

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica

Análise da eficácia de blindagem de materiais
condutores, ferromagnéticos e compostos de grafite.

Phillipe Oliveira Menezes

João Monlevade, MG
2016

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica

Análise da eficácia de blindagem de materiais
condutores, ferromagnéticos e compostos de grafite.

Phillipe Oliveira Menezes

Monografia apresentada ao Departamento de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Edgard Gregory Torres Saravia, Msc.

João Monlevade, MG

2016

M543a Menezes, Phillipe Oliveira.
Análise da eficácia de blindagem de materiais condutores,
ferromagnéticos e compostos de grafite. [manuscrito] / Phillipe Oliveira
Menezes. - 2016.

89f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Me. Edgard Gregory Torres Saravia.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto
de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica. 2. Fenômenos magnéticos. Interferência. 3.
Eletromagnetismo. 4. Desenvolvimento de software. 5. MATLAB (Programa
de computador). I. Saravia, Edgard Gregory Torres. II. Universidade Federal
de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.3.013

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ATA DE DEFESA

Aos 12 dias do mês de Agosto de 2016, às 13 horas, foi realizada a apresentação oral de TCC pelo (a) aluno (a) Phillipe Oliveira Menezes, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Edgard Guepy Torres Saravia, Aline Rocha de Assis e Sávio Figueira Correia.

O (a) candidato (a) apresentou o trabalho intitulado: Análise de eficácia de blindagem de materiais condutores, ferromagnéticos e compostos de grafite. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela Aprovação do(a) candidato(a), com a nota média 9.5, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
<u>Edgard Guepy Torres Saravia</u>	<u>10</u>
<u>Sávio Figueira Correia</u>	<u>9,5</u>
<u>Aline Rocha de Assis</u>	<u>9,0</u>
Média	9.5

João Monlevade, 12 de agosto de 2016.

Professor(a) Orientador(a)

Professor(a) Convidado (a)

Professor(a) Convidado(a)

Aluno(a)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Análise da eficácia de blindagem de materiais condutores, ferromagnéticos e compostos de grafite” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 21 de Agosto de 2016.

Phillipe Oliveira Menezes

‘A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.’

Nikola Tesla

Agradecimentos

Os primeiros agradecimentos deste trabalho se reservam àqueles que mais me inspiraram para a conclusão da minha graduação, meus pais, Levi (*in memoriam*) e Meura. A minha vontade de orgulhá-los me impulsionou e traçou meus passos. Aos meus amigos e aos meus companheiros de república, que me apoiaram durante esses longos anos de caminhada. Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Ouro Preto que, sempre pacientes, nos auxiliaram em todas as etapas de nossa graduação, em especial ao orientador deste trabalho, o Prof. Edgard Gregory Torres Saravia. E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para meu engrandecimento acadêmico ou como pessoa. Obrigado a todos.

Resumo

Interferências eletromagnéticas (EMI) são motivo de preocupação para projetistas e engenheiros em vários ramos da indústria, além de haver uma constante discussão sobre os impactos à saúde provocadas pela exposição a ondas eletromagnéticas. O desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos só torna mais necessário o emprego de práticas de blindagem eletromagnética. Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional que auxilie na análise de materiais que serão utilizados na blindagem das interferências eletromagnéticas. Esta investigação foi realizada em cinco materiais dos quais três são ligas metálicas de alta permeabilidade magnética (*Metglas 2714A*, *Super Q 80* e *HyMu 800*), também um material de alta condutividade (*Cobre Elox*) e um composto de grafite alternativo às ligas metálicas (*Amoco P-100 bromado*). Através de ferramenta computacional desenvolvida em MATLAB[®] foi possível qualificar os materiais citados como eficazes ou não na blindagem eletromagnética.

Palavras-Chave: EMI, blindagem, eficácia de blindagem.

Abstract

Electromagnetic interferences (EMI) are motive of concerning for designers and engineers in several branches of the industry, besides of the constant discussion about the impact to health that exposure to electromagnetic waves may cause. Technological advancement over the years just increase the urge for Shielding tehcniques. This work has the objective of developing a computational algorithm that aids the analysis of materials used in electromagnetic interference shielding. This investigation has been done for five different materials, from which three are metallic alloys with high magnetic permeability (*Metglas 2714A*, *Super Q 80* and *HyMu 800*), also a conductor (*Cobre Elox*) and at last a graphite composite alternative to metallic alloys (*brominated Amoco P-100*). Through computational algorithm denveloped in MATLAB[®], it was possible to characterize the materials above as effective or not in EMI shielding.

Keywords: EMI, Shielding, Shielding Effectiveness.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Partição blindante retendo EMI	4
Figura 2 – Partição blindante isolando dispositivo suscetível a EMI	5
Figura 3 – (a) Blindagem absorvendo EMI (b) blindagem refletindo EMI	6
Figura 4 – Conexão (a) metal-metal e (b) de condutor trançado.	6
Figura 5 – Filtro montado (a) no conector (b) junto à parede interna (c) no dispositivo.	7
Figura 6 – Propagação de ondas eletromagnéticas.	8
Figura 7 – A Gaiola de Faraday: Compartimento exposto ao campo elétrico E_{ext} .	9
Figura 8 – Nova distribuição de elétrons e campo E_{int} anulando E_{ext}	10
Figura 9 – Efeito de blindagem para campos magnéticos (Modificado de LearnEMC (2014))	11
Figura 10 – Diagrama de transmissão em materiais blindantes.	15
Figura 11 – Campo elétrico sendo absorvido exponencialmente por um meio	16
Figura 12 – Campos incidente (E_0), transmitido (E_1) e refletido (E_r)	18
Figura 13 – Campo interior ao meio (E_1), campo transmitido (E_t) e campo refletido no segundo limite do material (E_{r2})	19
Figura 14 – Múltiplas reflexões em um material blindante.	21
Figura 15 – Curva de histerese do <i>Permalloy 80</i> para corrente contínua, 400, 1000, 3000 e 6000 Hz.	22
Figura 16 – Diagrama do processo de análise da eficácia de blindagem.	25
Figura 17 – Permeabilidade dos materiais magnéticos vs. frequência.	28
Figura 18 – Atenuação de ondas planas devido ao fenômeno de absorção.	31
Figura 19 – Atenuação de ondas planas devido ao fenômeno de reflexão.	31
Figura 20 – Somatório de atenuação e reflexão.	32
Figura 21 – Fator de correção por múltiplas reflexões (B).	33
Figura 22 – Eficácia total de blindagem S ($t_1 = 0,15mm$).	34
Figura 23 – Eficácia total de blindagem S ($t_2 = 0,2mm$).	35
Figura 24 – Eficácia total de blindagem S ($t_3 = 0,25mm$).	36
Figura 25 – Eficácia total de blindagem S , para campos magnéticos (com fonte a 100 m do material blindante).	38
Figura 26 – Eficácia total de blindagem S , para campos magnéticos (com fonte a 10 m do material blindante).	40
Figura 27 – Eficácia total de blindagem S , para campos elétricos (com fonte a 100 m do material blindante).	41
Figura 28 – Eficácia total de blindagem S , para campos elétricos (com fonte a 10 m do material blindante).	42
Figura 29 – Eficácia total de blindagem S , do Metglas 2417A para campos elétricos, magnéticos e ondas planas.	44

Lista de tabelas

Tabela 1	– Níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos . . .	2
Tabela 2	– Circuito elétrico vs circuito magnético (SEN (1997)).	10
Tabela 3	– Materiais e suas propriedades eletromagnéticas (CHUNG (2000b)). . .	14
Tabela 4	– Constantes para a equação 2.35.	20
Tabela 5	– Materiais elegíveis para blindagem.	27
Tabela 6	– Profundidade pelicular dos materiais em 60 Hz, dada em milímetros. . .	28
Tabela 7	– Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para frequências de 100, 1000 e 10000 Hz. ($t_1 = 0,15mm$).	34
Tabela 8	– Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para frequências de 100, 1000 e 10000 Hz. ($t_2 = 0,2mm$).	36
Tabela 9	– Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para frequências de 100, 1000 e 10000 Hz. ($t_3 = 0,25mm$).	37
Tabela 10	– Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos magnéticos. ($r_1 = 100m$ e $t = 0,15mm$).	39
Tabela 11	– Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos magnéticos. ($r_2 = 10m$ e $t = 0,15mm$).	40
Tabela 12	– Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos elétricos. ($r_1 = 100m$ e $t = 0,15mm$).	42
Tabela 13	– Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos elétricos. ($r_2 = 10m$ e $t = 0,15mm$).	43

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação e Justificativa	1
1.2	Estrutura do trabalho	3
2	TEORIA DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA	4
2.1	Princípios de blindagem	4
2.1.1	Partição blindante	4
2.1.2	Cabeamento e aterramento	5
2.2	Propagação e blindagem	7
2.2.1	Características de ondas eletromagnéticas	7
2.2.2	Mecanismo de blindagem de meios condutores	9
2.2.3	Mecanismo de blindagem de meios magnéticos	10
2.2.4	Impedância do meio e fator de propagação	11
2.3	Eficácia de blindagem	13
2.3.1	Absorção	15
2.3.2	Reflexão	17
2.3.3	Múltiplas Reflexões	21
2.3.4	Nota sobre o comportamento da permeabilidade de materiais magnéticos	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	Análise quantitativa	24
3.2	Escolha dos materiais	26
3.2.1	O efeito pelicular na escolha das espessuras	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	Eficácia de blindagem para campos distantes	30
4.1.1	Materiais com espessura $t = 0,15$ mm	30
4.1.2	Materiais com espessura $t = 0,2$ mm	35
4.1.3	Materiais com espessura $t = 0,25$ mm	36
4.2	Eficácia de blindagem para campos próximos	38
4.2.1	Eficácia de blindagem para campos magnéticos	38
4.2.2	Eficácia de blindagem para campos elétricos	41
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	45
5.1	Trabalhos futuros	46
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXO A - ALGORITMO DE APROXIMAÇÃO PARA PERMEABILIDADE	50

ANEXO B- ALGORITMO PARA O CÁLCULO DE EFICÁCIA DE BLINDAGEM (S)	53
---	----

1 Introdução

Blindagem é uma técnica importante na atenuação de interferências eletromagnéticas, seja em sistemas de potência, telecomunicações, automação industrial ou qualquer outro ramo da engenharia que empregue energia elétrica.

A blindagem deve observar três particularidades de um sistema: o seu aterramento, cabeamento e o compartimento responsável pela proteção de interferências irradiadas. Para que seja adquirido um entendimento mais aprofundado sobre blindagem é fundamental que seja discutido quais materiais podem ser empregados na confecção destes compartimentos.

Este trabalho aborda a teoria de blindagem eletromagnética, assim como as propriedades de materiais condutores e ferromagnéticos que podem qualificá-los como eficazes ou não no processo de blindagem. O principal indicador da empregabilidade de um material é o valor denominado eficácia total de blindagem, valor representado pela letra S que leva em consideração fatores como a reflexão de ondas eletromagnéticas na superfície do material e a absorção dessas ondas no seu interior.

É investigada a importância de propriedades como condutividade elétrica e permeabilidade magnética no cálculo da eficácia total de blindagem. Cálculo este que é realizado através de algoritmo desenvolvido em MATLAB[®] exclusivamente para este fim. Os resultados obtidos através da análise computacional possibilitam a discussão de várias hipóteses introduzidas durante a revisão bibliográfica do trabalho e ajudam a desenvolver uma visão crítica sobre o uso de materiais condutores, ferromagnéticos e até mesmo de compostos de grafite na confecção de compartimentos blindantes.

Através dos resultados obtidos, é recomendado um sistema que garanta uma alta eficácia na blindagem de interferências eletromagnéticas no intervalo de frequência de 60 Hz a 100 kHz.

1.1 Motivação e Justificativa

Nos dias de hoje, todos os segmentos da indústria são dependentes de energia elétrica. Segundo a Agência Internacional de Energia, a IEA (2014), a geração de energia elétrica mundial já atinge valores que ultrapassam 23000 kW/h *per capita*. Como efeito do desenvolvimento da indústria energética e as evoluções tecnológicas, a humanidade tem trago cada vez mais dispositivos eletrônicos e máquinas elétricas para uso doméstico e industrial.

Problemas relacionados à poluição do ambiente eletromagnético é motivo de angústia para engenheiros em diversas áreas da engenharia. Nas telecomunicações, um sinal

transmitido está sujeito a interferências eletromagnéticas durante todo o seu trajeto da antena transmissora até o receptor, o que prejudica a confiabilidade de transmissão (RIBEIRO (2004)). Além do mais, nos dias de hoje os motores elétricos, que são fonte em potencial de sinais ruidosos, somam aproximadamente 50% das cargas industriais (FILHO e ALMEIDA (1997))

Outra preocupação latente é a exposição de seres humanos à campos eletromagnéticos. Existem diretrizes para limitar esta exposição, que são regulamentadas pela Agência Nacional de Telecomunicações, a ANATEL (1999), e pela Comissão Internacional de Proteção à Radiação Não-Ionizante, o ICNIRP (2010). Órgãos nacionais e internacionais concordam que a exposição à campos eletromagnéticos intensos são nocivos à saúde. Os níveis de referência para exposição do público geral a estes campos é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos para o público geral (ANATEL (1999)).

Faixas de frequência	Intensidade de campo E ($V.m^{-1}$)	Intensidade de campo H ($A.m^{-1}$)	Campo B (μT)
Até 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4
1 - 8 Hz	10000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$
8 - 25 Hz	10000	$4000 / f$	$5000 / f$
0,025 - 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$
0,8 - 3 kHz	$250 / f$	5	6,25
3 - 150 kHz	87	5	6,25
0,15 - 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$
1 - 10 MHz	$87 / f^{\frac{1}{2}}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$
10 - 400 MHz	28	0,073	0,092
400 - 2000 MHz	$1,375 f^{\frac{1}{2}}$	$0,0037 f^{\frac{1}{2}}$	$0,0046 f^{\frac{1}{2}}$
2 - 300 GHz	61	0,16	0,20

As Equações 1.1 e 1.2 expressam os valores recomendados de exposição para o público geral aos campos eletromagnéticos na frequência de 60 Hz.

$$B_{expo(60hz)} = \frac{5}{f} [\mu T] = 83.33 [\mu T], \quad (1.1)$$

$$E_{expo(60hz)} = \frac{250}{f} \left[\frac{V}{m} \right] = 4.16 \left[\frac{kV}{m} \right]. \quad (1.2)$$

Onde $B_{expo(60hz)}$ e $E_{expo(60hz)}$ são consecutivamente os limites máximos de exposição a campos magnéticos e elétricos que não são nocivos ao ser humano, estes valores são dados em Tesla (T) e Volts por metro (V/m). Estes valores também coincidem com os padrões recomendados pela entidade internacional reguladora de exposição a campos elétricos e magnéticos, a ICNIRP (2010) e que são obtidos a partir da Tabela 1.

1.2 Estrutura do trabalho

A fim de verificar a eficácia de blindagem de um compartimento blindante, foi desenvolvido um algoritmo que calcula a magnitude dos valores de atenuação para os materiais escolhidos, tornando possível visualizar a capacidade de blindagem fornecida por cada material e promovendo uma análise ampla dos casos onde cada um destes materiais oferecem melhor desempenho. O trabalho é constituído das seguintes etapas:

- (I) Nas Seções 2.1 e 2.2 do Capítulo 2, são discutidos os conceitos de blindagem eletromagnética, onde são feitas considerações sobre a propagação de ondas eletromagnéticas. Uma análise da condutividade elétrica (σ) e permeabilidade magnética (μ) permite verificar o fenômeno de transição de uma onda entre dois meios. Na Seção 2.3 foi feito o levantamento das ferramentas matemáticas que possibilitam a investigação da eficácia de blindagem dos materiais, tornando possível a análise quantitativa do fenômeno de blindagem;
- (II) Durante o Capítulo 3 é proposta uma metodologia para a análise da eficácia de cinco materiais propostos e ainda a justificativa da escolha de cada um dos materiais analisados.
- (III) No Capítulo 4 é dedicado a discussão dos resultados obtidos através do algoritmo desenvolvido em MATLAB[®] e a influência das propriedades eletromagnéticas dos materiais blindantes no resultado final da eficácia de blindagem.
- (IV) As conclusões e sugestões a respeito deste trabalho serão feitas no decorrer do Capítulo 5.

É de extrema importância analisar as propriedades dos materiais elegíveis na blindagem eletromagnética, pois mesmo que um material pareça ser ideal em certas condições, existem diversos fatores que podem prejudicar a capacidade de blindagem deste material. Para um melhor entendimento destes fenômenos e os conceitos necessários a fim de iniciar uma discussão aprofundada sobre a confecção de partições blindantes, o Capítulo 2 trás uma introdução sobre a teoria de blindagem eletromagnética.

2 Teoria de Blindagem Eletromagnética

2.1 Princípios de blindagem

Segundo o dicionário de Oxford (STEVENSON (2010)), o ruído é uma flutuação que acompanha um sinal elétrico transmitido, que não é originalmente parte deste sinal e pode tender a ocultá-lo. Uma baixa relação sinal/ruído pode comprometer a integridade dos sinais elétricos, e conseqüentemente diminuir a confiabilidade de dispositivos ou sistemas que são normalmente projetados para condições ideais. Durante este trabalho, ruído será chamado de interferência eletromagnética (EMI). Com objetivo de aumentar a relação sinal/ruído pode ser utilizada uma partição blindante.

2.1.1 Partição blindante

A atenuação de interferências eletromagnéticas, como é proposto por OTT (1988), é possível através da criação de uma partição entre dois ambientes que controla a propagação de campos elétricos e magnéticos. Essa partição tem o objetivo de conter os campos gerados por uma fonte de EMI, isolando-a do resto do ambiente (como ilustrado na Figura 1), ou isolar um dispositivo suscetível a EMI de um ambiente com intensa atividade eletromagnética (o que é mostrado na Figura 2).

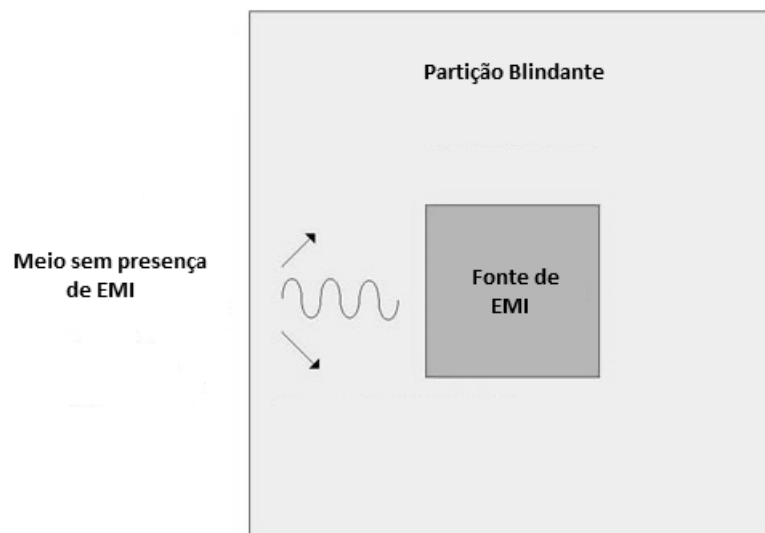


Figura 1 – Partição blindante retendo EMI (Modificado de DTBTEST (2006)).

Espera-se que esta partição blindante seja capaz de refletir e/ou absorver uma EMI (BJÖRKLÖF (1999); KESHTKAR e MAGHOUL (2011)). Também se faz necessário abordar o comportamento de campos elétricos e magnéticos separadamente uma vez que as parcelas de EMI refletidas e absorvidas estão relacionadas com as características da interferência.

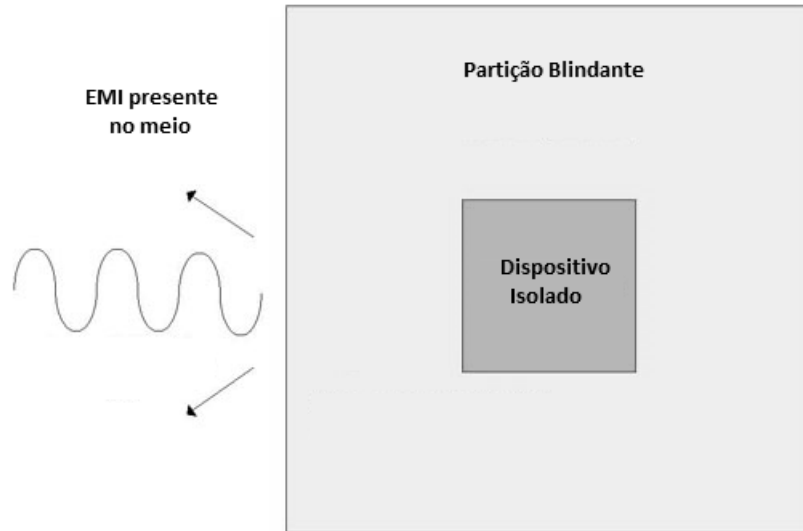


Figura 2 – Partição blindante isolando dispositivo suscetível a EMI (Modificado de DTBTEST (2006)).

Para se obter uma partição blindante robusta, alguns cuidados devem ser tomados, como por exemplo, a forma da partição blindante, uma vez que pequenas imperfeições na superfície da fronteira ar-blindagem podem ter um resultado negativo significativo na eficácia da blindagem (WENTWORTH (2008)). Além do mais, mesmo que a partição seja livre de fissuras, aberturas ou defeitos, deve-se tomar um cuidado especial com os cabos que alimentam um dispositivo blindado, pois são transportadores em potencial de EMI conduzida (OTT (1988)).

2.1.2 Cabeamento e aterramento

No estudo de OTT (1988) sobre blindagem eletromagnética, são feitas considerações que devem ser seguidas para uma blindagem efetiva. Mesmo que uma partição blindante robusta seja confeccionada, cabos podem conduzir EMI entre dois ambientes separados por uma partição blindante, o que torna estes cabos uma fonte em potencial de interferência. Conclusões precipitadas podem ser feitas sobre a eficácia de blindagem de uma partição caso a devida atenção não seja dada ao cabeamento.

Na Figura 3 observa-se situações onde cabos, blindados ou não, são expostos a dispositivos irradiadores de EMI. A Figura 3(a), ilustra um exemplo típico de EMI sendo absorvido pela blindagem, já na Figura 3(b), pode-se observar EMI sendo refletida pela blindagem.

Além do mais, de acordo com PAUL (2006), são recomendadas práticas de conexão direta entre a blindagem do cabo (se houver) e o compartimento blindante. Caso o cabeamento não apresente blindagem, é recomendado a filtragem analógica do sinal.

Para cabos blindados existem duas formas de conexão com o compartimento: a metal-metal, mostrada na Figura 4(a), onde a blindagem do cabo é completamente

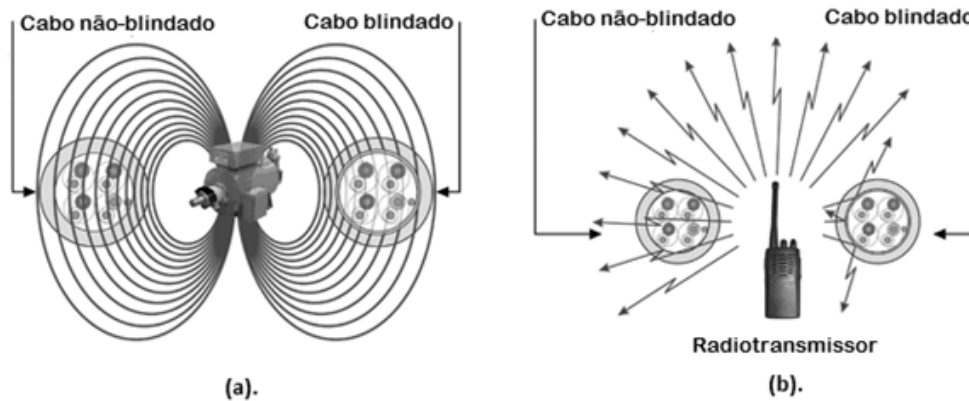


Figura 3 – (a) Blindagem absorvendo EMI (b) blindagem refletindo EMI (Modificado de NTI (2011)).

conectada ao compartimento em um contato de 360 graus, ou a conexão por condutor trançado, mostrada na Figura 4(b), onde a blindagem do cabo e o compartimento são conectados por um condutor enrolado que forma uma indutância considerável que descarrega a energia excessiva presente na blindagem do cabo em forma de campo magnético.

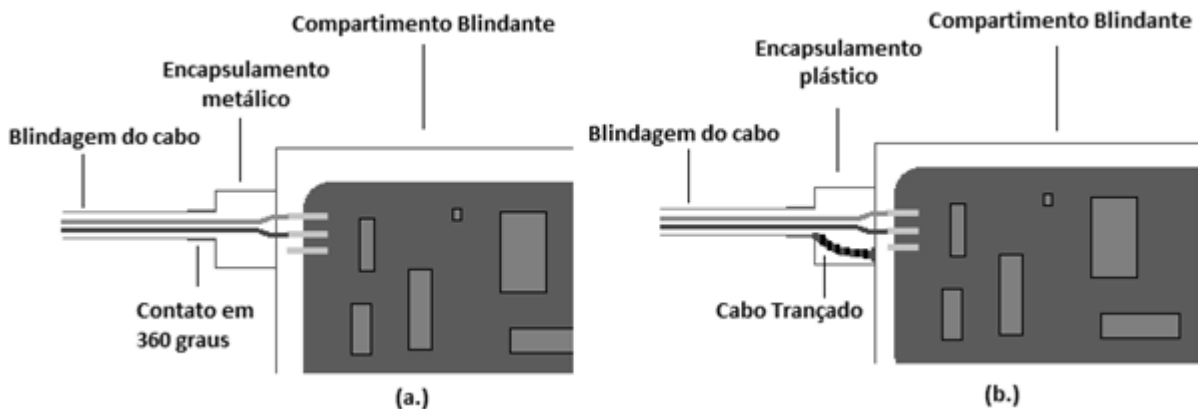


Figura 4 – Conexão (a) metal-metal e (b) de condutor trançado (Modificado de PAUL (2006)).

Em casos onde o cabo utilizado não é dotado de blindagem própria, se faz necessária a filtragem analógica do sinal portado pelo cabo. Para PAUL (2006), a localização mais óbvia para o posicionamento desses filtros é o mais próximo possível da parede do compartimento blindante. Podem ser observadas três situações, a primeira onde o filtro se localiza no conector entre cabo e blindagem como na Figura 5(a), outra situação é quando o filtro é montado junto à parede interna da blindagem, como mostrado na Figura 5(b), e uma terceira situação, onde o filtro é montado direto no dispositivo envolto pela partição blindante, situação mostrada na Figura 5(c).

O aterramento da partição blindante também é um ponto importante, pois

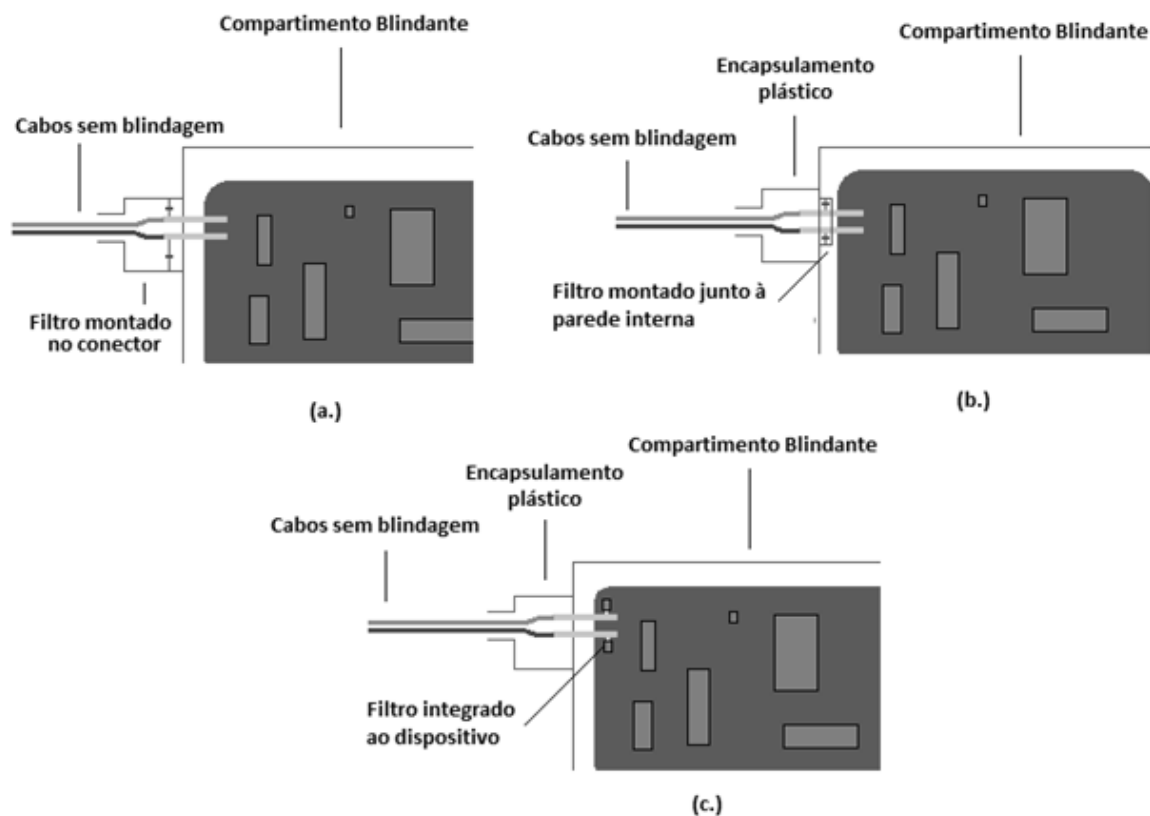


Figura 5 – Filtro montado (a) no conector (b) junto à parede interna (c) no dispositivo (Modificado de PAUL (2006)).

fornece uma rota para correntes geradas no compartimento blindante devido à ondas eletromagnéticas incidentes. Um sistema sem referência, quando assistido por aparelhos de medição, pode fornecer dados errados e levar a conclusões precipitadas sobre a eficácia da blindagem. Além do mais, por questões de segurança, o aterramento de equipamentos e/ou partes metálicas que possam ser expostos a grandes valores de potencial elétrico são sempre necessárias (CANTWELL (1980)).

