabilidade magnética relativa do aço semiprocessado E 170 GNO é superior a do Usicore 450 em todos os casos analisados. Este fato pode explicar seu desempenho melhor do que o Usicore 450 em alguns dos casos estudados neste capítulo.

A permeabilidade magnética ao longo da espessura das chapas praticamente não sofreu variação para os dois casos estudados, sendo que os valores de 2000 para o Usicore 450 e 3000 para o E 170 GNO foram utilizados para determinar o fator de blindagem para a configuração cilíndrica pelo método do potencial vetor nos casos cujos resultados foram apresentados nas figuras 8.17, 8.19, 8.21 e 8.25.

Ao longo do comprimento da chapa plana, para ambos os materiais, houve um aumento da permeabilidade exatamente na região onde é maior o campo magnético produzido pela fonte de alta impedância.

8.4 - Conclusão Geral do Trabalho e Proposta de Continuidade.

Conclusões importantes a respeito do trabalho serão agora apresentadas juntamente com algumas propostas de continuação das pesquisas na área visando melhorar ainda mais o desempenho do Usicore 450 na blindagem do campo magnético de 60 Hz.

Segue as principais conclusões do trabalho:

- > O método de análise do fenômeno de blindagem eletromagnética desenvolvido por "Schelkunoff" e adotado hoje na maioria dos projetos de blindagem e livros que tratam do assunto não é adequado quando se trata de campos magnéticos de frequências extremamente baixas como 60 Hz. O método do potencial vetor foi apresentado como alternativa e não considera as principais simplificações de "Schelkunoff" (onda plana e uniforme).
- > A blindagem ativa [9] tem algumas vantagens sobre a utilização de chapas metálicas como mecanismo de blindagem, mas é limitada a configurações simples de fonte de campo como condutores longos de corrente. A associação entre os métodos de blindagem ativa e chapas metálicas blindando a fonte seria uma alternativa que sem dúvida levaria a uma

redução do campo magnético suficiente para atender todos os projetos de blindagem, no entanto, o custo do projeto deve ser alto para a maioria dos casos. Um estudo de redução do custo para o emprego da blindagem ativa com placas metálicas deverá ser realizado;

- A blindagem com chapas planas, tanto para as fontes de alta como as de baixa impedância, não oferece um bom desempenho devido, principalmente, ao efeito de bordas causado pelo tamanho finito das chapas. A blindagem com as chapas metálicas em forma de cilindros tem o mesmo desempenho na contenção do campo magnético para qualquer distância da fonte de campo, este fato foi comprovado tanto pelas equações do método do potencial vetor como pelo método de elementos finitos. A desvantagem da blindagem em forma de cilindros é que os materiais utilizados na blindagem são fabricados usualmente na forma de chapas planas e para a obtenção da forma cilíndrica, dependendo da espessura da blindagem, um processo de conformação das chapas se torna necessário e um estudo da influência da deformação nas propriedades magnéticas do material precisa ser analisado em trabalhos posteriores;
- A utilização das ligas de ferro - níquel resultou em um desempenho muito melhor do que os demais materiais, fato explicado pelo seu alto valor de permeabilidade magnética ($\mu_r \approx 80000$ [11]). Conforme apresentado no capítulo 6, 0,1 mm deste material têm o desempenho na blindagem semelhante a 0,27 mm e 0,50 mm respectivamente dos aços elétricos de grãos orientados E - 004 GO e não orientados E - 170 GNO. O custo extremamente alto deste material inviabiliza seu emprego em projetos onde o tamanho da fonte de campo a ser blindada é grande;
- O tratamento térmico final de recozimento e descarbonetação é fundamental para a otimização da permeabilidade, porém não afetou, pelas medições realizadas neste trabalho, a condutividade elétrica.

O desempenho do Usicore 450 apresentou uma melhora significativa depois do tratamento térmico. Seu desempenho ficou semelhante ao desempenho de um aço totalmente processado já utilizado em projetos de blindagem. É importante salientar que o Usicore 450 não apresentou um desempenho satisfatório quando utilizado na configuração de chapas planas e quando utilizado na configuração cilíndrica seu desempenho melhorou atingindo um fator de blindagem conforme mostrado nas figuras 8.20 e 8.21. No próximo tópico será sugerido como proposta de continuidade das pesquisas a obtenção de um material com a condutividade elétrica do Usicore 450 e curva de magnetização do E 170 GNO.

8.4.1- Propostas de continuidade do trabalho.

Conforme já dito, o Usicore 450 não apresentou um bom desempenho para a configuração de chapas planas.

O aço totalmente processado E 170 GNO obteve, em alguns dos casos analisados, um desempenho superior ao Usicore 450 mesmo com uma condutividade elétrica bem menor. A maior permeabilidade para os valores de campo magnético produzidos pelas fontes de campo magnético pode justificar este fato.

As propostas de continuidade de pesquisas na área são apresentadas.

1. Otimização do tratamento térmico aplicado ao Usicore 450 para aumentar os valores de permeabilidade magnética nos níveis encontrados na blindagem, após modificações no passe de encruamento final.

A literatura especializada aponta que os aços elétricos semi processados podem, após sofrerem tratamento térmico final, possuírem grãos de 150 μm a 180 μm [26].

Conforme já apresentado no capítulo 7, o tamanho dos grãos do Usicore 450 deste trabalho, atingiu um tamanho máximo de cerca de 122 μm para as chapas e 114 μm para uma amostra que representava as lâminas utilizadas para o levantamento da curva de magnetização.

Geralmente o tratamento térmico nos aços semi processados visa otimizar o tamanho de grãos até o máximo de 150 μm , que é o tamanho onde a perda total no material é mínima. Na utilização do material para blindar campos magnéticos é

importante que os valores de condutividade e permeabilidade sejam os mais altos possíveis. Não existe limite máximo do tamanho dos grãos para a utilização na blindagem uma vez que quanto maiores os grãos, maior vai ser o valor da permeabilidade do material. O tamanho dos grãos deve ser o maior possível!

