# FORMULAÇÃO E CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UM SISTEMA DE CABOS EM FUNÇÃO DA FREQÜÊNCIA

Rosane da Silva Toledo Manhães

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA PÓS–GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.SC.) EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Biblioteca MAUÁ

Aprovada por:

Carlos M. J. C. de Medeiros Portela, D.Sc.
(Orientador)

Antonio Eduardo Hermeto, Livre Docente

Renato de Aquino Faria Nunes, D.Sc.

ITAJUBÁ, MG – BRASIL
DEZEMBRO DE 1992

MANHÃES, ROSANE DA SILVA TOLEDO

Formulação e Cálculo dos Parâmetros Elétricos de um Sistema de Cabos em Função da Freqüência [Minas Gerais], 1992.

XVI, 451 p. 29,7 cm (EFEI, M.Sc., Engenharia Elétrica, 1992).

Dissertação – Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

1. Apresentação da metodologia clássica e desenvolvimento computacional para o cálculo dos parâmetros elétricos de um sistema de cabos, levando em consideração a influência da freqüência, utilizando o "retorno pelo solo" para o sistema aéreo, subterrâneo ou submarino, incluindo o envolvimento matemático das funções de Bessel e das componentes simétricas.

I. EFEI II. Título (Série)

CLASS. 621.315.23/.24:621.3.011.21(043.2)
CUTT. M277f.
TOMBO. 704

Ao meu marido

José Cláudio

e aos meus pequeninos:

Vinícius,

Taíssa e

Luana.

Que eu possa lhes retribuir as horas sagradas da família, empregadas no desenvolvimento deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

A todos que cooperaram e contribuíram de alguma forma para a execução deste trabalho, principalmente:

À EFEI, pela oportunidade que me foi dada de concluir o curso de mestrado.

À COPPE e à DECANIA/CT da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo apoio e pela utilização de seus computadores para o desenvolvimento do programa e execução dos casos.

Ao Prof. Carlos M. Portela, pela valiosa e dedicada orientação deste trabalho.

Aos meus pais, por toda uma vida de dedicação, solidariedade e incentivo aos meus estudos.

Ao Engenheiro Hilton Ferreira Magalhães, pela contribuição e apoio à elaboração deste trabalho.

Aos colegas de trabalho: Antonio Carlos Ferreira, Paulo César D'Elia e Mônica Caruso Stoque pela colaboração prestada.

Ao Philippe Lemerre, pelo auxílio na tradução dos artigos em francês.

Aos amigos Israel Tini Cardoso e Vera Lúcia Figueiredo Tini Cardoso, pelo incentivo constante, de grande valor para o término deste trabalho.

À Daisy Lima, pelo cuidadoso e paciente trabalho de digitação.

Ao Luiz Heleno Alves da Cruz, pela execução dos desenhos.

Resumo da Tese apresentada à EFEI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

# FORMULAÇÃO E CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UM SISTEMA DE CABOS EM FUNÇÃO DA FREQÜÊNCIA

**Rosane da Silva Toledo Manhães**

**Orientador**: Carlos M. J. C. de Medeiros Portela

**Programa**: Engenharia Elétrica

Este trabalho trata do desenvolvimento analítico dos cálculos dos parâmetros elétricos de um sistema de cabos, em dependência com a freqüência: impedâncias longitudinais por unidade de comprimento e admitâncias transversais por unidade de comprimento.

Inicialmente, cita–se a importância do cabo nos sistemas elétricos atuais seguida de aspectos gerais, construtivos e materiais utilizados na concepção do cabo.

Numa primeira fase é feita uma abordagem teórica e apresenta–se a formulação necessária aos cálculos das matrizes de impedâncias longitudinais e admitâncias transversais, em função da freqüência, para um sistema de N–cabos constituídos por n–condutores. Em continuidade, dá–se enfoque à teoria clássica da representação das transformadas simétricas e das funções modificadas de Bessel.

Na fase seguinte é desenvolvido um programa computacional em FORTRAN 77 para o cálculo dos parâmetros de um sistema elétrico, levando–se em conta a influência da freqüência, a sensibilidade de convergência das funções de Bessel

e das séries infinitas que envolvem o retorno pelo solo.

Finalmente, são feitos estudos para um sistema exemplo dando–se ênfase à dependência com a freqüência dos parâmetros R e L; apresentando–se comentários a respeito.

Abstract of Thesis Presented to EFEI as Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)

**FORMULATION AND COMPUTATION OF A CABLES SYSTEM ELECTRICAL PARAMETERS IN FUNCTION OF FREQUENCY**

**Rosane da Silva Toledo Manhães**

**Advisor**: Carlos M. J. C. de Medeiros Portela

**Department**: Electrical Engineering

This work deals with analytical development of a cables system electrical parameters computation, as a frequency function, namely per unit length: longidutinal impedances and transversal admitances.

An introduction to cable systems, its importance in actual electrical systems and general aspects, related to constructive conception, and materials used.

In a first part it is made a theoretical approach with a formulation adequate the computation of longitudinal impedances and transversal admitances matrices, in function of frequency, for a system of N–cables each with n–conductors. Use is done of symmetrical coordinates and modified Bessel functions.

In the next part, a computation program, in FORTRAN 77, is developed, considering frequency influence, and convergence sensitive of Bessel functions and infinite series related to earth return.

Finally, studies are done for an example system, with emphasis in frequency dependence of R and L parameters, and discussing the results.

# ÍNDICE

Pág.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Gerais 1
1.2 – Metodologia Proposta 3
1.3 – Hipóteses Adotadas 5

CAPÍTULO II – O CABO NO SISTEMA ELÉTRICO

2.1 – Aspectos Gerais 8
2.2 – Dados Construtivos dos Cabos 9
2.2.1 – Condutor 10
2.2.1.1 – Material Empregado na Construção dos Condutores Elétricos 10
2.2.1.2 – Forma Geométrica dos Condutores Elétricos 11
2.2.2 – Blindagem sobre o Condutor 16
2.2.3 – Isolação 17
2.2.4 – Enchimentos 21
2.2.5 – Blindagem sobre o Isolamento 21
2.2.6 – Armação ou Proteção Metálica 22
2.2.7 – Cobertura 23
2.3 – Aspectos Construtivos 23

Pág.

## CAPÍTULO III– FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DA MATRIZ DAS IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS DE UM SISTEMA DE CABOS – DEPENDÊNCIA DA FREQÜÊNCIA


3.1 – Abordagem Geral 30

3.2 – Determinação da Matriz Parcial $\mathbf{Z}_i$ 33

3.2.1 – Submatriz $\mathbf{Z}_{i_{cj}}$ 34

3.2.2 – Submatriz $\mathbf{Z}_{i_{FOj}}$ 47

3.3 – Matriz Parcial $\mathbf{Z}_p$ 47

3.3.1 – Submatriz $\mathbf{Z}_{p_{jj}}$ 49

3.3.2 – Submatriz $\mathbf{Z}_{p_{jk}}$ 51

3.4 – Matriz Parcial $\mathbf{Z}_c$ 52

3.4.1 – Submatriz $\mathbf{Z}_{c_1}$ 53

3.4.2 – Submatriz $\mathbf{Z}_{c_2}$ 54

3.4.3 – Elemento $\mathbf{Z}_{c_3}$ 54

3.4.4 – Submatriz $\mathbf{Z}_{c_4}$ 55

3.4.5 – Elemento $\mathbf{Z}_{c_5}$ 55

3.4.6 – Submatriz $\mathbf{Z}_{c_6}$ 56

3.4.7 – Elemento $\mathbf{Z}_{c_7}$ 56

3.5 – Impedância Mútua entre Cabos PT e Impedância Própria de Retorno pelo Solo 62

3.5.1 – Metodologia de Carson para o Cálculo das Impedâncias de Retorno pelo Solo para Cabos Aéreos 65

Pág.

3.5.2 – Formulação de Pollaczek para o Cálculo das Impedâncias de Retorno pelo Solo para Cabos Subterrâneos 73

3.5.3 – Impedância de Retorno pelo Mar para Cabos Submarinos 78

3.6 – Sistema de Cabos Coaxiais Unipolares 82

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA MATRIZ DAS ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS DE UM SISTEMA DE CABOS

4.1 – Cálculo da Matriz Parcial $P_i$ 87

4.1.1 – Submatriz $P_{i_{cj}}$ 88

4.1.2 – Submatriz $P_{i_{FOj}}$ 92

4.2 – Matriz Parcial $P_p$ 93

4.2.1 – Submatriz $P_{p_{jj}}$ 93

4.2.2 – Submatriz $P_{p_{jk}}$ 94

4.3 – Matriz Parcial $P_c$ 95

4.3.1 – Submatriz $P_{c_1}$ 96

4.3.2 – Submatriz $P_{c_2}$ 96

4.3.3 – Elemento $P_{c_3}$ 97

4.3.4 – Submatriz $P_{c_4}$ 97

4.3.5 – Elemento $P_{c_5}$ 97

4.3.6 – Submatriz $P_{c_6}$ 98

4.3.7 – Elemento $P_{c_7}$ 98

Pág.

4.4 – Coeficientes de Potencial Mútuos entre Cabos PT e Próprios – em Presença do Ar 101

CAPÍTULO V – REPRESENTAÇÃO DAS TRANSFORMADAS SIMÉTRICAS

5.1 – Introdução 105

5.2 – Aspectos Teóricos 108

5.3 – Generalização aos Sistemas Polifásicos 113

5.4 – Preparação do Sistema para o Cálculo das Componentes Simétricas 114

5.4.1 – Camadas Metálicas Aterradas 116

5.4.2 – Camadas Metálicas Isoladas 118

5.5 – Transformação das Matrizes de Impedâncias Longitudinais e Admitâncias Transversais em Componentes Simétricas 120

5.6 – Cálculo das Componentes Simétricas para K–Circuitos Trifásicos Acoplados 124

5.7 – Componentes Simétricas para Cabos Bipolares 127

CAPÍTULO VI – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DAS FUNÇÕES MODIFICADAS DE BESSEL

6.1 – Introdução 129

6.2 – Séries Ascendentes para $I_\nu(z)$ 130

6.2.1 – Funções $I_0(z)$ e $I_1(z)$ 130

6.3 – Séries Ascendentes para $K_\nu(z)$ 131

Pág.

6.3.1 – Funções $K_0(z)$ e $K_1(z)$ 132

6.4 – Expansões Assintóticas para $I_\nu(z)$ 133

6.4.1 – Funções $I_0(z)$ e $I_1(z)$ 134

6.5 –Expansões Assintóticas para $K_\nu(z)$ 134

6.5.1 – Funções $K_0(z)$ e $K_1(z)$ 134

6.6 – Relações Derivadas 135

6.7 – Aplicações nos Sistemas Elétricos de Cabos 135

6.7.1 – Definições e Propriedades das Funções Modificadas de Bessel 136

6.7.2 – Séries Ascendentes das Parcelas ber, bei, ker e kei 138

6.7.2.1 – Série de $ber_n(x)$ 139

6.7.2.2 – Série de $bei_n(x)$ 140

6.7.2.3 – Série de $ker_n(x)$ 140

6.7.2.4 – Série de $kei_n(x)$ 140

6.7.3 – Séries Assintóticas das Parcelas ber, bei, ker e kei 141

6.7.3.1 – Série de $ber_n(x)$ 141

6.7.3.2 – Série de $bei_n(x)$ 141

6.7.3.3 – Série de $ker_n(x)$ 142

6.7.3.4 – Série de $kei_n(x)$ 142

6.7.4 – Aproximações Polinomiais 143

6.7.4.1 – Aproximações Polinomiais para Ordem Zero e Argumentos Menores ou Iguais a Oito para as Parcelas $ber_0(x)$, $bei_0(x)$, $ker_0(x)$ e $kei_0(x)$ 143

6.7.4.2 – Aproximações Polinomiais para Ordem Zero e Argumentos Maiores do que Oito para $ker_0(x)$, $kei_0(x)$, $ber_0(x)$ e $bei_0(x)$ 145

6.7.4.3 – Aproximações Polinomiais para ordem um 147

6.7.4.4 – Aproximações Polinomiais para ber'(x), bei'(x), ker'(x) e kei'(x) 148

6.7.4.5 – Aproximações Polinomiais para ker'(x), kei'(x), ber'(x) e bei'(x) tendo Argumento Maior do que Oito 150

CAPÍTULO VII– CÁLCULO COMPUTACIONAL DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UM SISTEMA DE CABOS

7.1 – Abordagem Geral 155

7.2 – Diagramas de Estruturas 158

7.3 – Descrição dos Dados de Entrada 166

7.3.1 – Dados Gerais do Sistema de Cabos 167

7.3.2 – Dados Gerais por Cabo em Estudo 170

7.3.3 – Dados por Cabo SC, Interno, de Energia do Cabo PT em Estudo 173

7.3.4 – Dados por Cabo SC de Fibra Ótica do Cabo PT em Estudo 176

7.3.5 – Dados do Tubo Envolvente do Cabo PT em Estudo 176

7.3.6 – Dados Referentes ao Cálculo das Componentes Simétricas para o Sistema de Cabos em Estudo 177

7.4 – Arquivo de Saída 181

Pág.