2.2 Propagação e blindagem

Para análise dos fenômenos de absorção e reflexão de ondas eletromagnéticas, além de identificar a natureza da interferência que deve ser blindada, deve-se avaliar como campos predominantemente magnéticos diferem dos predominantemente elétricos. Esta diferenciação é feita a seguir, durante a discussão sobre características de ondas eletromagnéticas.

2.2.1 Características de ondas eletromagnéticas

Em 1865, James Clerck Maxwell propôs equações que unificavam campos elétricos e magnéticos por meio de quatro equações que hoje são conhecidas como as equações de Maxwell. A teoria de Maxwell previa a existência de ondas eletromagnéticas, que

apenas foram produzidas e captadas por Heinrich Rudolph Hertz anos depois (DORIA e MARINHO (2006)).

Na Figura 6 uma onda eletromagnética se propaga no sentido do vetor ρ , vetor de mesmo sentido e direção que o vetor de Poynting (ISHIMARU (1999)), com seus campos elétrico (\mathbf{E}) e magnético (\mathbf{H}) associados.



Figura 6 – Propagação tridimensional de ondas eletromagnéticas (Modificado de WETZEL (2014)).

De acordo com OTT (1988), a razão dos módulos das amplitudes de campo elétrico e magnético de uma onda eletromagnética nos dá informação sobre a natureza desta onda. Considere as seguintes condições:

$$\frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} < 377 \text{ } [\Omega], \quad (2.1)$$

$$\frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} > 377 \text{ } [\Omega]. \quad (2.2)$$

Razão chamada de impedância de onda, dada em Ω . Quando esta razão é menor que 377 (inequação 2.1), o campo é chamado predominantemente magnético, o que também infere que este campo é gerado por uma fonte com baixo valor de tensão e alto valor de corrente. Do contrário, caso esta razão seja maior que 377 (inequação 2.2), o campo é predominantemente elétrico, e sua fonte geradora tem alto valor de tensão e baixo valor de corrente (OTT (1988)).

Estas inequações devem ser consideradas quando os campos eletromagnéticos estão próximos à fonte de interferência, pois quando os campos estão a uma distância maior que $\lambda/2\pi$, onde λ é o comprimento de onda do campo, a razão das amplitudes de campo elétrico e magnético se reduzem à Equação 2.3 (RYBAK e STEFFKA (2004)).

$$\frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{H}|} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ } [\Omega]. \quad (2.3)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre e ϵ_0 a permissividade elétrica do espaço livre.

De acordo com RIBEIRO (2004), a Equação 2.3 é uma representação característica das ondas planas. A razão das amplitudes de campo elétrico e magnético de uma onda plana não se altera e não existe uma predominância de um campo em particular.

Trataremos portanto da propagação de ondas eletromagnéticas em duas situações distintas, as ondas que se propagam em *campo próximo* (ou zona de Fresnel) e em *campo distante*, também conhecido como zona de Fraunhofer segundo FRENZEL (2013). No campo distante, os campos elétricos e magnéticos atenuam numa taxa de $1/r$, onde r é a distância da fonte dos campos dado em metros. Porém no campo próximo, a taxa de atenuação dos campos a partir da fonte difere, sendo assim, campos elétricos e magnéticos devem ser considerados separadamente (OTT (1988)).

Nas próximas subseções, serão discutido os mecanismos de blindagem dos meios de alta condutividade elétrica e alta permeabilidade magnética, e como a natureza de uma interferência eletromagnética (predominantemente elétrica ou magnética) pode ser um indicador de qual tipo de material deve ser usado na confecção de uma partição blindante.

2.2.2 Mecanismo de blindagem de meios condutores

A blindagem de campos elétricos é possível graças a um fenômeno descoberto por Michael Faraday em 1821. Neste ano, Faraday descobriria que o campo elétrico dentro de uma caixa condutora fechada é igual a zero (BJÖRKLÖF (1999)), fenômeno que hoje é conhecido como gaiola de Faraday.

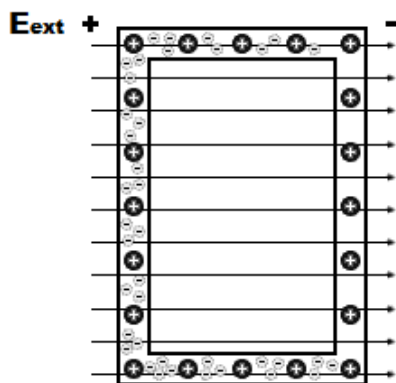


Figura 7 – A Gaiola de Faraday: compartimento exposto ao campo elétrico E_{ext} (Modificado de MAGLAB (2010)).

Os elétrons em um compartimento feito de material condutor (Figura 7) tendem a se concentrar em certa região do material quando este é exposto a um campo elétrico externo (E_{ext}).

A nova distribuição de elétrons neste material condutor cria uma mudança de polaridade no material (Figura 8). Esta mudança de polaridade gera um novo campo elétrico, este por sua vez, interior ao compartimento, de magnitude igual ao campo elétrico externo (\mathbf{E}_{ext}), mas com sentido contrário. Este novo campo elétrico interno (\mathbf{E}_{int}) anula o campo elétrico externo (\mathbf{E}_{ext}), criando um ambiente com campo elétrico nulo no espaço compreendido pelo compartimento condutor (KRAUSS (1992)).

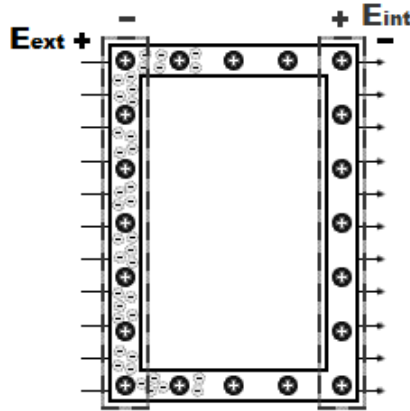


Figura 8 – Nova distribuição de elétrons e campo \mathbf{E}_{int} anulando \mathbf{E}_{ext} (Modificado de MAGLAB (2010)).

Observa-se desta forma que uma das propriedades desejadas dos materiais utilizados em blindagem de campos elétricos deve ser a alta condutividade (σ). A ilustração da Figura 8 descreve a blindagem eletrostática, porém o raciocínio pode ser estendido para campos variantes no tempo.

2.2.3 Mecanismo de blindagem de meios magnéticos

Como é retratado por SEN (1997), é possível ser feita uma analogia entre circuitos elétricos e magnéticos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Circuito elétrico vs circuito magnético (SEN (1997)).

	Circuito Elétrico	Circuito Magnético
Força Envolvida	Força eletromotriz (\mathcal{E})	Força magnetomotriz (\mathcal{F})
Produz	Corrente ($i = \mathcal{E}/R$)	Fluxo ($\Phi = \mathcal{F}/\mathcal{R}$)
Limitado por	Resistência ($R = l/\sigma A$)	Relutância ($\mathcal{R} = l/\mu A$)

Para um circuito magnético de comprimento l , seção transversal A e permeabilidade magnética relativa μ_r , a relutância (\mathcal{R}) pode ser calculada por:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}. \quad (2.4)$$

De acordo com a Equação 2.4, materiais com alta permeabilidade magnética relativa ($\mu_r \gg 1$) apresentam menor relutância ao fluxo magnético. Materiais ferromagnéticos como ferro, cobalto e níquel apresentam altos valores de permeabilidade relativa, que variam de 2000 até 6000 (SEN (1997)). Considerando-se um compartimento fabricado de um material ferromagnético onde incide um campo magnético como na Figura 9, em termos de circuito magnético, o fluxo será confinado ao meio de menor relutância. Neste caso o material de alta permeabilidade tem relutância muito menor que o ar ($\mu_r=1$) pois os meios ferromagnéticos apresentam altos valores de permeabilidade ($\mu_r \gg 1$).

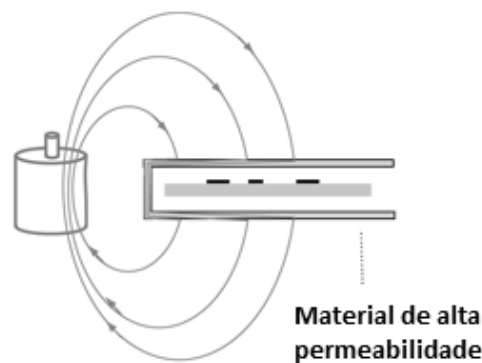


Figura 9 – Efeito de blindagem para campos magnéticos (Modificado de LEARNEMC (2014)).

É importante notar, neste caso, que o material desvia o fluxo magnético em volta do objeto blindado. Caso este desvio não ocorra, a blindagem não é efetiva (OTT (1988)).

2.2.4 Impedância do meio e fator de propagação

Segundo RIBEIRO (2004), a impedância intrínseca de um meio é o valor numérico que dá informação sobre quanto esse meio se opõe a propagação de ondas eletromagnéticas.

A impedância intrínseca, ou impedância superficial no limite de dois meios, segundo WENTWORTH (2008), é dada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (2.5)$$

Na Equação 2.5, j é a unidade imaginária (ou $\sqrt{-1}$), ω é a frequência angular da onda, μ é a permeabilidade magnética absoluta do meio, σ é a condutividade do meio e ε é a permissividade elétrica absoluta. RIBEIRO (2004) e WENTWORTH (2008) concordam que a impedância pode ser calculada pela Equação 2.5 porém, diferente de WENTWORTH (2008) onde a impedância é representada por Z , nas bibliografias de RIBEIRO (2004) e HAYT (2011) é usado η .

Permeabilidade e permissividade absolutas, por sua vez, são dadas por:

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r. \quad (2.7)$$

Sendo μ_0 a permeabilidade magnética do espaço livre e μ_r a permeabilidade relativa do meio, de modo análogo, ε_0 e ε_r são respectivamente a permissividade do espaço livre e permissividade relativa do meio.

Observa-se que a impedância intrínseca do meio varia de acordo com suas propriedades eletromagnéticas, e que além disto, é um valor complexo. A impedância intrínseca de um meio pode ser relacionada com a forma com que ondas eletromagnéticas se propagam, sejam consideradas as equações de onda propostas por RIBEIRO (2004):

$$\mathbf{E} = E_0 e^{-r\gamma}, \quad (2.8)$$

$$\mathbf{H} = H_0 e^{-r\gamma}. \quad (2.9)$$

As equações de onda, segundo RIBEIRO (2004), ditam o comportamento dos campos elétrico e magnético de uma onda, onde γ é um número complexo chamado de constante de propagação, E_0 e H_0 são as amplitudes dos campos, \mathbf{E} e \mathbf{H} são os vetores dos campos como visto na Figura 6 e r é a distância da fonte.

A constante de propagação (γ) está intimamente ligada a impedância intrínseca do meio (η). De acordo com RIBEIRO (2004) elas se relacionam da seguinte forma:

$$\eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma}. \quad (2.10)$$

Substituindo 2.5 em 2.10, tem-se que:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}. \quad (2.11)$$

E ainda pode-se separar a constante de propagação em termos de suas parcelas reais e imaginárias:

$$\gamma = \alpha + j\beta. \quad (2.12)$$

As parcelas α e β são chamadas, respectivamente, de fator de atenuação e fator de fase (WENTWORTH (2008)). A parcela real do fator de propagação (α) dá informação de quanto uma onda eletromagnética atenua à medida que se propaga, enquanto a parcela imaginária (β) dá informação sobre a fase da onda.

A princípio, a fase de onda não terá nenhuma influência na escolha do material utilizado na confecção de uma partição blindante, portanto, não é necessário um estudo aprofundado sobre o fator de fase (β), será abordado apenas o fator de atenuação (α).

Para casos reais, segundo RIBEIRO (2004), temos que o fator de atenuação é dado pela seguinte aproximação para meios dielétricos (com $\sigma \ll \omega\varepsilon$):

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}. \quad (2.13)$$

E para meios condutores reais ($\sigma \gg \omega\varepsilon$):

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}}. \quad (2.14)$$

A partir das equações acima, pode-se observar que nos meios dielétricos reais (Equação 2.13), o fator de atenuação não depende da frequência de onda. Além do mais, uma vez que a condutividade destes meios é baixa, o que garantiria uma boa atenuação para meios dielétricos seria uma alta permeabilidade magnética (μ).

Para meios condutores reais (Equação 2.14), a atenuação se torna gradativamente maior a medida que a frequência da onda incidente aumenta, o que evidencia a facilidade de blindar altas frequências com materiais condutores. Valores altos de condutividade (σ) e permeabilidade magnética (μ) também influem positivamente na atenuação.

Alguns valores de condutividade e permeabilidade relativas são listados na Tabela 3 (CHUNG (2000b)).

Na Tabela 3, σ_r é a condutividade do material relativa à condutividade do cobre e μ_r é a permeabilidade magnética relativa à permeabilidade do espaço livre.

O cobre, sendo um bom condutor, seria uma escolha provável para o caso citado na Subseção 2.2.2, e os materiais de alta permeabilidade magnética, como é o caso de *MuMetal* e o *Supermalloy*, seriam as prováveis escolhas no caso citado na Subseção 2.2.3

2.3 Eficácia de blindagem

Vários fatores contribuem para o processo de blindagem eletromagnética. A eficácia de blindagem varia de acordo com a frequência (MIYAZAKI (1990); KLINKERBUSCH

Tabela 3 – Materiais e suas propriedades eletromagnéticas (CHUNG (2000b)).

Material	σ_r	μ_r	$\sigma_r \mu_r$	$\frac{\sigma_r}{\mu_r}$
Prata	1.05	1	1.05	1.05
Cobre	1	1	1	1
Ouro	0.7	1	0.7	0.7
Alumínio	0.61	1	0.61	0.61
Latão	0.26	1	0.26	0.26
Bronze	0.18	1	0.18	0.18
Estanho	0.15	1	0.15	0.15
Níquel	0.2	100	20	2×10^{-3}
Aço Inox. (430)	0.02	500	10	4×10^{-5}
MuMetal (em 1kHz)	0.03	20000	600	1.5×10^{-6}
Supermalloy (em 1kHz)	0.03	100000	3000	3×10^{-7}

(2005)), a geometria da blindagem (TOSAKA (2005)) além da natureza do campo a ser atenuado como visto anteriormente (Subseção 2.2.1).

OTT (1988), BJÖRKLÖF (1999) e WENTWORTH (2008) concordam que uma onda eletromagnética pode ser atenuada ao atravessar um meio com certas propriedades eletromagnéticas, meio este conhecido como partição blindante. Esta atenuação sofrida pode ser quantificada por um termo conhecido como eficácia total de blindagem. É importante observar que a eficácia total de blindagem tem contribuição de dois efeitos distintos, absorção e reflexão (GUAN (2003)).

Existe ainda um terceiro fator que é considerado para os cálculos de eficácia de blindagem, o fator de correção das múltiplas reflexões. Este valor considera a possibilidade de uma onda eletromagnética sofrer reflexão não apenas no limiar entre dois meios, mas também em sua trajetória dentro do meio blindante (WENTWORTH (2008); OTT (1988); GUAN (2003)). Todos estes fatores são representados na Equação 2.15.

$$S = A + R + B \text{ [dB]}. \quad (2.15)$$

A eficácia de blindagem total (S), dada em decibéis, é a soma das parcelas: A ou eficácia de blindagem dada pela absorção, R ou eficácia proveniente de reflexão, e B que representa o termo de correção devido às múltiplas reflexões sofridas pelo campo incidente no material blindante (GAIER (1990)).

OTT (1988) também sugere que o valor de eficácia total de blindagem S também pode ser calculado pelas Equações 2.16 e 2.17, quando considerados os campos elétrico e magnético individualmente:

$$S = 20 \log \frac{E_0}{E_1} \text{ [dB]}, \quad (2.16)$$

$$S = 20 \log \frac{H_0}{H_1} [dB]. \quad (2.17)$$

Sendo E_0 e H_0 as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente, antes da incidência no material blindante. Já E_1 e H_1 são as amplitudes destes campos depois da incidência. A Figura 10 ilustra, E^i , o campo incidente, e E^t , o campo transmitido.

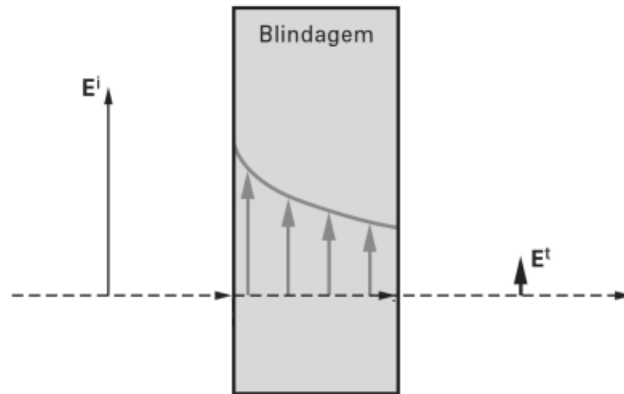


Figura 10 – Onda transmitida em material blindante (Modificado de WENTWORTH (2008)).

Neste caso, a eficácia de blindagem do campo elétrico E^i pode ser dada por:

$$S = 20 \log \frac{E_i}{E_t} [dB]. \quad (2.18)$$

2.3.1 Absorção

A amplitude de uma onda eletromagnética que incide na superfície de um material tende a diminuir exponencialmente, como mostrado na Figura 11. Este fenômeno pode ser também observado a partir das Equações 2.8 e 2.9 na Subseção 2.2.4. Devem ser consideradas as contribuição das correntes induzidas no material e as perdas ôhmicas e o aquecimento do material (HAYT (2011)).

De acordo com OTT (1988) também podemos relacionar a amplitude dos campos elétrico e magnético antes e depois da incidência através das Equações 2.19 e 2.20.

$$E_1 = E_0 e^{-\frac{d}{\delta}}, \quad (2.19)$$

$$H_1 = H_0 e^{-\frac{d}{\delta}}. \quad (2.20)$$

Onde os valores de E_0 e H_0 são as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos no ar, os valores de E_1 e H_1 são as amplitudes destes campos após sua incidência,

d é distância da borda do meio onde é estimado o valor de E_1 e H_1 , valor dado em metros, e δ é chamado de *profundidade de penetração* ou também *profundidade pelicular* (WENTWORTH (2008);SANCHES (2010)).

De acordo com RAJPUT (2006), em um material condutor, a corrente contínua se distribui uniformemente através da seção transversal de um material. Porém, se tratando de corrente alternada, devido ao fenômeno de auto-indutância, esta corrente tende a se aglomerar nos limites externos deste material. Este fenômeno é conhecido por *efeito pelicular*.

O efeito pelicular, ou a aglomeração de corrente nos limites externos de um material, define a amplitude da *profundidade pelicular* (δ) deste material, valor dado em metros, que corresponde à distância a partir da borda do meio onde a onda incidente é absorvida até 37% (ou $1/e$) de seu valor original (OTT (1988)), como pode ser observado na Figura 11.

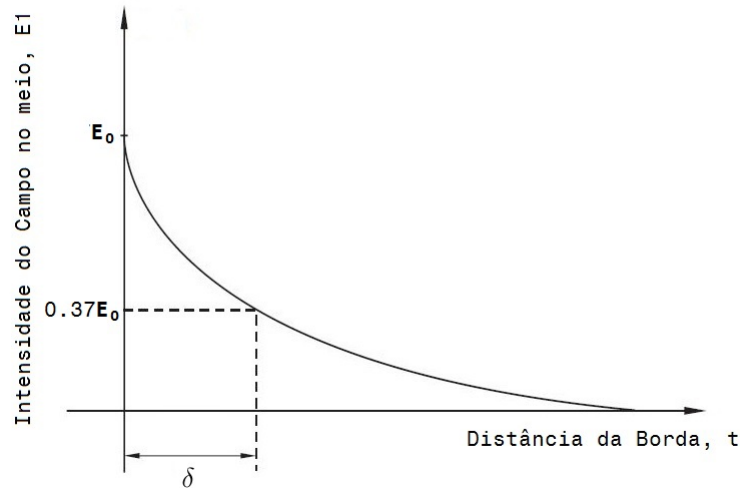


Figura 11 – Campo elétrico sendo absorvido exponencialmente por um meio.

Caso a distância da borda do meio seja igual a profundidade pelicular ($d = \delta$), temos que:

$$E_1 = E_0 e^{-1} = 0,37E_0. \quad (2.21)$$

De acordo com OTT (1988), a *profundidade pelicular* pode ser calculada pela equação:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} [m]. \quad (2.22)$$

A profundidade pelicular pode ser um indicador importante na escolha da espessura de um material usado na blindagem eletromagnética, uma vez que o uso de material em

excesso pode resultar em custos desnecessários, e em contraste, espessuras excessivamente pequenas podem não ser o suficiente para garantir uma blindagem efetiva.

Observa-se que materiais com alta permeabilidade magnética (μ) e alta condutividade (σ) tem profundidade pelicular menor, logo, mesmo se estes materiais forem finos, podem prover grande absorção. Também, é possível observar que quanto maior a frequência de propagação das ondas eletromagnéticas, menor a profundidade pelicular, evidenciando que quanto maior a frequência de uma onda eletromagnética, mais fácil se torna sua absorção.

Substituindo a Equação 2.19 em 2.16, a contribuição da Absorção (A) no cálculo da eficácia total de blindagem (descrito na Equação 2.15) pode ser calculada por:

$$A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) [dB]. \quad (2.23)$$

Onde t é a espessura do compartimento blindante, δ é a profundidade pelicular do material e e é o número de Euler ($e = 2,71828$). A Equação 2.23 também pode ser reescrita como:

$$A = 8,69 \left(\frac{t}{\delta} \right) [dB]. \quad (2.24)$$

Das Equações 2.22 e 2.24, é evidente que o produto entre condutividade (σ) e permeabilidade (μ) influi diretamente na absorção. Quanto maior este produto, maior será o impacto da absorção do meio blindante. Revisitando a Tabela 3 (Materiais e suas propriedades eletromagnéticas), pode-se observar que os materiais magnéticos são mais desejáveis nessa situação.

2.3.2 Reflexão

RIBEIRO (2004) na sua abordagem sobre reflexão e transmissão na limiar de dois meios, disponibiliza a seguinte equação para estimar a reflexão sofrida por um campo que se propaga em um meio com impedância intrínseca η_1 e incide em um meio com impedância intrínseca η_2 :

$$E_r = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_i} E_0. \quad (2.25)$$

Onde θ_i é o ângulo de incidência, E_0 é a intensidade do campo incidente e E_r é a parcela deste campo que é refletida. Pode-se observar na Figura 12 os campos E_0 , E_r e E_1 , este último é a parcela do campo incidente transmitida para o segundo meio.

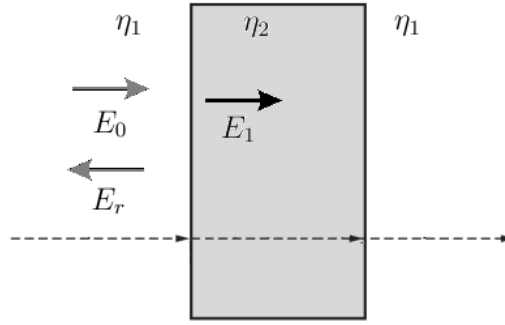


Figura 12 – Campos incidente (E_0), transmitido (E_1) e refletido (E_r).

Considerando incidência normal (com $\theta_i = 90^\circ$), a Equação 2.25 pode ser reescrita como:

$$E_r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_0. \quad (2.26)$$

E_r também pode ser escrito como a diferença de campo incidente e parcela transmitida ($E_r = E_0 - E_1$), esta igualdade pode ser utilizada em conjunto com a Equação 2.26 e ser reescrita da seguinte forma:

$$E_1 = \frac{2\eta_1}{\eta_1 + \eta_2} E_0. \quad (2.27)$$

A Equação 2.27 é uma importante ferramenta que relaciona a intensidade do campo incidente e campo transmitido. Equação esta que não se restringe a campos elétricos e também pode ser escrita para campos magnéticos, de forma que:

$$H_1 = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} H_0. \quad (2.28)$$

Também se pode abordar a interação no segundo limite do meio (HAYT (2011); OTT (1988)), nos casos em que a espessura da blindagem não é o suficiente para absorver completamente os campos incidentes. Levando-se em consideração as informações da Subseção 2.3.1 (Absorção), pode-se garantir que o campo não é totalmente absorvido desde que a espessura do material blindante seja menor que a profundidade pelicular (δ), neste caso podemos observar uma segunda reflexão (E_{r2}), como é mostrado na Figura 13:

De modo análogo às Equações 2.27 e 2.28 temos que:

$$E_t = \frac{2\eta_1}{\eta_1 + \eta_2} E_1, \quad (2.29)$$

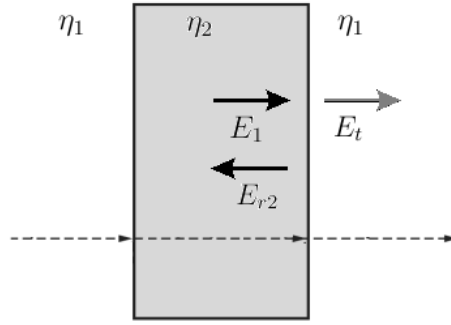


Figura 13 – Campo interior ao meio (E_1), campo transmitido (E_t) e campo refletido no segundo limite do meio (E_{r2}).

$$H_t = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} H_1. \quad (2.30)$$

Onde E_t e H_t são valores da intensidade dos campos transmitidos no segundo limite do meio, como mostrado na Figura 13 para E_t .

Desta forma, é possível colocar E_t e H_t em função dos valores de campo incidente E_0 e H_0 , tornando assim mais simples a análise quantitativa do fenômeno de reflexão. Substituindo as Equações 2.27 e 2.28 em 2.29 e 2.30, temos que:

$$E_t = \frac{4\eta_1\eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} E_0, \quad (2.31)$$

$$H_t = \frac{4\eta_1\eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} H_0. \quad (2.32)$$

Ainda que, como é visto nas Equações 2.31 e 2.32, o valor de reflexão seja proporcional para campos elétrico e magnético, existe uma diferença entre ambos. Para melhor entender essa diferença, algumas considerações devem ser feitas: Caso o meio 1 tenha impedância muito maior que o meio 2 ($\eta_1 \gg \eta_2$), por exemplo, quando o meio 1 é o ar e o meio 2 é algum material condutor, pode-se observar através das Equações 2.27 e 2.28 que campos elétricos tem grande potencial de reflexão no primeiro limite entre os dois meios. Desta forma, pode-se afirmar que mesmo para materiais condutores de espessura muito fina, campos elétricos apresentam uma parcela de reflexão considerável (GUAN (2003); SINDURA (2011)).

No mesmo cenário em que $\eta_1 \gg \eta_2$, um campo magnético não teria grande potencial de reflexão no primeiro limite entre os dois meios, mas sim no segundo limite entre estes meios (ver Equação 2.30). Em outras palavras, os campos magnéticos tendem a ser enclausurados nos materiais blindantes, e por sua vez, ter maior proveito do efeito de absorção.

Segundo OTT (1988), quando $\eta_1 \gg \eta_2$, temos que:

$$E_t = \frac{4\eta_2}{\eta_1} E_0, \quad (2.33)$$

$$H_t = \frac{4\eta_2}{\eta_1} H_0. \quad (2.34)$$

Pode-se observar que a razão entre onda incidente e transmitida é proporcional à razão de impedância da partição blindante e do meio original da onda. Desta forma, tem-se uma equação de atenuação que é função da impedância intrínseca dos meios, e não função das amplitude dos campos:

$$R = 20 \log \frac{|\eta_1|}{4|\eta_2|} [dB]. \quad (2.35)$$

Esta equação pode ser utilizada para avaliar a capacidade de blindagem eletromagnética por reflexão dos materiais condutores como cobre, ouro, alumínio, etc.

Já para o cálculo da eficácia para materiais com baixa condutividade ($\eta_1 \ll \eta_2$) é necessário o uso de uma equação geral (Equação 2.36) que é descrita por OTT (1988). Equação esta que também leva em conta as características do campo a ser blindado, seja ele predominantemente elétrico, magnético ou quando se trata de uma onda plana.

$$R = C + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left(\frac{1}{f^n r^m} \right) [dB]. \quad (2.36)$$

Onde os valores de C , n e m podem ser obtidos através da Tabela 4, f é a frequência da onda, r é a distância efetiva à partir da fonte da onda eletromagnética (quando se trata de *campo próximo*). Os valores σ_r e μ_r são respectivamente os valores de condutividade e permeabilidade relativa da partição blindante.

Tabela 4 – Constantes para a equação 2.35.

Tipo de Campo	C	n	m
Campo Elétrico	322	3	2
Onda Plana	168	1	0
Campo Magnético	14,6	-1	-2

A Equação 2.36 deixa evidente que a contribuição da reflexão na eficiência de blindagem é uma função da razão de condutividade (σ_r) e permeabilidade (μ_r). Revisitando a Tabela 3 (Materiais e suas propriedades eletromagnéticas), pode-se observar que os meios condutores são mais eficientes quando se trata de reflexão.

2.3.3 Múltiplas Reflexões

Quando a espessura de um compartimento blindante é menor do que sua profundidade pelicular (δ), é esperado que a onda eletromagnética incidente não seja totalmente absorvida por este compartimento, desta forma, uma nova parcela desta onda pode ser refletida novamente durante seu trajeto. Este fenômeno já foi abordado na Subseção 2.3.2 (Reflexão). Porém, existem casos onde este fenômeno se repete inúmeras vezes, como é mostrado na Figura 14.