Algumas alterações nos parâmetros do tratamento térmico como: temperatura de encharque, ponto de orvalho e atmosfera utilizada na descarbonetação podem gerar uma recristalização suficiente para gerar grãos maiores do que $120 \mu\text{m}$. Deve-se também ser otimizado o valor do encruamento final do material, pois este está diretamente ligado na obtenção de grãos maiores depois do tratamento térmico final.

A referencia [26] estuda a variação destes parâmetros no tamanho dos grãos de um aço semi processado também produzido pela Usiminas - o Usicore 260 - e tamanho de grãos de até $189 \mu\text{m}$ foram obtidos. Um estudo semelhante para o Usicore 450 precisa ser feito.

Como exemplo é estudado o desempenho de um material que possui a condutividade elétrica do Usicore - 450 e a curva de magnetização do E 170 GNO apresentada na figura 8.26.

As configurações estão na figura 8.32. As simulações foram realizadas no "FEMM[®]" [21] e as correntes, tamanho da região de cálculo e número de nós da malha foram os apresentados no capítulo 4. O cálculo do fator de blindagem foi realizado a 1 m em volta da fonte.

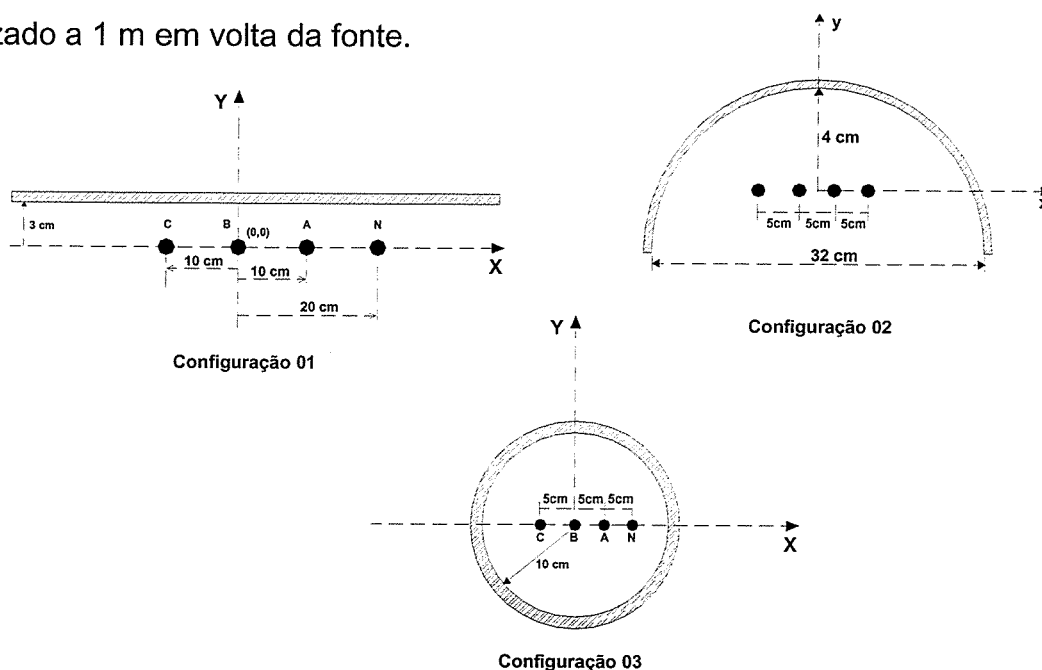


Figura 8.32: Configurações propostas para o novo material.