7.5 – Apresentação de um Sistema Exemplo 181

CAPÍTULO VIII – ALGUMAS INVESTIGAÇÕES PARA UM SISTEMA EXEMPLO

8.1 – Aspectos Gerais 182

8.2 – Características Geométricas e Eletromagnéticas do Sistema Exemplo 183

8.3 – Análise dos Resultados Obtidos 243

8.4 – Análise Assintótica do Comportamento dos Parâmetros R e L com a Freqüência 253

CAPÍTULO IX – CONCLUSÕES E SUGESTÃO 257

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 259

APÊNDICE I – DEFINIÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS, VARIÁVEIS E FUNÇÕES

A.1.1 – Parâmetros 265

A.1.2 – Variáveis 266

A.1.3 – Funções 266

A.1.3.1 – Expansão Binomial em (–1) 267

A.1.3.2 – Expansão de Funções Trigonométricas 268

A.1.3.3 – Função "Gamma" 268

A.1.3.4 – Função "PSI" (Digamma) 268

Pág.

A.1.4 – Profundidade de Penetração 269

APÊNDICE II – CABOS ELÉTRICOS: CARACTERÍSTICAS GERAIS

A.2.1 – Materiais Dielétricos 276

A.2.1.1 – Permissividade ou Constante Dielétrica 276

A.2.2 – Classes de Tensão 281

A.2.3 – Temperaturas Admissíveis dos Materiais Isolantes 282

A.2.4 – Resistividade Elétrica dos Condutores 283

A.2.5 – Permeabilidade Magnética 285

APÊNDICE III– DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DA IMPEDÂNCIA SUPERFICIAL DE UM CONDUTOR TUBULAR 288

APÊNDICE IV – MÉTODOS DE CÁLCULO DA INTEGRAL E MANIPULAÇÕES MATEMÁTICAS USADAS NA OBTENÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS DE RETORNO PELO SOLO PARA CABOS SUBTERRÂNEOS

A.4.1 – Composição dos Métodos de Cálculo da Integral 297

A.4.2 – Método Trapezoidal para o Cálculo da Integral 300

A.4.3 – Método Analítico para o Cálculo da Integral da Definição de Impedâncias Mútuas e Impedâncias Próprias de Retorno pelo Solo para Cabos Subterrâneos 304

A.4.3.1 – Linearizando a Expressão (A.4.15) 304

A.4.3.2 – Linearizando a Expressão (A.4.20) 306

Pág.

A.4.3.3 – Linearizando a Função $\cos(\alpha x)$ 307

A.4.3.4 – Linearizando a Função Integrando 307

**APÊNDICE V – TRATAMENTO MATEMÁTICO DAS FUNÇÕES MODIFICADAS DE BESSEL**

A.5.1 – Considerações Gerais 312

A.5.2 – Aplicações na Formulação da Série Ascendente de $ber_n(x)$ para a Expressão (6.26) 312

A.5.3 – Manipulações Matemáticas na Formulação de $bei_n(x)$ para a Série Ascendente da Expressão (6.27) 314

A.5.4 – Recursos Matemáticos Aplicados na Formulação de $ker_n(x)$ para a Série Ascendente da Expressão (6.28) 316

A.5.5 – Considerações Matemáticas na Formulação de $kei_n(x)$ para a Série Ascendente da Expressão (6.32) 319

A.5.6 – Recursos Matemáticos Empregados nas Expansões Assintóticas das Funções Modificadas de Bessel 321

A.5.6.1 – Emprego em $f_n(x)$ 322

A.5.6.2 – Considerações para $f_n(-x)$ 324

A.5.6.3 – Aplicação no Somatório Infinito de $g_n(x)$ da Expressão (6.39) 325

A.5.6.4 – Alterações Propostas para $g_n(-x)$ 327

Pág.

APÊNDICE VI – CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICO DE UM SISTEMA EXEMPLO

A.6.1 – Apresentação do Sistema Exemplo 329

A.6.2 – Caso do Sistema Aéreo 329

A.6.3 – Caso do Sistema Subterrâneo 368

A.6.4 – Cálculo para um Sistema Submarino 373

APÊNDICE VII– TABELAS DO SISTEMA EXEMPLO DO CAPÍTULO VIII

A.7.1 – Considerações Gerais 379

# CAPÍTULO I

# INTRODUÇÃO

## 1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A energia é um suporte essencial à vida. O desenvolvimento das sociedades industriais está intimamente ligado ao uso crescente de energia.

A energia elétrica ainda ocupa uma fração importante da energia utilizada, dado que ainda não foram encontradas soluções satisfatórias quanto às fontes alternativas de energia que possam superá–la.

Desta forma, é inevitável perceber que o caminho do suprimento de energia, como aliás já tem sido feito, é o transporte da mesma, do ponto de geração ao ponto de consumo. Notadamente, os centros de carga não são adjacentes à geração.

Há basicamente dois meios de transportar a energia elétrica[36] da geração ao ponto de carga: pelas linhas de transmissão aéreas e por cabos subterrâneos; indiscutivelmente bem mais dispendioso. Entretanto, tendo o seu emprego aumentado para o suprimento energético dos grandes centros urbanos densamente povoados.

Há ainda grande interesse sobre os cabos submarinos no tocante à substituição dos geradores a diesel pela energia elétrica, para solucionar o suprimento de ilhas, em face do grande crescimento da demanda[29]; sendo inclusive, objeto de pesquisa[4,6] para o transporte de energia elétrica também em plataformas de petróleo, com crescente preocupação nas últimas décadas.

Assim sendo, com o aumento do uso da transmissão de energia elétrica por cabos subterrâneos, com níveis de tensão cada vez maiores e o interesse acentuado pelos cabos submarinos, tornam–se de grande importância a análise das características de propagação de onda e estudos de transitórios, bem como outros estudos associados ao sistema de cabos, caracterizando–se extremamente importante obter os parâmetros elétricos de um sistema de cabos em dependência da freqüência; tanto sob o enfoque teórico quanto através do cálculo computacional; onde se insere o principal objetivo deste trabalho.

Até por volta de 1970, os cálculos dos parâmetros elétricos dos cabos eram feitos considerando aproximações das funções de Bessel[38], sendo satisfatório nas baixas freqüências com uma pequena margem de erro.

Claramente, para modelos mais confiáveis desses tipos de sistemas de transmissão, na ordem do plano econômico e na escolha de isolantes e proteção contra transitórios, há uma grande necessidade de cálculos mais precisos envolvendo séries bastante sensíveis à convergência; sendo conseguidos com os recursos computacionais existentes.

Este trabalho descreve uma formulação físico–matemática analítica[4] derivada das equações de campo, incluindo as funções de Bessel ou Kelvin, capaz de obter os parâmetros elétricos de um sistema de cabos em função da freqüência. São eles:

– matriz das impedâncias longitudinais (série) por unidade de comprimento;
– matriz das admitâncias transversais (derivação) por unidade de comprimento.

Ressalta–se que esta formulação analítica tem algumas limitações geométricas como o emprego restrito às configurações de cabos coaxiais e configurações de cabo

PT (descritas no Capítulo II) com simetria axial. No entanto, cumpre observar que estas são as configurações mais abrangentes nos sistemas elétricos de cabos.

Portanto, a abordagem aqui exposta direciona–se aos sistemas de cabos constituídos de cabos coaxiais monofásicos consistindo de núcleo (condutor), blindagem e armação, conforme ilustrados no corte transversal da Figura (2.3) e/ou cabos trifásicos PT, tipo tubulares, contendo ou não cabos de fibra ótica, vistos na Figura (2.6), cuja espessura do tubo envolvente é finita.

Quanto às instalações podem ser aéreos, subterrâneos ou submarinos.

## 1.2 – METODOLOGIA PROPOSTA

Os parâmetros de um sistema de cabos são obtidos a partir das equações matriciais seguintes:

$$\frac{dV}{dx} = -Z\,I \tag{1.1}$$

$$\frac{dI}{dx} = -Y\,V \tag{1.2}$$

onde, V, I, Z e Y são definidos no Capítulo V.

Em geral, as matrizes de impedâncias longitudinais e das admitâncias transversais de um sistema de cabos podem ser obtidas a partir das expressões que seguem[4]:

$$Z = Z_i + Z_p + Z_c + Z_0 \tag{1.3}$$

$$Y = j\omega P^{-1}$$

$$P = P_i + P_p + P_c + P_0 \tag{1.4}$$

Sendo P a matriz de coeficientes de potencial e as matrizes parciais em Z e P são, respectivamente, definidas nos Capítulos III e IV.

As contribuições do retorno pelo solo são baseadas na literatura clássica de CARSON[9,31], para cabos aéreos, de POLLACZEK[30,38], para cabos subterrâneos e BIANCHI[6] para cabos submarinos.

Entende–se por sistema elétrico de cabos a formação por n–elementos metálicos, N–cabos, m–fases e k–circuitos mutuamente acoplados.

Além disso, uma avaliação das matrizes Z e Y do sistema de cabos permite representá–las por:

$$\begin{bmatrix} [CABO_{1-1}] & [MÚTUA_{1-2}] & \cdots & [MÚTUA_{1-N}] \\ [MÚTUA_{2-1}] & [CABO_{2-2}] & \cdots & [MÚTUA_{2-N}] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [MÚTUA_{N-1}] & [MÚTUA_{N-2}] & \cdots & [CABO_{N-N}] \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

tendo dimensão n x n.

Sendo matrizes simétricas, como conseqüência de se supor sistema linear, estático e passivo.

## 1.3 – HIPÓTESES ADOTADAS

O cálculo analítico envolvendo os fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas em sistema elétrico de cabos é bastante complexo, face às dificuldades existentes quanto às grandezas envolvidas; tais como: morfologia, características eletromagnéticas de alguns materiais e do solo que o cerca, etc..

Os problemas citados tornam impraticáveis os cálculos exatos dos parâmetros elétricos. Em princípio, tornam–se viáveis mediante a consideração de algumas hipóteses simplificativas.

Embora a adoção dessas hipóteses, na análise de determinados casos, possa levar a erros significativos; entretanto, nas análises de transitórios e propagação de ondas dos sistemas de cabos, na maioria dos casos, com freqüências de interesse na faixa de até 1 MHz, obtêm–se valores razoáveis para os parâmetros dos cabos.

Destaca–se, que pode ser obtida uma boa performance das teorias clássicas de Carson e Pollaczek, sob condições propícias do solo, assumindo algumas das hipóteses a seguir.