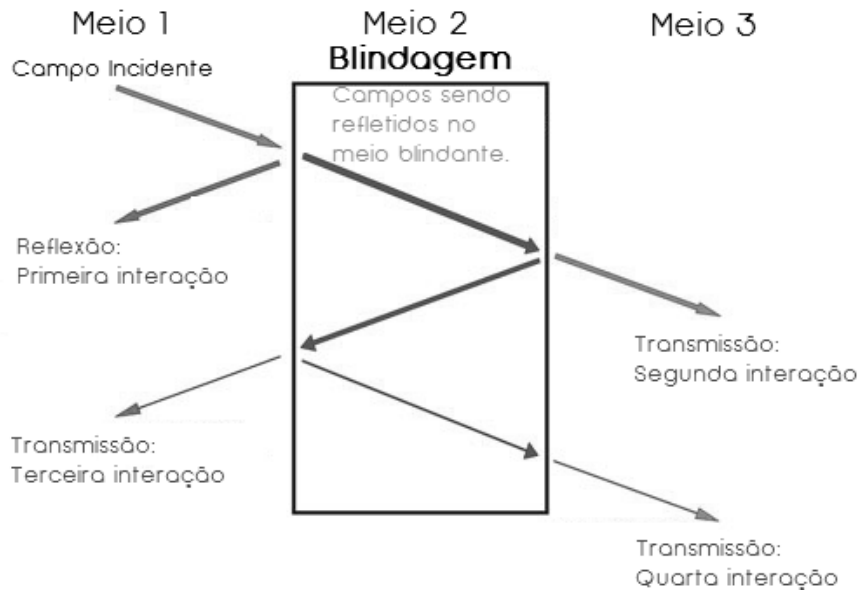


Figura 14 – Múltiplas reflexões em um material blindante (Modificado de OTT (1988)).

Logo, um terceiro fator deve ser considerado no cálculo da eficiência total de blindagem, as múltiplas reflexões (B) ou como também é chamado, fator de correção por múltiplas reflexões (MCDOWELL (2014)).

O fator de correção por múltiplas reflexões pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$B = 20 \log(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}}) [dB]. \quad (2.37)$$

Na Equação 2.37, δ é a *profundidade pelicular*, grandeza que pode ser calculado através da Equação 2.22 e t é a espessura da blindagem. O fator de correção (B) é um valor negativo, sendo que uma blindagem ideal teria valores de B próximos ou iguais à zero.

Caso a profundidade pelicular (δ) de um material seja muito menor que sua espessura, este efeito pode ser desconsiderado (CHUNG (2000a)). Para OTT (1988), caso a atenuação devido à absorção seja maior que 9 dB, o fator B pode ser desconsiderado. Já segundo SCHULZ (1988) e GAIER (1990), este fator pode ser excluído dos cálculos caso a atenuação por absorção seja maior que 15 dB.

2.3.4 Nota sobre o comportamento da permeabilidade de materiais magnéticos

Como é retratado por ROZANOV e KOLEDINTSEVA (2013), materiais magnéticos apresentam uma queda gradativa em sua permeabilidade à medida que a frequência aumenta, fenômeno que ocorre devido a limitações físicas desses materiais. Uma forma de compreender a queda de permeabilidade relativa (μ_r) dos materiais magnéticos é a observação do fenômeno de histerese. A Figura 15 retrata como se comporta a curva de histerese magnética para diferentes frequências de um campo magnetizante (\mathbf{H}) sendo aplicado à uma liga *Permalloy 80* (similar ao *Super QTM 80*).

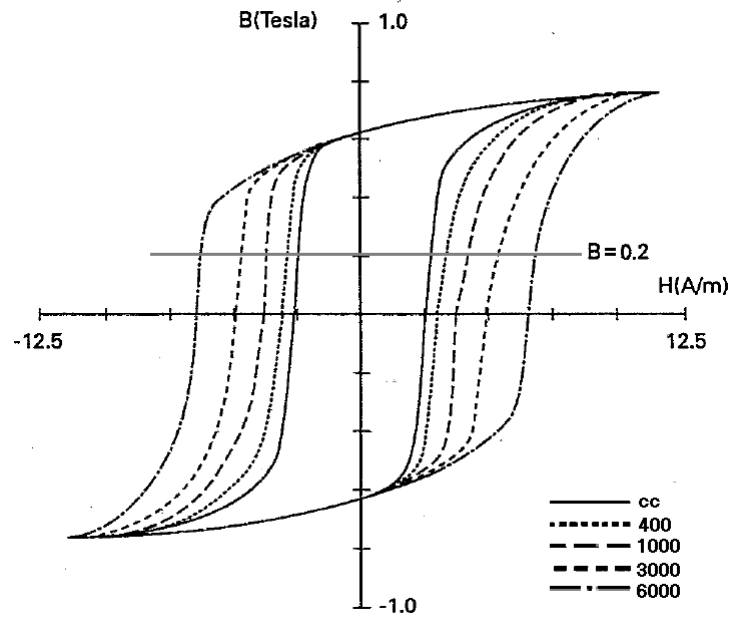


Figura 15 – Curva de histerese do *Permalloy 80* submetido a um campo magnetizante \mathbf{H} em corrente contínua, 400, 1000, 3000 e 6000 Hz (Modificado de JILES (1994)).

De acordo com MCLYMAN (2004) e HOLLAND (1948), considerando que a permeabilidade magnética seja:

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}}. \quad (2.38)$$

Onde $\mu = \mu_0\mu_r$, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, \mathbf{H} é o campo magnetizante e \mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético induzido no material ferromagnético, valor que não deve ser confundido com o fator de múltiplas reflexões abordado nas seções anteriores.

Para uma densidade de fluxo magnético $B = 0,2$ T, é possível notar que quanto maior a frequência, menor se torna a razão das amplitudes de B e H , por sua vez, menor

é μ e μ_r . O valor $B = 0,2 T$ não foi fixado casualmente, mas sim por ser a região onde são observados os valores máximos de permeabilidade de um material magnético segundo MCLYMAN (2004). Esta análise portanto indica que: quanto maior a frequência do campo magnético incidente, menor se torna a permeabilidade relativa máxima do material magnético ao qual este campo incide.

Embora as informações da Figura 15 sejam dados de um único material, observa-se que no trabalho de WIESERMAN, SCHWARZE e NIEDRA (1990) são mostrados gráficos similares para diferentes materiais magnéticos como o *Supermalloy* e *MetGlass 2605SC*, e a análise desses gráficos levam a mesma conclusão feita acima.

Outros fatores também influenciam o comportamento da permeabilidade de materiais magnéticos, o que é abordado por WIESERMAN, SCHWARZE e NIEDRA (1990), JILES (1994) e HOLLAND (1948). Nestes trabalhos, observa-se que a histerese é afetada por fatores como temperatura do material, frequência do campo magnético incidente e a constituição do material. A natureza deste problema é de alta complexidade, portanto foi julgado suficiente levar em consideração as mudanças de permeabilidade apenas em função de frequência.

3 Metodologia

3.1 Análise quantitativa

A fim de analisar a possibilidade do emprego dos materiais selecionados na confecção de compartimentos blindantes, foi feita uma avaliação quantitativa da eficácia de blindagem destes materiais sob certas condições. As seguintes considerações devem ser feitas:

- (I) O escopo deste trabalho será a classificação de pelo menos 5 materiais distintos que podem ser utilizados na confecção de compartimentos blindantes e sua classificação como eficazes ou não.
- (II) Será definida uma faixa de frequências para as quais a eficácia de blindagem será avaliada. O objetivo será a análise desta eficácia para ondas eletromagnéticas que se propagam com frequências no intervalo de 60 Hz a 100 kHz, pois é a faixa de frequência onde há disponibilidade dos dados necessários para os cálculos de eficácia.
- (III) O Capítulo 2 foram discutidas as diferenças entre *campo próximo* e *campo distante*. Desta forma, serão considerada três possibilidades: Ondas planas no *campo distante*, ondas predominantemente elétricas no *campo próximo* e ondas predominantemente magnéticas também no *campo próximo*.

Feitas estas considerações, foi desenvolvido um algoritmo utilizando o ambiente de programação MATLAB[®], disponível no Anexo B (Algoritmo para o cálculo de eficácia de blindagem (S)). Este algoritmo é capaz de, a partir de características eletromagnéticas e físicas dos materiais propostos, estipular valores para eficácia de blindagem ao longo do intervalo de frequências proposto.

O diagrama da Figura 16 ilustra como será o processo de análise dos materiais escolhidos. O algoritmo usa a equação 2.23 para o cálculo de A , a equação 2.36 para o cálculo de R e calcula os valores de B através da equação 2.37 do capítulo anterior. Logo em seguida é feita a somatória dos três fatores, de acordo com a equação 2.15.

De acordo com o diagrama da Figura 16, podemos observar 3 grupos distintos de resultados para cada material selecionado. O grupo 1 conta com os resultados da eficácia de blindagem para ondas planas. Será traçado o gráfico desta eficácia em função da frequência de onda ($S \times f$) para cada uma das possíveis espessuras escolhidas (t_1 , t_2 e t_3) do material, tornando possível entrever como a escolha de espessura do compartimento blindante influencia o resultado final.

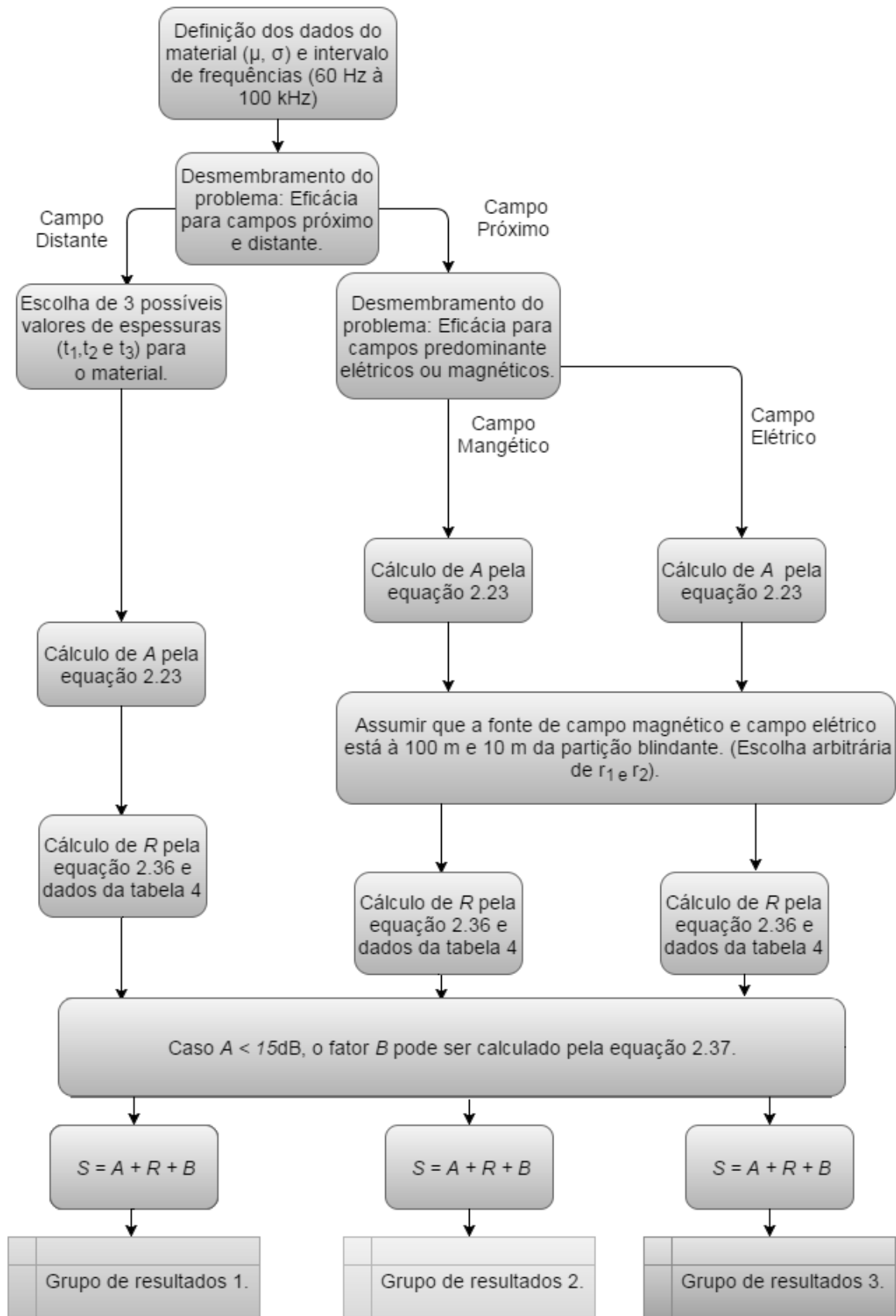


Figura 16 – Diagrama do processo de análise da eficácia de blindagem.

O grupo 2 é constituído dos resultados da eficácia de blindagem de interferências eletromagnéticas geradas por fontes de alta corrente e baixa tensão, localizadas no *campo próximo* (ondas predominantemente magnéticas). Diferente do grupo 1, os resultados do grupo 2 se dão para um valor de espessura t . E ainda será feita uma análise para duas distâncias hipotéticas da fonte de interferência (r_1 e r_2), desta forma, possibilitando observar como a distância da fonte de interferência pode influenciar a eficácia de blindagem.

O grupo 3 é análogo ao grupo 2, porém considerando que a interferência eletromagnética é gerada por fontes de alta tensão e baixa corrente (ondas predominantemente elétricas).

3.2 Escolha dos materiais

Conforme discutido no Capítulo 2, na escolha do material devem ser consideradas duas características: permeabilidade magnética e condutividade elétrica. Conforme observado na Tabela 3, as propriedades do cobre como bom condutor, o tornam um bom candidato como material blindante devido à grande atenuação de interferências por reflexão. No outro extremo, temos as ligas magnéticas, que devido à grande permeabilidade magnética são eficientes na atenuação por absorção.

Cobre é um metal bastante comum, que devido a sua alta condutividade, é uma escolha óbvia de material blindante. *Cobre Elox* é o nome comercial do cobre com 99,95% de pureza, distribuído no Brasil pela Shockmetals, indústria paulista de metais não ferrosos.

Somente em 1923 foi descoberto pela Bell System Laboratory que ligas de ferro e níquel possuíam propriedades magnéticas memoráveis (ARNOLD e ELMEN (1923)), como o *Super QTM 80*, liga composta por 80% níquel e aproximadamente 19% ferro (MAGNETIC METALS (2003)), e o HyMu 800 (liga alternativa ao MuMetal), composta por 80% níquel, aproximadamente 14% ferro, além de molibdênio, manganês, silicone e carbono. Ambas são ligas de ferro-níquel que apresentam altos valores de permeabilidade magnética. É válido ressaltar que materiais magnéticos como o *Super QTM 80* e o HyMu 800 são comumente comercializados para fins de confecção de transformadores. Neste trabalho será levada em consideração a possibilidade do seu uso em blindagem eletromagnética.

Uma alternativa às ligas de ferro-níquel presentes no mercado são as ligas amorfas à base de cobalto produzidos pela *Metglas[®]*. O *Metglas[®] 2714A* apresenta propriedades magnéticas ainda melhores do que o *Super QTM 80* e o *HyMu 800*, porém apresenta valores de condutividade relativa (σ_r) menor que ambos.

Outras propriedades além de condutividade e permeabilidade podem ser levadas em consideração no processo de escolha dos materiais blindantes. Um exemplo que pode

ser citado é um memorando técnico divulgado pela NASA em 1994 onde é feito um comparativo entre a eficiência de blindagem do cobre e compostos de grafite intercalado, com o *Amoco P-100*. O *Amoco P-100* é um composto de fibra de grafite à base de piche, que com a adição eletroquímica de bromo (CHUNG e HO (1990)), apresenta condutividade relativa de $\sigma_{rP-100+Br} = 0,02$. Este valor de condutividade é relativamente baixo quando comparado ao cobre. Mas em contraste, a densidade volumétrica do P-100 bromado é aproximadamente 20% do valor da densidade do cobre. Este é um ponto crítico a ser avaliado na construção de aeronaves, sondas espaciais e satélites, uma vez que existe uma constante preocupação em diminuir os seus pesos e tornar a exploração espacial mais rentável (GAIER e TERRY (1994)).

Serão eleitos portanto cinco materiais com propriedades eletromagnéticas distintas a fim de obter maior discernimento sobre o fenômeno de blindagem: o *Cobre Elox*, o *Super QTM 80*, o *HyMu 800*, o *Metglas[®] 2714A* e por fim, o *Amoco P-100 bromado*.

A Tabela 5 apresenta algumas informações relevantes sobre estes materiais.

Tabela 5 – Materiais elegíveis para blindagem.

Material	σ_r	μ_r
Super Q TM 80	0,034	Ver Figura 17
HyMu 800	0,027	Ver Figura 17
Cobre Elox	0,999	1
Amoco P-100 bromado	0,020	1
Metglas [®] 2714A	0,012	Ver Figura 17

Informações referentes ao *Cobre Elox* podem ser encontrados no web-site da Shockmetals SHOCKMETAIS (2014). Dados sobre o *Super QTM 80* e ligas similares estão disponíveis no trabalho de ARNOLD e ELMEN (1923) e na folha de dados do material (MAGNETIC METALS (2003)). A folha de dados com informações sobre *HyMu 800* pode ser encontrado no repositório online CARPENTER (1991). Os dados referentes ao *Metglas[®] 2714A* são encontrados em sua folha de dados (METGLASS (2011)) e informações sobre o *Amoco P-100 bromado* podem ser encontrados no trabalho de GAIER (1990).

As folhas de dados dos materiais *Super QTM 80*, *HyMu 800* e *Metglas[®] 2714A* também estão disponíveis em anexo a este trabalho.

O comportamento da permeabilidade destes materiais pode ser observada na Figura 17. Os resultados na Figura 17 foram obtidos através do algoritmo disponível no Anexo A, algoritmo este que aproxima com erro máximo de 5% os valores para permeabilidade relativa dos materiais apresentados baseando-se em informações disponíveis na folha de dados dos respectivos materiais. Estes são dados referentes a materiais sob uma densidade de fluxo magnético que abrange valores entre 0,2 T e 0,4 T.

Será considerado que a eficácia de blindagem do Amoco P-100 bromado pode ser calculada através dos mesmos métodos empregados no cálculo de eficácia para ligas

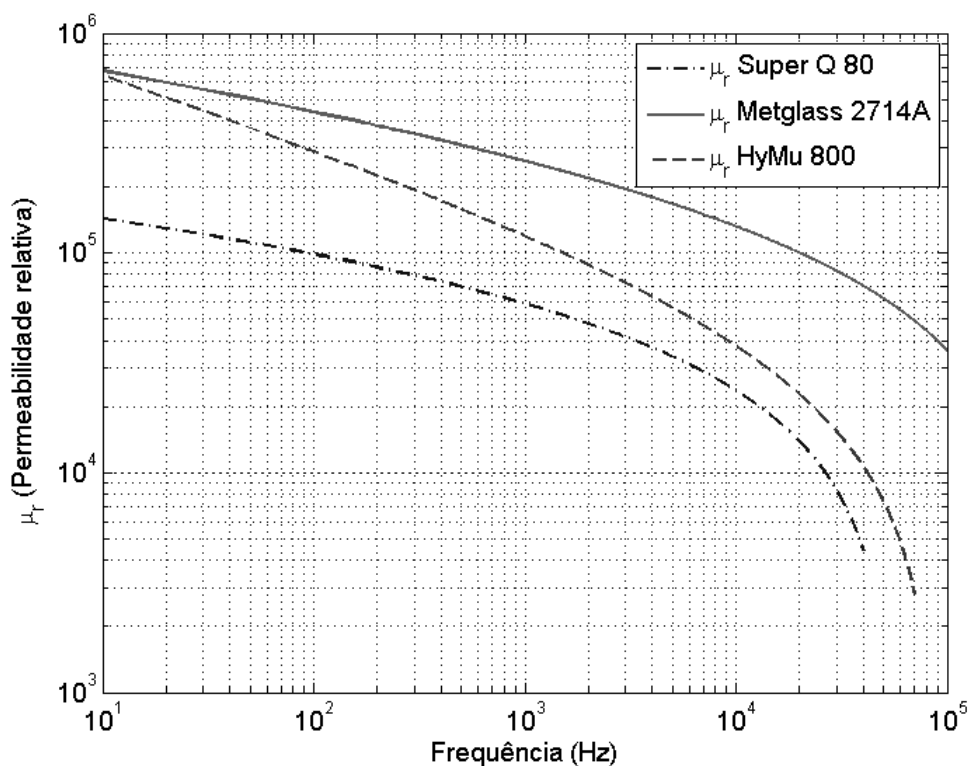


Figura 17 – Permeabilidade dos materiais magnéticos vs. frequência.

metálicas, como é tratado no trabalho de GAIER (1990).

3.2.1 O efeito pelicular na escolha das espessuras

A escolha das espessuras t_1 , t_2 e t_3 não deve ser arbitrária, pois deve ser levado em consideração os valores de profundidade pelicular (δ) já discutidos na Subseção 2.3.1. Uma espessura de blindagem maior que δ é o suficiente para garantir que uma interferência sofra absorção de pelo menos 63% do seu valor inicial (SANCHES (2010)).

De acordo com a Equação 2.22, δ se torna menor à medida que as frequências aumentam, logo, garantir uma espessura suficientemente grande para absorver interferências com frequências de 60 Hz deve assegurar bom desempenho para todas as frequências maiores. Na Tabela 6 constam os valores de δ para os cinco materiais propostos na Tabela 5, em 60 Hz.

Tabela 6 – Profundidade pelicular dos materiais em 60 Hz, dada em milímetros.

Material	δ
Super Q 80	0,136 mm
HyMu 800	0,085 mm
Cobre Elox	8,276 mm
Amoco P-100 bromado	58,492 mm
Metglas [®] 2714A	0,108 mm

A profundidade pelicular (δ) é um fator importante no cálculo de absorção (A) de interferências eletromagnéticas, entretanto, materiais como *Cobre Elox* e o *Amoco P-100 bromado* são pouco eficientes na absorção de interferências devido aos seus baixos valores de permeabilidade magnética. O principal mecanismo de blindagem desses materiais é a reflexão (R), e o fator R não depende da espessura dos materiais (Equação 2.36)

Portanto, deve-se assegurar uma espessura maior que δ apenas para os materiais magnéticos (Super Q 80, HyMu 800 e Metglas[®] 2714A), a fim de assegurar uma absorção mínima de 63%.

4 Resultados e Discussões

Nos últimos capítulos, foram propostas ferramentas matemáticas que possibilitam a análise quantitativa da eficácia no processo de blindagem eletromagnética e ainda foi proposto um esquema metodológico que facilita esta análise. A partir das hipóteses formuladas durante este trabalho e as ferramentas desenvolvidas, foram obtidos os resultados deste capítulo. No Anexo B encontra-se o algoritmo desenvolvido para análise da eficácia de blindagem dos materiais listados na Tabela 5, este algoritmo segue o esquema metodológico proposto no capítulo anterior que é observado no diagrama da Figura 16.

4.1 Eficácia de blindagem para campos distantes

Seguindo o diagrama da Figura 16, uma vez que os valores de μ e σ foram definidos e o desmembramento do problema entre campo distante e próximo se dará ao decorrer das seções deste capítulo, o próximo passo é a escolha de espessuras do compartimento blindante para a blindagem eletromagnética de ondas distantes. Serão escolhidos portanto os seguintes valores para espessura de material: $t_1 = 0,15mm$, $t_2 = 0,2mm$ e $t_3 = 0,25mm$. O critério de escolha destas espessuras já foi discutido na Subseção 3.2.1, t_1 , t_2 e t_3 devem ser maiores que a *profundidade pelicular* (δ) dos materiais estudados para frequências acima de 60 Hz, visando assim garantir um valor mínimo de absorção.

4.1.1 Materiais com espessura $t = 0,15$ mm

A partir das equações propostas na Subseção 2.3.1, foi estimada a atenuação de um sinal pelo fenômeno de absorção (A). Na Figura 18 é possível observar como se comporta a absorção de uma onda plana por materiais com uma espessura $t_1 = 0,15mm$.

Na Subseção 2.3.1, foi discutido a preferência por materiais magnéticos quando o objetivo era alcançar um valor significativo de absorção. De fato, os materiais magnéticos se mostram mais efetivos no fenômeno de absorção, enquanto materiais como o *Cobre Elox* e o *Amoco P-100 bromado* dificilmente conseguem oferecer uma atenuação maior que 10 dB nas condições propostas. O *Cobre Elox* ainda é pouco mais eficiente que o *Amoco P-100* devido a sua maior condutividade. Observa-se também que a absorção se torna gradativamente maior à medida que se aumenta a frequência. Fato que pode ser inferido a partir das Equações 2.22 e 2.24.

Ainda considerando-se uma espessura de $t_1 = 0,15mm$, foi estimada a atenuação pelo fenômeno de reflexão (R) dos materiais, como pode ser visto na Figura 19.

Ao fim da Subseção 2.3.2, era observado que a razão de condutividade (σ_r) por permeabilidade relativa (μ_r) afeta diretamente a resposta da atenuação por reflexão.

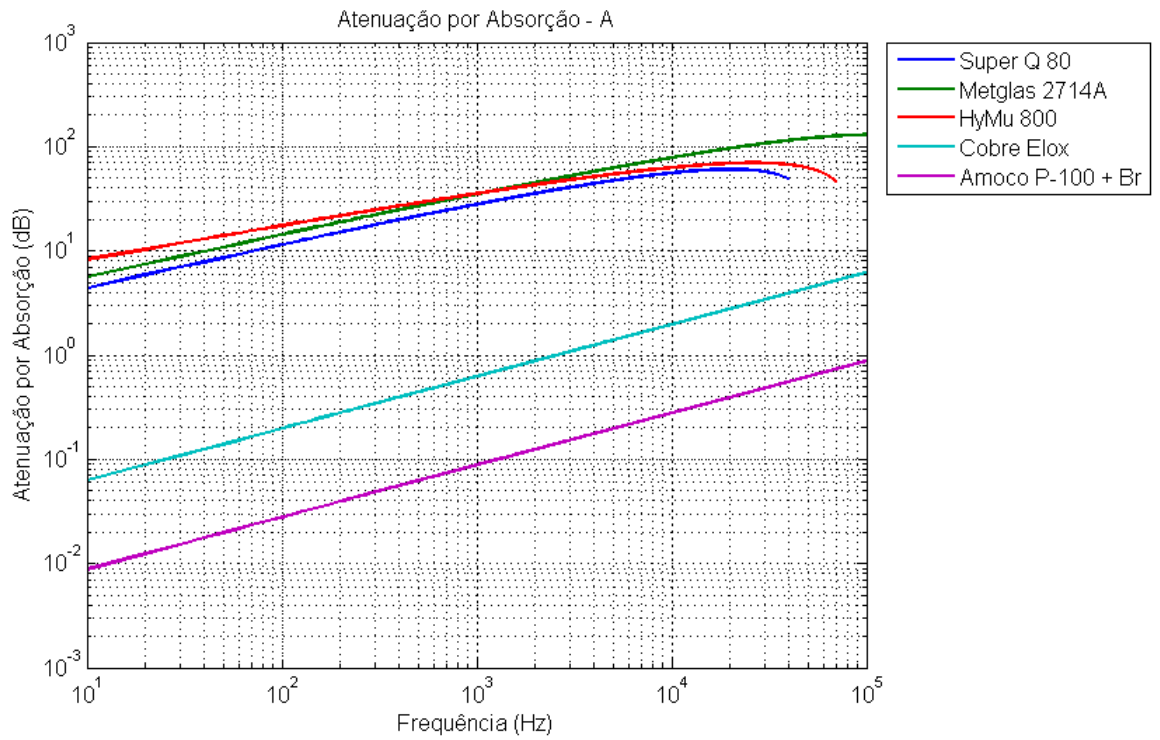


Figura 18 – Atenuação de ondas planas devido ao fenômeno de absorção A ($t_1 = 0,15mm$).

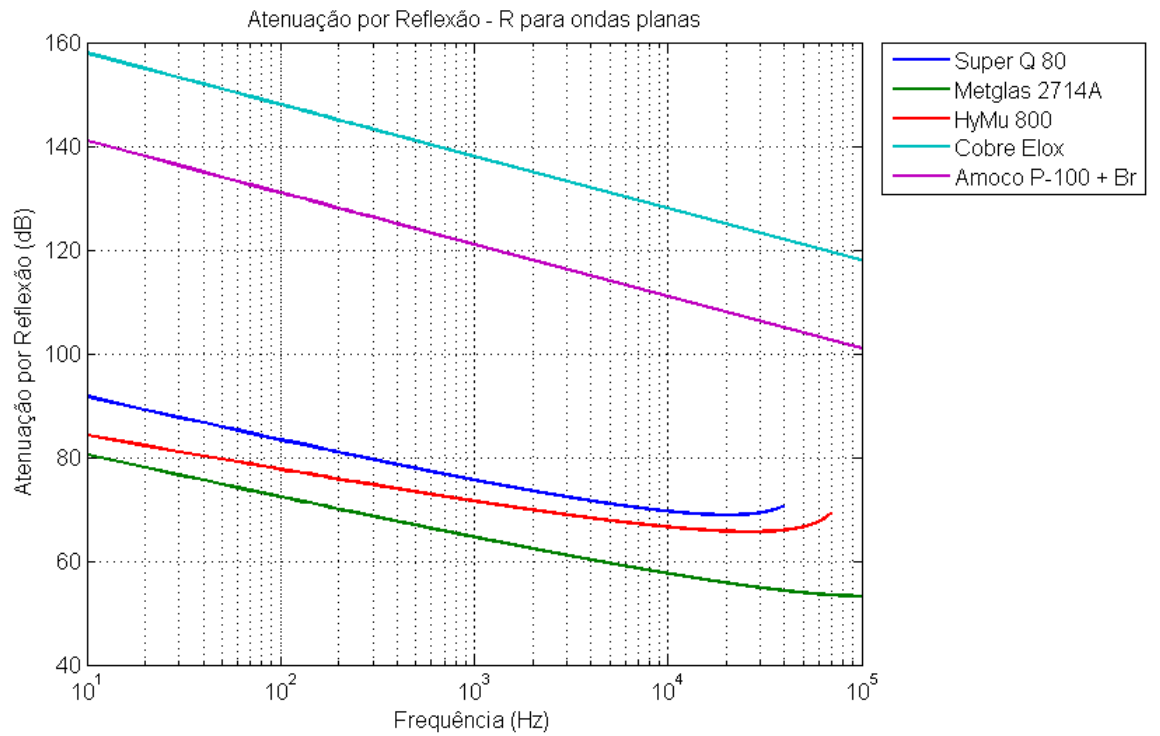


Figura 19 – Atenuação de ondas planas devido ao fenômeno de reflexão R ($t_1 = 0,15mm$).