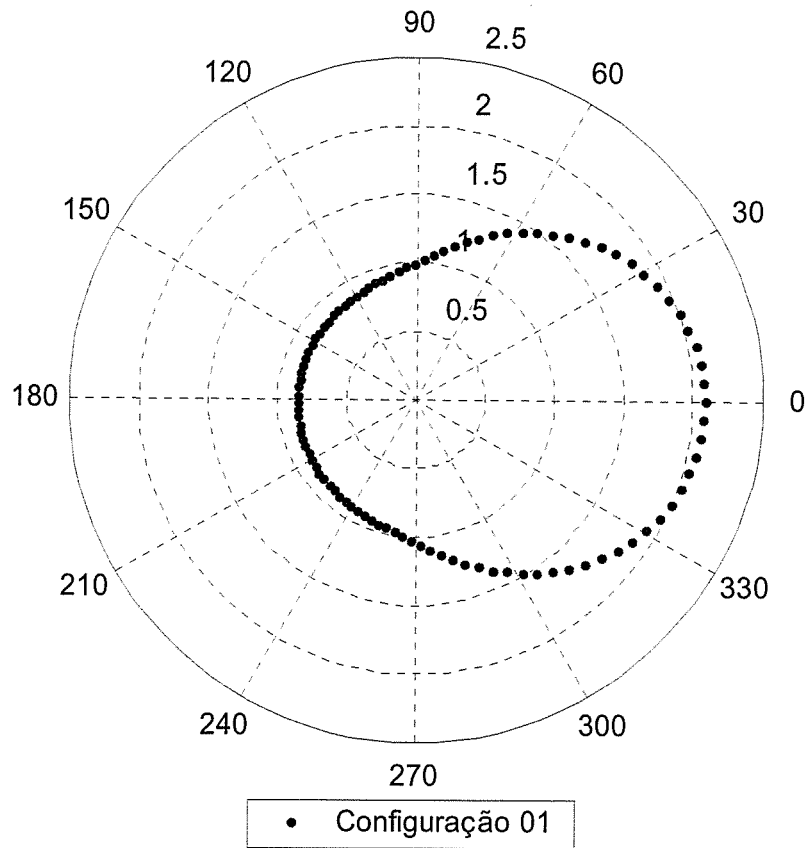


Figura 8.33: Configuração 01 - chapa plana 1 mm de espessura

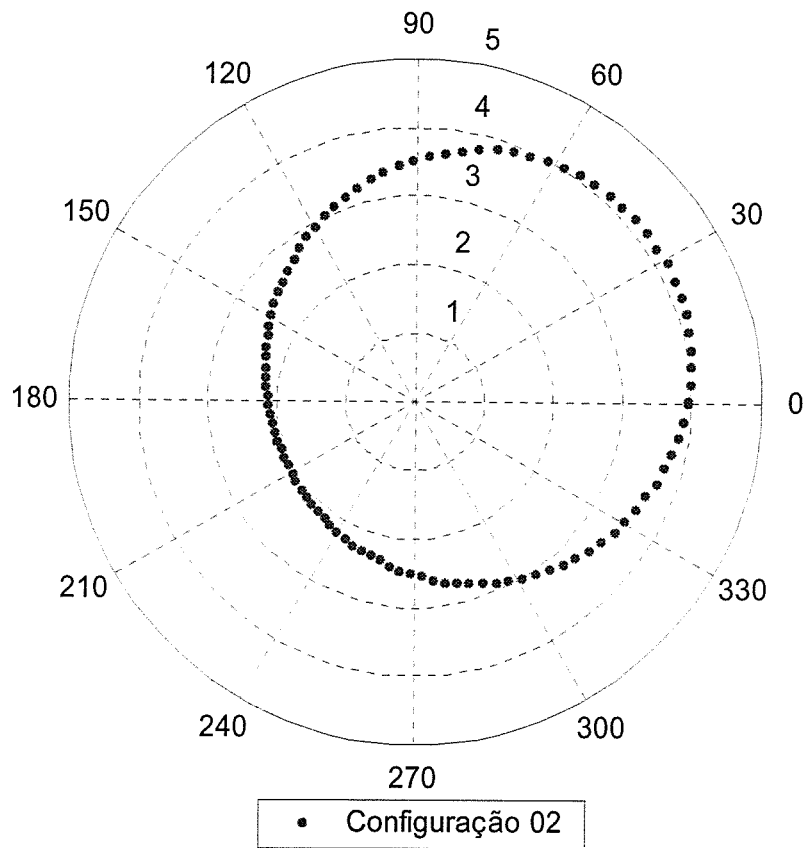


Figura 8.34: Configuração 02 - chapa curva 1 mm de espessura

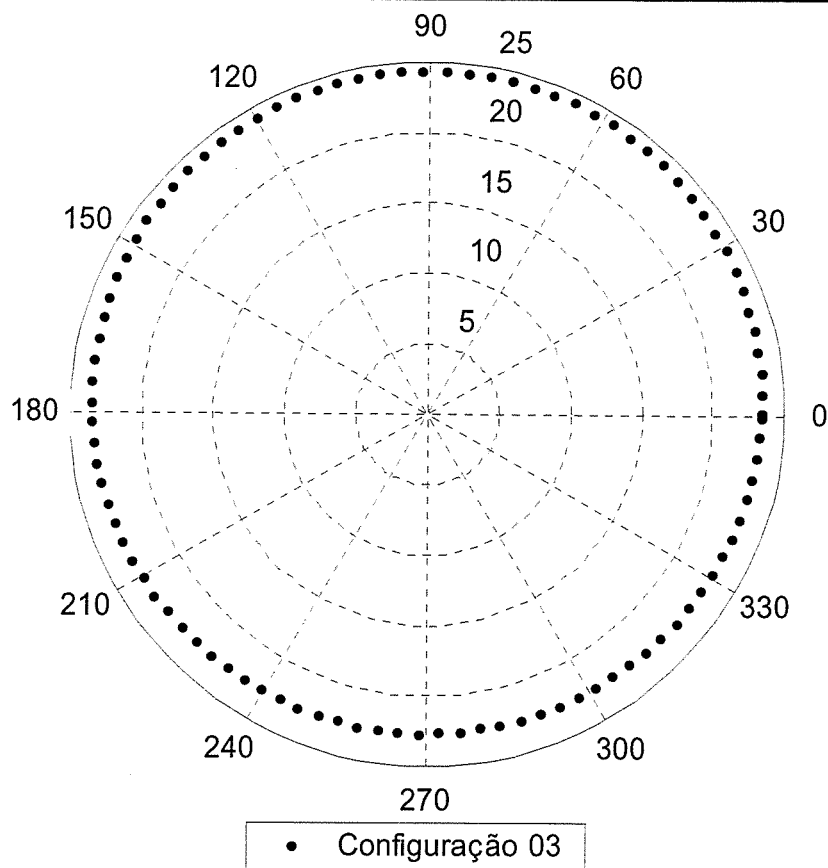


Figura 8.35: Configuração 03 - cilindro com 1 mm de espessura.

Pelos resultados apresentados nas figuras 8.33, 8.34 e 8.35 apenas a configuração de blindagem em forma de cilindro obteve um resultado satisfatório na blindagem.

Pela comparação entre as figuras 8.21, 8.25 e 8.35, pode-se observar que um material que possua a condutividade elétrica do Usicore 450 e a curva de permeabilidade magnética do E 170 GNO tem um desempenho superior a estes dois materiais.

Uma atenção especial para a figura 8.25, na qual mostra o desempenho de uma blindagem com espessura 50% maior do que a utilizada na figura 8.35 e com um desempenho parecido o que sugere que o novo material com as características propostas pode gerar uma economia de 50% de material.

As figuras 8.36 e 8.37 mostram a variação da permeabilidade magnética na configuração cilíndrica ao longo das linhas da figura 8.27.