Essas hipóteses, no que concerne os efeitos morfológicos e a dependência da freqüência, com validades aceitáveis, são:

a) o solo é plano e homogêneo nas vizinhanças do(s) cabo(s);

b) o solo tem condutividade e constante dielétrica uniformes;

c) os cabos são paralelos entre si e ao solo, sendo os seus diâmetros muito

inferiores às distâncias envolvidas;

d) os efeitos terminais do cabo são desprezados na determinação do campo eletromagnético;

e) desprezam–se as perdas no dielétrico; visto que as mesmas são pequenas, se comparadas com as perdas nos meios condutores dos cabos e as perdas no solo;

f) as correntes capacitivas de deslocamento entre o cabo e o solo, no que concerne a impedância de retorno pelo solo, são desprezadas dependendo do tipo de solo;

g) o comprimento de onda é suficientemente longo comparado com as dimensões geométricas transversais do cabo;

h) o retorno da corrente é feito parte pelas blindagens e armações metálicas do cabo e parte pelo solo;

i) a corrente flui somente longitudinalmente em cada camada metálica do cabo;

j) a permeabilidade magnética é uniforme e constante.

Freqüentemente, as armações são constituídas de materiais ferromagnéticos. Entretanto, não é usual ter altas correntes para causar a saturação das mesmas. Sendo de interesse considerar a permeabilidade magnética do material dependente da corrente, em função do efeito de saturação; não é uma tarefa fácil, pois envolve uma variação não linear; no entanto, pode ser feita considerando a literatura, nas referências[6,7,12];

ℓ) a espessura do tubo envolvente é finita, se comparada com a profundidade de penetração na parede metálica do mesmo;

m) no caso de cabos com tubo envolvente (cabos PT), os cabos SC, internos, de energia são iguais entre si e eqüidistantes do centro do tubo envolvente. O mesmo ocorre com os cabos de fibra ótica;

n) no cálculo da impedância, a espessura do semicondutor é adicionada à do isolante; ou seja, os raios que definem as espessuras das camadas metálicas pela diferença entre os mesmos, são os que devem ser usados;

o) no cálculo da admitância, a espessura do semicondutor é adicionada à do condutor. Portanto, neste caso, os raios usados são os que definem as espessuras das camadas isolantes;

p) as matrizes **Z** e **Y** têm a mesma dimensão.

# CAPÍTULO II

# O CABO NO SISTEMA ELÉTRICO

## 2.1 – ASPECTOS GERAIS

O cabo é um elemento constituinte do sistema elétrico, devendo ser adequado às suas características.

Os vários tipos de cabos podem operar em faixas limitadas de tensão e potência.

Quanto à aplicação[16,19,27], podem ser:

– cabos de uso específico, os quais se subdividem em:
  . cabos de comando;
  . cabos para instrumentação;
  . cabos para navios;
  . cabos para circuitos de segurança (antichama);
  . cabos submarinos, etc.;
– cabos de uso geral.

Os cabos elétricos podem ser utilizados em sistemas de transmissão, distribuição, iluminação pública, etc..

Os vários tipos de materiais isolantes empregados como dielétricos e capa externa ou "tubo envolvente" são principalmente limitados pelos níveis de tensão do sistema, a fim de garantir a confiabilidade dos mesmos.

**Quadro 2.1** – Denominação de cabos isolados da Pirelli[27]

| MATERIAL ISOLANTE | CABOS PIRELLI | CLASSE DE TENSÃO (kV) |
|---|---|---|
| PVC | Sintenax | 1–5–8–15 |
| Polietileno reticulado (XLPE) | Voltenax | 1 |
| | Voltalene | 0.6–5–8–15 |
| Borracha etileno propileno (EPR) | Eprotenax | 0.6–5–8–15–25–35–69 |
| | Eproprene | 0.6–5–8–15 |
| Papel impregnado com massa | UNP | 1–5–8–15–25–35 |
| | RP | 1–5–8–15 |
| | HP | 15–25–35 |
| | RPFP | 1–5–8–15 |
| Papel impregnado com óleo fluido | OF | 69–88–138–230–345 |

## 2.2 – DADOS CONSTRUTIVOS DOS CABOS

O cabo é constituído por várias camadas que, na ordem da fabricação, vão do condutor à capa externa; porém, podendo diferir do ponto de vista construtivo, conforme o tipo de cabo.

### 2.2.1 – Condutor

Na concepção do condutor são importantes o material empregado e a sua forma geométrica.

#### 2.2.1.1 – Material Empregado na Construção dos Condutores Elétricos

Atualmente, os materiais mais utilizados na fabricação dos condutores dos cabos elétricos são o cobre e o alumínio[27,28].

O cobre deve ser eletrolítico, de pureza mínima 99.9%, recozido (têmpera mole) e de condutibilidade 100% IACS (International Annealed Copper Standard). O cobre de têmperas meio dura e dura só é utilizado em aplicações especiais[19,27].

O emprego do alumínio na fabricação dos condutores dos cabos elétricos tem crescido nos países mais desenvolvidos, com tendências no Brasil[28]. Isto ocorre por várias razões:

- o emprego do alumínio como condutor elétrico é de conveniência econômica;
- os cabos de alumínio, por serem mais leves (menor peso específico) que os de cobre, facilitam o transporte e a instalação dos mesmos;
- praticamente, já não existem mais inconvenientes quanto ao mau contato nas interligações com condutores de alumínio, que limitavam o seu uso. Esse mau contato é função da camada fina de óxido que normalmente envolve o alumínio, sendo de característica altamente isolante. Experiências realizadas com o alumínio, durante alguns anos, permitiram o desenvolvimento de novas

técnicas de trabalho e de linhas de acessórios especiais, para fazerem as conexões e as interligações que superaram os inconvenientes citados[28];

– o alumínio puro utilizado em condutores isolados é obtido geralmente por laminação contínua e é de têmpera meio dura e de condutibilidade 61% IACS.

Levando em consideração o transporte de uma mesma corrente, pode ser facilmente verificado, partindo da igualdade das resistências ôhmicas[27], que o condutor de alumínio terá diâmetro 28% aproximadamente maior do que o de cobre; porém, pesando ainda cerca da metade deste.

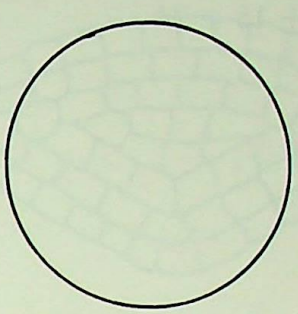
Entretanto, cumpre observar que, apesar das vantagens oferecidas pela aplicação do alumínio como condutor elétrico, em se tratando de um cabo elétrico, outros fatores tornam–se preponderantes à escolha ou não do alumínio como o elemento condutor. Dentre eles, citam–se, principalmente para o emprego em tensões mais altas, o custo do isolamento como conseqüência do aumento do diâmetro do cabo e problemas de corrosão em presença da umidade para cabos subterrâneos, independentes da tensão aplicada.

Observa–se também, que o cobre ainda é o material condutor largamente empregado em todos os tempos.

### 2.2.1.2 – Forma Geométrica dos Condutores Elétricos

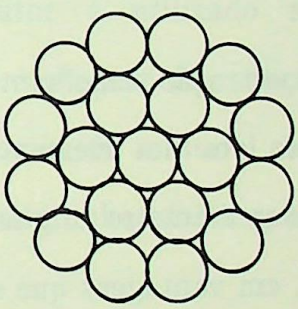
O condutor de cobre ou em alumínio pode ser construído de várias formas[19,27,28]:

– Redondo sólido



Do ponto de vista econômico é o ideal; porém, limitado por seções menores em função do aspecto dimensional e da flexibilidade.

– Redondo normal



Condutor de formação concêntrica ou regular; constituindo–se de um fio longitudinal, em torno do qual, em forma de espiral, são colocadas uma ou mais coroas de fios com o mesmo diâmetro do fio central. Esse tipo de condutor tem mais flexibilidade e é amplamente utilizado na construção de cabos de energia unipolares ou múltiplos e para qualquer tipo de isolamento.

As formações padronizadas de cordas normais são as seguintes:

7 fios = 1 + 6

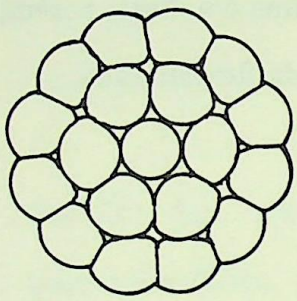
19 fios = 1 + 6 + 12

37 fios = 1 + 6 + 12 + 18

61 fios = 1 + 6 + 12 + 18 + 24

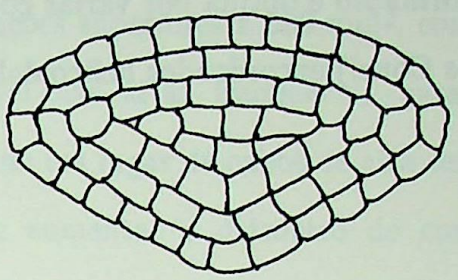
e assim sucessivamente.

– Redondo compacto



Apresenta processo de construção semelhante ao do condutor redondo normal; contudo, após o encordoamento dos fios elementares, ele sofre uma compactação através de um perfil que reduz o diâmetro original deformando os fios das cordas; caracterizando–se, desta forma, em vantagens que são a redução do diâmetro final do cabo acompanhada da eliminação dos espaços vazios no interior do condutor e a minimização da heterogeneidade do campo elétrico. Tem como desvantagem a perda parcial da flexibilidade.

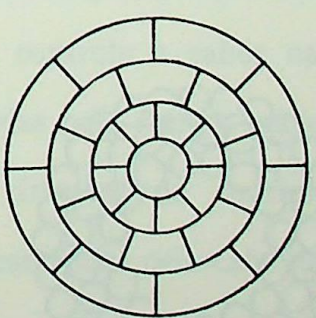
– Setorial compacto



O processo construtivo é análogo ao redondo compactado; sendo que o formato do perfil setorial é obtido através da passagem de uma corda redonda normal por jogos de calandras[19,27], dimensionadas para atribuir ao condutor o formato setorial adequado, com deformação dos fios elementares.

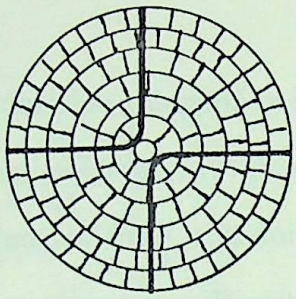
Este tipo de condutor é utilizado nos cabos múltiplos (tripolares e quadripolares) oferecendo as vantagens da redução do diâmetro externo do cabo com conseqüente redução e economia do material de enchimento e proteção e, também reduzindo a heterogeneidade das linhas do campo elétrico.

– Conci



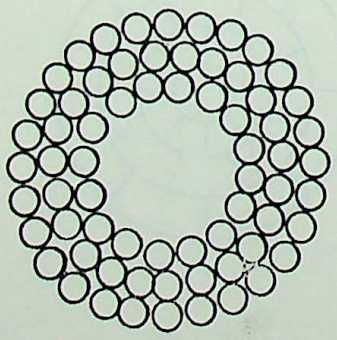
É o tipo de condutor empregado somente em cabos OF (com isolante a óleo fluido). Trata–se de um condutor anular cujo núcleo é oco, formando um canal para o óleo impregnante. Sua formação é obtida por várias coroas anulares que são formadas por setores anulares (fios Conci) encordoados helicoidalmente.

– Redondo segmentado



A sua construção se baseia na divisão do condutor em segmentos separados entre si por uma camada isolante relativamente fina, de forma a melhor distribuir a densidade de corrente ao longo do condutor. Sua princípal aplicação se encontra em cabos singelos de seções superiores a 500 $mm^2$, quando o efeito pelicular se torna apreciável, objetivando minimizá–lo e garantindo maior capacidade de condução de corrente para o condutor.