Portanto, materiais com altos valores de permeabilidade relativa são menos eficientes dentre os materiais estudados, fato que pode ser deduzido através da Equação 2.36.

A soma de absorção e reflexão ($A+R$), pode ser observada na Figura 20. Uma análise preliminar da somatória das parcelas calculadas de absorção e reflexão pode ocasionar em conclusões precipitadas quanto à eficácia de blindagem dos materiais. Observamos que os materiais magnéticos: *Super Q 80*, *Metglas 2714A* e *HyMu 800*, aparentam menor eficácia quando comparados aos outros materiais em frequências abaixo de 10 kHz. Mesmo que estes materiais tenham uma melhor resposta de absorção (Figura 18), o *Cobre Elox* e *Amoco P-100 bromado* os superam facilmente devido à grande atenuação proveniente da reflexão (Figura 19).

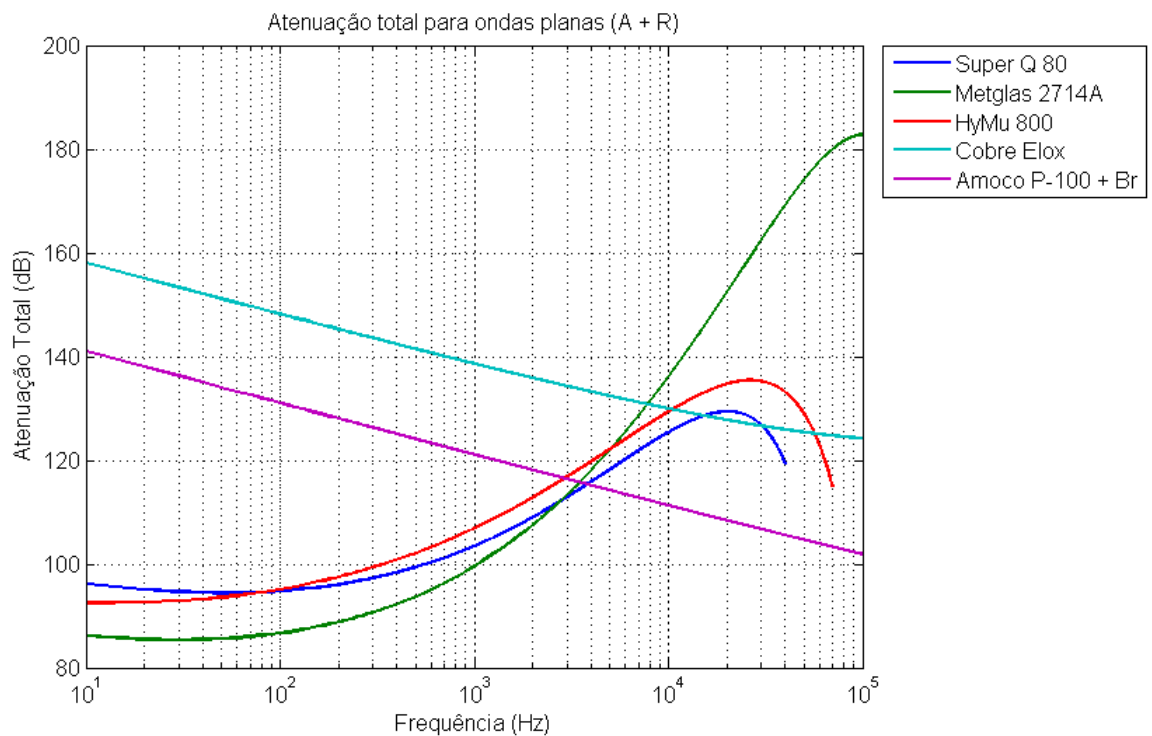


Figura 20 – Somatório de atenuação e reflexão $A + R$ ($t_1 = 0,15mm$).

A Figura 20 não traduz o real comportamento do fenômeno de atenuação. Deve-se observar que um terceiro termo deve ser adicionado a estes cálculos, o fator de correção por múltiplas reflexões (B). O fator B é calculado e mostrado na Figura 21.

A Figura 21 representa a magnitude do fator de correção, mas deve-se ter em mente que este é um fator negativo. Observa-se que materiais de alta permeabilidade sofrem menos com o efeito de múltiplas reflexões, uma vez que seu mecanismo de blindagem principal é a atenuação e toda interferência que incide nesses materiais mais provavelmente será absorvida. Materiais que dependem do fenômeno de reflexão para garantir blindagem são mais propícios a sofrer com o efeito de múltiplas reflexões.

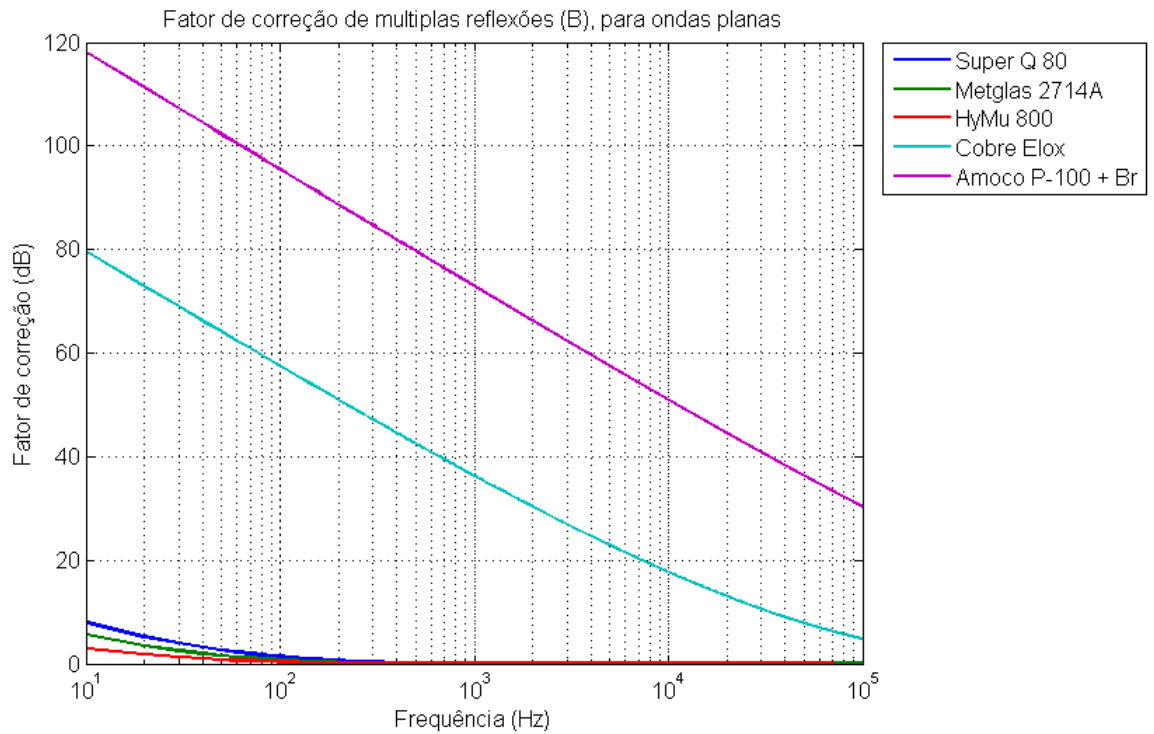


Figura 21 – Fator de correção por múltiplas reflexões B ($t_1 = 0,15mm$).

Uma vez que o fator B seja incluso na equação, é possível estimar a eficácia total de blindagem, dada por $S = A + R + B$ e pode ser observada na Figura 22. O *Amoco P-100 bromado* se mostra uma opção inviável principalmente nas mais baixas frequências, o *Cobre Elox* ainda é viável em alguns intervalos de frequência, porém os materiais magnéticos claramente excedem a eficácia do *Cobre Elox* principalmente nas frequências acima de 1 kHz.

Ainda na Figura 22 é possível observar que apenas alta permeabilidade não é o suficiente para eleger o melhor dentre os três materiais magnéticos. O *Metglas 2714A* conta com os maiores valores de permeabilidade entre os três materiais magnéticos estudados (ver Figura 16), porém apresenta a menor eficácia de blindagem dentre os três no intervalo de 60 Hz à 1 kHz. Isto ocorre pois a condutividade destes materiais, mesmo que menor se comparadas a do cobre, ainda desempenham um papel importante na blindagem eletromagnética, e a condutividade do *Metglas 2714A* em particular é a menor dos três materiais magnéticos estudados.

A Tabela 7 mostra alguns valores de A , R , B e S para certos pontos de interesse para os cinco materiais. Observe que os valores de B não são mostrados quando $A > 15$ dB, pois tem amplitudes desprezíveis.

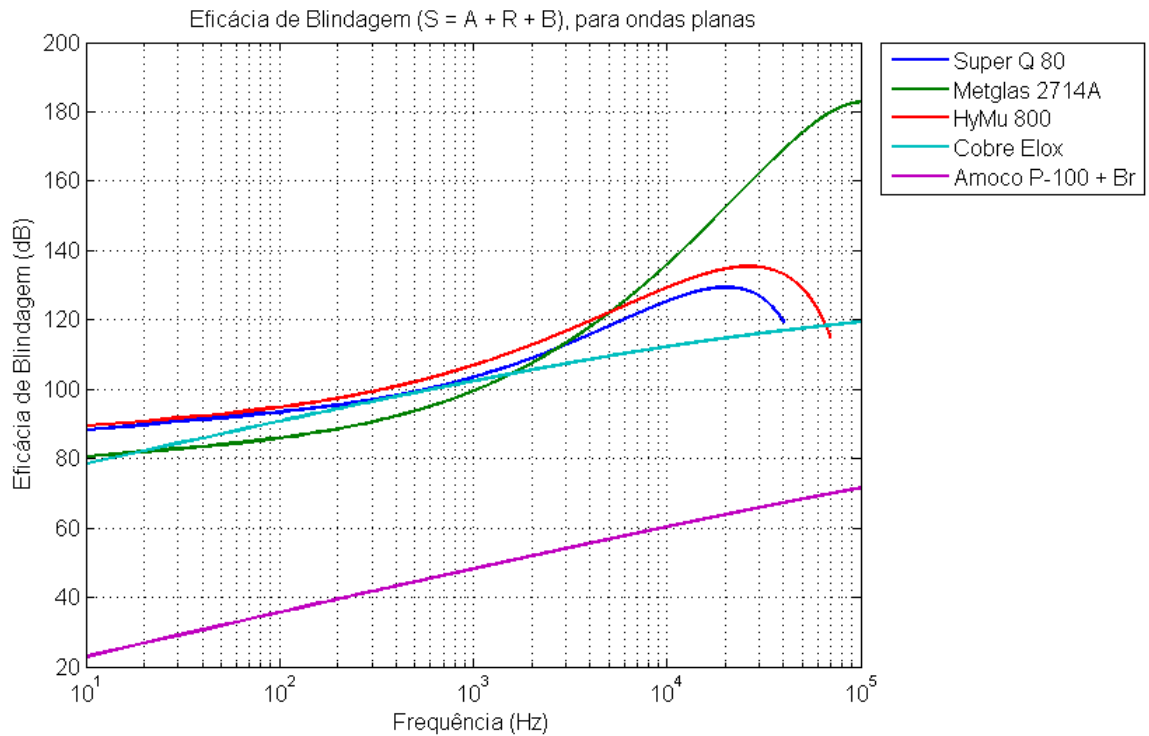


Figura 22 – Eficácia total de blindagem S ($t_1 = 0,15mm$).

Tabela 7 – Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para frequências de 100, 1000 e 10000 Hz. ($t_1 = 0,15mm$).

Material e Frequência	(A)	(R)	(B)	(S)
Cobre Elox (em 100 Hz)	0,20 dB	148 dB	- 57,46 dB	90,74 dB
Cobre Elox (em 1 kHz)	0,62 dB	138 dB	- 36,29 dB	102,33 dB
Cobre Elox (em 10 kHz)	1,97 dB	128 dB	- 17,68 dB	112,29 dB
P-100 + Br (em 100 Hz)	0,03 dB	131 dB	- 95,40 dB	35,63 dB
P-100 + Br (em 1 kHz)	0,09 dB	121 dB	- 72,89 dB	48,20 dB
P-100 + Br (em 10 kHz)	0,28 dB	111 dB	- 50,92 dB	60,36 dB
Super Q 80 (em 100 Hz)	11,41 dB	83,34 dB	- 1,40 dB	93,35 dB
Super Q 80 (em 1 kHz)	27,87 dB	75,62 dB	-	103,49 dB
Super Q 80 (em 10 kHz)	55,86 dB	69,58 dB	-	125,44 dB
Metglas 2714A (em 100 Hz)	14,29 dB	72,38 dB	- 0,73 dB	85,94 dB
Metglas 2714A (em 1 kHz)	34,94 dB	64,61 dB	-	99,55 dB
Metglas 2714A (em 10 kHz)	78,44 dB	57,59 dB	-	136,03 dB
HyMu 800 (em 100 Hz)	17,43 dB	77,69 dB	-	95,12 dB
HyMu 800 (em 1 kHz)	35,38 dB	71,55 dB	-	106,93 dB
HyMu 800 (em 10 kHz)	62,83 dB	66,56 dB	-	129,39 dB

4.1.2 Materiais com espessura $t = 0,2 \text{ mm}$

Utilizando o mesmo algoritmo para o cálculo da eficácia de blindagem, nas mesmas condições apresentadas anteriormente porém com materiais de espessura de ($t_2 = 0,2 \text{ mm}$), observa-se o comportamento mostrado na Figura 23. Juntamente com a Tabela 8, que conta com valores de A , R , B e S .

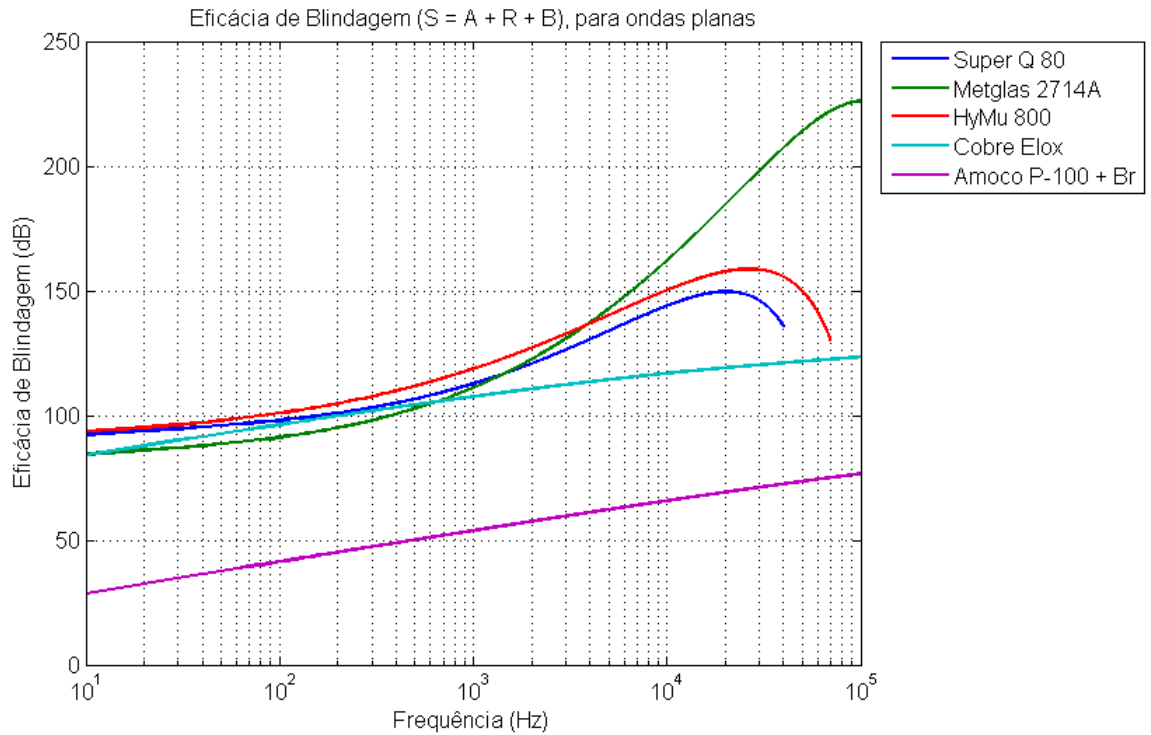


Figura 23 – Eficácia total de blindagem S ($t_2 = 0,2 \text{ mm}$).

É claramente perceptível que o aumento da espessura do material afeta positivamente a blindagem eletromagnética. A absorção (A) é diretamente proporcional à espessura do material, o que pode ser verificado através da Equação 2.24. O fator de reflexão (R) não se altera com o aumento de espessura do material blindante, porém o fator de correção B se torna menor à medida que a espessura aumenta. O fator B diminui pois um material de maior espessura assegura que a onda eletromagnética incidente seja absorvida antes de chegar a ser refletida novamente no segundo limite dos meios.

Outro fenômeno importante a ser observado é o aumento de eficácia dos materiais magnéticos para frequências acima de 10 kHz, com picos que atingem até 226 dB em 100 kHz. Isto sugere que um pequeno ajuste na espessura deste material pode gerar um aumento considerável na sua eficácia de blindagem.

Tabela 8 – Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para frequências de 100, 1000 e 10000 Hz. ($t_2 = 0,2mm$).

Material e Frequência	(A)	(R)	(B)	(S)
Cobre Elox (em 100 Hz)	0,26 dB	148 dB	- 52,03 dB	96,23 dB
Cobre Elox (em 1 kHz)	0,83 dB	138 dB	- 31,30 dB	107,53 dB
Cobre Elox (em 10 kHz)	2,26 dB	128 dB	- 13,77 dB	116,49 dB
P-100 + Br (em 100 Hz)	0,04 dB	131 dB	- 89,75 dB	41,29 dB
P-100 + Br (em 1 kHz)	0,12 dB	121 dB	- 67,33 dB	53,79 dB
P-100 + Br (em 10 kHz)	0,37 dB	111 dB	- 45,59 dB	65,78 dB
Super Q 80 (em 100 Hz)	15,22 dB	83,37 dB	-	98,59 dB
Super Q 80 (em 1 kHz)	37,16 dB	75,62 dB	-	112,78 dB
Super Q 80 (em 10 kHz)	74,48 dB	69,58 dB	-	144,06 dB
Metglas 2714A (em 100 Hz)	19,05 dB	72,38 dB	-	91,43 dB
Metglas 2714A (em 1 kHz)	46,59 dB	64,61 dB	-	111,20 dB
Metglas 2714A (em 10 kHz)	104,60 dB	57,59 dB	-	162,19 dB
HyMu 800 (em 100 Hz)	23,24 dB	77,69 dB	-	100,93 dB
HyMu 800 (em 1 kHz)	47,17 dB	71,55 dB	-	118,72 dB
HyMu 800 (em 10 kHz)	83,77 dB	66,56 dB	-	150,33 dB

4.1.3 Materiais com espessura $t = 0,25$ mm

De forma análoga aos capítulos anteriores, para uma espessura $t_3 = 0,25$ mm, foram obtidos os gráficos e valores observados na Figura 24 e a Tabela 9.

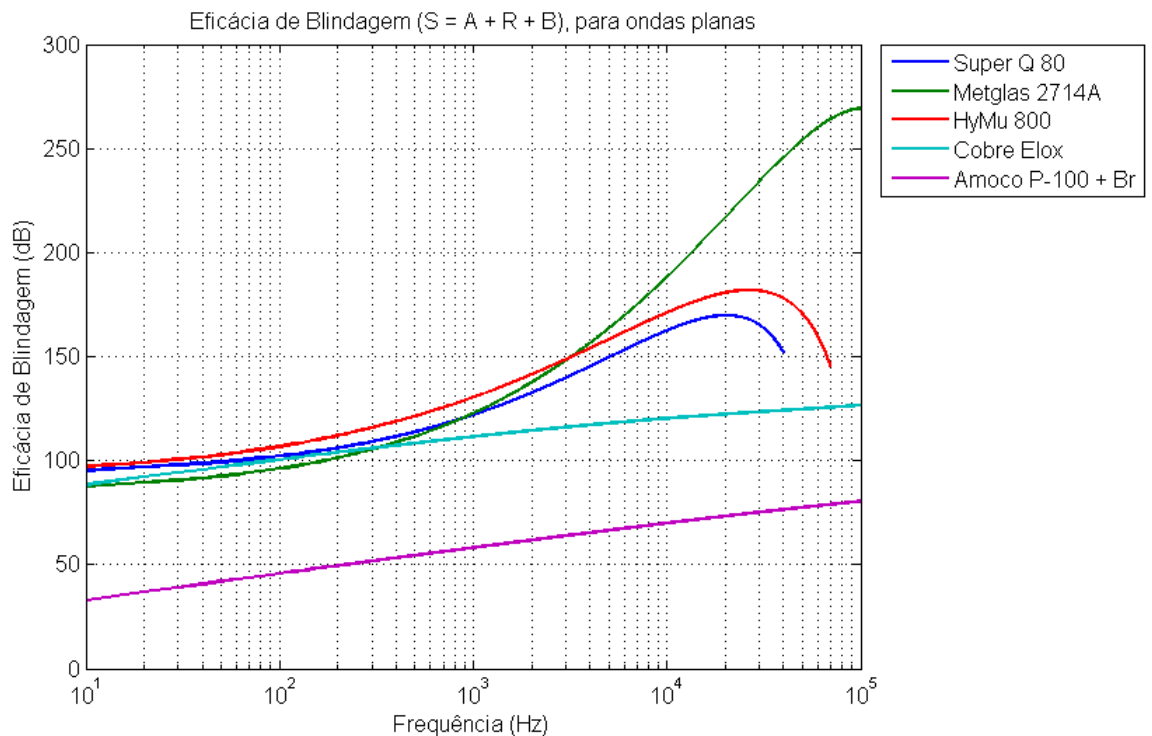


Figura 24 – Eficácia total de blindagem S ($t_3 = 0,25mm$).

Tabela 9 – Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para frequências de 100, 1000 e 10000 Hz. ($t_3 = 0,25mm$).

Material e Frequência	(A)	(R)	(B)	(S)
Cobre Elox (em 100 Hz)	0,33 dB	148 dB	- 47,88 dB	100,45 dB
Cobre Elox (em 1 kHz)	1,04 dB	138 dB	- 27,57 dB	111,47 dB
Cobre Elox (em 10 kHz)	3,28 dB	128 dB	- 11,02 dB	120,26 dB
P-100 + Br (em 100 Hz)	0,05 dB	131 dB	- 85,38 dB	45,67 dB
P-100 + Br (em 1 kHz)	0,15 dB	121 dB	- 63,05 dB	58,10 dB
P-100 + Br (em 10 kHz)	0,46 dB	111 dB	- 41,52 dB	69,94 dB
Super Q 80 (em 100 Hz)	19,02 dB	83,37 dB	-	102,39 dB
Super Q 80 (em 1 kHz)	46,44 dB	75,62 dB	-	122,06 dB
Super Q 80 (em 10 kHz)	93,10 dB	69,58 dB	-	162,68 dB
Metglas 2714A (em 100 Hz)	23,81 dB	72,38 dB	-	96,19 dB
Metglas 2714A (em 1 kHz)	58,23 dB	64,61 dB	-	122,84 dB
Metglas 2714A (em 10 kHz)	130,70 dB	57,59 dB	-	188,29 dB
HyMu 800 (em 100 Hz)	29,05 dB	77,69 dB	-	106,74 dB
HyMu 800 (em 1 kHz)	58,96 dB	71,55 dB	-	130,61 dB
HyMu 800 (em 10 kHz)	104,70 dB	66,56 dB	-	171,26 dB

Continua-se observando que o aumento de espessura dos materiais magnéticos tem um impacto maior na eficácia de blindagem para frequências maiores. O *Metglas 2714A* com uma espessura de 0,25 mm chega a oferecer eficácia de mais de 250 dB a partir de 30 kHz. O *Super Q 80* e o *HyMu 800* também chegam a apresentar eficácia acima de 150 dB, mas tem uma abrupta queda devido ao comportamento de suas permeabilidades para altas frequências, como visto na Figura 16. O *Amoco P-100* bromado e o *Cobre Elox*, por outro lado, não parecem apresentar diferenças tão grande na eficiência de blindagem à medida que se aumenta a espessura do material, mesmo que haja uma pequena melhora devido a diminuição do fator de correção B .

Pouco foi dito a respeito do *Amoco P-100 bromado* na análise dos resultados obtidos nas ultimas subseções, mas não se deve negligenciar a utilidade deste material. Como é dito na Seção 3.2 do Capítulo 3, este material foi objeto de estudo de GAIER (1990), sendo considerado uma alternativa mais leve que as ligas metálicas convencionais na blindagem eletromagnética.

O *Amoco P-100 bromado* apresenta valores de eficácia de blindagem iguais a $S_{100Hz} = 45,67$ dB, $S_{1kHz} = 58,10$ dB e $S_{10kHz} = 69,94$ dB, de acordo com a Tabela 9. Estes valores são respectivamente 45%, 52% e 56% da eficácia do *Cobre Elox* nas mesmas condições. Deve também ser mencionado que o valor da densidade volumétrica do *Amoco P-100* corresponde aproximadamente a um quinto da densidade volumétrica do *Cobre Elox*. Caso se opte pelo uso do *Amoco*, temos um material com $\frac{1}{5}$ da massa do cobre e com até metade de sua eficácia de blindagem.

4.2 Eficácia de blindagem para campos próximos

Na Figura 15 se observa que para campos próximos, o problema se desmembra em duas situações, quando um campo é classificado como elétrico ou magnético. Esta análise se faz necessária devido ao que já foi discutido no Capítulo 2.2.1, a diferença do comportamento dos campos elétrico e magnético no campo próximo.

As análises aqui feitas consideram que as fontes dos campos estejam localizadas uma distância que garanta *campo próximo*, o que segundo RYBAK e STEFFKA (2004), pode ser garantido para distâncias menores que $\lambda/2\pi$, onde λ é o comprimento de onda da maior frequência do intervalo considerado. Para 100 kHz, temos que $\lambda = 3000$ m. Desta forma, pode-se garantir que com $r < 447$ m se trabalha em *campo próximo*. Será definido portanto que as fontes de campo elétrico e magnético estão a princípio a uma distância de $r_1 = 100$ m e em seguida $r_2 = 10$ m. Considera-se também que todos os resultados são para materiais com espessura de 0,15 mm.

4.2.1 Eficácia de blindagem para campos magnéticos

A partir do algoritmo usado para o cálculo da eficácia de blindagem (Anexo B), considerando $r_1 = 100$ m, foi obtido o gráfico da Figura 25 e a Tabela 10.

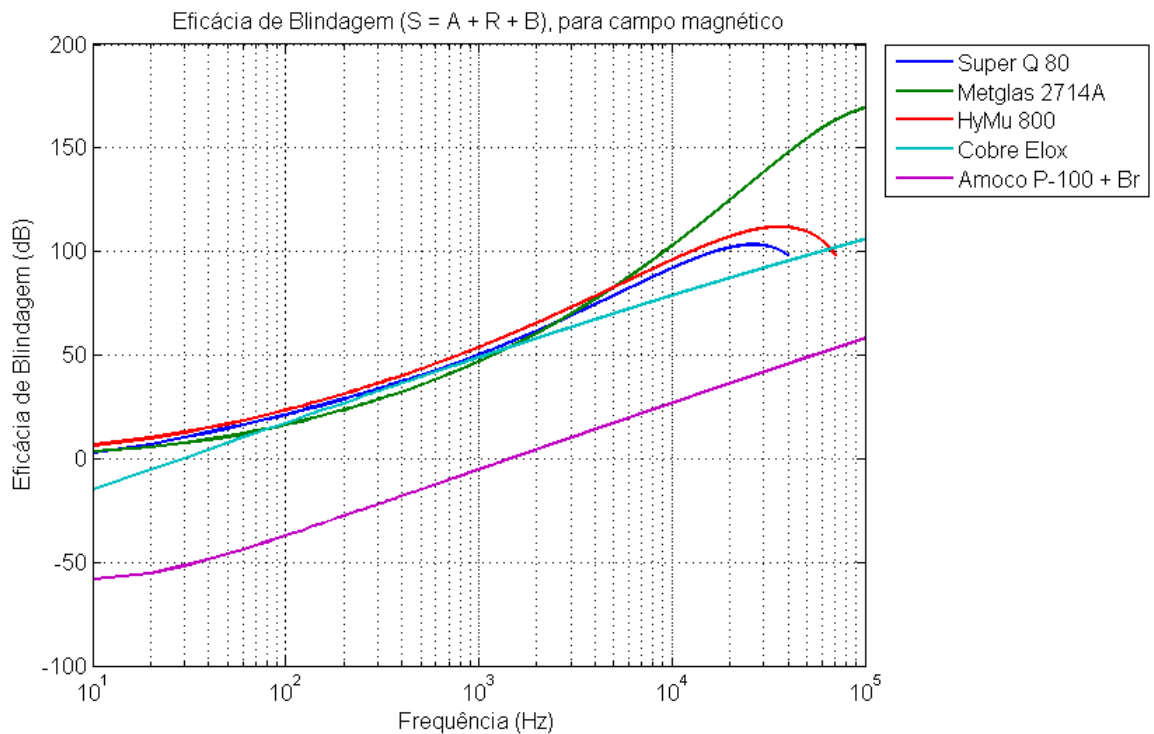


Figura 25 – Eficácia total de blindagem S , para campos magnéticos (com fonte a 100 metros do material blindante).