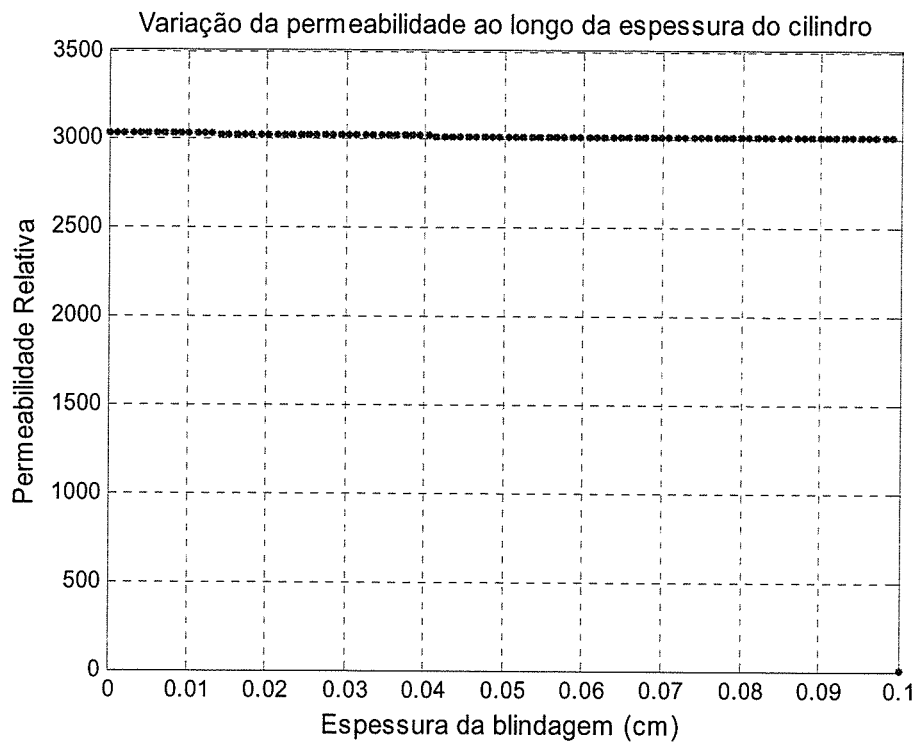


Figura 8.36: Variação da permeabilidade magnética ao longo da espessura da blindagem.

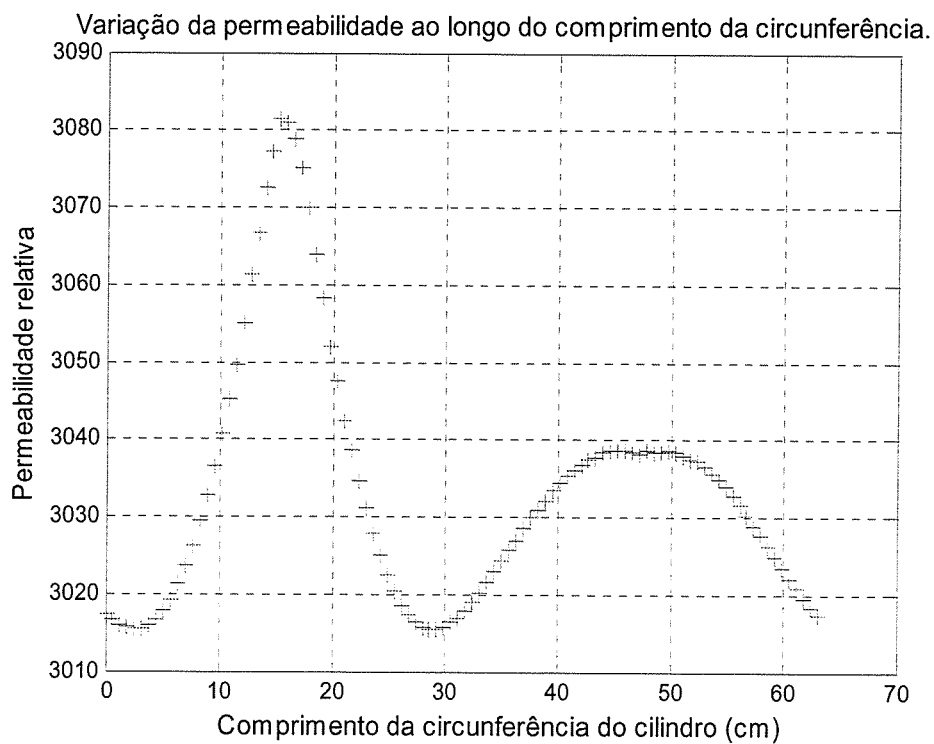


Figura 8.37: Variação da permeabilidade magnética ao longo do comprimento da circunferência da blindagem.

A permeabilidade magnética ao longo de toda a blindagem ficou em torno de 3000 com o nível do campo produzido pela fonte de alta impedância.

Um material que apresente uma permeabilidade magnética maior ou igual a 3000 para os níveis de campo magnético apresentados neste trabalho deve ser o objetivo de futuros trabalhos.

2. Aprimoramento do método do potencial vetor magnético.

O método do potencial vetor magnético já não incorpora algumas simplificações adotadas pelo método de "Schelkunoff" mas, no entanto, considera o tamanho da blindagem como infinito na configuração de chapas planas para os dois tipos de fonte de campo.

Uma proposta de continuidade deste trabalho é o aperfeiçoamento do método do potencial vetor para considerar o tamanho finito da blindagem.

Uma solução aproximada para o problema é apresentada pela referência [15], que considera ainda a aproximação de o material utilizado na blindagem ser ora condutor elétrico perfeito ora condutor magnético perfeito.

3. Análise da influência da conformação dos materiais nas propriedades magnéticas.

Com o bom desempenho da configuração cilíndrica, um estudo mais aprofundado precisa ser feito quanto ao comportamento das propriedades magnéticas do aço perante a conformação da chapa plana para a forma cilíndrica.

Referências Bibliográficas.