– Anular



É um condutor redondo, em forma de coroa circular[27], tendo o núcleo de corda textil e ao redor um encordoamento por fios. Tem utilização semelhante ao redondo segmentado, em cabos de seções superiores a 500 $mm^2$, com a finalidade de reduzir o efeito pelicular (considerável nas altas freqüências para cabos normais com tais seções). É também empregado em lugar de cabos de alta tensão com pequena seção de cobre, tendo o objetivo de aumentar o diâmetro do condutor e reduzir o campo elétrico nas proximidades do mesmo, diminuindo a possibilidade da ocorrência do efeito corona.

### 2.2.2 – Blindagem sobre o Condutor

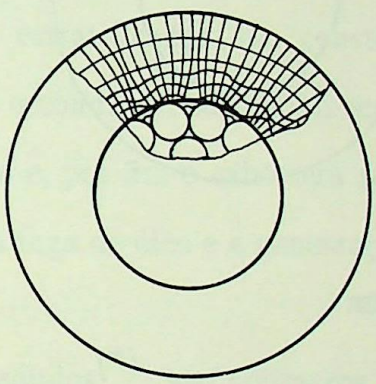


Fig. 2.1 – Condutor sem blindagem

A blindagem, de um modo geral, tem finalidade que depende do tipo de cabo. Por exemplo, nos cabos de controle e cabos navais, o seu objetivo é evitar que ocorram interferências causadas pelo campo magnético gerado por cabos de energia, que induzem tensões nos circuitos de controle e interferências nos meios de comunicação e nos sinais transmitidos pelo cabo naval.

No caso de cabos isolados de média e alta tensão, a blindagem sobre o condutor é o revestimento com uma camada de material semicondutor(*), devendo estar intimamente unida à superfície interna do isolamento, para que tenha um perfeito desempenho. Suas principais finalidades são permitir uma forma perfeitamente cilíndrica ao condutor, eliminar a existência de espaços vazios entre o condutor e a isolação e reduzir os efeitos fisiológicos causados pelo campo magnético gerado no cabo de energia.

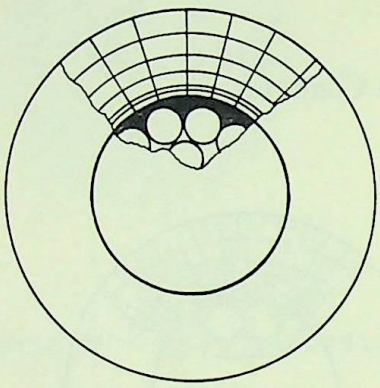


Fig. 2.2 – Condutor com blindagem

O condutor tendo uma forma perfeitamente cilíndrica reduz a forma distorcida do campo elétrico, tornando–o uniforme e com linhas homogêneas e de distribuição simétrica radial e ainda elimina a concentração de solicitações elétricas em determinados pontos que podem perfurar o dielétrico.

### 2.2.3 – Isolação

A isolação é considerada uma das partes construtivas de grande influência na escolha do tipo de cabo a ser especificado para um dado sistema elétrico; seja pelas suas características elétricas e mecânicas, pelas propriedades químicas do material

---

(*) materiais condutores não metálicos.

isolante ou mesmo pelo custo.

A isolação é colocada sobre o elemento condutor com a finalidade de isolá–lo eletricamente do meio que o cerca, tendo a característica de alta resistividade elétrica.

Os materiais isolantes mais utilizados nos cabos de energia elétrica são divididos em dois grupos:

– dielétricos estratificados ou laminados;
– dielétricos sólidos.

Os dielétricos estratificados são constituídos por fitas de papel aplicadas helicoidalmente sobre o condutor; sendo, em seguida impregnadas com massa ou com óleo fluido sob pressão e, por fim o cabo será coberto por uma camada de chumbo ou alumínio para evitar a fuga do óleo e a penetração de umidade na isolação.

Os dielétricos sólidos(*) são polímeros colocados sobre o condutor ou sobre a blindagem do condutor, que se subdividem em:

– termoplásticos;
– termofixos.

O Quadro 2.2 ilustra a divisão e as subdivisões entre os grupos de dielétricos.

---

(*) também conhecidos como extrudados.

**Quadro 2.2** – Materiais mais usados como isolantes

| | | |
|---|---|---|
| Sólidos (extrudados) | Termoplásticos | –PVC (cloreto de polivinila)<br>–PET (polietileno) |
| | Termofixos | –XLPE (polietileno reticulado)<br>–EPR (borracha etileno–<br>–propileno) |
| Estratificados (laminados) | – Papel impregnado com massa<br>– Papel impregnado com óleo isolante fluido sob pressão | |

Basicamente, a distinção entre os termoplásticos e os termofixos está na capacidade dos termofixos permanecerem[19] estáveis em temperaturas mais elevadas.

Quimicamente, os termoplásticos são polímeros de cadeia linear e os termofixos são polímeros tridimensionais obtidos por vulcanização.

Na prática[27], o PVC é o isolante sólido mais usado até 15 kV, apesar de suas características elétricas apenas regulares; o seu emprego é justificado pelo fator econômico e por apresentar excelente resistência à ionização (maior durabilidade).

O polietileno comum PET[27], com excelente constante de isolamento, alta rigidez dielétrica e fator de perdas baixíssimo, é limitado pela baixa resistência à ionização e pobres características físicas, sendo praticamente fluido a $110^0$ C.

O XLPE, obtido por reticulação molecular do polietileno comum, une as boas propriedades deste com uma alta temperatura admissível e boas qualidades

mecânicas; porém, é pouco flexível e também tem baixa resistência à ionização. Portanto, o seu emprego tem confiabilidade até 15 kV.

O EPR é o elemento isolante de desenvolvimento mais recente e tido como o mais completo dos isolantes sólidos, visto que apresenta as seguintes vantagens: alta temperatura admissível, resistência à ionização muito maior do que o XLPE, excelente flexibilidade e apresenta baixa dispersão de rigidez dielétrica.

Foram feitas exaustivas experiências mundiais e nacionais quanto ao emprego do EPR como material isolante na baixa e na média tensão, inclusive com testes na alta tensão[27], obtendo–se bons resultados.

O papel impregnado com massa tem o seu emprego, tradicionalmente, em cabos de energia de baixa e média tensão. É um material, comprovadamente de vida útil longa, que vem sendo utilizado por muitas décadas, em todo o mundo. A contínua evolução tecnológica tem melhorado as características do papel impregnado, produzindo novas gerações de cabos de alta qualidade.

O papel impregnado com óleo fluido sob pressão é o único isolante plenamente confiável, disponível nos tempos atuais[27], para a utilização de cabos de energia elétrica de altíssima tensão.

Cumpre ressaltar[19,27] a importância da rigidez dielétrica como um dos parâmetros de escolha do material isolante.

A rigidez dielétrica varia de seção para seção ao longo do comprimento do cabo, apresentando uma dispersão apreciável em torno de um valor médio para os isolantes sólidos; porém, para os isolantes estratificados, a dispersão da rigidez

dielétrica é extremamente baixa, tornando o papel impregnado, dentre os materiais isolantes utilizados, o mais confiável. Isto ocorre devido ao método de aplicação do isolamento estratificado e subseqüente impregnação evitar a ocorrência de vazios localizados na isolação. Esta garantia não é dada pelos processos de preparação e aplicação dos dielétricos sólidos.

Entretanto, pode–se reduzir sensivelmente a dispersão da rigidez dielétrica nestes elementos isolantes, desde que haja[27] um rígido controle das matérias primas, da limpeza dos locais de preparação e da aplicação dos dielétricos sólidos, assim como a utilização de equipamentos adequados para monitoramento.

Finalmente, constata–se que, historicamente, não há um material isolante ideal para a aplicação em cabos elétricos. A escolha de alguns materiais ainda gera controvérsias entre os fabricantes.

### 2.2.4 – Enchimentos

Utilizados em cabos múltiplos. São empregados para o preenchimento de vazios internos entre os cabos (condutores internos e cabos de fibra ótica, quando existem). Podem ser polímeros termoplásticos ou termofixos ou outros materiais como juta, algodão e fibra de vidro.

### 2.2.5 – Blindagem sobre o Isolamento

Consiste de uma camada de material semicondutor e, na maioria dos casos, também de uma camada de material condutor aplicados sobre à superfície do isolamento. Seu principal objetivo é confinar o campo elétrico dentro do cabo isolado, obtendo uma distribuição radial e simétrica do mesmo, fazendo com que o dielétrico

seja uniformemente solicitado.

Da mesma forma que a blindagem sobre o condutor, esta blindagem sobre a isolação deve ser construída de maneira que elimine qualquer possibilidade de vazios entre ela e a superfície externa do isolamento.

Esta blindagem deve ter uma condutância compatível com o nível das correntes de fuga e capacitivas; sendo ainda constituída de fitas ou fios de cobre para o transporte de corrente induzida ou de curto–circuito diretamente para a terra.

### 2.2.6 – Armação ou Proteção Metálica

É um reforço mecânico colocado entre o núcleo e a cobertura externa, com o objetivo de aumentar a resistência à tração e/ou a resistência radial dos cabos.

Os tipos mais usados são:

- armação de fita plana de aço, aplicada helicoidalmente;
- armação de fita de aço ou alumínio, aplicada transversalmente, corrugada e intertravada. É o tipo mais moderno[27], que além de garantir maior resistência aos esforços radiais que o tipo tradicional à fita plana, permite boa flexibilidade ao cabo;
- armação de fios de aço, empregada nos cabos em que se deseja obter maior resistência aos esforços de tração como no caso de cabos submarinos que estão sujeitos aos efeitos das correntes marítimas.

### 2.2.7 – Cobertura

É uma proteção não metálica ou capa externa. Tem o objetivo de proteger o núcleo contra danos provocados pelo ambiente onde o cabo está instalado.

Sendo um elemento de proteção, a cobertura deve possuir propriedades específicas que sejam compatíveis com a utilização do cabo.

Na maioria dos casos, a capa externa com isolamento seco é de PVC, material mais econômico e com resistência suficiente para o uso corrente.

Os principais materiais adotados para a construção da cobertura são:

– cloreto de polivinila (PVC);
– cloreto de polivinila resistente à chama (PVC–BWF);
– polietileno linear (PE);
– polietileno clorossulfonado – CSP (HYPALON);
– policloroprene (NEOPRENE);
– borracha nitrílica.

## 2.3 – ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Cada cabo unipolar, com camadas coaxiais, ("single–core" – SC), seja ele condutor de energia ou cabo de fibra ótica, pode ser representado, para fins de cálculo dos parâmetros elétricos, pelo corte transversal ilustrado na Figura 2.3.