Em uma comparação entre as Tabelas 7 e 10 (Comparação da eficácia de blindagem

Tabela 10 – Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos magnéticos. ($r_1 = 100m$ e $t = 0,15mm$).

Material e Frequência	(A)	(R)	(B)	(S)
Cobre Elox (em 100 Hz)	0,20 dB	74,56 dB	- 57,44 dB	17,32 dB
Cobre Elox (em 1 kHz)	0,62 dB	84,56 dB	- 36,28 dB	48,62 dB
Cobre Elox (em 10 kHz)	1,97 dB	94,56 dB	- 17,68 dB	78,85 dB
P-100 + Br (em 100 Hz)	0,03 dB	57,58 dB	- 94,77 dB	- 37,16 dB
P-100 + Br (em 1 kHz)	0,09 dB	67,58 dB	- 72,83 dB	- 5,16 dB
P-100 + Br (em 10 kHz)	0,28 dB	77,58 dB	- 50,91 dB	26,95 dB
Super Q 80 (em 100 Hz)	11,41 dB	10,92 dB	- 1,39	20,94 dB
Super Q 80 (em 1 kHz)	27,87 dB	22,43 dB	-	50,30 dB
Super Q 80 (em 10 kHz)	55,86 dB	36,20 dB	-	92,06 dB
Metglas 2714A (em 100 Hz)	14,29 dB	2,35 dB	- 0,69	15,95 dB
Metglas 2714A (em 1 kHz)	34,94 dB	12,03 dB	-	46,97 dB
Metglas 2714A (em 10 kHz)	78,44 dB	24,34 dB	-	102,78 dB
HyMu 800 (em 100 Hz)	17,43 dB	6,13 dB	-	23,56 dB
HyMu 800 (em 1 kHz)	35,58 dB	18,50 dB	-	54,08 dB
HyMu 800 (em 10 kHz)	62,83 dB	33,19 dB	-	96,02 dB

entre onda plana e campo magnético), se observa que não há diferença nos valores de absorção (A), isso indica que a absorção se comporta da mesma forma tanto para ondas planas quanto para campos predominantemente magnéticos. A mudança do fator B é irrisória, tendo uma diferença menor que 1 dB entre as duas tabelas. Já R se torna muito menor para campos magnéticos, um indicativo de que a atenuação por reflexão não deve ser o mecanismo mais confiável de blindagem para campos predominantemente magnéticos.

É importante ressaltar que o impacto da diminuição de R é mais notável para as mais baixas frequências. Para o *Cobre Elox* a eficácia de blindagem em 100 Hz que para ondas planas chega a valores de $S_{100Hz} = 96,23$ dB, para campos magnéticos se torna $S_{100Hz} = 17,38$ dB, uma perda de 81,93% da sua eficácia de blindagem. Isto implica que é mais difícil obter uma blindagem efetiva de campos magnéticos do que ondas planas, principalmente nas mais baixa frequência.

Observa-se também que quanto maior a distância entre fonte de campo magnético e compartimento blindante, mais o campo magnético incidente se parece com uma onda plana. Isto implica que quando a distância r tende a valores altos, a resposta da eficácia de blindagem para campos magnéticos tende a se parecer com a de ondas planas.

Assumindo agora uma distância de $r_2 = 10$ metros da fonte de campo magnético, observa-se os resultados da Figura 26 e da Tabela 11.

Quanto menor se torna a distância entre a fonte de campo magnético e o compartimento blindante, menos efetivo se torna a blindagem. O fator de reflexão R se torna cada vez menor com a aproximação da fonte de interferência ao passo que a absorção não se altera, e materiais com baixa permeabilidade magnética como o *Cobre*

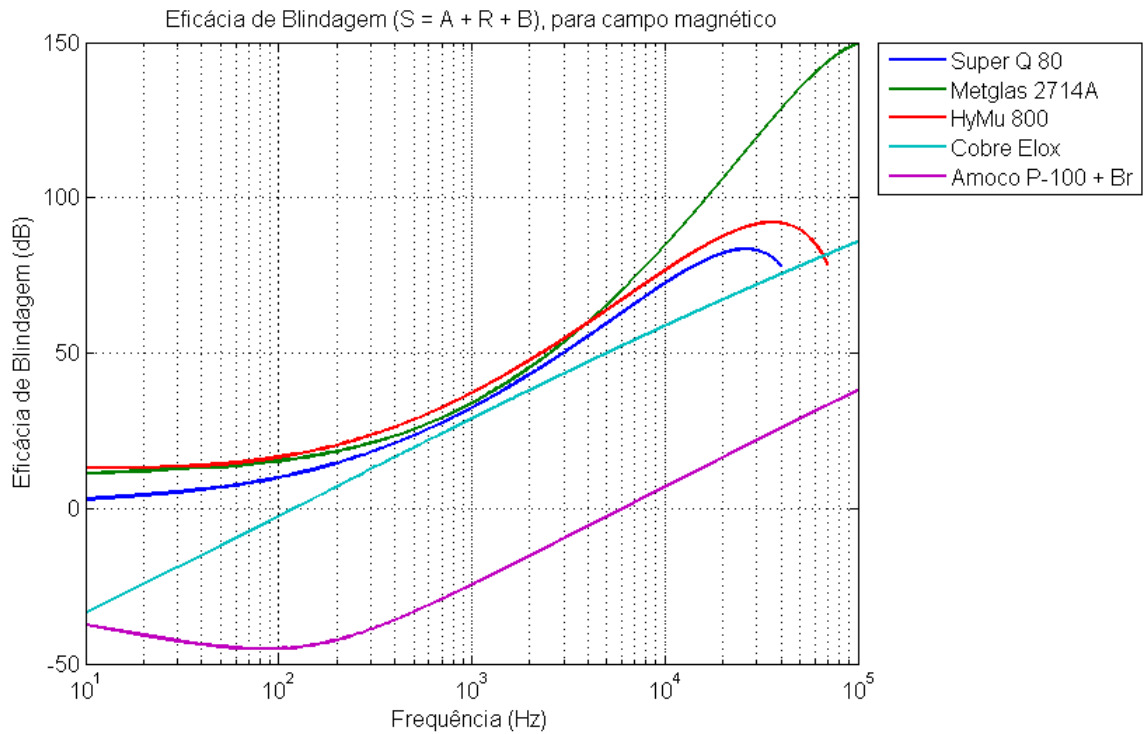


Figura 26 – Eficácia total de blindagem S , para campos magnéticos (com fonte a 10 metros do material blindante).

Tabela 11 – Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos magnéticos. ($r_2 = 10m$ e $t = 0,15mm$).

Material e Frequência	(A)	(R)	(B)	(S)
Cobre Elox (em 100 Hz)	0,20 dB	54,57 dB	- 57,31 dB	- 2,54 dB
Cobre Elox (em 1 kHz)	0,62 dB	64,56 dB	- 36,27 dB	28,91 dB
Cobre Elox (em 10 kHz)	1,97 dB	74,56 dB	- 17,68 dB	58,85 dB
P-100 + Br (em 100 Hz)	0,03 dB	37,62 dB	- 82,82 dB	- 45,17 dB
P-100 + Br (em 1 kHz)	0,09 dB	47,59 dB	- 72,16 dB	- 24,48 dB
P-100 + Br (em 10 kHz)	0,28 dB	57,58 dB	- 50,84 dB	7,02 dB
Super Q 80 (em 100 Hz)	11,41 dB	- 1,24 dB	- 0,29 dB	9,89 dB
Super Q 80 (em 1 kHz)	27,87 dB	4,55 dB	-	32,42 dB
Super Q 80 (em 10 kHz)	55,86 dB	16,63 dB	-	72,49 dB
Metglas 2714A (em 100 Hz)	14,29 dB	1,20 dB	- 0,29 dB	15,21 dB
Metglas 2714A (em 1 kHz)	34,94 dB	- 1,02 dB	-	33,92 dB
Metglas 2714A (em 10 kHz)	78,44 dB	6,05 dB	-	84,49 dB
HyMu 800 (em 100 Hz)	17,43 dB	- 0,91 dB	-	16,52 dB
HyMu 800 (em 1 kHz)	35,38 dB	1,84 dB	-	37,22 dB
HyMu 800 (em 10 kHz)	62,83 dB	13,80 dB	-	76,63 dB

Elox e o *Amoco P-100 bromado* se tornam cada vez menos efetivos na blindagem de campos magnéticos.

4.2.2 Eficácia de blindagem para campos elétricos

Nas mesmas condições em que foram estimados os resultados para eficácia de blindagem para campos magnéticos, será analisado o comportamento dos campos elétricos. Sendo usadas as distâncias hipotéticas da fonte de interferência eletromagnética $r_1 = 100$ m e $r_2 = 10$ m. Mantem-se a espessura de 0,15 mm. Os resultados com fonte de interferência a 100 m podem ser visualizados pela Figura 27 e a Tabela 12.

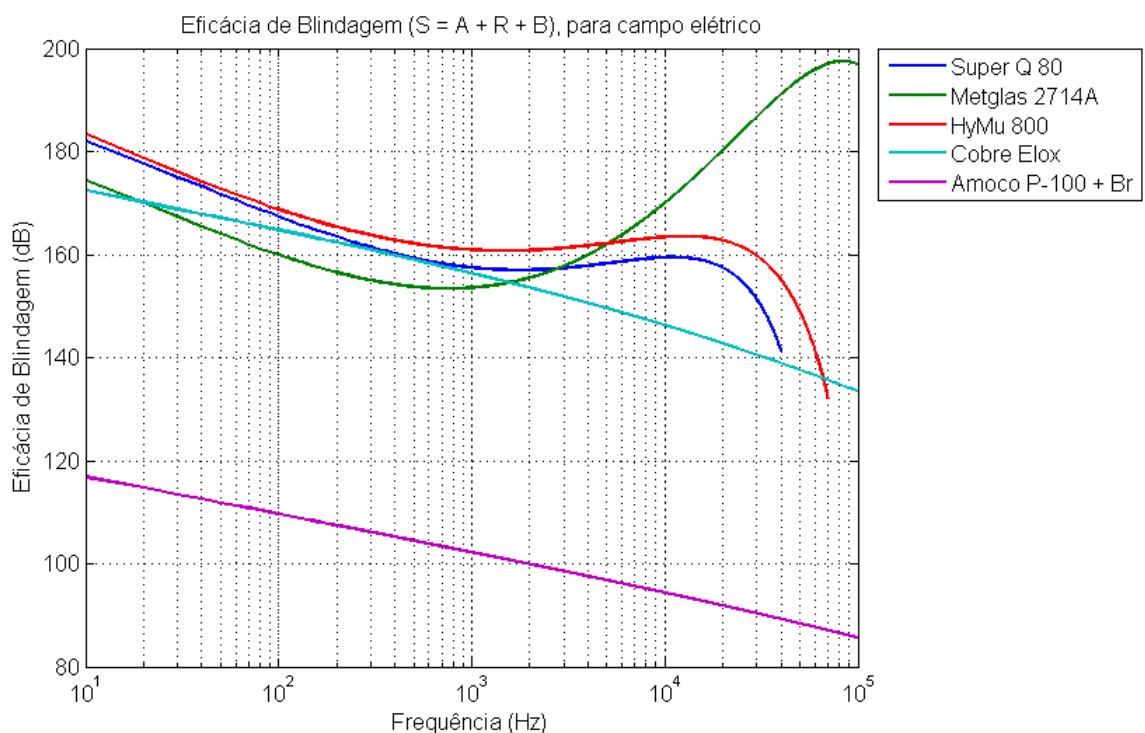


Figura 27 – Eficácia total de blindagem S , para campos elétricos (com fonte a 100 m do material blindante).

Em comparação com a Tabela 7, observa-se que os valores de A e B de campos predominantemente elétrico são os mesmos que os de onda plana, mas há uma mudança notável nos valores de reflexão (R), que se tornam gradativamente maiores para todos os materiais investigados.

Todos os materiais apresentam aumento do fator de reflexão, principalmente para as mais baixas frequências, onde a blindagem dos campos predominantemente elétricos se torna até mais fácil que blindagem de ondas planas. Até o *Amoco P-100 bromado*, que até aqui se mostrava ineficaz para blindagem eletromagnética, atinge valores maiores que 100 dB. Porém esta eficácia de blindagem se torna cada vez menor com o aumento da frequência, fato que também pode ser inferido através da Equação 2.36.

Tabela 12 – Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos elétricos. ($r_1 = 100m$ e $t = 0,15mm$).

Material e Frequência	(A)	(R)	(B)	(S)
Cobre Elox (em 100 Hz)	0,20 dB	222 dB	- 57,46 dB	164,74 dB
Cobre Elox (em 1 kHz)	0,62 dB	192 dB	- 36,29 dB	156,33 dB
Cobre Elox (em 10 kHz)	1,97 dB	162 dB	- 17,68 dB	146,29 dB
P-100 + Br (em 100 Hz)	0,03 dB	205 dB	- 95,40 dB	109,63 dB
P-100 + Br (em 1 kHz)	0,09 dB	175 dB	- 72,89 dB	102,20 dB
P-100 + Br (em 10 kHz)	0,28 dB	145 dB	- 50,92 dB	94,36 dB
Super Q 80 (em 100 Hz)	11,41 dB	157,4 dB	- 1,40 dB	167,41 dB
Super Q 80 (em 1 kHz)	27,87 dB	129,6 dB	-	157,47 dB
Super Q 80 (em 10 kHz)	55,86 dB	103,6 dB	-	159,46 dB
Metglas 2714A (em 100 Hz)	14,29 dB	146,4 dB	- 0,73 dB	159,96 dB
Metglas 2714A (em 1 kHz)	34,94 dB	118,6 dB	-	153,54 dB
Metglas 2714A (em 10 kHz)	78,44 dB	91,59 dB	-	170,03 dB
HyMu 800 (em 100 Hz)	17,43 dB	151,7 dB	-	169,13 dB
HyMu 800 (em 1 kHz)	35,38 dB	125,5 dB	-	160,88 dB
HyMu 800 (em 10 kHz)	62,83 dB	100,6 dB	-	163,43 dB

A seguir, os resultados para eficácia de blindagem de campos elétricos com $r_2 = 10$ m. (Figura 28 e Tabela 13).

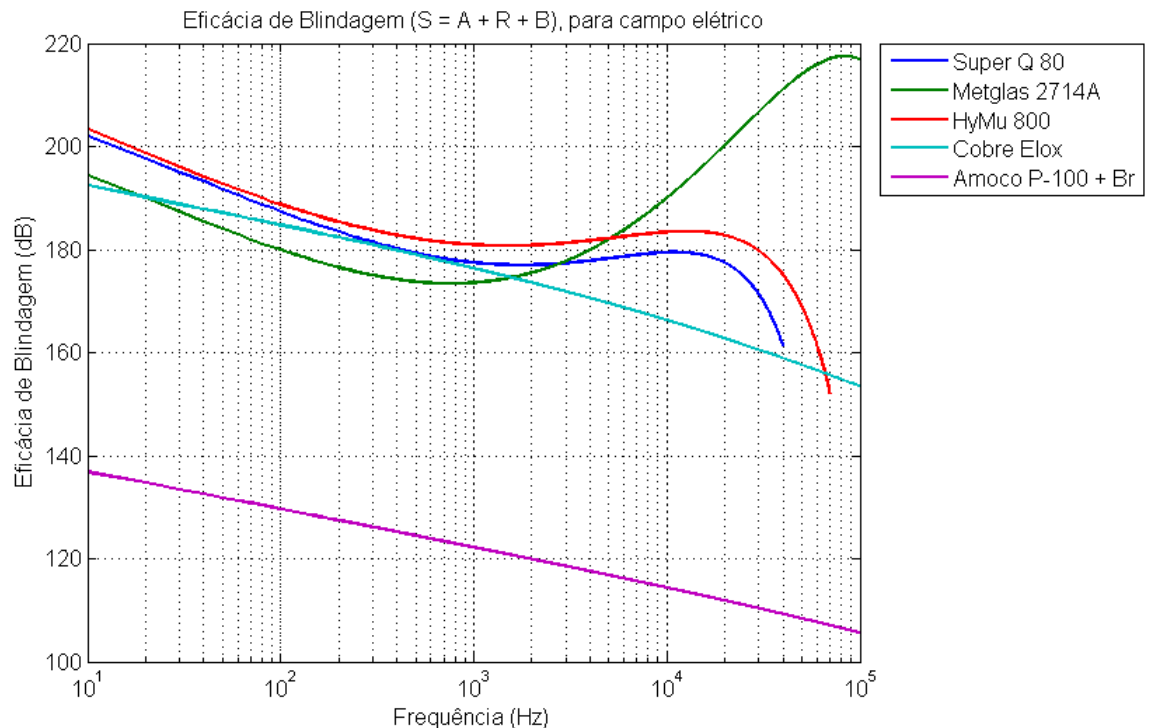


Figura 28 – Eficácia total de blindagem S , para campos elétricos (com fonte a 10 m do material blindante).

A blindagem dos campos magnéticos se tornam mais problemática com a diminuição

Tabela 13 – Valores de absorção (A), reflexão (B), fator de correção (B) e eficácia total de blindagem (S) para campos elétricos. ($r_2 = 10m$ e $t = 0,15mm$).

Material e Frequência	(A)	(R)	(B)	(S)
Cobre Elox (em 100 Hz)	0,20 dB	242 dB	- 57,46 dB	184,74 dB
Cobre Elox (em 1 kHz)	0,62 dB	212,1 dB	- 36,29 dB	176,33 dB
Cobre Elox (em 10 kHz)	1,97 dB	182 dB	- 17,68 dB	166,29 dB
P-100 + Br (em 100 Hz)	0,03 dB	225 dB	- 95,40 dB	129,63 dB
P-100 + Br (em 1 kHz)	0,09 dB	195 dB	- 72,89 dB	122,20 dB
P-100 + Br (em 10 kHz)	0,28 dB	165 dB	- 50,92 dB	114,36 dB
Super Q 80 (em 100 Hz)	11,41 dB	177,4 dB	- 1,40 dB	187,41 dB
Super Q 80 (em 1 kHz)	27,87 dB	149,6 dB	-	177,47 dB
Super Q 80 (em 10 kHz)	55,86 dB	123,6 dB	-	179,46 dB
Metglas 2714A (em 100 Hz)	14,29 dB	166,4 dB	- 0,73 dB	179,96 dB
Metglas 2714A (em 1 kHz)	34,94 dB	138,6 dB	-	173,54 dB
Metglas 2714A (em 10 kHz)	78,44 dB	111,59 dB	-	190,03 dB
HyMu 800 (em 100 Hz)	17,43 dB	171,7 dB	-	189,13 dB
HyMu 800 (em 1 kHz)	35,38 dB	145,5 dB	-	180,88 dB
HyMu 800 (em 10 kHz)	62,83 dB	120,6 dB	-	183,43 dB

da distância r , como visto na Subseção 4.2.1, em contrapartida, a blindagem de campos elétricos se torna cada vez mais efetiva quando r diminui. A reflexão tem um aumento de aproximadamente 20 dB para todos os materiais com a mudança de 100 para 10 metros.

Ao passo que a distância r aumenta, é de se esperar que a blindagem de campos elétricos se torna cada vez menos efetiva, até que em um ponto a eficácia de blindagem se torne parecida com os valores de eficácia para ondas planas. A Figura 29 ajuda na visualização da diferença na blindagem eletromagnética de cada um dos casos citados.

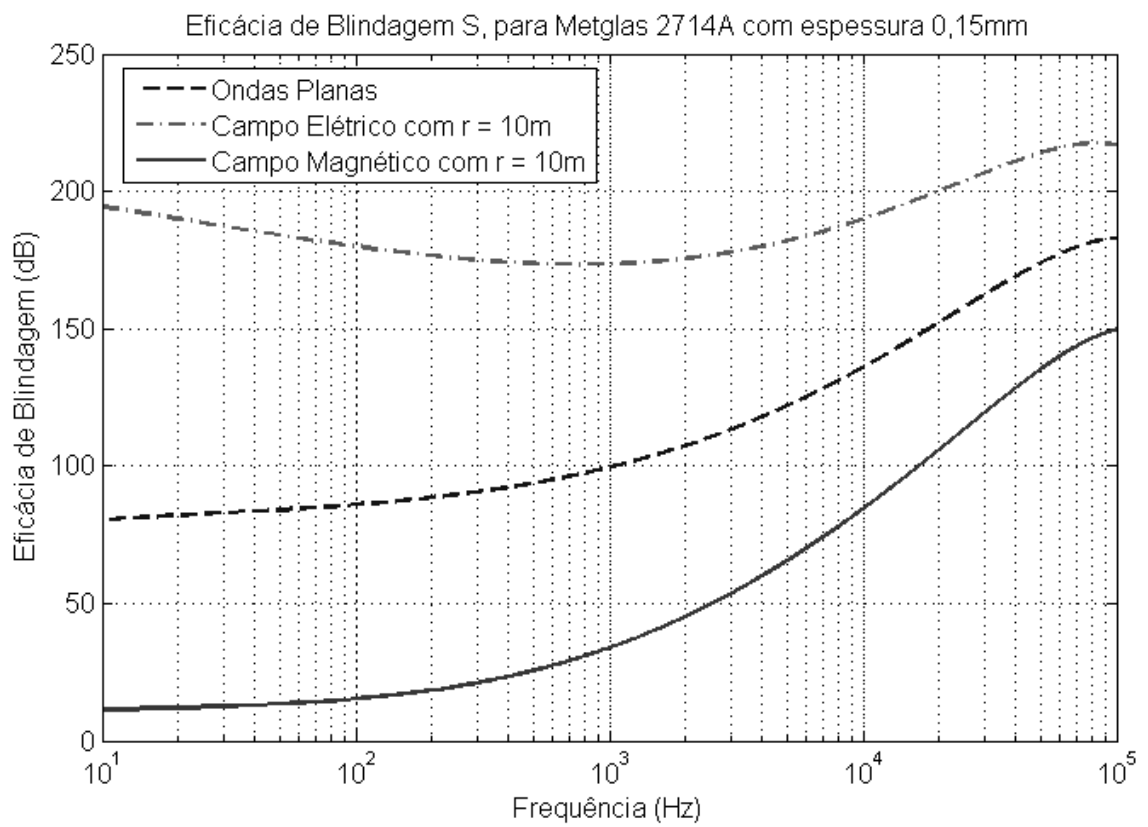


Figura 29 – Eficácia total de blindagem S , do Metglas 2417A com espessura $t = 0,15$ mm para campos elétricos, magnéticos e ondas planas.

5 Conclusões e trabalhos futuros

Baseado na análise computacional e discussões do Capítulo 4, foi possível observar que existe vários fatores que devem ser levados em consideração na blindagem eletromagnética, como por exemplo: tipo de interferência eletromagnética a ser blindada, frequência dessa interferência, espessura dos materiais blindantes, propriedades eletromagnéticas desses materiais e a distância entre o foco de interferência e região a ser blindada. O que está de acordo com OTT (1988).

Campos predominantemente magnéticos são difíceis de serem blindados, principalmente nas baixas frequências e quando a fonte destes campos de interferência estão muito próximas da região a ser blindada, conforme observado na Figura 29. Os materiais magnéticos (*Metglas 2714A*, *Super Q 80* e *HyMu 800*), tem maior aproveitamento do fenômeno de absorção (A) do que os demais materiais investigados, como a espessura de um material é diretamente proporcional à sua absorção, um simples ajuste na espessura pode resultar em um grande aumento na eficácia de blindagem. O uso do *Cobre Elox* e do *Amoco P-100 bromado* não é recomendado para blindagem de campos magnéticos pois apresentam baixa eficácia de blindagem, principalmente nas baixas frequências .

A blindagem dos campos magnéticos de baixa frequência pode ser um desafio. A melhor forma de se obter um valor aceitável de atenuação para estes campos é optando por materiais magnéticos e realizar ajustes de espessura até que se obtenha um nível de atenuação aceitável. Valores na faixa de 100 dB são considerados suficientes.

Campos predominantemente elétricos são fáceis de serem blindados principalmente nas baixas frequências. O principal mecanismo de blindagem para este tipo de campos é a reflexão (R). Como os valores de R não se alteram com a mudança de espessura, até mesmo materiais extremamente finos podem oferecer uma boa atenuação por reflexão. Entretanto, um aumento na espessura do material pode resultar na diminuição do fator B de correção para múltiplas reflexões, logo, um ajuste de espessura não deve ser descartado.

É possível observar através da Equação 2.35 que materiais com altos valores de condutividade e baixos valores de permeabilidade são a escolha provável para a blindagem de campos predominantemente elétricos, como por exemplo o *Cobre Elox* e o *Amoco P-100 bromado*, porém se observa na Subseção 4.2.2 que os materiais ferromagnéticos também oferecem valores aceitáveis de atenuação para campos elétricos. Isto ocorre pois o *Cobre Elox* e o *Amoco P-100 bromado* são os principais materiais afetados pelo fenômeno de múltiplas reflexões (justamente devido à baixa permeabilidade magnética).

Os materiais magnéticos estudados são tão eficazes quanto o *Cobre Elox* na blindagem de campos elétricos. Existem intervalos de frequência onde estes materiais

são até melhores do que o cobre, pois apresentam um baixo valor de B e, em contraste, ainda oferecem um bom índice de absorção (A).

A blindagem das ondas planas apresentam um comportamento intermediário, pois são mais facilmente blindadas do que os campos predominantemente magnéticos, porém são mais difíceis de serem blindadas do que os campos predominantemente elétricos. Tanto o *Cobre Elox* quanto os materiais magnéticos parecem oferecer valores consideráveis de eficácia de blindagem para ondas planas, porém os materiais magnéticos se tornam cada vez mais eficientes com o aumento de suas espessuras. Os materiais magnéticos são unânimes como a melhor opção de blindagem entre 1 kHz e 100 kHz.

Observa-se que o *Metglas 2714A* excede a eficácia de blindagem de todos os outros materiais para frequências maiores que 10 kHz. Isto é devido a estabilidade de sua permeabilidade magnética relativa (μ_r). Os valores de μ_r dos outros materiais cai abruptamente para frequências acima de 10 kHz enquanto a do *Metglas* diminui à uma taxa mais estável (ver Figura 17). Mas em algum momento, o *Metglas* também deve perder suas propriedades magnéticas como os outros materiais ferromagnéticos estudados, devido a limitações físicas. Podemos garantir entretanto que o *Metglas 2714A* com espessura $t > 0,15$ mm é a melhor opção na blindagem eletromagnética para frequências entre 10 kHz e 100 kHz.

Em todas as situações o *Amoco P-100 bromado* parece ter o pior desempenho em questão de eficiência de blindagem, porém é errado subestimar seu potencial. O *Amoco* apresenta uma densidade volumétrica de $1,78 \text{ g/cm}^3$ enquanto o cobre apresenta uma densidade volumétrica de $8,96 \text{ g/cm}^3$ (GAIER e TERRY (1994)). Espera-se portanto que compartimentos de cobre tenham massa cinco vezes maior que aqueles de mesmas dimensões confeccionados em *Amoco P-100*.

Com um quinto da massa do cobre, o *Amoco P-100 bromado* apresenta, em algumas situações, valores de S que podem atingir até 75% da eficácia do *Cobre Elox* na blindagem de campos elétricos. Pode ser considerada a substituição do *Cobre Elox* pelo *Amoco P-100* na blindagem de campos elétricos e, em alguns casos, até mesmo na blindagem de ondas planas, porém é desencorajado o uso deste material na blindagem de campos magnéticos.

5.1 Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros deve ser continuada a análise da eficácia de blindagem, desta vez fazendo uso de instrumentos de aferição para que sejam mensurados em laboratório os campos eletromagnéticos antes e depois da blindagem. Os resultados reais podem ser comparados com aqueles obtidos através dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho. As Equações 2.16 e 2.17 devem ser usadas no levantamento da eficácia de blindagem. Uma vez que mesmo compartimentos blindantes bem estruturados podem se mostrar ineficientes na ausência de aterramento e cabeamento, deve ser proposto um sistema adequado para que seja possível validar os dados obtidos.

Referências

- ANATEL. *Diretrizes para limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variáveis no tempo (Até 300 GHz)*. Brasília, 1999. 54 p.
- ARNOLD, H.; ELMEN, G. Permalloy, a new magnetic material of very high permeability. *The Bell System Technical Journal*, v. 2, n. 3, p. 101–111, 1923.
- BJÖRKLÖF, D. Emc standards and their application. *Computer Standards & Interfaces*, v. 20, n. 6, p. 479–480, 1999.
- CANTWELL, E. Effective grounding - the key to personnel and proper equipment operation. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, v. 3, p. 194–199, 1980.
- CARPENTER. *Carpenter HyMu 800 Technical Datasheet*. 1991. Acesso em: 21 de Junho de 2016. Disponível em: <http://cartech.ides.com/datasheet.aspx?i=103&e=204&c=TechArt&FMT=PRINT>.
- CHUNG, D. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, v. 38, n. 2, p. 279–285, 2000.
- CHUNG, D. Materials for electromagnetic interference shielding. *ASM International*, v. 9, n. 3, p. 350–354, 2000.
- CHUNG, D.; HO, C. T. Bromination of graphitic pitch-based carbon fibers. *Carbon*, v. 28, n. 6, p. 832–837, 1990.
- DORIA, M.; MARINHO, F. *Ondas e Bits*. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.
- DTBTEST. *A Primer on Electromagnetic Shielding*. 2006. Acesso em: 09 de Dezembro de 2014. Disponível em: <http://www.dtbtest.com/electromagnetic-shielding-primer.aspx>.
- FILHO, E.; ALMEIDA, A. Estimativa de parâmetros e determinação de características de desempenho de motores de indução trifásicos de rotor em gaiola. *SBA Controle & Automação*, v. 8, n. 11, p. 37–42, 1997.
- FRENZEL, L. *Fundamentos de Comunicação Eletrônica - Volume 2*. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2013.
- GAIER, J. R. *Intercalated Graphite Fiber Composites as EMI Shields in Aerospace Structures*. Cleveland, 1990. 34 p.
- GAIER, J. R.; TERRY, J. *EMI Shields Made From Intercalated Graphite Composites*. New Jersey, 1994. 16 p.
- GUAN, D. Study on shielding functionally gradient materials with low reflection loss and high absorption loss for electromagnetic wave. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, v. 2, p. 1259–1262, 2003.