- [1] - COMMITTEE ON THE POSSIBLE EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON BIOLOGICAL SYSTEMS., "*Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields*" National Academy Press Washington, DC 1997.
- [2] - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE - EPRI., "Survey of Residential Magnetic Field Sources: Protocol. Data Analyses and Management" , VOL. 2. 1993.
- [3] -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.
- [4] - MARTINS, M. C. V., "Interferência e Compatibilidade Eletromagnética em Ambientes Industriais" Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp 72-78, Agosto de 1994.
- [5] - JUHA, TIKKANEN; ESA, VIRTANEN, "*Campos Magnéticos Causados por Postos de Transformações Internos*", Eletricidade Moderna, Aranda Editora, pp. 119-128, Abril de 1996.
- [6] - PAULINO, J.O.S.; "Cálculo, Projeto e Especificação de um sistema de Blindagem para Cabos de Baixa Tensão com o Objetivo de Eliminar Interferências em Telas de Microcomputadores", Relatório Técnico – CEMIG/FCO/EEUFMG, 1997.
- [7] - MURTA, M.L., "Blindagem Ativa para Campos Magnéticos em Baixa Frequência", *Tese de Doutorado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 2002.
- [8] - SOUZA, M.J., "Estudo da Eficiência de Chapas de Aços Elétricos na Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Frequência", *Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG*, 2000.

- [9] - 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.
- [10] -PAULINO, J.O.S.; "Análise do Problema de Interferência Eletromagnética no Prédio Lopes Quintas da Rede Globo de Televisão no Município do Rio de Janeiro", Relatório Técnico – CEMIG/FCO/EEUFMG, 1997.
- [11] -PAUL, C. R., "*Introduction to Electromagnetic Compatibility*", Department of Electrical Engineering - University of Kentucky, Lexington. A Wiley - Interscience Publication, 1992.
- [12] -HEMMINIG, LELAND H., "*Architectural Electromagnetic Shielding Handbook, A Design and Specification Guide*", IEEE PRESS, Inc., New York, 1991.
- [13] -OTT, HENRY W., "Noise Reduction Techniques in Eletronic Systems" Editora John Wiley & Sons, 2ª Edição 1988.
- [14] - YAPING, Du.; CHENG,T.C; "*Principles of Power Frequency Magnetic Field Shielding with Flat Shets in a source of Long Conductors*", IEEE Transaction Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no 3, pp 450-459, August, 1996.
- [15] - OLSEN, R. G.; MORENO,P.; "*Some Observation About Shielding Extermely Low - Frequency Magnetic Fields by Finite Width Shields*" IEEE Transaction Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no 3, pp 460-468, August, 1996.
- [16] -BOYCE, E.W.; DIPRIMA, C.R.; "Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno" Editores: Livros Técnicos e Científicos, Sexta Edição 1999.
- [17] - BANNISTER, P. R.; "*New Theoretical Expression Shielding Effectiveness for the Plane Shield Case* ", IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 10, nº 1, pp 2-6, March, 1968.

- [18] -YAPING, Du.; BURNETT,J; “ *Optimal Magnetic Shielding of Double Shield at Power Frequency*”, IEEE Transaction Electromagnetic Compatibility, vol. 38, nº 3, pp 191-196, August, 1996.
- [19] - MOSER, J. R.; “ *Low Frequency Low Impedance Electromagnetic Shielding* ”, IEEE Transaction Electromagnetic Compatibility, vol. 30, no 3, pp 202-210, August 1988.
- [20] -TALARICO, M. L., “Resistividade Elétrica no Aço Silício”, Dissertação de Mestrado do Curso de Pós - Graduação em Metalurgia da UFMG, 1977.
- [21] – <http://femm.berlios.de> Site onde, até a data 17/12/2003 o programa "FEMM" poderia ser obtido gratuitamente.
- [22] – <http://www.zetataalk.com/info/tinfo22p.htm>. Página faz referência ao uso das ligas de ferro níquel na blindagem de campos magnéticos.
- [23] - LANDGRAF, F.J.G; Curso Organizado pelo Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos, “*Aços carbono e Aços Silício para Fins Elétrico*”, São Paulo 1999.
- [24] -WEN, C.C., “*Magnetism and Metalurgy of Soft Magnetics Materials*”, North – Holland, 1977.
- [25] -Catálogo Acesita, “Aços ao Silício de Grãos Orientados e Aços ao Silício de Grãos não Orientado”.
- [26] -KLEINER, M.M., “Cinética de Descarbonetação de um Aço GNO Semiprocessado e sua Influência nas Propriedades Magnéticas e na Susceptibilidade ao Envelhecimento Magnético”, *Tese de Doutorado do curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG*, 2002.

ANEXO 1

**Laudo da Composição Química
Antes do Tratamento Térmico.**

Laboratório de Análises Químicas	
Certificado nº: 136/03	Data: 02 de maio de 2003
Material: Aço	
Solicitante: Moacir de Souza	
Procedência: Depto Engenharia Elétrica	



RESULTADOS

Nº Lab.	1030/03
Referência da Amostra	Placas
Elementos Solicitados	Teores Encontrados
C	0,052%
S	0,007%
Si	< 0,01%
Al	< 0,05%
Mn	0,212%

Obs.: 1- O presente resultado só é válido para as amostras enviadas.

Olívia Maria de Sousa Ribeiro Vasconcelos
Engenheira Química – CRQ n.º 02300542 – 2ª. região

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Laboratório de Análises Químicas	
Certificado nº: 161/03	Data: 07 de maio de 2003
Material: Aço	
Solicitante: Moacir de Souza	
Procedência: Depto Engenharia Elétrica	

metalurgia e materiais



RESULTADOS

Nº Lab.	1220/03
Referência da Amostra	Placas após tratamento
Elementos Solicitados	Teores Encontrados
C	0,048%
S	0,008%
Si	< 0,01%
Al	0,241%
Mn	0,237%

Obs.: 1- O presente resultado só é válido para as amostras enviadas.

Olívia Maria de Sousa Ribeiro Vasconcelos
Engenheira Química – CRQ n.º 02300542 – 2ª. região

ANEXO 2

**Laudo do Tratamento Térmico e
das Curvas de Magnetização do
Usicore 450.**



Instituto de Pesquisas Tecnológicas

RELATÓRIO TÉCNICO Nº 66 853

Final

**TRATAMENTO TÉRMICO E CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE
LÂMINAS DE AÇO**

**Divisão de Metalurgia
Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos**

**Cliente: CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA DA UFMG**

agosto/2003



Resumo:

As lâminas e chapas enviadas foram submetidas a tratamento térmico e depois foram caracterizadas quanto às perdas e a permeabilidade magnética de 1 conjunto de lâminas de aço.