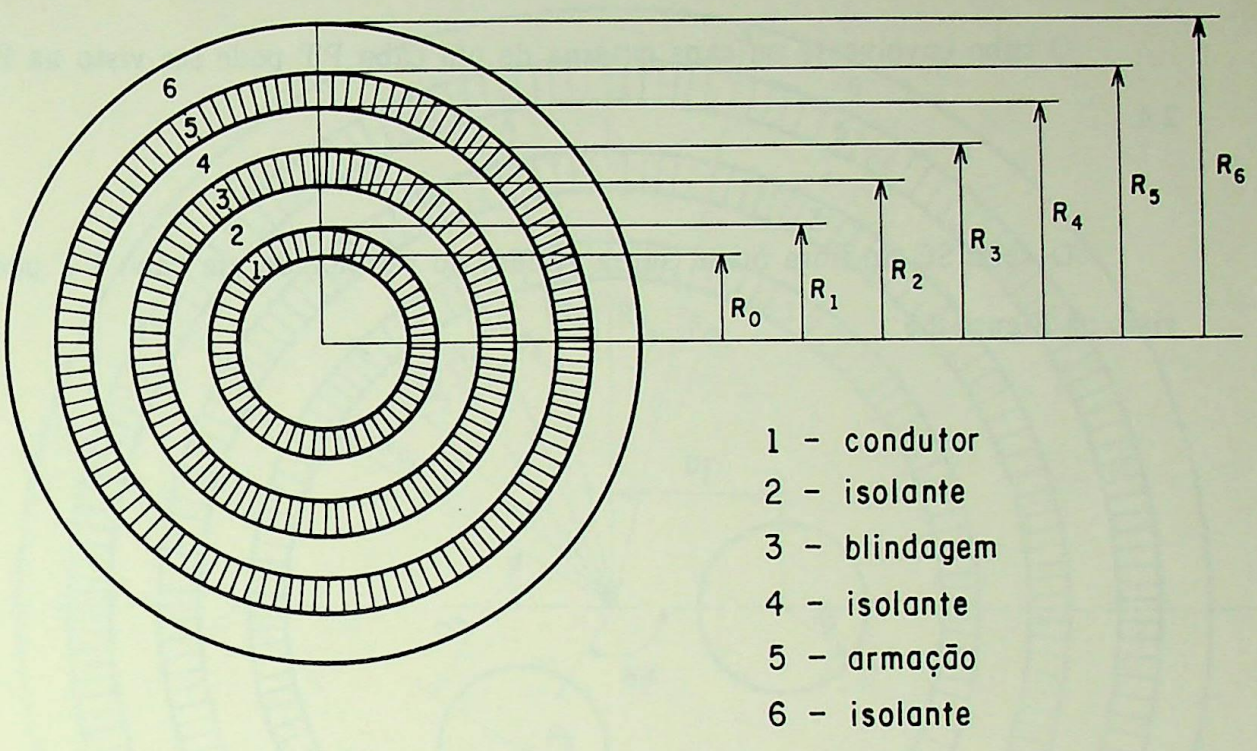



Fig. 2.3 – Corte transversal de um condutor interno ou cabo SC

Um cabo tipo PT[3], termo adotado para cabo multipolar, com condutor, blindagem e armação fora do centro, fechados por um tubo envolvente ("pipe–type cable"), pode ser visto na Figura 2.6. Neste caso, apresenta–se um cabo trifásico, com configuração simétrica dos cabos SC internos e contendo cabos de fibra ótica.

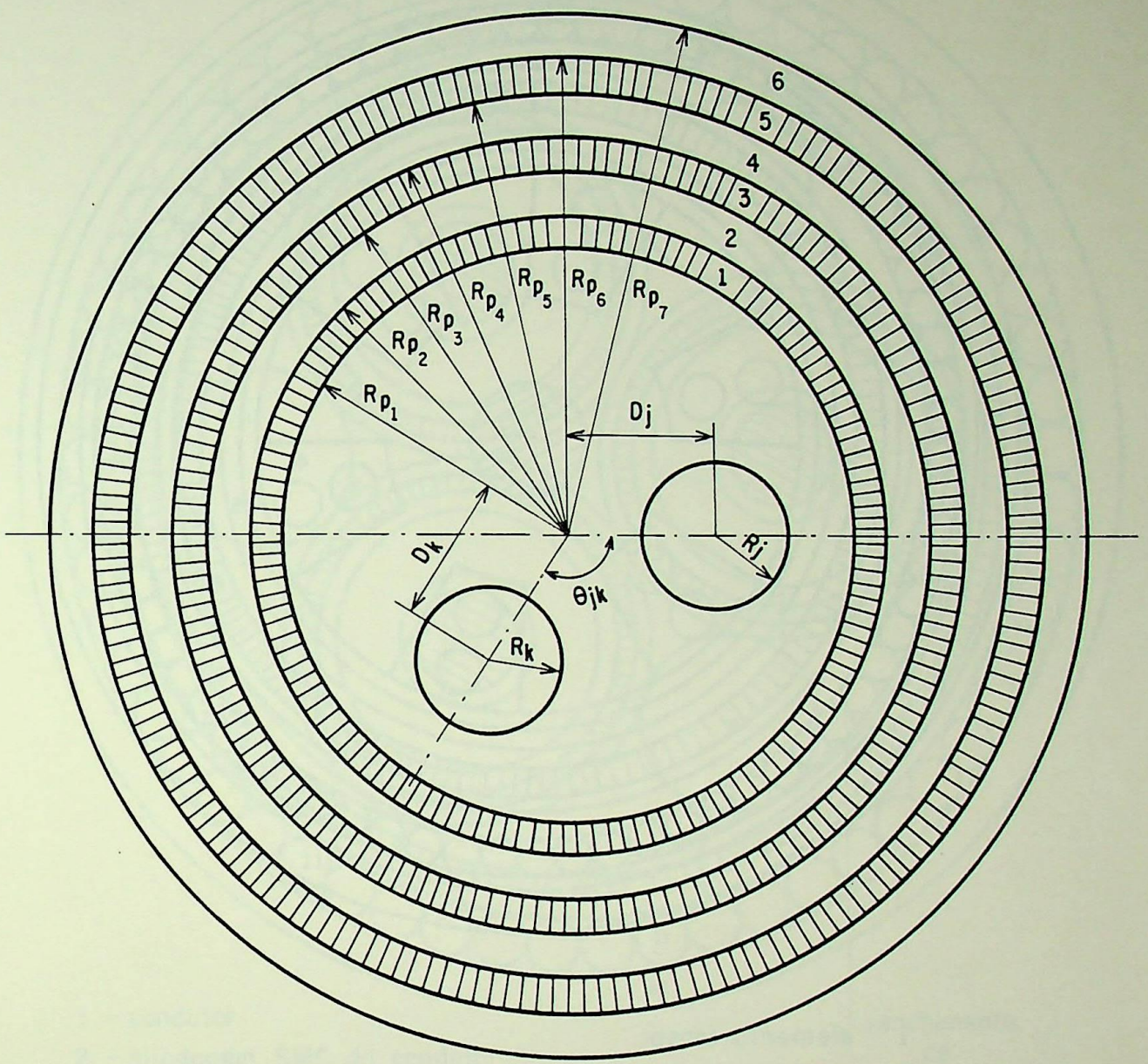
É crescente o uso destes tipos de cabos com cabos de fibra ótica em instalações submarinas, principalmente pelos custos de lançamento de um cabo submarino e problemas mecânicos para os cabos de fibra ótica.

Os cabos de fibra ótica no interior de um cabo PT são usados para sistemas de comunicação, sistemas de controle e até mesmo para monitoramento da energização

do cabo PT.

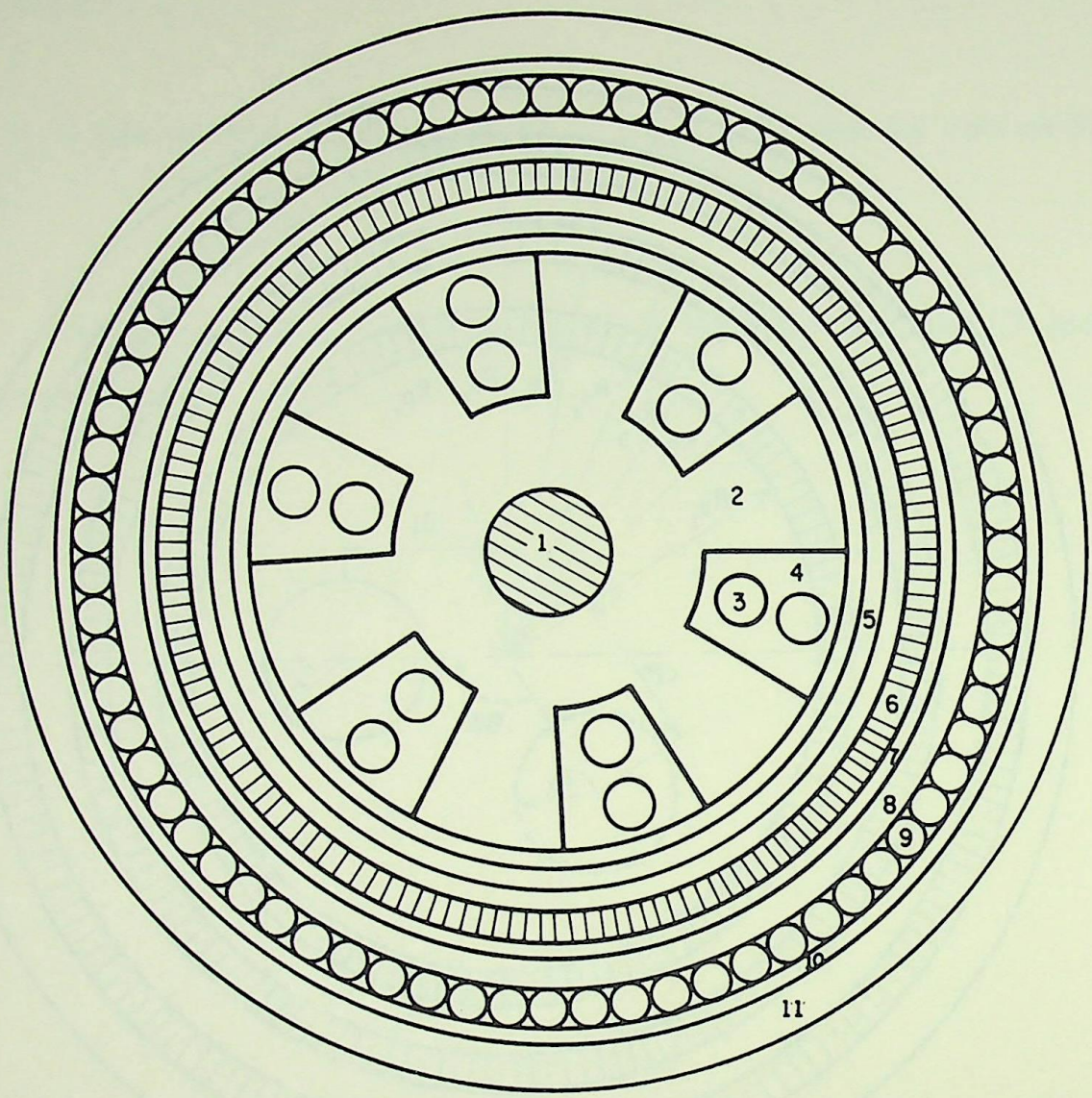
O tubo envolvente ou capa externa de um cabo PT pode ser visto na Figura 2.4.

O cabo SC de fibra ótica, supra citado, no interior de um cabo PT pode ser visto na Figura 2.5.