- HAYT, W. *Engineering electromagnetics*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- HOLLAND, C. *Hysteresis loss of supermalloy at different temperatures*. 74 p. Dissertação (M.S. in Physics) — Missouri School of Mines and Metallurgy, 1948.
- ICNIRP. *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100kHz)*. Gothenburg, 2010. 20 p.
- IEA. *Key World Energy Statistics*. Paris, 2014. 82 p.
- ISHIMARU, A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- JILES, D. C. Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials. *Journal of Applied Physics*, v. 76, n. 10, p. 5849–5855, 1994.
- KESHTKAR, A.; MAGHOUL, A. Design considerations to affect on shielding effectiveness for conductive enclosure. *IEICE Electronic Express*, v. 8, n. 13, p. 1047–1055, 2011.
- KLINKERBUSCH, L. On the shielding effectiveness of enclosures. *IEEE Transactions on EMC*, v. 47, n. 3, p. 589–601, 2005.
- KRAUSS, J. D. *Electromagnetics*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1992.
- LEARNEMC. *Practical Shielding*. 2014. Acesso em: 23 de Novembro de 2014. Disponível em: http://www.learnemc.com/tutorials/Shielding02/Practical_Shielding.html.
- MAGLAB. *Faraday Cage*. 2010. Acesso em: 09 de Dezembro de 2014. Disponível em: <https://nationalmaglab.org/about/around-the-lab/what-the/faraday-cage>.
- MAGNETIC METALS. *Super Q 80 Laminations*. Camden: Magnetic Metals, 2003.
- MCDOWELL, A. *Decomposition of Shielding Effectiveness into Absorption and Reflection Components*. Clemson University, 2014. 22 p.
- MCLYMAN, W. *Transformer and Inductor Design Handbook*. 3. ed. New York: CRC Press, 2004.
- METGLASS. *Magnetic Alloy 2714A (cobalt-based)*. 2011. Acesso em: 14 de Junho de 2016. Disponível em: <http://www.metglas.com/assets/pdf/2714a.pdf>.
- MIYAZAKI, Y. Electromagnetic absorption and shield properties of lossy composite multilayers. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, v. 3, p. 370–374, 1990.
- NTI. *Protecting Video Signals from EMI When Using CATx Extenders*. 2011. Acesso em: 09 de Dezembro de 2014. Disponível em: <http://www.networktechinc.com/blog/protecting-video-signals-from-emi-when-using-catx-extenders/133/>.
- OTT, H. *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- PAUL, C. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2006.

- RAJPUT, R. *Power System Engineering*. 1. ed. Patiala: Laxmi Publications Pvt Limited, 2006.
- RIBEIRO, J. *Propagação das ondas eletromagnéticas: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2004.
- ROZANOV, K.; KOLEDINTSEVA, M. Limitations on high-frequency permeability of magnetic materials. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, p. 551–556, 2013.
- RYBAK, T.; STEFFKA, M. *Automotive Electromagnetic Compatibility (EMC)*. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- SANCHES, D. *Tópicos Especiais em Eletrônica - EMI*. 3. ed. [S.l.]: Clube dos Autores, 2010.
- SCHULZ, R. Shielding theory and practice. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, v. 30, n. 3, p. 187–201, 1988.
- SEN, P. *Principles of Electrical Machines & Power Electronics*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- SHOCKMETAIS. *Propriedades Físicas do Cobre*. 2014. Acesso em: 14 de Junho de 2016. Disponível em: <http://www.shockmetais.com.br/produtos>.
- SINDURA, G. Control of electromagnetic waves through electromagnetic shielding. *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, v. 1, p. 448–452, 2011.
- STEVENSON, A. *Oxford Dictionary of English*. 3. ed. Oxford: OUP Oxford, 2010.
- TOSAKA, T. Estimation of electric parameters for thin shielding sheets. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, v. 1, p. 97–101, 2005.
- WENTWORTH, S. *Eletromagnetismo aplicado: Abordagem antecipada das linhas de transmissão*. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- WETZEL, J. *The WikiPremed MCAT Course*. 2014. Acesso em: 23 de Novembro de 2014. Disponível em: <http://www.wikipremed.com/>.
- WIESERMAN, W. R.; SCHWARZE, G. E.; NIEDRA, J. *High Frequency, High Temperature Specific Core Loss and Dynamic B-H Hysteresis Loop Characteristics of Soft Magnetic Alloys*. Reno, 1990. 10 p.

ANEXO A - Algoritmo de aproximação para permeabilidade

```
1 %-----
2 % Algoritmo para a aproximação matemática de valores de
3 % permeabilidade magnética para o Super Q 80,
4 % Metglass 2714A e HyMu 800.
5 %
6 % Phillipe Oliveira Menezes - UFOP - 2016
7 %-----
8
9 % Determinando função de  $\mu_r(f)$ 
10 % para o Super Q 80 à partir da folha de dados.
11
12 clc;
13 clear all;
14
15 % Informações obtidas à partir da folha de dados.
16 f = [ 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300,...
17 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000,...
18 4000, 5000, 6000];
19 x = [ 130000,120000,110000,108000,100000,98000,96000,92000,...
20 88000,80000,75000,72000,68000,66000,65000,62000,60800,...
21 50000,41000,38000,31000,28000];
22
23 % Função de aproximação
24 p = fit(f',x','power2');
25 f2 = 10:10:40000;
26 % Resultados à partir de 40kHz foram julgados não condizentes
27 % com a realidade do problema físico.
28 % (Erro da aproximação cresce gradativamente à medida
29 % que a frequência progride).
30
31 % x2 -> Função aproximada calculada à partir dos coeficientes a, b e c
32 % obtidos pela função 'fit'
33 x2 = (p.a) * f2 .^ (p.b) + (p.c);
34
35 % Dados e Aproximação
36 figure(1);
37 plot(f2,x2,f,x,'o');
38 xlabel('Frequência (Hz)');
39 ylabel('\mu_{r} (Permeabilidade relativa)');
```

```

40
41 % Função aproximada em escala logarítmica
42 figure(2);
43 loglog(f2,x2);
44 legend('\mu_{r} Super Q 80');
45 xlabel('Frequência (Hz)');
46 ylabel('\mu_{r} (Permeabilidade relativa)');
47
48 %-----%
49 % Determinando função de \mu_{r}(f)
50 % para o Metglass 2714A à partir da folha de dados.
51
52 % Informações obtidas à partir da folha de dados.
53 f3 = [50,60,70,80,90,100,200,300,400,500,600,700,800,900,...
54 1000,2000,3000,4000,5000,6000,7000,8000,9000,10000,20000,...
55 30000,40000,50000,60000,70000,80000,90000,100000];
56 x3 = [500000,490000,480000,460000,440000,420000,390000,...
57 345000,325000,300000,295000,290000,285000,280000,255000,...
58 215000,195000,180000,170000,160000,150000,145000,135000,...
59 130000,95000,75000,67000,62000,55000,50000,49000,42000,38000];
60
61 % Função de aproximação
62 p = fit(f3',x3', 'power2');
63 f4 = 10:10:100000;
64
65 % x4 -> Função aproximada calculada à partir dos coeficientes a, b e c
66 % obtidos pela função 'fit'
67 x4 = (p.a) * f4 .^ (p.b) + (p.c);
68
69 % Dados e Aproximação
70 figure(3);
71 plot(f4,x4,f3,x3,'o');
72 xlabel('Frequência (Hz)');
73 ylabel('\mu_{r} (Permeabilidade relativa)');
74
75 % Função aproximada em escala logarítmica
76 figure(4);
77 loglog(f4,x4);
78 legend('\mu_r Metglass 2714A');
79 xlabel('Frequência (Hz)');
80 ylabel('\mu_r (Permeabilidade relativa)');
81
82 %-----%
83 % Determinando função de \mu_{r}(f)
84 % para o Mag-Stop à partir da folha de dados.

```



```

85
86
87 % Informações obtidas à partir da folha de dados.
88 f5 = [70,300,900,2000,5000,10000,20000,30000,40000,50000];
89 x5 = [260000,190000,135000,90000,52000,32000,...
90 20000,16500,12000,10000];
91
92 % Interpolação dos dados (método diferente do utilizado anteriormente)
93 f6 = 70:10:50000;
94 x6 = interp1(f5,x5,f6);
95
96 p = fit(f6',x6', 'power2');
97
98 f7 = 10:10:70000;
99 x7 = (p.a)*f7.^(p.b)+(p.c);
100
101 % Dados e Aproximação
102 figure(5);
103 plot(f7,x7,f5,x5,'o');
104 xlabel('Frequência (Hz)');
105 ylabel('\mu_{r} (Permeabilidade relativa)');
106
107 % Função aproximada em escala logarítmica
108 figure(6);
109 loglog(f7,x7);
110 legend('\mu_r Mag-Stop');
111 xlabel('Frequência (Hz)');
112 ylabel('\mu_r (Permeabilidade relativa)');
113
114 figure(7);
115 loglog(f2,x2,'-.',f4,x4,f7,x7,'--')
116 grid on
117 legend('\mu_r Super Q 80', '\mu_r Metglass 2714A', '\mu_r HyMu 800');
118 xlabel('Frequência (Hz)');
119 ylabel('\mu_r (Permeabilidade relativa)');
120
121 % Salvando dados calculados dos materiais em um arquivo data.mat
122 data.mat1 = x2;
123 data.freq1 = f2;
124 data.mat2 = x4;
125 data.freq2 = f4;
126 data.mat3 = x7;
127 data.freq3 = f7;
128 save('data.mat', '-struct', 'data');

```

ANEXO B - Algoritmo para o cálculo de eficácia de blindagem (S)

```
1 %-----
2 % Algoritmo para o cálculo da eficácia de blindagem
3 % para os seguintes materiais:Super Q 80, Metglass 2714A,
4 % HyMu 800, Cobre Elox e Amoco P-100 + Br.
5 %
6 % Phillipe Oliveira Menezes - UFOP - 2015
7 %-----
8 clear all;
9 clc;
10 % Frequências de varredura
11 Freq=10:10:100000; %Frequências usadas nos gráficos
12 load('data.mat'); % Carregando dados dos materiais de data.mat
13 % gerados por mat01.m
14 % Esta função carrega:
15 % mat1: Permeabilidade do Super Q 80
16 % freq1: "range"de frequências de mat1
17 % mat2: Permeabilidade do Merglass 2714A
18 % freq2: "range"de frequências de mat2
19 % mat3: Permeabilidade do HyMu 800
20 % freq2: "range"de frequências de mat3
21
22 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
23 % Perdas por absorção para campos elétrico e magnético
24 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
25 K1 = 131.4; %Constante =131.4 se l é em metros;
26 %3.34 se l é em polegadas
27 l = 0.0002; %Espessura em metros
28 % Parâmetros do Super Q 80
29 M1_ur = mat1; %Permeabilidade
30 M1_gr = 0.034; %Condutividade
31 % Parâmetros do Metglas 2714A
32 M2_ur = mat2; %Permeabilidade
33 M2_gr = 0.012; %Condutividade
34 % Parâmetros do HyMu 800
35 M3_ur = mat3; %Permeabilidade
36 M3_gr = 0.027; %Condutividade
37 % Parâmetros do Cobre Elox
38 M4_ur = 1; %Permeabilidade
39 M4_gr = 0.999; %Condutividade
```

```

40 % Parâmetros do Amoco P-100 + Br
41 M5_ur = 1; %Permeabilidade
42 M5_gr = 0.020; %Condutividade
43
44 % Equação de perda por absorção
45 A_M1 = K1 * l * sqrt((freq1.*M1_ur) * M1_gr);
46 A_M2 = K1 * l * sqrt((freq2.*M2_ur) * M2_gr);
47 A_M3 = K1 * l * sqrt((freq3.*M3_ur) * M3_gr);
48 A_M4 = K1 * l * sqrt((Freq.*M4_ur) * M4_gr);
49 A_M5 = K1 * l * sqrt((Freq.*M5_ur) * M5_gr);
50 % Grafico de atenuação por Absorção (A)
51 figure (1);
52 set(gca,'fontsize',12);
53 loglog(freq1, A_M1, freq2, A_M2, freq3, A_M3, Freq,...
54 A_M4, Freq, A_M5,'LineWidth',2);
55 grid on;
56 title('Atenuação por Absorção - A');
57 xlabel('Frequência (Hz)');
58 ylabel('Atenuação por Absorção (dB)');
59 legend('Super Q 80','Metglas 2714A','HyMu 800',...
60 'Cobre Elox','Amoco P-100+Br', -1);
61
62 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
63 % Atenuação por reflexão
64 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
65 C1 = 0.0117; %Coeficiente = 0.0117 se r for em metros
66 % = 0.462 se r for polegadas
67 C2 = 5.35; %Coeficiente = 5.35 se r for em metros
68 % = 0.136 se r for polegadas
69 C3 = 322;
70 r = 10; %Distancia da fonte de EM à blindagem em metros
71
72 % Atenuação por reflexão para o campo magnético
73 Rm_M1 = 20 * log10((C1 ./ (r .* sqrt(...
74 (freq1 .* M1_gr) ./ M1_ur)))+(C2 ...
75 .* (r .* sqrt((freq1 .* M1_gr) ./ M1_ur))) + 0.354);
76 Rm_M2 = 20 * log10((C1 ./ (r .* sqrt(...
77 (freq2 .* M2_gr) ./ M2_ur)))+(C2 ...
78 .* (r .* sqrt((freq2 .* M2_gr) ./ M2_ur))) + 0.354);
79 Rm_M3 = 20 * log10((C1 ./ (r .* sqrt(...
80 (freq3 .* M3_gr) ./ M3_ur)))+(C2 ...
81 .* (r .* sqrt((freq3 .* M3_gr) ./ M3_ur))) + 0.354);
82 Rm_M4 = 20 * log10((C1 ./ (r .* sqrt(...
83 (Freq .* M4_gr) ./ M4_ur)))+(C2 ...
84 .* (r .* sqrt((Freq .* M4_gr) ./ M4_ur))) + 0.354);

```

```

85 Rm_M5 = 20 * log10((C1 ./ (r .* sqrt(...
86 (Freq .* M5_gr) ./ M5_ur)))+(C2 ...
87 .* (r .* sqrt((Freq .* M5_gr) ./ M5_ur))) + 0.354);
88
89 % Gráficos para Atenuação por reflexão para o campo magnético
90 figure(2);
91 set(gca,'fontsize',12);
92 semilogx(freq1, Rm_M1, freq2, Rm_M2, freq3, ...
93 Rm_M3, Freq, Rm_M4, Freq, Rm_M5, 'LineWidth',2);
94 grid on;
95 title('Atenuação por Reflexão R - para Campos Magnéticos');
96 xlabel('Frequência (Hz)');
97 ylabel('Atenuação por Reflexão (dB)');
98 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', ...
99 'HyMu 800', 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
100 % Atenuação por reflexão para campo elétrico
101 Re_M1 = C3 - (10 * log10((M1_ur.*freq1.^3 * r.^2) / M1_gr));
102 Re_M2 = C3 - (10 * log10((M2_ur.*freq2.^3 * r.^2) / M2_gr));
103 Re_M3 = C3 - (10 * log10((M3_ur.*freq3.^3 * r.^2) / M3_gr));
104 Re_M4 = C3 - (10 * log10((M4_ur.*Freq.^3 * r.^2) / M4_gr));
105 Re_M5 = C3 - (10 * log10((M5_ur.*Freq.^3 * r.^2) / M5_gr));
106 % Gráficos para Atenuação por reflexão para o campo elétrico
107 figure (3);
108 set(gca,'fontsize',12);
109 semilogx(freq1, Re_M1, freq2, Re_M2, freq3,...
110 Re_M3, Freq, Re_M4, Freq, Re_M5, 'LineWidth',2);
111 grid on;
112 title('Atenuação por Reflexão R - Campos Elétricos');
113 xlabel('Frequência (Hz)');
114 ylabel('Atenuação por Reflexão (dB)');
115 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800', 'Cobre Elox',...
116 'Amoco P-100 + Br', -1);
117 % Atenuação por reflexão para ondas planas
118 Rp_M1 = 168 - 20 * log10(sqrt((freq1.*M1_ur) / M1_gr));
119 Rp_M2 = 168 - 20 * log10(sqrt((freq2.*M2_ur) / M2_gr));
120 Rp_M3 = 168 - 20 * log10(sqrt((freq3.*M3_ur) / M3_gr));
121 Rp_M4 = 168 - 20 * log10(sqrt((Freq.*M4_ur) / M4_gr));
122 Rp_M5 = 168 - 20 * log10(sqrt((Freq.*M5_ur) / M5_gr));
123 % Gráfico Atenuação por reflexão para ondas planas
124 figure(4);
125 set(gca,'fontsize',12);
126 semilogx(freq1, Rp_M1, freq2, Rp_M2, freq3,...
127 Rp_M3, Freq, Rp_M4, Freq, Rp_M5, 'LineWidth',2);
128 grid on;
129 title('Atenuação por Reflexão - R para ondas planas');

```

```

130 xlabel('Frequência (Hz)');
131 ylabel('Atenuação por Reflexão (dB)');
132 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800', 'Cobre Elox',...
133 'Amoco P-100 + Br', -1);
134
135
136 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
137 % Atenuação total para campos magnéticos
138 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
139 TotalM_M1 = A_M1 + Rm_M1;
140 TotalM_M2 = A_M2 + Rm_M2;
141 TotalM_M3 = A_M3 + Rm_M3;
142 TotalM_M4 = A_M4 + Rm_M4;
143 TotalM_M5 = A_M5 + Rm_M5;
144
145 % Gráfico da Atenuação total para campos magnéticos
146 figure (5);
147 set(gca,'fontsize',12);
148 semilogx(freq1, TotalM_M1, freq2, TotalM_M2,...
149 freq3, TotalM_M3, Freq, TotalM_M4, Freq,...
150 TotalM_M5,'LineWidth',2);
151 grid on;
152 title('Atenuação total para campos magnéticos (A + R)');
153 xlabel('Frequência (Hz)');
154 ylabel('Atenuação total (dB)');
155 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800',...
156 'Cobre Elox','Amoco P-100 + Br', -1);
157
158 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
159 % Atenuação total para campos elétricos
160 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
161 TotalE_M1 = A_M1 + Re_M1;
162 TotalE_M2 = A_M2 + Re_M2;
163 TotalE_M3 = A_M3 + Re_M3;
164 TotalE_M4 = A_M4 + Re_M4;
165 TotalE_M5 = A_M5 + Re_M5;
166 % Gráfico das perdas totais para campos elétricos
167
168 figure (6);
169 set(gca,'fontsize',12);
170 semilogx(freq1, TotalE_M1, freq2, TotalE_M2,...
171 freq3, TotalE_M3, Freq, TotalE_M4, Freq,...
172 TotalE_M5,'LineWidth',2);
173 grid on;
174 title('Atenuação total para campos elétricos (A + R)');

```

```

175 xlabel('Frequência (Hz)');
176 ylabel('Atenuação total (dB)');
177 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800', ...
178 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
179
180 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
181 %Atenuação total para onda plana
182 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
183 TotalP_M1 = A_M1 + Rp_M1;
184 TotalP_M2 = A_M2 + Rp_M2;
185 TotalP_M3 = A_M3 + Rp_M3;
186 TotalP_M4 = A_M4 + Rp_M4;
187 TotalP_M5 = A_M5 + Rp_M5;
188 % Gráfico da Atenuação total para onda plana
189 figure(7);
190 set(gca, 'fontsize', 12);
191 semilogx(freq1, TotalP_M1, freq2, TotalP_M2, ...
192 freq3, TotalP_M3, Freq, TotalP_M4, Freq, ...
193 TotalP_M5, 'LineWidth', 2);
194 grid on;
195 title('Atenuação total para ondas planas (A + R)');
196 xlabel('Frequência (Hz)');
197 ylabel('Atenuação Total (dB)');
198 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800', ...
199 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
200
201 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
202 % Fator de correção de multiplas reflexões
203 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
204 % Parametro m para r em metros para campo magnético
205 mM_M1 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M1_ur ./ (freq1 .* M1_gr));
206 mM_M2 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M2_ur ./ (freq2 .* M2_gr));
207 mM_M3 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M3_ur ./ (freq3 .* M3_gr));
208 mM_M4 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M4_ur ./ (Freq .* M4_gr));
209 mM_M5 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M5_ur ./ (Freq .* M5_gr));
210 % Coeficiente de reflexão para campo magnético
211 GammaM_M1 = 4 .* (((1 - (mM_M1.^2)).^2 - (2 .* (mM_M1.^2))...
212 + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M1 .* (1 - (mM_M1.^2)))) ...
213 ./(((1 + (sqrt(2) .* mM_M1)).^2 + 1).^2));
214 GammaM_M2 = 4 .* (((1 - (mM_M2.^2)).^2 - (2 .* (mM_M2.^2))...
215 + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M2 .* (1 - (mM_M2.^2)))) ...
216 ./(((1 + (sqrt(2) .* mM_M2)).^2 + 1).^2));
217 GammaM_M3 = 4 .* (((1 - (mM_M3.^2)).^2 - (2 .* (mM_M3.^2))...
218 + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M3 .* (1 - (mM_M3.^2)))) ...
219 ./(((1 + (sqrt(2) .* mM_M3)).^2 + 1).^2));

```

```

220 GammaM_M4 = 4 .* (((1 - (mM_M4.^2)).^2 - (2 .* (mM_M4.^2))...
221 + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M4 .* (1 - (mM_M4.^2)))) ...
222 ./(((1 + (sqrt(2) .* mM_M4)).^2 + 1).^2));
223 GammaM_M5 = 4 .* (((1 - (mM_M5.^2)).^2 - (2 .* (mM_M5.^2))...
224 + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M5 .* (1 - (mM_M5.^2)))) ...
225 ./(((1 + (sqrt(2) .* mM_M5)).^2 + 1).^2));
226 % Fator de correção de Multiplas reflexões para campo magnético
227 CM_M1 = 20 .* log(1 - (GammaM_M1 .* (10.^(-A_M1 ./ 10))...
228 .* (cos(0.23 .* A_M1) - (1i .* sin(0.23 .* A_M1))));
229 CM_M2 = 20 .* log(1 - (GammaM_M2 .* (10.^(-A_M2 ./ 10))...
230 .* (cos(0.23 .* A_M2) - (1i .* sin(0.23 .* A_M2))));
231 CM_M3 = 20 .* log(1 - (GammaM_M3 .* (10.^(-A_M3 ./ 10))...
232 .* (cos(0.23 .* A_M3) - (1i .* sin(0.23 .* A_M3))));
233 CM_M4 = 20 .* log(1 - (GammaM_M4 .* (10.^(-A_M4 ./ 10))...
234 .* (cos(0.23 .* A_M4) - (1i .* sin(0.23 .* A_M4))));
235 CM_M5 = 20 .* log(1 - (GammaM_M5 .* (10.^(-A_M5 ./ 10))...
236 .* (cos(0.23 .* A_M5) - (1i .* sin(0.23 .* A_M5))));
237 % Magnitude de fator de correção para campo magnético
238 magCM_M1 = abs(CM_M1);
239 magCM_M2 = abs(CM_M2);
240 magCM_M3 = abs(CM_M3);
241 magCM_M4 = abs(CM_M4);
242 magCM_M5 = abs(CM_M5);
243 % Gráfico para o fator de correção (B) para campo magnético
244 figure (8);
245 set(gca,'fontsize',12);
246 semilogx(freq1, magCM_M1, freq2, magCM_M2, freq3, magCM_M3,...
247 Freq, magCM_M4, Freq, magCM_M5,'LineWidth',2);
248 grid on;
249 title...
250 ('Fator de correção (B), para campos magnéticos');
251 xlabel('Frequência (Hz)');
252 ylabel('Fator de correção (dB)');
253 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800', 'Cobre Elox',...
254 'Amoco P-100 + Br', -1);
255 %-----
256 % Parametro m para r em metros para campo elétrico
257 mE_M1 = 0.205e-16 * r * sqrt((M1_ur.*freq1.^3) / M1_gr);
258 mE_M2 = 0.205e-16 * r * sqrt((M2_ur.*freq2.^3) / M2_gr);
259 mE_M3 = 0.205e-16 * r * sqrt((M3_ur.*freq3.^3) / M3_gr);
260 mE_M4 = 0.205e-16 * r * sqrt((M4_ur.*Freq.^3) / M4_gr);
261 mE_M5 = 0.205e-16 * r * sqrt((M5_ur.*Freq.^3) / M5_gr);
262 % Coeficiente de reflexão para campo elétrico
263 GammaE_M1 = 4 .* (((1 - (mE_M1.^2)).^2 - (2 .* ...
264 (mE_M1.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M1...