Palavras Chaves: tratamento térmico; caracterização magnética; lâminas de aço.

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos/APM/DIMET

Relatório Técnico nº 66 853 - ii

SUMÁRIO

	pg
1 INTRODUÇÃO	1
2 RESULTADOS	3
3 CONCLUSÃO	7

1 INTRODUÇÃO

O CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFMG enviou ao IPT 1 conjunto (cortes transversal e longitudinal) de lâmina Epstein de aço e chapas do mesmo material e solicitou tratamento térmico e ensaios de determinação de propriedades magnéticas para campos magnéticos na faixa de 5 a 300 A/m a 60 Hz.

AMOSTRA(S)

- **Material declarado pelo cliente:** Lâminas e chapas de Aço (USICORE 450).
- **Descrição das amostras:** 1 conjunto de lâminas (8 lâminas com corte transversal e 8 longitudinal) com as seguintes dimensões: 300 x 29,72 x 0,5 mm e 40 chapas com aproximadamente 20 x 25 cm.

Densidade declarada pelo cliente: não informado.

- **Identificação da Amostra:**

Tabela 1. Identificação e dimensões da amostra Epstein.

IPT-LMPMM	Paralela à direção de laminação(longitudinal)	Perpendicular à direção de laminação(transversal)	Total
5436	8	8	16

MÉTODOS UTILIZADOS

- **Método**
 - Procedimento de ensaio DIMET-LMPMM-PE12.

- Normas de referência

ASTM 343 Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-Epstein Test Frame

ABNT NBR 5161 Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos

- Equipamentos utilizados:

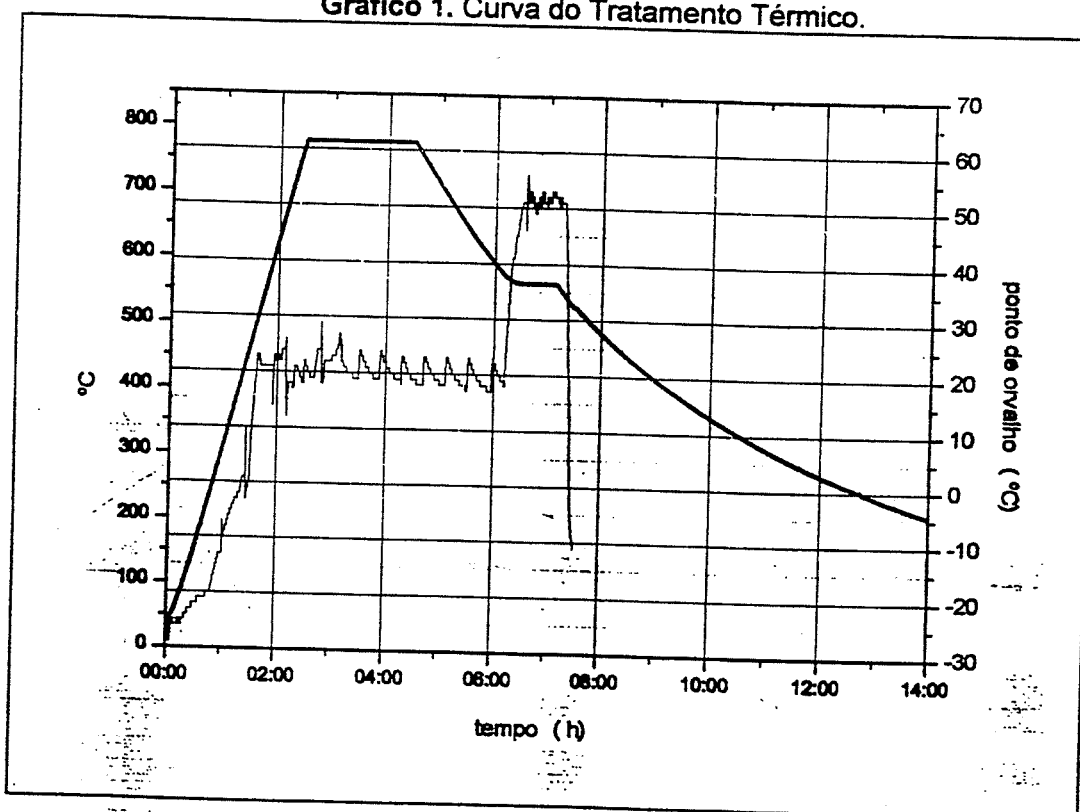
- Quadro de Epstein de 25 cm com bobina de mútua compensação
- Multímetro HP-34401A
Certificado de calibração/aferição nº 46 104 Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT
- Conjunto composto por: amplificador Tectronix AM5030 e ponta de corrente Tectronix A6302, osciloscópio digital HP54602
Certificado de calibração/aferição nº 46 101 Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT
- Wattímetro Yokogawa modelo 2533E
Certificado de calibração/aferição nº 46 107 Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT
- Gerador de funções HP-33120A
Certificado de calibração/aferição nº 46 100 Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT
- Balança digital de precisão Chyo MJ-3000
Certificado de calibração/aferição nº 40 323 Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT
- Fonte de potência Kepco BOP 50-8M
- Ohmmeter - Dos Digital CROPICO
Certificado de calibração/aferição nº 46 244 Laboratório de Metrologia Elétrica do IPT

2 RESULTADOS

Determinou-se a densidade através da medição da resistividade e obteve-se a densidade de 7.882kg/m^3 .

As lâminas (8 longitudinais e 8 transversais) e as 40 chapas da amostra foram submetidas a tratamento térmico (vide gráfico 1) que consistiu de descarbonetação (2 horas a 760°C e ponto de orvalho em torno de 20°C) e azulamento (1 hora a 560°C e ponto de orvalho em torno de 50°C), passando a ser identificadas como IPT-LMPMM 5444.