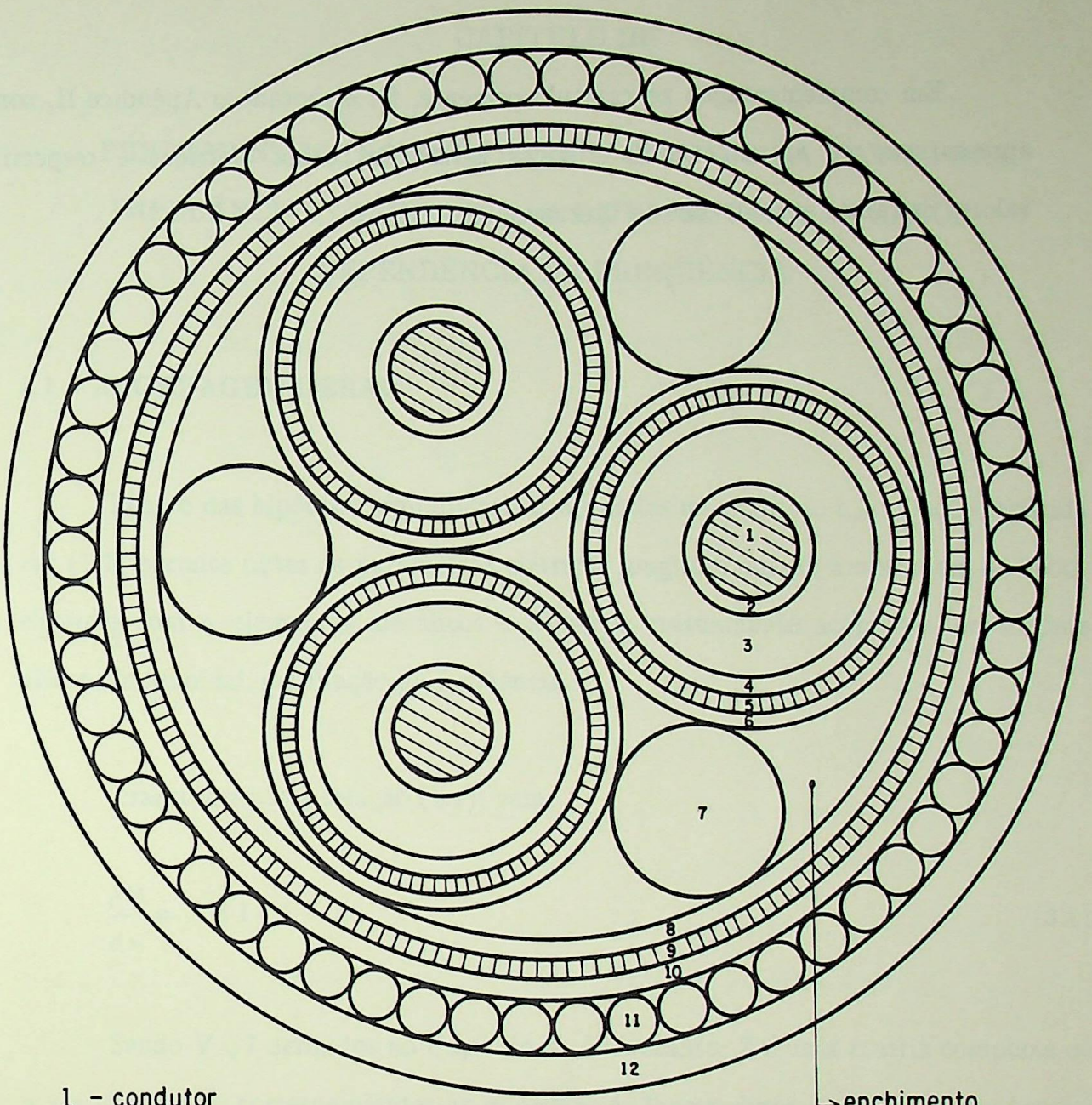

1 – proteção antiteredo
2 – isolante
3 – fita antitorsão
4 – isolante
5 – armação
6 – capa externa

Fig. 2.4 – Corte transversal de um cabo PT dando ênfase ao tubo envolvente




1 - elemento tensor
2 - suporte plástico
3 - fibra ótica revestida
4 - composto de preenchimento
5 - enfaixamento mais composto de preenchimento
6 - blindagem - fita de cobre
7 - proteção anticorrosiva
8 - capa interna de polietileno
9 - armação - fios de aço
10 - fita de algodão
11 - capa externa de polietileno

Fig. 2.5 – Corte transversal de um cabo SC de fibra ótica




1 - condutor
2 - blindagem SMC do condutor
3 - isolação
4 - blindagem SMC da isolação
5 - capa metálica
6 - capa termoplástica de polietileno
7 - cabo com fibras óticas
8 - fita de algodão embarrachada
9 - proteçao antiteredo
10 - capa termoplástica de polietileno
11 - fios de aço galvanizado
12 - polipropileno

Fig. 2.6 — Corte transversal de um cabo PT, trifásico com cabos de fibra ótica

Em complementação ao capítulo presente, foi elaborado o Apêndice II, com a apresentação de algumas características gerais dos cabos elétricos e respectivos valores de tabela encontrados na literatura.

# CAPÍTULO III

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DA MATRIZ DAS IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS DE UM SISTEMA DE CABOS – DEPENDÊNCIA DA FREQÜÊNCIA

## 3.1 – ABORDAGEM GERAL

Dentro das hipóteses simplificativas adotadas no Capítulo I, a relação indicada em (1.1) permite obter os parâmetros elétricos longitudinais de um sistema de cabos elétricos com n–elementos metálicos e N–cabos mutuamente acoplados, em regime alternado senoidal, em função da freqüência.

Transcrevendo a relação (1.1), vem:

$$\frac{dV}{dx} = -\,Z\,I \tag{3.1}$$

Sendo **V** e **I** definidos no Capítulo V. Entretanto, **Z** é uma matriz complexa de n x n elementos, correspondentes às impedâncias longitudinais entre os n–condutores (elementos metálicos) do sistema de cabos, por unidade de comprimento, em presença do solo.

Considera–se o sistema de cabos, em princípio, constituído por N–cabos PT; por si, formados por p–cabos SC, internos, de energia e q–cabos SC, internos, de fibra ótica. Como salientado no Capítulo II, o termo "cabo SC", neste trabalho, refere–se a um cabo unipolar coaxial. O termo "cabo PT", refere–se a um conjunto de cabos SC fechados por um tubo envolvente.

Na Figura (2.6) pode ser visto o corte transversal de um cabo PT, trifásico (contendo três cabos SC, internos, de energia) e com cabos SC, internos, de fibra ótica.

A formulação apresentada admite, ainda, a simetria cilíndrica na distribuição dos campos eletromagnéticos para cada camada metálica tratada como um condutor cilíndrico.

A título de esclarecimento, baseando–se na representação da matriz **Z** para o sistema de N–cabos, pela matriz expressa em (1.5), acrescenta–se que a expressão matricial apresentada em (1.3) deve ser calculada tantas vezes quantos forem os cabos do sistema; ou seja, N–vezes. Observa–se ainda, que esta expressão se refere à submatriz equivalente ao $\text{cabo}_{ii}$ ($i = 1, N$).

O presente capítulo tem por objetivos:

– obter a matriz $\mathbf{Z}_{ii}$ da expressão (1.3) retratada em (3.2);

– obter a matriz $\mathbf{Z}_{ij}$ das impedâncias mútuas entre cabos (para $i \neq j$).

Cumpre destacar, mais uma vez, que $\mathbf{Z}_{ii}$ e $\mathbf{Z}_{ij}$, em análise, são submatrizes da matriz **Z** do sistema de N–cabos. Por facilidade, neste capítulo, $\mathbf{Z}_{ii}$ será tratada por **Z**, definindo a matriz das impedâncias próprias longitudinais de um cabo PT e $\mathbf{Z}_{ij}$ também será tratada por matriz, correspondendo à matriz de impedâncias mútuas entre os cabos i e j.

Desta forma, reescrevendo (1.3), tem–se:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_p + \mathbf{Z}_c + \mathbf{Z}_0 \qquad (3.2)$$

Sendo as matrizes parciais definidas:

$\mathbf{Z}_i$ – matriz de impedância interna dos cabos SC, internos, de energia e de fibra ótica, caso existam ($\Omega$/m);

$\mathbf{Z}_p$ – matriz de contribuição de impedância interna do tubo envolvente, com referência à sua primeira camada metálica para os cabos SC, internos ($\Omega$/m);

$\mathbf{Z}_c$ – matriz de impedância de conexão entre as superfícies interna e externa do tubo envolvente ($\Omega$/m);

$\mathbf{Z}_0$ – matriz de impedância devida ao retorno pelo solo, para o cabo j ($\Omega$/m).

Percebe–se que da expressão matricial (3.2), resulta[4] a matriz completa de impedância própria para um cabo PT, constituído de condutores internos tipo SC, ilustrados no corte transversal da Figura 2.3, para a suposição do mesmo ter a espessura de tubo envolvente finita, se comparada com a profundidade de penetração da corrente.

Assumindo ser a espessura do tubo envolvente infinita, a matriz $\mathbf{Z}$ será obtida por:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_p \qquad (3.3)$$

## 3.2 – DETERMINAÇÃO DA MATRIZ PARCIAL $Z_i$

Esta matriz parcial de impedância interna de um cabo PT, considera apenas as interações entre os elementos metálicos de cada cabo SC, interno, isoladamente; sem a contribuição do tubo envolvente, conforme ilustrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} Z_{i_{c_1}} & 0 & \dots & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{i_{c_2}} & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & & Z_{i_{c_p}} & Z_{i_{FO_1}} & & & & & \\ 0 & \dots & & & & Z_{i_{FO_2}} & & & & \\ \vdots & & & & & & & & & \\ 0 & \dots & & & & & Z_{i_{FO_q}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Sendo os seus elementos assim definidos:

$Z_{i_{c_j}}$ (j=1, p) – submatriz de impedância interna de um cabo SC, interno, de energia;

$Z_{i_{FO_j}}$(j=p+1, p+q) – submatriz de impedância interna de um cabo SC, interno, de fibra ótica.

Os zeros colocados no final da diagonal principal de $Z_i$ são tantos, definindo linha e coluna, quantos forem os elementos metálicos no tubo envolvente.

Partindo–se da hipótese que, na maioria dos cabos utilizados nos sistemas elétricos, o número de camadas metálicas no tubo envolvente não ultrapassa a três, considera–se, portanto, este valor como referência nos cálculos dos parâmetros elétricos dos cabos, aqui abordados.

Constata–se que, sendo o caso de considerar o tubo envolvente com mais de três camadas metálicas, acrescentam–se para cada matriz parcial, os elementos referentes às mesmas. Para um tubo envolvente comportando menos de três elementos metálicos, retiram–se os elementos equivalentes às últimas camadas metálicas inexistentes no tal tubo envolvente.

Se a espessura do tubo envolvente for considerada infinita, as linhas e colunas referentes às camadas metálicas do mesmo, deixam de existir.

### 3.2.1 – Submatriz $Z_{i_{C_j}}$

De acordo com as fórmulas analíticas estabelecidas na literatura[4,5,38], a submatriz de impedância interna por unidade de comprimento, $Z_{i_{C_j}}$, de um cabo SC consistindo de condutor, blindagem e armação, representado pelo circuito da Figura (3.1), pode ser obtida como segue,