```

```

265 .* (1 - (mE_M1.^2))) ./(((1 - (sqrt(2) .* mE_M1)).^2 + 1).^2));
266 GammaE_M2 = 4 .* (((1 - (mE_M2.^2)).^2 - (2 .* ...
267 (mE_M2.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M2...
268 .* (1 - (mE_M2.^2)))) ./(((1 - (sqrt(2) .* mE_M2)).^2 + 1).^2));
269 GammaE_M3 = 4 .* (((1 - (mE_M3.^2)).^2 - (2 .* ...
270 (mE_M3.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M3...
271 .* (1 - (mE_M3.^2)))) ./(((1 - (sqrt(2) .* mE_M3)).^2 + 1).^2));
272 GammaE_M4 = 4 .* (((1 - (mE_M4.^2)).^2 - (2 .* ...
273 (mE_M4.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M4...
274 .* (1 - (mE_M4.^2)))) ./(((1 - (sqrt(2) .* mE_M4)).^2 + 1).^2));
275 GammaE_M5 = 4 .* (((1 - (mE_M5.^2)).^2 - (2 .* ...
276 (mE_M5.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M5...
277 .* (1 - (mE_M5.^2)))) ./(((1 - (sqrt(2) .* mE_M5)).^2 + 1).^2));
278 % Fator de correção de multiplas reflexões para campo elétrico
279 CE_M1 = 20 .* log(1 - (GammaE_M1 .* (10.^(-A_M1 ./ 10))...
280 .* (cos(0.23 .* A_M1) - (1i .* sin(0.23 .* A_M1))));
281 CE_M2 = 20 .* log(1 - (GammaE_M2 .* (10.^(-A_M2 ./ 10))...
282 .* (cos(0.23 .* A_M2) - (1i .* sin(0.23 .* A_M2))));
283 CE_M3 = 20 .* log(1 - (GammaE_M3 .* (10.^(-A_M3 ./ 10))...
284 .* (cos(0.23 .* A_M3) - (1i .* sin(0.23 .* A_M3))));
285 CE_M4 = 20 .* log(1 - (GammaE_M4 .* (10.^(-A_M4 ./ 10))...
286 .* (cos(0.23 .* A_M4) - (1i .* sin(0.23 .* A_M4))));
287 CE_M5 = 20 .* log(1 - (GammaE_M5 .* (10.^(-A_M5 ./ 10))...
288 .* (cos(0.23 .* A_M5) - (1i .* sin(0.23 .* A_M5))));
289 % Magnitude de fator de correção para campo elétrico
290 magCE_M1 = abs(CE_M1);
291 magCE_M2 = abs(CE_M2);
292 magCE_M3 = abs(CE_M3);
293 magCE_M4 = abs(CE_M4);
294 magCE_M5 = abs(CE_M5);
295 % Gráfico para o fator de correção (B) para campo elétrico
296 figure(9);
297 set(gca,'fontsize',12);
298 semilogx(freq1, magCE_M1, freq2, magCE_M2, freq3, ...
299 magCE_M3, Freq, magCE_M4, Freq, magCE_M5,'LineWidth',2);
300 grid on;
301 title...
302 ('Fator de correção (B), para campos elétricos');
303 xlabel('Frequência (Hz)');
304 ylabel('Fator de correção (dB)');
305 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800',...
306 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
307 %-----
308 % Parametro m para r em metros para onda plana
309 mP_M1 = 9.77e-10 .* sqrt((freq1 .* M1_ur) / M1_gr);

```



```

310 mP_M2 = 9.77e-10 .* sqrt((freq2 .* M2_ur) / M2_gr);
311 mP_M3 = 9.77e-10 .* sqrt((freq3 .* M3_ur) / M3_gr);
312 mP_M4 = 9.77e-10 .* sqrt((Freq .* M4_ur) / M4_gr);
313 mP_M5 = 9.77e-10 .* sqrt((Freq .* M5_ur) / M5_gr);
314 % Coeficiente de reflexão para onda plana
315 GammaP_M1 = 4 .* (((1 - (mP_M1.^2)).^2 - (2 ...
316 .* (mP_M1.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .*...
317 mP_M1 .* (1 - (mP_M1.^2)))) ./(((1 + ...
318 (sqrt(2) .* mP_M1)).^2 + 1).^2));
319 GammaP_M2 = 4 .* (((1 - (mP_M2.^2)).^2 - (2 ...
320 .* (mP_M2.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .*...
321 mP_M2 .* (1 - (mP_M2.^2)))) ./(((1 + ...
322 (sqrt(2) .* mP_M2)).^2 + 1).^2));
323 GammaP_M3 = 4 .* (((1 - (mP_M3.^2)).^2 - (2 ...
324 .* (mP_M3.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .*...
325 mP_M3 .* (1 - (mP_M3.^2)))) ./(((1 + ...
326 (sqrt(2) .* mP_M3)).^2 + 1).^2));
327 GammaP_M4 = 4 .* (((1 - (mP_M4.^2)).^2 - (2 ...
328 .* (mP_M4.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .*...
329 mP_M4 .* (1 - (mP_M4.^2)))) ./(((1 + ...
330 (sqrt(2) .* mP_M4)).^2 + 1).^2));
331 GammaP_M5 = 4 .* (((1 - (mP_M5.^2)).^2 - (2 ...
332 .* (mP_M5.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .*...
333 mP_M5 .* (1 - (mP_M5.^2)))) ./(((1 + ...
334 (sqrt(2) .* mP_M5)).^2 + 1).^2));
335 % Fator de correção de multiplas reflexões para onda plana
336 CP_M1 = 20 .* log(1 - (GammaP_M1 .* ...
337 (10.^(-A_M1 ./ 10)).*(cos(0.23 ...
338 .* A_M1) - (1i .* sin(0.23 .* A_M1)))));
339 CP_M2 = 20 .* log(1 - (GammaP_M2 .* ...
340 (10.^(-A_M2 ./ 10)).*(cos(0.23 ...
341 .* A_M2) - (1i .* sin(0.23 .* A_M2)))));
342 CP_M3 = 20 .* log(1 - (GammaP_M3 .* ...
343 (10.^(-A_M3 ./ 10)).*(cos(0.23 ...
344 .* A_M3) - (1i .* sin(0.23 .* A_M3)))));
345 CP_M4 = 20 .* log(1 - (GammaP_M4 .* ...
346 (10.^(-A_M4 ./ 10)).*(cos(0.23 ...
347 .* A_M4) - (1i .* sin(0.23 .* A_M4)))));
348 CP_M5 = 20 .* log(1 - (GammaP_M5 .* (10.^...
349 (-A_M5 ./ 10)).*(cos(0.23 .* A_M5) - ...
350 (1i .* sin(0.23 .* A_M5)))));
351 % Magnitude de fator de correção para onda plana
352 magCP_M1 = abs(CP_M1);
353 magCP_M2 = abs(CP_M2);
354 magCP_M3 = abs(CP_M3);

```

```

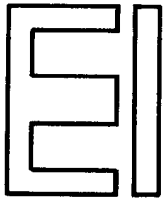
355 magCP_M4 = abs(CP_M4);
356 magCP_M5 = abs(CP_M5);
357 % Gráfico para o fator de correção para onda plana
358 figure (10);
359 set(gca,'fontsize',12);
360 semilogx(freq1, magCP_M1, freq2, magCP_M2,...
361 freq3, magCP_M3, Freq, magCP_M4, Freq, magCP_M5,'LineWidth',2);
362 grid on;
363 title('Fator de correção (B), para ondas planas');
364 xlabel('Frequência (Hz)');
365 ylabel('Fator de correção (dB)');
366 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800',...
367 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
368
369 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
370 % Eficácia de blindagem (S) para campo magnético
371 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
372 SEm_M1 = A_M1 + Rm_M1 - magCM_M1;
373 SEm_M2 = A_M2 + Rm_M2 - magCM_M2;
374 SEm_M3 = A_M3 + Rm_M3 - magCM_M3;
375 SEm_M4 = A_M4 + Rm_M4 - magCM_M4;
376 SEm_M5 = A_M5 + Rm_M5 - magCM_M5;
377 % Gráfico da Eficácia de blindagem para campo magnético
378 figure (11);
379 set(gca,'fontsize',12);
380 semilogx(freq1, SEm_M1, freq2, SEm_M2, freq3,...
381 SEm_M3, Freq, SEm_M4, Freq, SEm_M5,'LineWidth',2);
382 grid on;
383 title...
384 ('Eficácia de Blindagem (S = A + R + B), para campo magnético');
385 xlabel('Frequência (Hz)');
386 ylabel('Eficácia de Blindagem (dB)');
387 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800',...
388 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
389
390 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
391 % Eficácia de blindagem (S) para campo elétrico
392 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
393 SEe_M1 = A_M1 + Re_M1 - magCE_M1;
394 SEe_M2 = A_M2 + Re_M2 - magCE_M2;
395 SEe_M3 = A_M3 + Re_M3 - magCE_M3;
396 SEe_M4 = A_M4 + Re_M4 - magCE_M4;
397 SEe_M5 = A_M5 + Re_M5 - magCE_M5;
398 % Gráfico da Eficácia de blindagem para campo magnético
399 figure (12);

```

```

400 set(gca,'fontsize',12);
401 semilogx(freq1, SEe_M1, freq2, SEe_M2, freq3,...
402 SEe_M3, Freq, SEe_M4, Freq, SEe_M5,'LineWidth',2);
403 grid on;
404 title...
405 ('Eficácia de Blindagem (S = A + R + B), para campo elétrico');
406 xlabel('Frequência (Hz)');
407 ylabel('Eficácia de Blindagem (dB)');
408 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800',...
409 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
410
411 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
412 % Eficácia de blindagem para onda plana
413 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
414 SEp_M1 = A_M1 + Rp_M1 - magCP_M1;
415 SEp_M2 = A_M2 + Rp_M2 - magCP_M2;
416 SEp_M3 = A_M3 + Rp_M3 - magCP_M3;
417 SEp_M4 = A_M4 + Rp_M4 - magCP_M4;
418 SEp_M5 = A_M5 + Rp_M5 - magCP_M5;
419 % Gráfico da Eficácia de blindagem para onda plana
420 figure (13);
421 set(gca,'fontsize',12);
422 semilogx(freq1, SEp_M1, freq2, SEp_M2, freq3,...
423 SEp_M3, Freq, SEp_M4, Freq, SEp_M5,'LineWidth',2);
424 grid on;
425 title('Eficácia de Blindagem (S = A + R + B), para ondas planas');
426 xlabel('Frequência (Hz)');
427 ylabel('Eficácia de Blindagem (dB)');
428 legend('Super Q 80', 'Metglas 2714A', 'HyMu 800',...
429 'Cobre Elox', 'Amoco P-100 + Br', -1);
430 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
431 %Comparação de eficácia de blindagem para o Metglas 2714A
432 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
433 figure(14);
434 set(gca,'fontsize',12);
435 semilogx(freq2, SEp_M2,'--', freq2, SEe_M2,'-.',...
436 freq2, SEm_M2,'LineWidth',2);
437 grid on;
438 title...
439 ('Eficácia de Blindagem S, para Metglas 2714A com t = 0,1mm');
440 xlabel('Frequência (Hz)');
441 ylabel('Eficácia de Blindagem (dB)');
442 legend('Ondas Planas com r = 10m','Campo Elétrico',...
443 'Campo Magnético com r = 10m', -1);

```



SUPER Q 80 LAMINATIONS

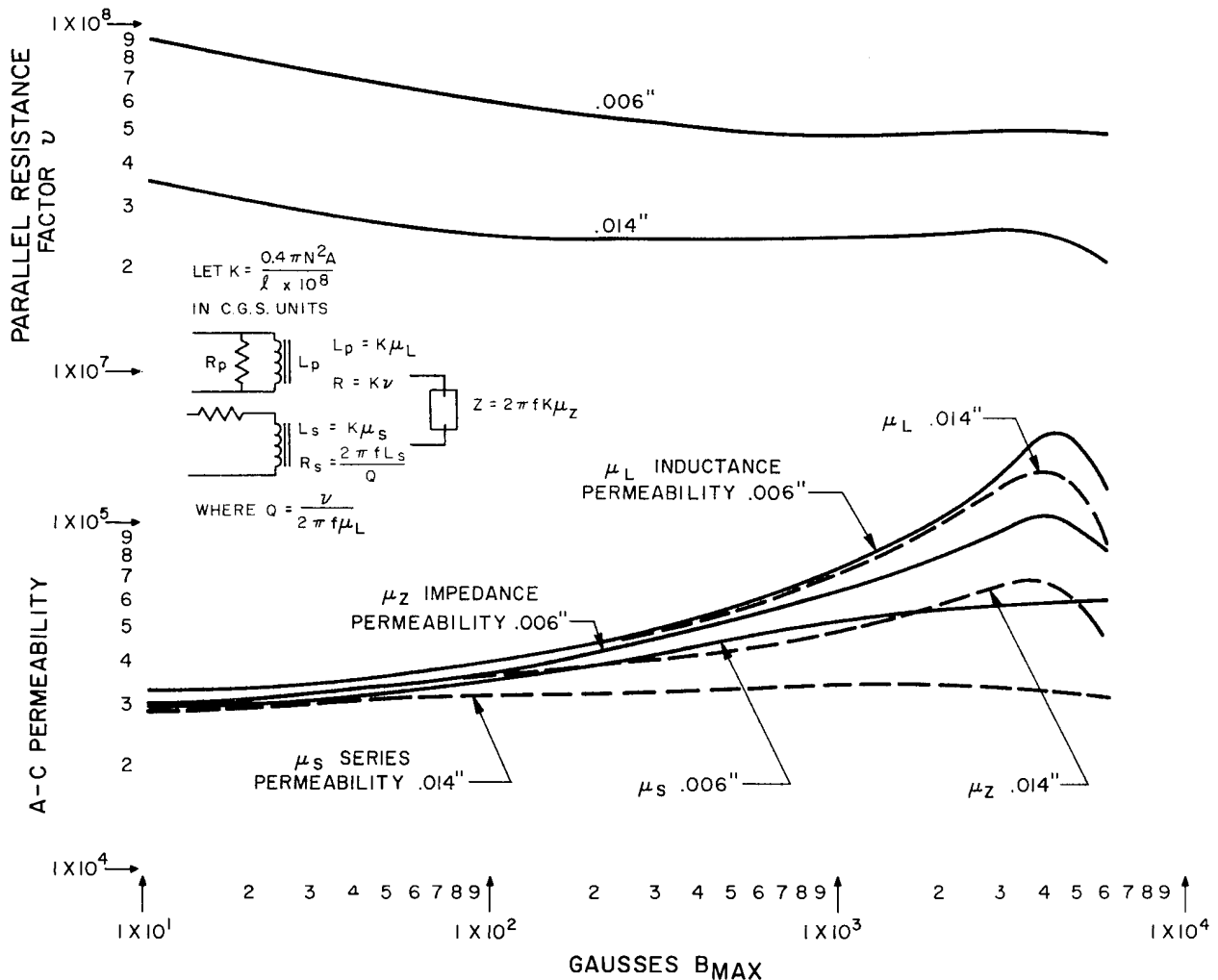
SUPER Q 80 LAMINATIONS are produced from specially selected 80% nickel-iron alloy. Exacting quality control procedures are followed to ensure the user consistent high permeability performance.

The data in this bulletin is a guide for the magnetic component design engineer's use in predicting the performance of Super Q 80 laminations.

INDEX

Core Loss Curves, Watts per Pound _____	Page 3	Linear Magnetization Curves _____	Page 4
Hanna Curves _____	Page 6	Permeability Curves for Laminations _____	Page 7
Incremental Permeability Curves _____	Page 5	Shunt Resistance Factor Curves, 60 cps _____	Page 1
Inductance Permeability Curves, 60 cps _____	Page 1	Variation of Properties with Frequency _____	Page 2

Permeability and core loss of typical material used in the manufacture of Super Q 80 laminations. Stamped Ring Laminations at 60 Hz.



MAGNETIC METALS CORP.

CAMDEN, NEW JERSEY

PROPERTIES VS. FREQUENCY

SUPER Q 80

CORE LOSS of material used for production of **Super Q 80** laminations is presented in two ways. On the first page and this page, the parallel resistance factor ν can be used to calculate R_p . The core loss is then E^2/R_p . The curves on page three show the conventional watts per pound relationships. The relationship between ν and watts per pound is

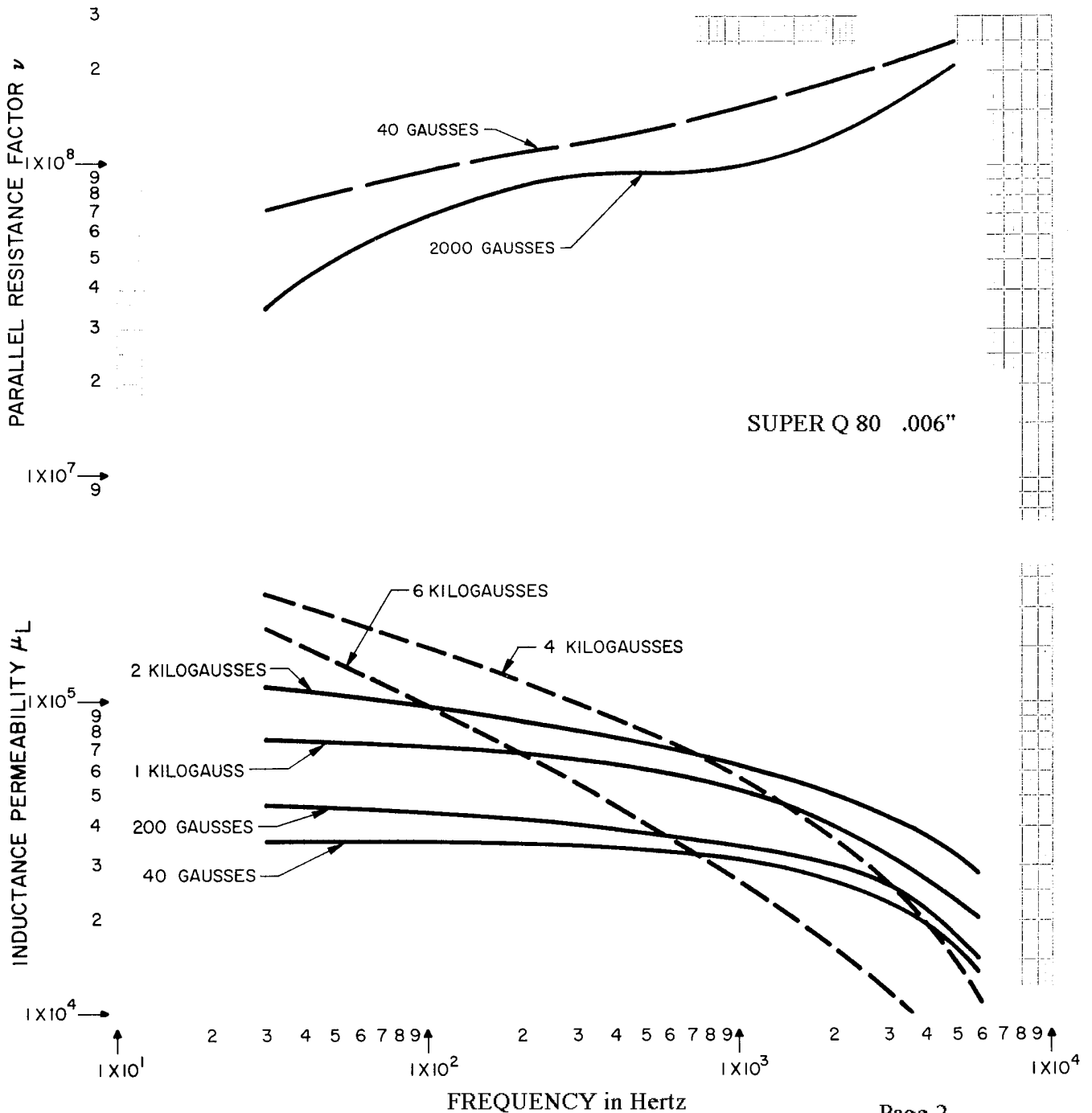
$$\nu = 0.81536 \frac{B_m^2 f^2}{P_s} \times 10^{-5}$$

where B_m is the maximum induction in gaussess

f is the frequency in Hertz

P_s is the specific core loss in watts per pound.

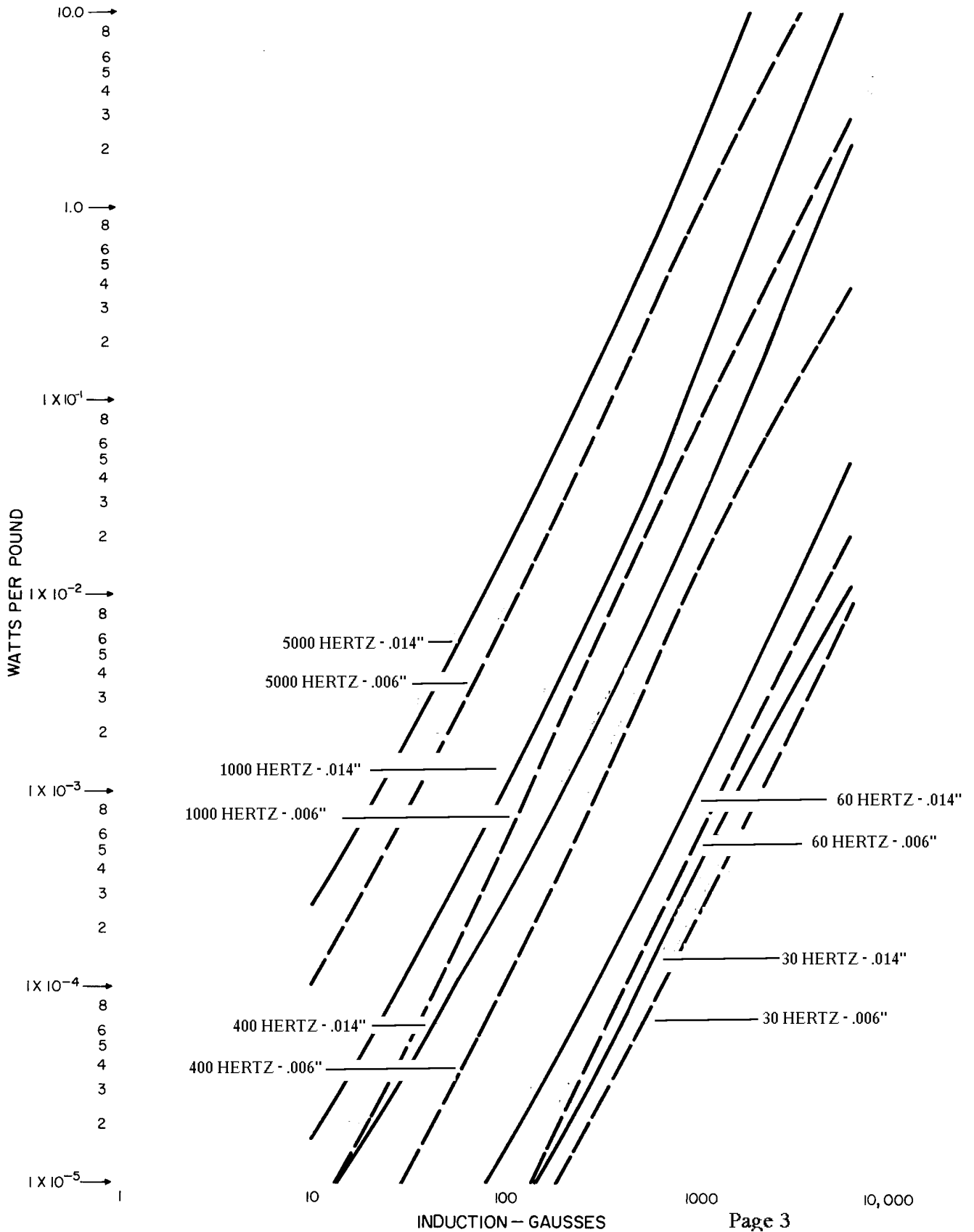
Variation of paralred resistance factor and permeability with frequency; typical material for Super Q 80 laminations; Modified Hay Bridge data using Stamped Ring Laminations.



CORE LOSS

SUPER Q 80

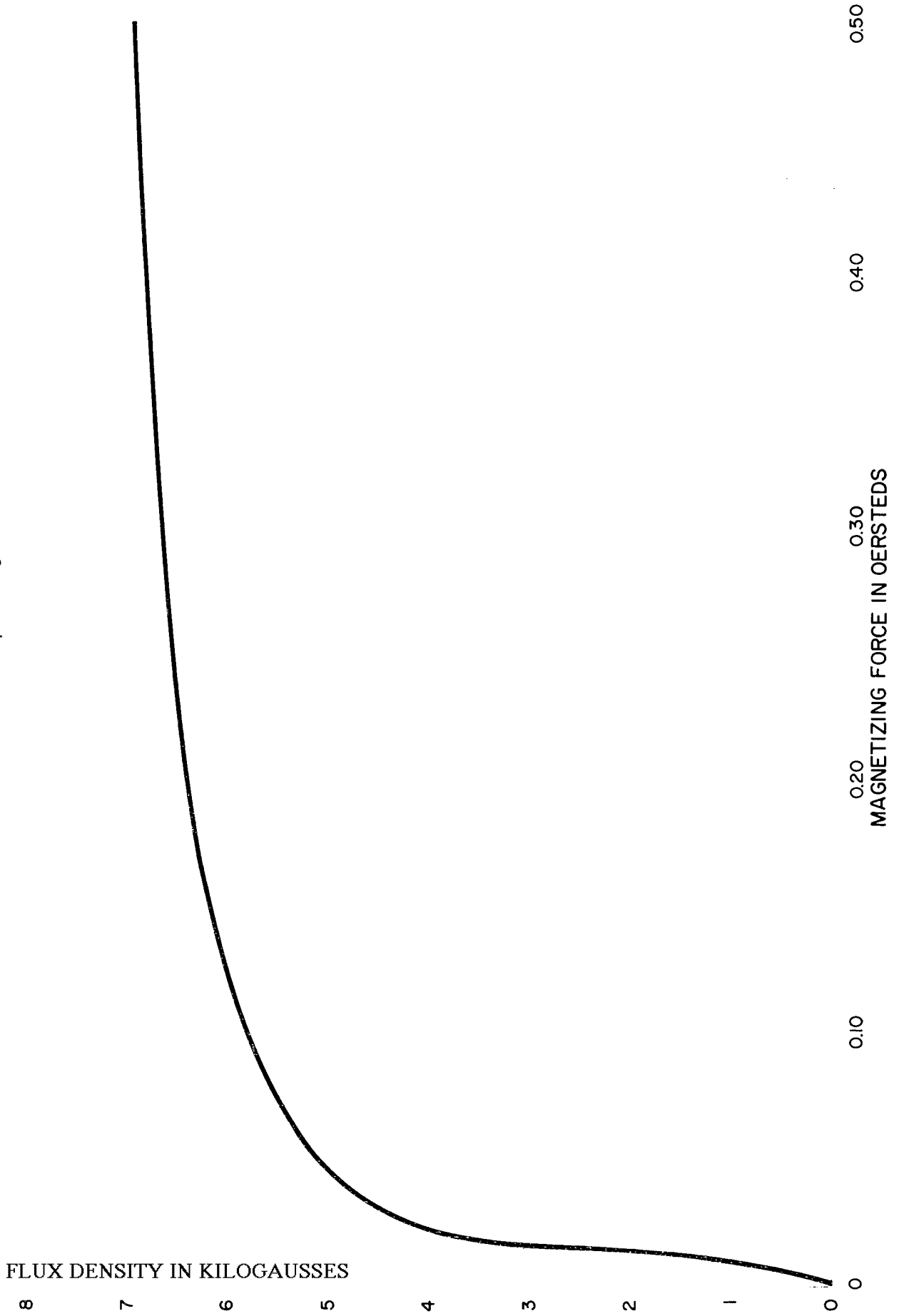
Core loss curves in watts per pound; typical material for Super Q 80 laminations; Stamped Ring Lamination data.



MAGNETIZATION

SUPER Q 80

D-C magnetization curve, plotted with linear scales for calculation of reactors with direct current. Stamped Ring Lamination Data.



INCREMENTAL PERMEABILITY

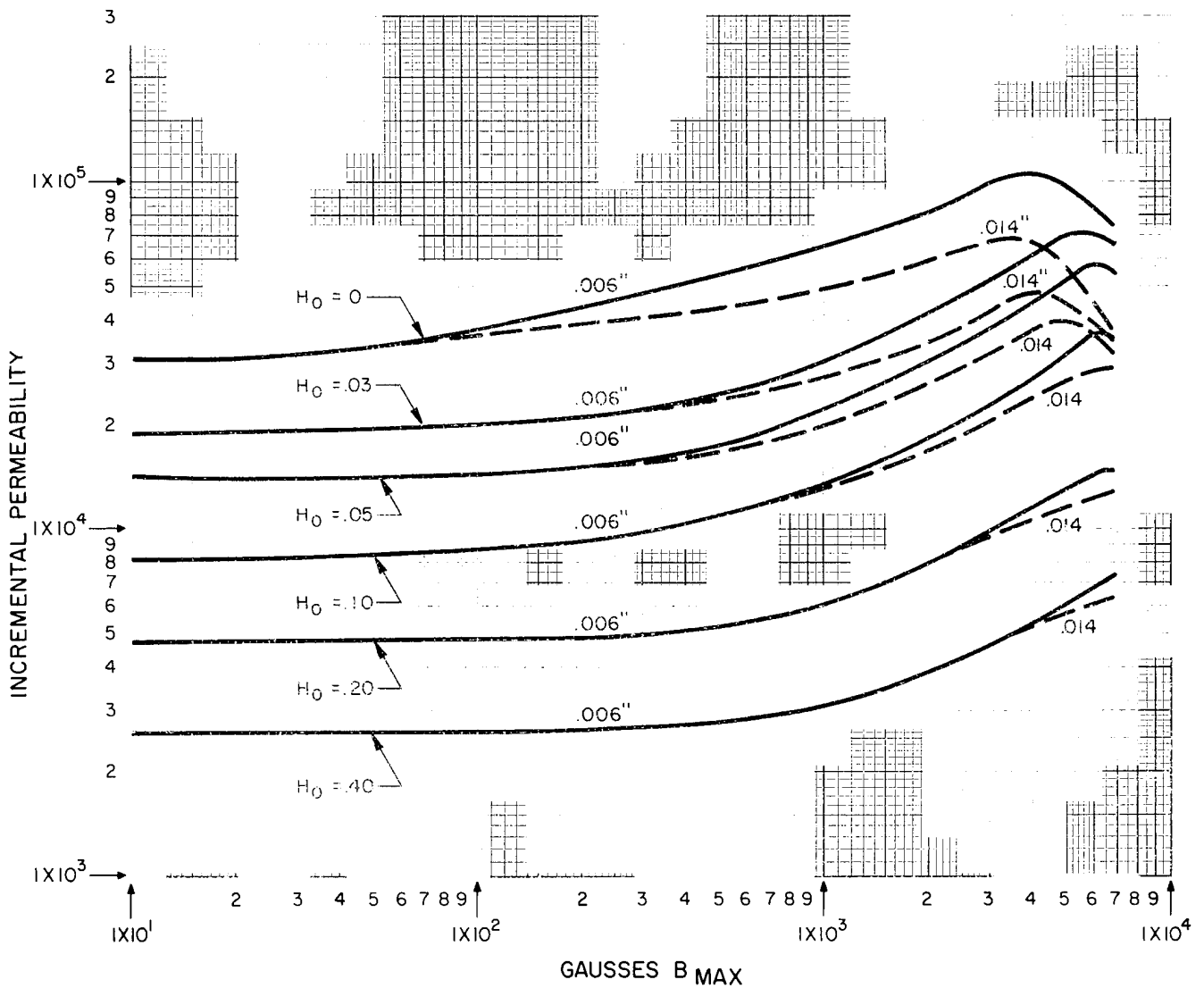
SUPER Q 80

INDUCTANCE CALCULATION. The curves on pages four and five are useful for inductance calculation using the negative air gap line technique. For additional information,

there are many texts on magnetic component design.*

**MAGNETIC CIRCUITS AND TRANSFORMERS: M.I.T. Staff, John Wiley and Sons, Inc., 7th printing 1950, p. 202*

Incremental permeability of typical material used in the manufacture of Super Q laminations. Stamped Ring Laminations at 60 Hz.