Gráfico 1. Curva do Tratamento Térmico.



Os ensaios de indução e permeabilidade foram realizados utilizando 8 lâminas com direção de corte longitudinal(L) e 8 lâminas com direção de corte transversal(T) separadamente para cada direção e em conjunto(L+T). Devido à precisão do equipamento, o campo magnético foi a partir de 34 A/m a 60 Hz . Os resultados estão nas tabelas 2a, 2b, 2c e gráficos 2 e 3.

Tabela 2a. Resultados de indução, permeabilidade e perdas para as lâminas de corte longitudinal.

5444L

Campo A/m	Indução (T)	permeabilidade	Perdas W/kg
34	0,100	2503	0,053
55	0,200	3074	0,189
66	0,300	3875	0,373
76	0,401	4394	0,605
87	0,500	4810	0,885
99	0,600	5093	1,219
115	0,700	5160	1,601
125	0,800	5356	2,042
145	0,900	5148	2,535
152	1,000	5367	3,096
172	1,100	5246	3,735
190	1,200	5163	4,436
234	1,300	4581	5,201
305	1,400	3724	6,076
550	1,501	2217	7,160

Tabela 2b. Resultados de indução, permeabilidade e perdas para as lâminas de corte transversal.

5444T

Campo A/m	Indução (T)	permeabilidade	Perdas W/kg
36	0,100	2359	0,054
53	0,200	3233	0,185
66	0,300	3844	0,375
77	0,400	4466	0,604
89	0,500	4718	0,887
98	0,600	5110	1,218
114	0,701	5109	1,613
130	0,800	5129	2,051
146	0,900	5135	2,553
157	1,000	5230	3,118
174	1,100	5201	3,761
212	1,200	4639	4,477
282	1,300	3753	5,301
464	1,401	2444	6,334
1252	1,501	964	7,601

Tabela 2c. Resultados de indução, permeabilidade e perdas para as lâminas em conjunto.

5444LT

Campo A/m	Indução (T)	permeabilidade	Perdas W/kg
37	0,100	2378	0,058
54	0,200	3088	0,192
65	0,300	3849	0,376
73	0,400	4586	0,602
86	0,500	4957	0,884
97	0,600	5138	1,211
108	0,700	5324	1,588
127	0,801	5229	2,017
136	0,900	5533	2,508
152	1,001	5400	3,061
170	1,101	5313	3,685
191	1,200	5055	4,379
248	1,300	4208	5,158
367	1,402	3079	6,108
851	1,502	1409	7,331

Gráfico 2. Comparação da curva da permeabilidade para cada tipo de lâmina.

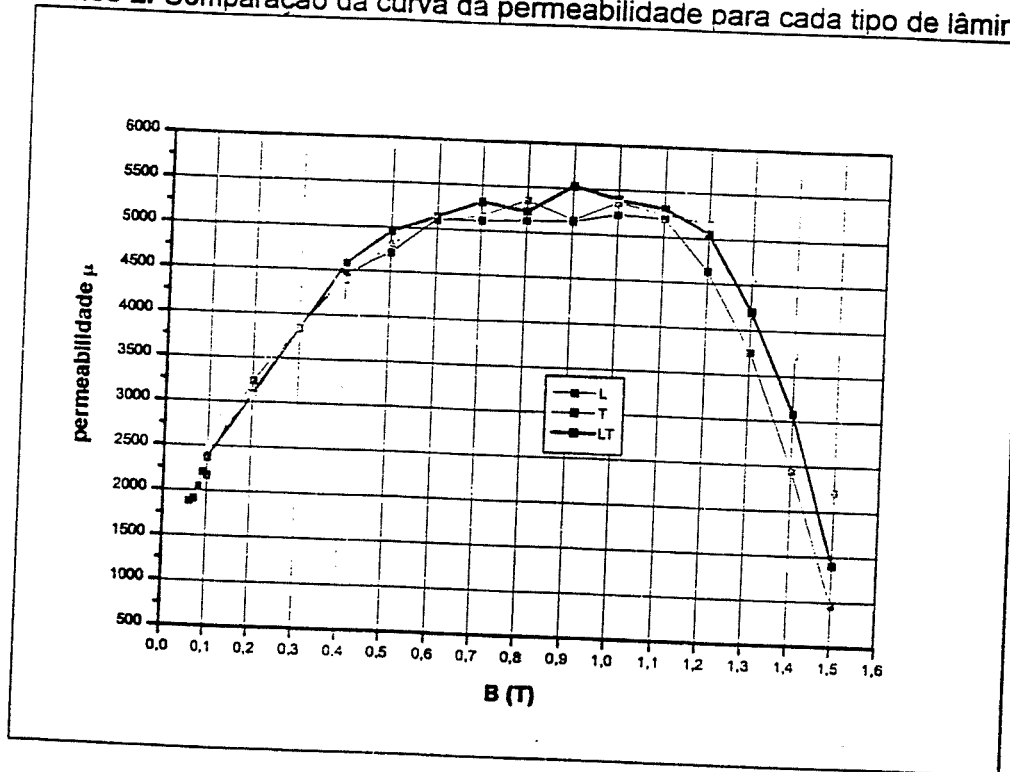
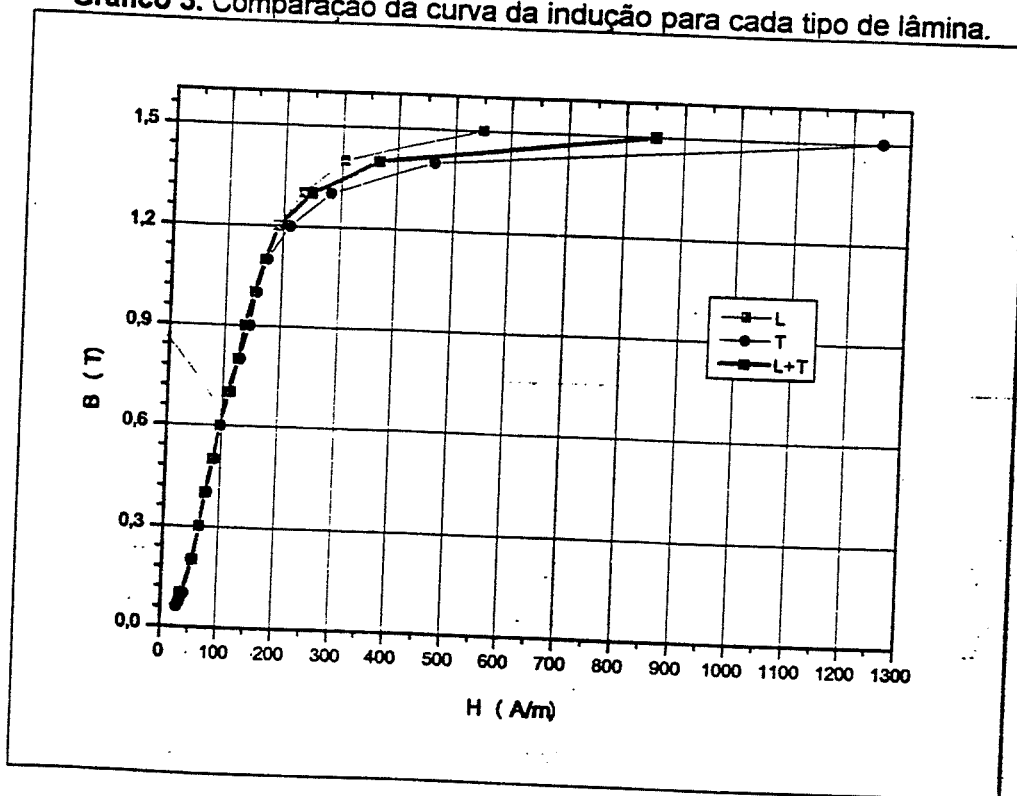