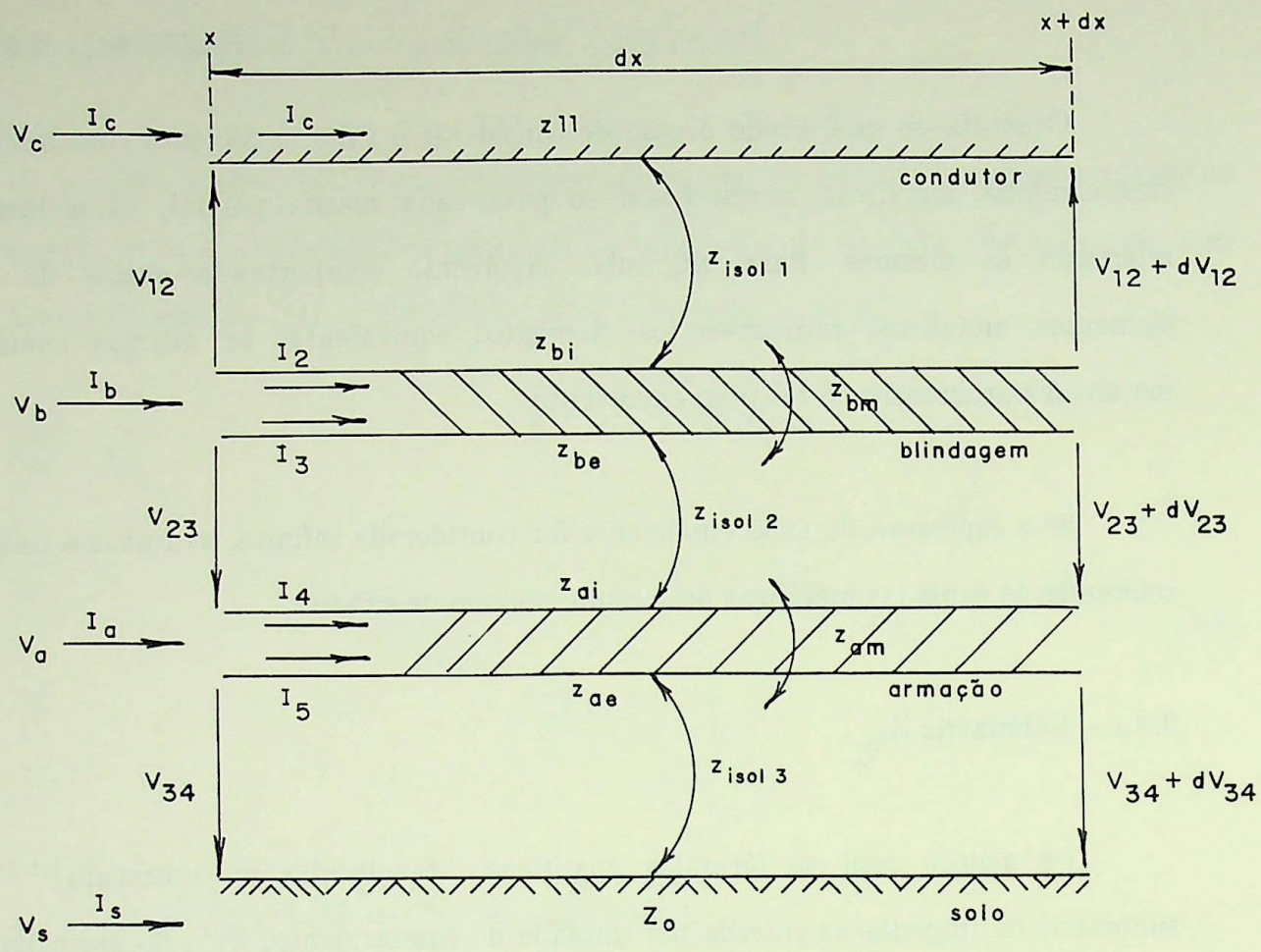



Fig. 3.1 – Circuito equivalente para o cálculo das impedâncias longitudinais de um cabo SC

definindo os parâmetros como:

$I_c$, $I_b$, $I_a$ e $I_s$– são respectivamente, as correntes fluindo no condutor, na blindagem, na armação e no meio externo ("solo");

$I_2$ e $I_4$ – representam, nesta ordem, as correntes fluindo nas superfícies internas da blindagem e da armação;

$I_3$ e $I_5$ – respectivamente, exprimem as correntes fluindo nas superfícies externas da blindagem e da armação;

$V_{12}$, $V_{23}$ e $V_{34}$ – representam, desta forma, as diferenças de potenciais no plano perpendicular à direção do cabo, entre: condutor e blindagem, blindagem e armação e ainda, armação e o solo;

$V_{12} + dV_{12}$, $V_{23} + dV_{23}$, $V_{34} + dV_{34}$ – nesta seqüência, resultam nas diferenças de potenciais equivalentes às citadas anteriormente, no plano x + dx.

Do circuito apresentado, obtêm–se as seguintes relações para as correntes:

$$\begin{cases} I_2 = -I_c \\ I_3 = -I_4 \\ I_5 = -I_s \end{cases} \tag{3.5}$$

$$\begin{cases} I_b = I_2 + I_3 = -(I_c + I_4) \\ I_a = I_4 + I_5 = I_4 - I_s \end{cases} \tag{3.6}$$

Das equações (3.5) e (3.6), resultam:

$$\begin{cases} I_4 = -(I_c + I_b) \\ I_s = -(I_c + I_b + I_a) \end{cases} \tag{3.7}$$

Para a diferença de potencial $V_{12}$ entre o condutor e a blindagem, vem:

$$V_{12} = \quad z_{11}\,dx\,I_c - z_{isol_1}\,dx I_2 - z_{bi}\,dx\,I_2 - z_{bm}\,dx\,I_3 + V_{12} + dV \tag{3.8}$$

Verifica–se, a partir de (3.8), fazendo–se as devidas substituições, que:

$$-\frac{dV_{12}}{dx} = (z_{11} + z_{isol_1} + z_{bi})\,I_c + z_{bm}\,I_4 \tag{3.9}$$

Para $V_{23}$, diferença de potencial entre a blindagem e a armação, com as mesmas considerações, decorre:

$$-\frac{dV_{23}}{dx} = (z_{be} + z_{isol_2} + z_{ai})\,I_4 + z_{bm}\,I_c - z_{am}\,I_s \tag{3.10}$$

Da diferença de potencial $V_{34}$, entre a armação e o meio externo (solo), aplicando os mesmos procedimentos anteriores, ou seja, "lei das malhas" e substituição das correntes, resulta em:

$$-\frac{dV_{34}}{dx} = (z_{ae} + z_{isol3} + Z_0)\,I_s - z_{am}\,I_4 \tag{3.11}$$

Pelo exame das equações desenvolvidas em (3.9), (3.10) e (3.11), nota–se que as impedâncias empregadas referentes aos subscritos acompanhados de i (da superfície interna) e e (da superfície externa) correspondem às clássicas impedâncias superficiais definidas por SCHELKUNOFF[33]. Essas, bem como, todas as outras impedâncias utilizadas são definidas no Apêndice III.

Ressalta–se que $Z_0$ refere–se à impedância própria de retorno pelo solo e será abordada em item próprio, posteriormente.

No Apêndice III é elaborado um detalhamento analítico para o cálculo da impedância superficial.

Tomando o solo como referência de potencial zero, têm–se:

$$V_a = -V_{34}$$

$$V_b = -(V_{23} + V_{34}) = V_a - V_{23} \tag{3.12}$$

$$V_c = V_{12} + V_b$$

Substituindo–se a equação (3.7) em (3.11), vem:

$$-\frac{dV_a}{dx} = (z_{ae} - z_{am} + z_{isol3} + Z_0)(I_c + I_b) + (z_{ae} + z_{isol3} + Z_0) I_a \tag{3.13}$$

Dando prosseguimento às substituições, inserindo–se as equações (3.7), (3.12) e (3.13) em (3.10), obtém–se:

$$\begin{aligned} -\frac{dV_b}{dx} = \quad & (z_{be} - z_{bm} + z_{isol2} + z_{ai} + z_{ae} - 2z_{am} + z_{isol3} + Z_0) I_c + \\ & (z_{be} + z_{isol2} + z_{ai} + z_{ae} - 2z_{am} + z_{isol3} + Z_0) I_b + \\ & (z_{ae} - z_{am} + z_{isol3} + Z_0) I_a \end{aligned} \tag{3.14}$$

De forma análoga, são feitas as substituições das equações (3.7), (3.12) e (3.14) em (3.9), resultando em:

$$-\frac{dV_c}{dx} = (z_{11} + z_{isol1} + z_{bi} + z_{be} - 2z_{bm} +$$

$$z_{isol2} + z_{ai} + z_{ae} - 2z_{am} + z_{isol3} + Z_0)\, I_c +$$

$$(z_{be} - z_{bm} + z_{isol2} + z_{ai} + z_{ae} - 2z_{am} + z_{isol3} + Z_0)\, I_b +$$

$$(z_{ae} - z_{am} + z_{isol3} + Z_0)\, I_a \qquad (3.15)$$

Assim sendo, as equações (3.13), (3.14) e (3.15) conduzem para:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dx} = -\mathbf{Z'I} \qquad (3.16)$$

sendo, neste caso $\mathbf{Z'} = \mathbf{Z}_{i_{C_j}} + \mathbf{Z}_0$.

Com base na análise teórica aqui exposta, permite avaliar a influência da impedância de retorno pelo solo ($Z_0$) presente em todas as parcelas de $\mathbf{Z'}$ e, como mencionado anteriormente, será objeto de estudo no item 3.5.

A presente análise permite representar $\mathbf{Z}_{i_{C_j}}$ conforme ilustrado a seguir:

$$\mathbf{Z}_{i_{C_j}} = \begin{bmatrix} Z_{i_{cc}} & Z_{i_{cb}} & Z_{i_{ca}} \\ Z_{i_{bc}} & Z_{i_{bb}} & Z_{i_{ba}} \\ Z_{i_{ac}} & Z_{i_{ab}} & Z_{i_{aa}} \end{bmatrix} \qquad (3.17)$$

Dada a simetria da matriz, resulta em:

$$\begin{cases} Z_{i_{cb}} = Z_{i_{bc}} \\ Z_{i_{ca}} = Z_{i_{ac}} \\ Z_{i_{ba}} = Z_{i_{ab}} \end{cases} \tag{3.18}$$

sendo:

a) $Z_{i_{cc}}$– impedância própria da primeira camada metálica ou condutor interno.

Das equações anteriores, observa–se que:

$$Z_{i_{cc}} = z_{11} + z_{isol1} + z_{bi} + z_{be} - 2z_{bm} + z_{isol2} + z_{ai} + z_{ae} - 2z_{am} + z_{isol3} \tag{3.19}$$

b) $Z_{i_{bb}}$– impedância própria da segunda camada metálica ou blindagem.

Das equações (3.14), (3.16) e (3.17), torna–se:

$$Z_{i_{bb}} = z_{be} + z_{isol2} + z_{ai} + z_{ae} - 2z_{am} + z_{isol3} \tag{3.20}$$

c) $Z_{i_{cb}}$– impedância mútua entre o condutor e a blindagem.

De forma análoga, através das equações (3.15), (3.16) e (3.17), tem–se:

$$Z_{i_{cb}} = z_{be} - z_{bm} + z_{isol2} + z_{ai} + z_{ae} - 2z_{am} + z_{isol3} \tag{3.21}$$

d) $Z_{i_{aa}}$– impedância própria da terceira camada metálica ou armação.

Das equações (3.13), (3.16) e (3.17), obtém–se:

$$Z_{i_{aa}} = z_{ae} + z_{isol3} \tag{3.22}$$

e) $Z_{i_{ca}}$– impedância mútua entre o condutor e a armação.

Partindo–se das equações (3.15), (3.16) e (3.17), vem:

$$Z_{i_{ca}} = z_{ae} - z_{am} + z_{isol3} \tag{3.23}$$

f) $Z_{i_{ba}}$– impedância mútua entre a blindagem e a armação.

Constata–se, através das equações (3.13), (3.16) e (3.17) que $Z_{i_{ba}} = Z_{i_{ca}}$.

Cumpre observar que, se o número de camadas metálicas do cabo SC for menor do que o envolvido nesta análise, basta retirar da formulação apresentada neste item, as contribuições referentes às camadas omitidas.

Dando continuidade às definições das impedâncias, seguem, para as impedâncias superficiais:

1) $z_{11}$ – impedância interna do condutor interno ou primeira camada metálica. Depende da geometria do condutor, a saber:

1.a) Condutor interno tipo cilíndrico oco, conforme apresentado no corte transversal da Figura 3.2:

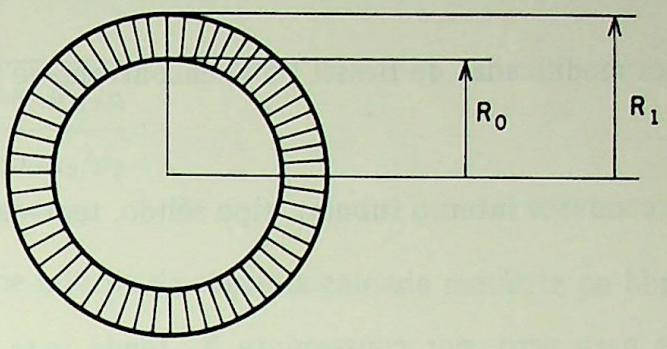



Fig. 3.2 – Corte transversal de um condutor tipo cilíndrico oco

$$z_{11} = \frac{j\omega\mu_0\mu_1}{2\pi} \frac{1}{X_2} \frac{I_0(X_2)\ K_1(X_1) + K_0(X_2)\ I_1(X_1)}{I_1(X_2)\ K_1(X_1) - I_1(X_1)\ K_1(X_2)} \tag{3.24}$$

onde:

$\mu_1$ – permeabilidade magnética relativa do material metálico que compõe o condutor;

$$\begin{cases} X_1 = R_0 \sqrt{j\omega\mu_0\mu_1/\rho_1} \\ X_2 = R_1 \sqrt{j\omega\mu_0\mu_1/\rho_1} \end{cases} \tag{3.25}$$

$X_1$ e $X_2$ – argumentos complexos das funções de Bessel;

$R_0$ – raio da superfície interna da camada metálica (m);

$R_1$ – raio da superfície externa da camada metálica (m);

$\rho_1$ – resistividade elétrica do material ($\Omega$m).