HANNA CURVES

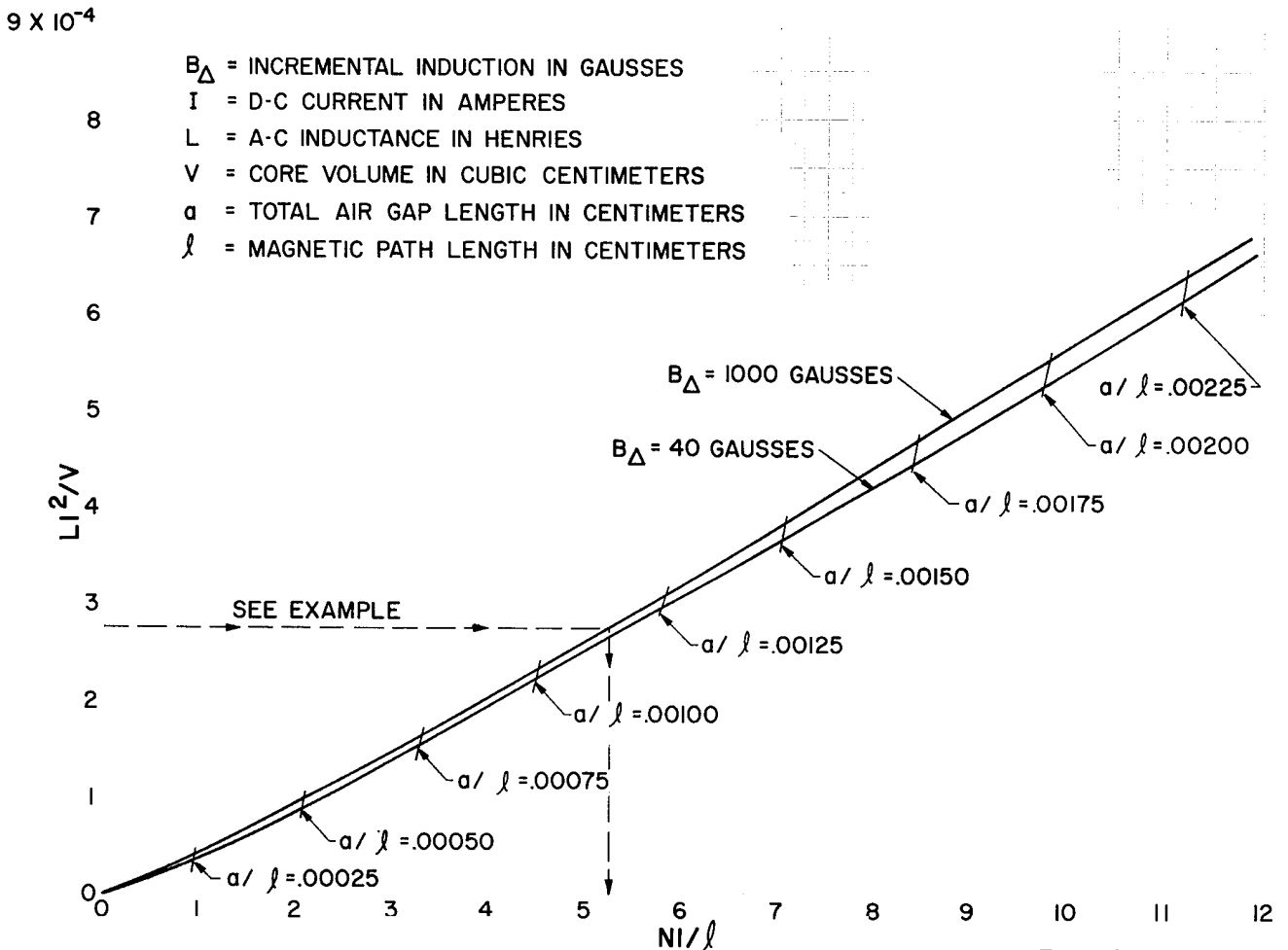
SUPER Q 80

HANNA CURVES* provide a simplified method of calculating inductances with direct current, and for determining the optimum air gap. Where L is the a-c inductance in henries, I is the d-c current in amperes, and V is the core volume in cubic centimeters; calculate LI^2/V and enter the chart at that ordinate. Extend across the chart along this ordinate to the appropriate B_{Δ} , for a-c induction in gaussses, and select the indicated abscissa for NI/l . Calculate required turns by substituting the centimeters of path length in the core material for l , and for the d-c amperes I . The optimum ratio of air gap length to path length (a/l) applies to the points indicated.

Example: Required $L = 1.41$ henries in 2425-EE SM 30 with $I = .020$ amperes d-c. From lamination catalog, $V = 2.05 \text{ cm}^3$ and $l = 5.08 \text{ cm}$. Calculate $LI^2/V = 2.75 \times 10^{-4}$. For estimated $B_{\Delta} = 1000$ gaussses, $NI/l = 5.25$ and a/l lies between .0010 and .00125. Substituting for I and l , $N = 1335$ turns. The total air gap is approximately $a = .0010 \times 5.08 = .00508 \text{ cm}$ or .002 inches. A spacer .001 inch thick will establish this total air gap.

*"Design of Reactors and Transformers which Carry Direct Current", C. R. Hanna, Journal AIEE, Vol. 46, February 1927.

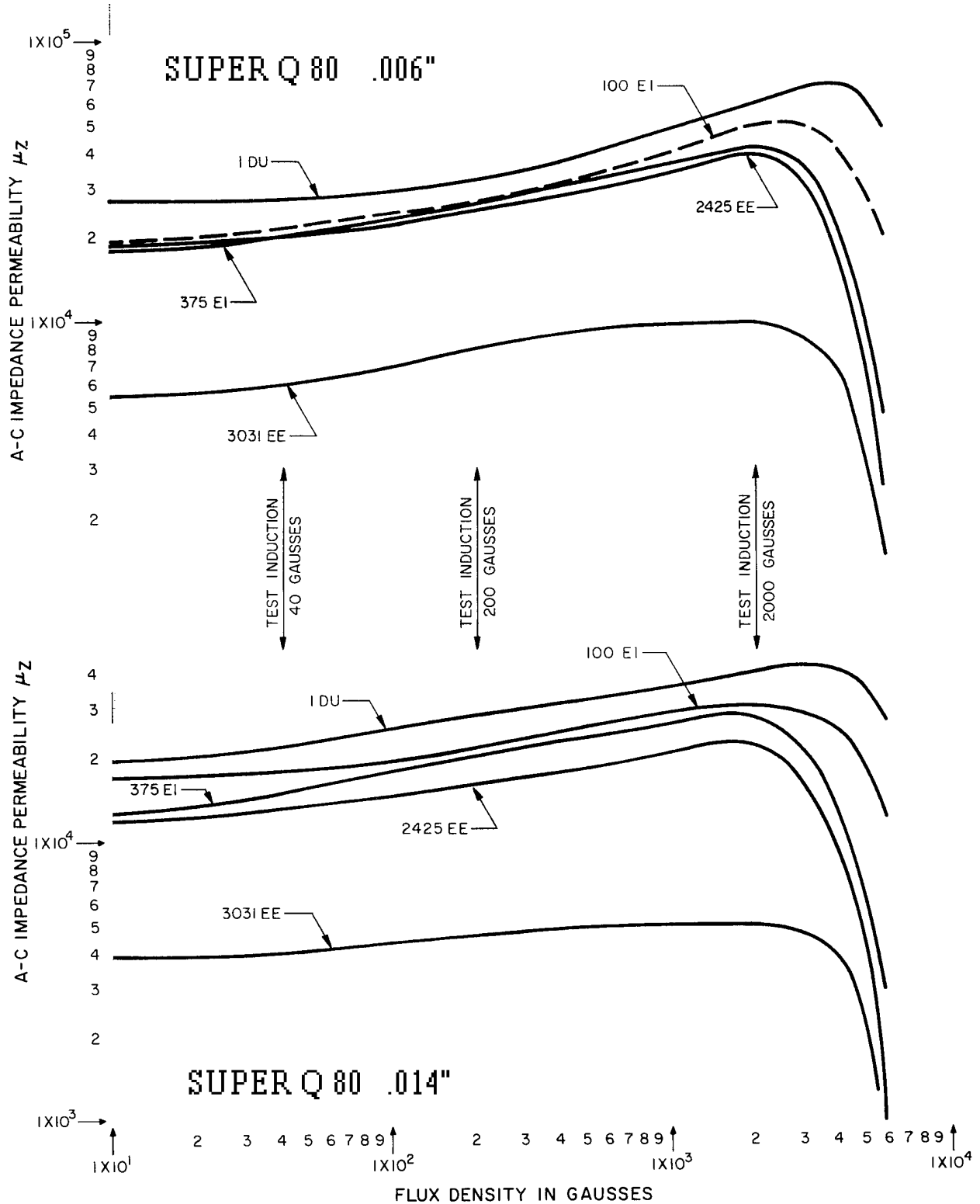
Hanna Reactor Design Curves.
Data prepared from Stamped Ring Lamination measurements at 60 Hz.



IMPEDANCE PERMEABILITY

SUPER Q 80

Impedance permeability at 60 Hz. of typical lamination shapes.
Curves are drawn through rejection levels at test inductions.



Carpenter HyMu "800"

[Email Datasheet](#)
[Add to My Materials](#)

Type Analysis

Single figures are nominal except where noted.

Carbon	0.01 %	Manganese	0.50 %
Silicon	0.15 %	Nickel	80.00 %
Molybdenum	5.00 %	Iron	Balance

General Information

Description

Carpenter HyMu "800" is a nickel-molybdenum-iron alloy capable of being heat treated to show very high initial permeabilities, maximum permeabilities and AC core losses at low magnetic flux densities.

This alloy is produced in strip form at thicknesses less than 0.008" (0.02 mm). Cut lengths, heat treated to magnetic property requirements ready for photoetching, can be supplied. Coiled strip, suitable for blanking or forming, can also be produced.

Applications

HyMu "800" has been used to produce toroids for core components.

Properties

Physical Properties

Specific Gravity

-- 8.74

Density

-- 0.3160 lb/in³

Mean Specific Heat

-- 0.1180 Btu/lb/°F

Mean CTE

-90 to 400°F 7.20 x 10⁻⁶ in/in/°F

Thermal Conductivity

-- 240.0 BTU-in/hr/ft²/°F

Electrical Resistivity

70°F 370.0 to 380.0 ohm-cir-mil/ft

Temperature Coeff of Electrical Resist

0 to 930°F 6.00 x 10⁻⁴ Ohm/Ohm/°F

Curie Temperature

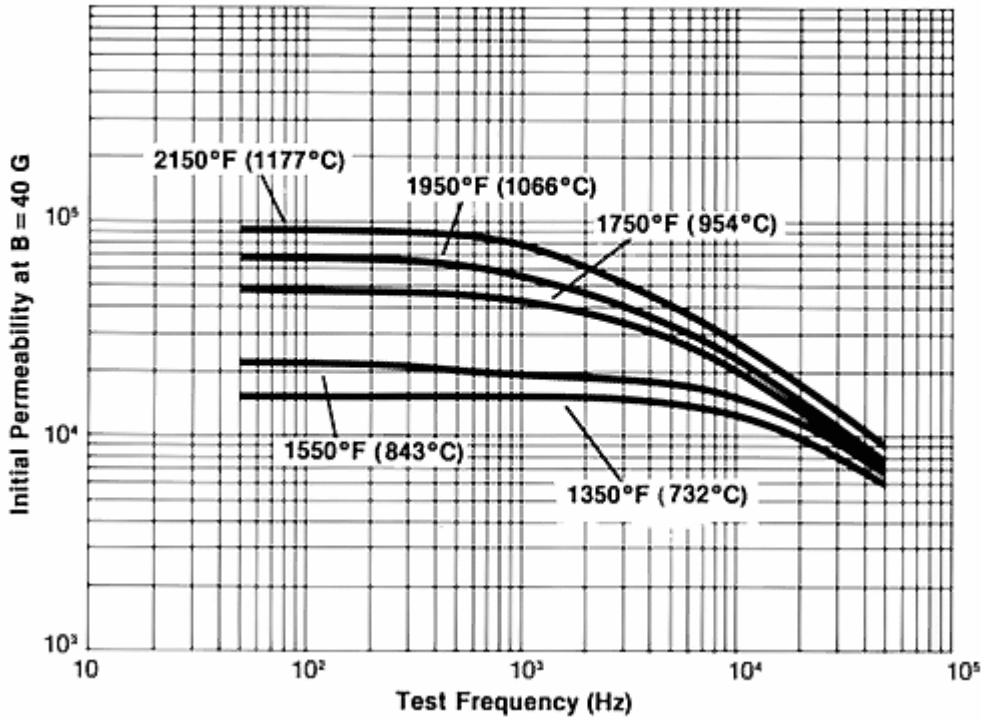
-- 860 °F

Melting Range

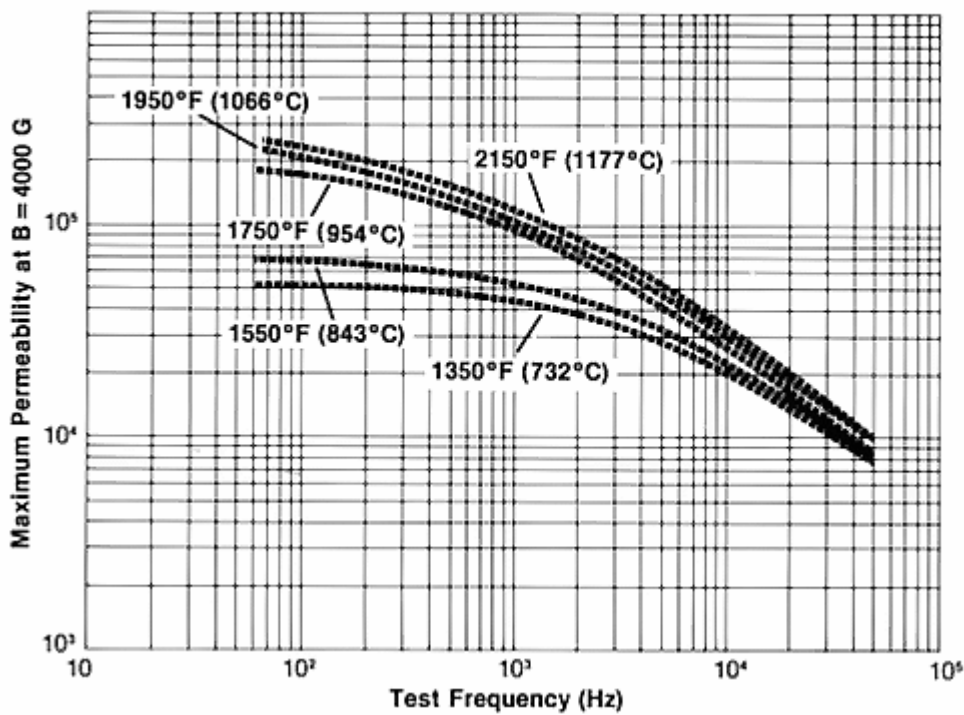
-- 2650 °F

Magnetic Properties

Effect of Annealing Treatment on Magnetic Permeability—Carpenter HyMu “800”
Initial permeability vs. test frequency for 0.002" (0.051 mm) strip.

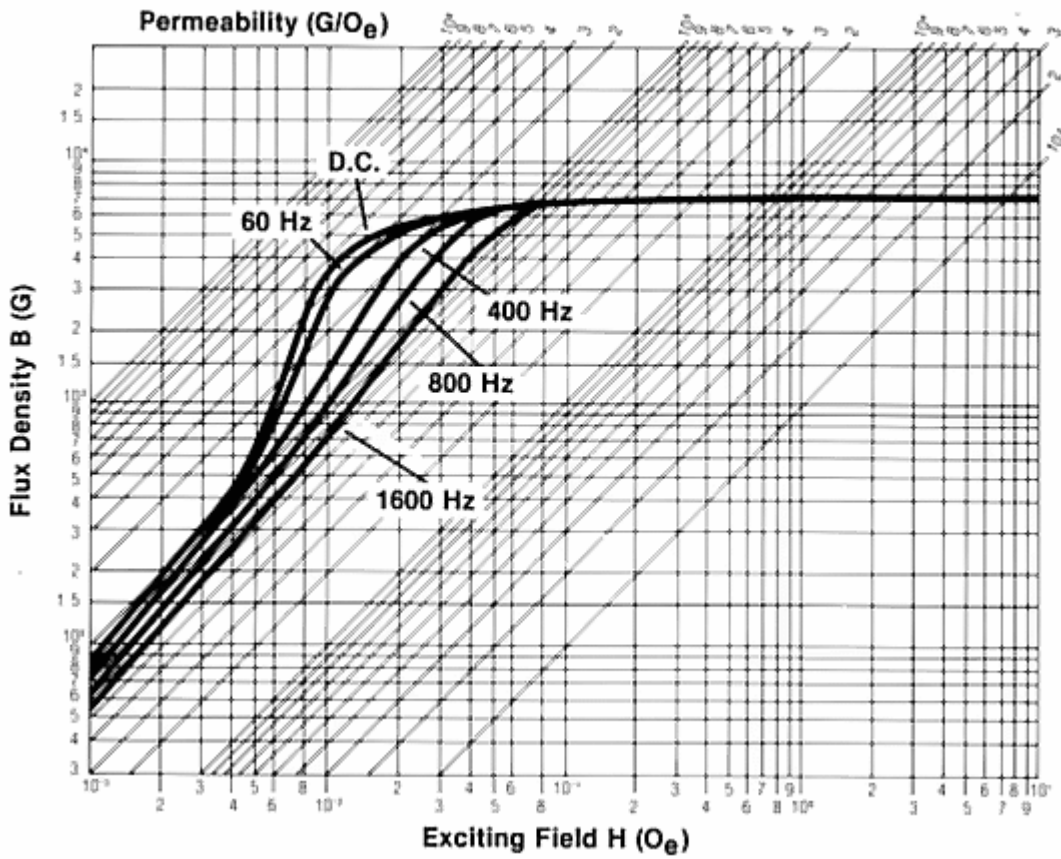


Effect of Annealing Temperature on Magnetic Permeability—Carpenter HyMu “800”
Permeability at high flux levels (B = 4000 G) vs. test frequency for 0.002" (0.051 mm) strip.

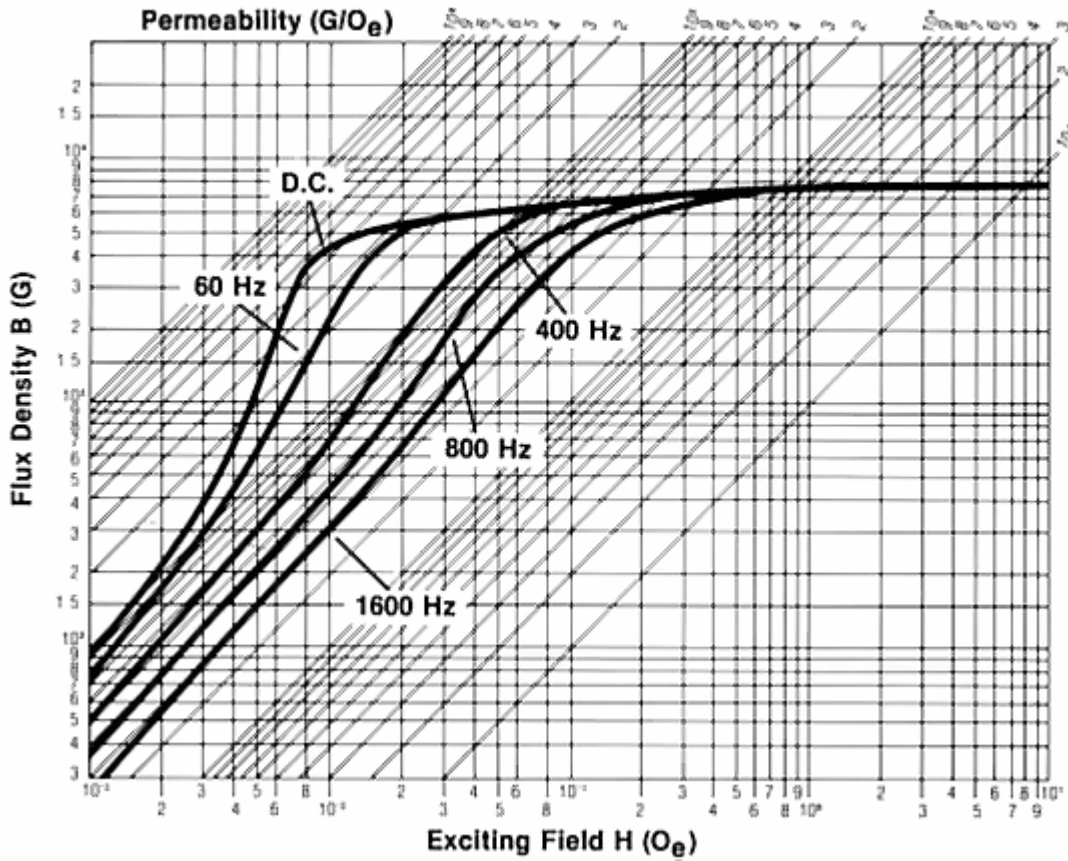


Typical Magnetization Curves—Carpenter HyMu "800"

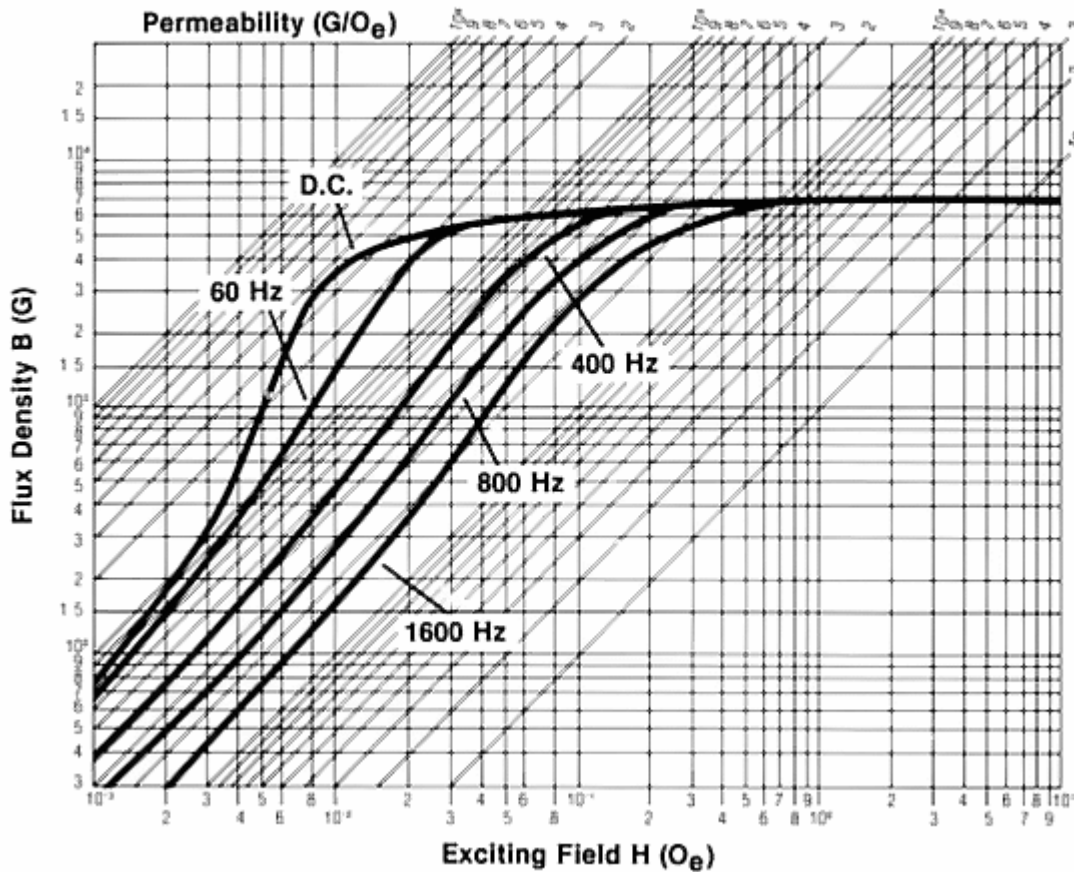
0.002" (0.051 mm) thick tape toroid, 1" (25.4 mm) ID x 1¼" (31.8 mm) OD.



Typical Magnetization Curves—Carpenter HyMu "800"
 0.004" (0.10 mm) thick tape toroid, 1" (25.4 mm) ID x 1¼" (31.8 mm) OD.



Typical Magnetization Curves—Carpenter HyMu "800"
 0.006" (0.15 mm) thick tape toroid, 1" (25.4 mm) ID x 1¼" (31.8 mm) OD.



Heat Treatment

Annealing

In-Process Anneal:

In-process annealing for further cold rolling of strip products should consist of a strand annealing operation in a nonoxidizing, noncarburizing atmosphere (dry hydrogen or NH₃ preferred) at 1830/1920°F (1000/1050°C) that will produce a tensile strength of 100 ksi (690 MPa) maximum.

Thermal Treatment for Magnetic Properties:

Specific magnetic characteristics are obtainable through selection of the thermal treatment used; low temperatures 1350/1650 °F (732/843 °C) for very high frequency response, and high temperatures 2050/2150 °F (1120/1177 °C) for low frequency response.

HyMu "800" should be annealed in an oxygen-free, dry-hydrogen atmosphere with a dew point below -40 °F (-40 °C). For uniformity of properties, material should be held 2 to 4 hours at temperature and cooled at a rate of 300/600 °F (167/333 °C) per hour through the order-disorder range 1200/800 °F (649/427 °C).

Oil, grease, lacquer and all other contaminants must be removed before annealing. The individual parts should be separated by an inert insulating powder such as magnesium or aluminum oxide during hydrogen annealing.

Other Information

Applicable Specifications

- ASTM A753 Alloy 4
-

Forms Manufactured

Strip in thicknesses less than 0.008" (0.02 mm).

Available from Carpenter Technology Corporation Special Products Division, El Cajon, California:

Panels - annealed to provide magnetic properties ready for photoetching, 8" wide x up to 0.0145" thick x up to 37" long.

Panels - cold rolled ready for heat treatment, 8" wide x up to 0.0145" thick x up to 37" long.

-
- Sheet

- Strip
-

Technical Articles

- A Simplified Method of Selecting Soft Magnetic Alloys
 - Soft Magnetic Alloys with Improved Corrosion Resistance
-

Disclaimer:

The information and data presented herein are typical or average values and are not a guarantee of maximum or minimum values. Applications specifically suggested for material described herein are made solely for the purpose of illustration to enable the reader to make his/her own evaluation and are not intended as warranties, either express or implied, of fitness for these or other purposes. There is no representation that the recipient of this literature will receive updated editions as they become available.

Unless otherwise specified, registered trademarks are property of
CRS Holdings Inc., a subsidiary of [Carpenter Technology Corporation](#).
Copyright 2016 CRS Holdings Inc. All rights reserved.

Edition Date: 11/01/1991

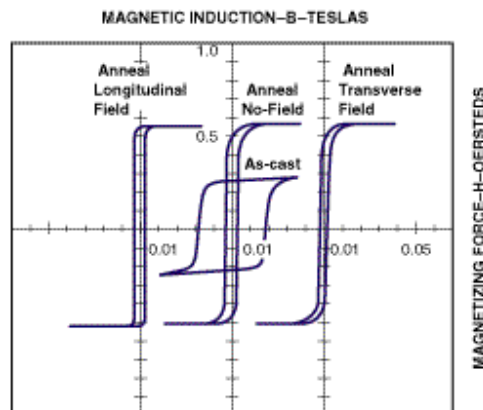
Applications

- Switch-mode power supply applications
- High frequency transformers
- High sensitivity matching transformers
- Ultra-sensitive current transformers
- Shielding
- Sensor applications

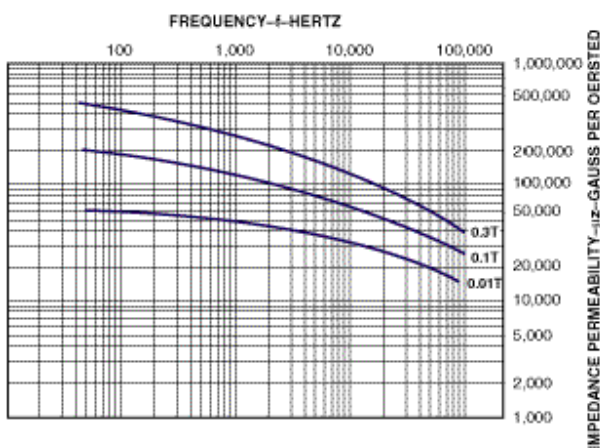
Benefits

- Extremely low core loss
- Ultra-high permeability
- High squareness ratio – low coercive force
- Near-zero magnetostriction
- Excellent corrosion resistance

Typical DC Hysteresis Loop



Typical Impedance Permeability Curves, No-Field Anneal



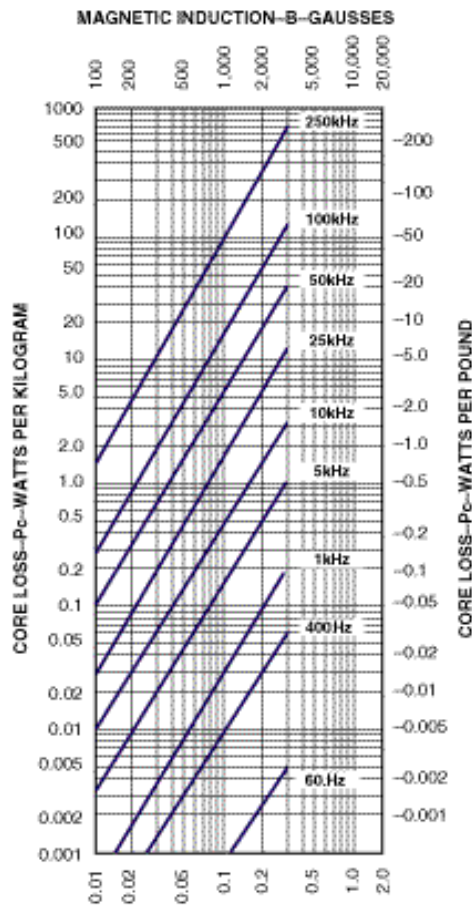
Physical Properties

Density (g/cm ³)	.759
Vicker's Hardness (50g load)	.960
Tensile Strength (GPa)	.1-2
Elastic Modulus (GPa)	.100-110
Lamination Factor (%)	>75
Thermal Expansion (ppm/°C)	12.7
Crystallization Temperature (°C)	.550
Continuous Service Temp. (°C)	.90

Magnetic Properties

Saturation Induction (T)	.057
Maximum D.C. Permeability (μ):	
Annealed	.1,000,000
As Cast	>80,000
Saturation Magnetostriction (ppm)	<0.5
Electrical Resistivity (μΩ.cm)	.142
Curie Temperature (°C)	.225

**Typical Core Loss Curves
Metglas Alloy 2714A**



Notes :

Contact Information:

AMERICAS

Metglas[®], Inc.

440 Allied Drive
Conway, SC 29526

Tel: (800) 581-7654

Tel: (843) 349-7363

Fax: (843) 349-6815

ASIA

Hitachi Metals Hong Kong

Units 2212-14, 22/F.
Miramar Tower, 132 Nathan Road,
Tsimshatsui, Kowloon
Hong Kong

Tel: 852-27244183

Fax: 852-27227660

EUROPE

Hitachi Metals Europe

Immermannstrasse 14-16
D- 40210 Düsseldorf
Germany

Tel :49(0)211-16009-23

Fax:49(0)211-16009-30