Gráfico 3. Comparação da curva da indução para cada tipo de lâmina.



IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos/APM/DIMET

Relatório Técnico nº 66 853 -7/7

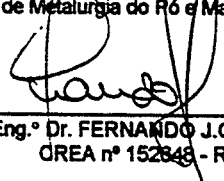
3 CONCLUSÃO

As chapas e lâminas foram recozidas em ciclo térmico adequado para maximizar as propriedades magnéticas. As propriedades magnéticas encontradas têm valores que podem ser considerados típicos de aços elétricos sem silício. A anisotropia encontrada também está em níveis típicos.

Responsável pelos ensaios: Fís. Marcos Fukuhara

São Paulo, 25 de agosto de 2003.

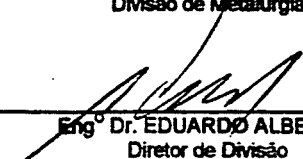
INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - IPT
Divisão de Metalurgia
Agrupamento de Processos Metalúrgicos
Lab. de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos


Eng.º Dr. FERNANDO J.G. LANDGRAF
CREA nº 152849 - RE 2985.0

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - IPT
Divisão de Metalurgia
Agrupamento de Processos Metalúrgicos
Lab. de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos


Eng.º Dr. DANIEL ROBRIGUES
Responsável pelo Laboratório
CREA nº 216.217/D - RE nº 7861.8

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - IPT
Divisão de Metalurgia


Eng.º Dr. EDUARDO ALBERTIN
Diretor de Divisão
CREA nº 74.790 - RE nº 2364.8

ANEXO 3

**Laudo da Composição Química
Depois do Tratamento Térmico.**

RELATÓRIO TÉCNICO Nº 71 212

CLIENTE: PROF. MOACIR DE SOUZA JÚNIOR
Av. Monte Simplon, 464 – Apto 202
30480-530 – Belo Horizonte – MG

NATUREZA DO TRABALHO: Determinação dos teores de carbono, enxofre, silício e alumínio em aço elétrico.

1. INTRODUÇÃO

Em atendimento a sua solicitação através de carta recebida em 22.04.2004, seguem abaixo os resultados das análises químicas realizadas em amostra fornecida por V.S.^a, identificada como: **5444L**.

2. EXAMES REALIZADOS: Análise química.

Carbono (ppm C)	30 ± 6
Enxofre (ppm S)	58 ± 5
Silício (% Si)	0,014 ± 0,001
Alumínio (%Al)	0,052 ± 0,001

Nota: A incerteza associada refere-se ao intervalo de confiança de 95%, utilizando t-Student para n=3.

3. MÉTODO UTILIZADO

Os resultados acima foram obtidos utilizando os seguintes métodos:

C/S: combustão direta, detecção por infravermelho.

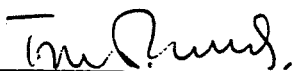
Si e Al: espectrofotometria de absorção atômica.

As curvas de calibração foram verificadas com os padrões: IPT-73 (ppm C: 34 ± 2 ppm e ppm S: 49 ± 3); JSS-1202-2 (ppm C: 39 ± 1); IPT 11A (% Si: $0,030 \pm 0,003$ e % Al: $0,153 \pm 0,005$).

São Paulo, 14 de junho de 2004.

Responsável pela execução: **Quím. Tomoe Oide Tsubaki, NRE 5416.3.**

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - IPT
Divisão de Metalurgia
Agrupamento de Processos Metalúrgicos
Laboratório de Processamento Pirometalúrgico



Quím. TOMOE OIDE TSUBAKI
CRQ n° 20.355 - RE n° 5416.3

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - IPT
Divisão de Metalurgia
Agrupamento de Processos Metalúrgicos
Laboratório de Processamento Pirometalúrgico



Eng° Metal. FLÁVIO BENEDITO NETO
Responsável pelo Laboratório
CREA n° 157.413 - RE n° 6914.6