As demais variáveis e os parâmetros são definidos no Apêndice I.

As funções modificadas de Bessel I e K encontram–se no Capítulo VI.

1.b) Para um condutor interno tubular, tipo sólido, tem–se:

$R_0$ tende para zero, por conseguinte $X_1$ tende para zero e $z_{11}$ tende para a impedância interna de um cilindro homogêneo de raio $R_1$. Portanto, segue–se:

$$z_{11} = \frac{j\omega\mu_0\mu_1 I_0(X_2)}{2\pi X_2 I_1(X_2)} \qquad (3.26)$$

2) $z_{isol1}$ – impedância devida à variação no tempo, do campo magnético no isolante externo ao condutor.

$$z_{isol1} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (3.27)$$

3) $z_{bi}$ – impedância interna da superfície interna da blindagem.

Esta impedância é traduzida pela relação entre o campo elétrico longitudinal associado à superfície interna da blindagem e a corrente que retorna pelo condutor interno; permitindo a definição seguinte, segundo à formulação de SCHELKUNOFF[33]:

$$z_{bi} = \frac{j\omega\mu_0\mu_2}{2\pi} \frac{1}{X_3} \frac{I_0(X_3)\ K_1(X_4) + K_0(X_3)\ I_1(X_4)}{I_1(X_4)\ K_1(X_3) - I_1(X_3)\ K_1(X_4)} \qquad (3.27)$$

sendo:

$\mu_2$ – permeabilidade magnética relativa da blindagem;

$$\begin{cases} X_3 = R_2 \sqrt{j\omega\mu_0\mu_2/\rho_2} \\ X_4 = R_3 \sqrt{j\omega\mu_0\mu_2/\rho_2} \end{cases} \tag{3.28}$$

$R_2$ – raio da superfície interna da segunda camada metálica ou blindagem (m);

$R_3$ – raio da superfície externa da blindagem (m);

$\rho_2$ – resistividade elétrica da blindagem ($\Omega$m);

4) $z_{be}$ – impedância interna da superfície externa da blindagem.

Pode ser obtida através da relação entre o campo elétrico longitudinal referente à superfície externa da blindagem e a corrente retornando via superfície interna da armação.

Por similaridade às impedâncias anteriores, torna–se:

$$z_{be} = \frac{j\omega\mu_0\mu_2}{2\pi} \frac{1}{X_4} \frac{I_0(X_4)\ K_1(X_3) + K_0(X_4)\ I_1(X_3)}{I_1(X_4)\ K_1(X_3) - I_1(X_3)\ K_1(X_4)} \tag{3.29}$$

com todas as variáveis e parâmetros definidos ou com referências indicadas nas equações anteriores.

5) $z_{bm}$ – impedância mútua da blindagem ou impedância de transferência entre as superfícies da blindagem.

Esta impedância é caracterizada pela relação entre o campo elétrico longitudinal associado à superfície externa/interna da blindagem e a corrente

retornando pelo condutor interno/superfície interna da armação; o que permite obter:

$$z_{bm} = \frac{\rho_2}{2\pi R_2 R_3 [I_1(X_4)\ K_1(X_3) - I_1(X_3)\ K_1(X_4)]} \tag{3.30}$$

6) $z_{isol2}$ – impedância devida ao campo magnético variando com o tempo, no isolante externo à blindagem. Tem–se:

$$z_{isol2} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n(\frac{R_4}{R_3}) \tag{3.31}$$

7) $z_{ai}$ – impedância interna da superfície interna da armação.

É representada pela relação entre o campo elétrico longitudinal na superfície interna da armação e a corrente que retorna parte pelo condutor interno e parte pela blindagem.

Por analogia, baseando–se na teoria elementar[4,31,33,38] da impedância superficial, tem–se:

$$z_{ai} = \frac{j\omega\mu_0\mu_3}{2\pi} \frac{1}{X_5} \frac{I_0(X_5)\ K_1(X_6) + K_0(X_5)\ I_1(X_6)}{I_1(X_6)\ K_1(X_5) - I_1(X_5)\ K_1(X_6)} \tag{3.32}$$

com,

$\mu_3$ – permeabilidade magnética relativa da armação;

$$\begin{cases} X_5 = R_4 \sqrt{j\omega\mu_0\mu_3/\rho_3} \\ X_6 = R_5 \sqrt{j\omega\mu_0\mu_3/\rho_3} \end{cases} \tag{3.33}$$

$R_4$ – raio da superfície interna da camada metálica relativa à armação (m);

$R_5$ – raio da superfície externa da armação (m);

$\rho_3$ – resistividade elétrica da armação ($\Omega$m).

8) $z_{ae}$ – impedância interna da superfície externa da armação.

Está associada à relação do campo magnético longitudinal na superfície externa da armação pela corrente retornando pelo meio externo (solo).

Face às características semelhantes entre a impedância interna de cada superfície externa, $z_{ae}$ pode ser obtida por:

$$z_{ae} = \frac{j\omega\mu_0\mu_3}{2\pi} \frac{1}{X_6} \frac{I_0(X_6)\ K_1(X_5) + K_0(X_6)\ I_1(X_5)}{I_1(X_6)\ K_1(X_5) - I_1(X_5)\ K_1(X_6)} \tag{3.34}$$

9) $z_{am}$ – impedância mútua ou de transferência entre as superfícies da armação.

Esta impedância refere–se à relação entre o campo elétrico longitudinal atribuído à superfície externa/interna da armação e a corrente que retorna parte pelo condutor interno e parte pela blindagem/pelo condutor externo (solo).

Portanto, pela definição, segue–se:

$$z_{am} = \frac{\rho_3}{2\pi\ R_4\ R_5\ [I_1(X_6)\ K_1(X_5) - I_1(X_5)\ K_1(X_6)]} \tag{3.35}$$

10) $z_{isol3}$ – impedância devida ao campo magnético variando com o tempo,

no isolante externo à armação. De forma análoga à $z_{isol1}$ e $z_{isol2}$ obtém–se:

$$z_{isol3} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n(\frac{R_6}{R_5}) \tag{3.36}$$

onde, $R_6$ é o raio da superfície externa da terceira camada isolante (externa à armação).

### 3.2.2 – Submatriz $Z_{i_{FO_j}}$

Trata–se da submatriz de impedância interna de um cabo SC de fibra ótica, por unidade de comprimento.

Admitindo–se a semelhança construtiva entre os cabos SC de energia e os cabos SC de fibra ótica, no que concerne ao cálculo da impedância interna, permite–se adotar o mesmo procedimento expresso no item anterior, para o cálculo dos elementos da submatriz $\mathbf{Z}_{i_{cj}}$.

Em decorrência da expressão (3.17), resulta–se:

$$\mathbf{Z}_{i_{FO_j}} = \begin{bmatrix} Z_{i_{FO_{cc}}} & Z_{i_{FO_{cb}}} & Z_{i_{FO_{ca}}} \\ Z_{i_{FO_{bc}}} & Z_{i_{FO_{bb}}} & Z_{i_{FO_{ba}}} \\ Z_{i_{FO_{ac}}} & Z_{i_{FO_{ab}}} & Z_{i_{FO_{aa}}} \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

## 3.3 – MATRIZ PARCIAL $Z_p$

Dando continuidade ao cálculo da matriz de impedância própria de um cabo

PT, apresenta–se a matriz de contribuição do tubo envolvente, atribuída à primeira camada metálica do mesmo.

Através da referência da primeira camada metálica do tubo envolvente é adicionada a influência na matriz de impedância interna dos cabos SC, internos, de energia e fibra ótica (associada à impedância própria de cada cabo SC). Permite também, obter as submatrizes de impedâncias mútuas entre cabos SC, internos, mantendo–se a referência à primeira camada metálica do tubo envolvente.

$\mathbf{Z}_p$ pode ser retratada por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{p11} & \mathbf{Z}_{p21} & \cdots & \mathbf{Z}_{pj1} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{Z}_{p21} & \mathbf{Z}_{p22} & \cdots & \mathbf{Z}_{pj2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{pj1} & \mathbf{Z}_{pj2} & \cdots & \mathbf{Z}_{pjj} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & \ldots & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & \ldots & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & \ldots & \mathbf{0} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (3.38)$$

Cujos elementos significam:

$\mathbf{Z}_{pjj}(j = 1, p+q)$ – submatriz que representa a parcela de impedância própria do condutor j, com referência à primeira camada metálica do tubo envolvente.

Quanto à dimensão, verifica–se que:

a) $\mathbf{Z}_{pjj}(j=1,p)$ – tem a mesma dimensão da submatriz $\mathbf{Z}_{i_{cj}}$ (contribuição para os cabos SC, internos, de energia);

b) para (j=p+1,p+q) – a dimensão é igual à dimensão da submatriz $Z_{i_{FO_j}}$ (associada aos cabos SC, internos, de fibra ótica).

$Z_{pjk}(j \neq k)$ – submatriz que retrata a impedância mútua entre os cabos SC, internos j e k, com referência à primeira camada metálica do tubo envolvente.

Quanto aos índices j e k, tem–se a informar:

a) para (j = 1, p e k = 1, p), as submatrizes têm a mesma dimensão de $Z_{i_{cj}}$ pois, referem–se às impedâncias mútuas entre cabos SC, internos, de energia;

b) sendo (j = p + 1, p + q e k = p + 1, p + q), as submatrizes têm a mesma dimensão de $Z_{i_{FO_j}}$, uma vez que são atribuídas às impedâncias mútuas entre cabos de fibra ótica;

c) no caso de (j = 1, p e k = p + 1, p + q), as submatrizes correspondem às impedâncias mútuas entre cabos SC de energia e cabos de fibra ótica. Contêm tantas linhas quantos forem os elementos metálicos do cabo de energia e tantas colunas quantas forem as camadas metálicas do cabo SC de fibra ótica.

No tocante aos elementos nulos contidos nas últimas linhas e colunas de $\dot{Z_p}$, tem–se a esclarecer que os comentários feitos para $Z_i$ são extensivos à $Z_p$.

### 3.3.1 – Submatriz $Z_{pjj}$

Observa–se que, para um cabo SC, interno, constituído de condutor, blindagem e armação, a submatriz $Z_{pjj}$ é obtida como segue[4]:

$$\mathbf{Z}_{p_{jj}} = \begin{bmatrix} Z_{p_{jj}} & Z_{p_{jj}} & Z_{p_{jj}} \\ Z_{p_{jj}} & Z_{p_{jj}} & Z_{p_{jj}} \\ Z_{p_{jj}} & Z_{p_{jj}} & Z_{p_{jj}} \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

sendo:

$$Z_{p_{jj}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left\{ \frac{\mu_{TE_1}[\ker_0(Y_1) + j\ kei_0(Y_1)]}{Y_1\,[j\ker_1(Y_1) - kei_1(Y_1)]} + \right.$$

$$\left. Q_{jj} + 2\mu_{TE_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\frac{D_j}{R_{p_1}})^{2n}}{n(1+\mu_{TE_1}) + Y_1 \frac{K_{n-1}(Y_1)}{K_n(Y_1)}} \right\} \tag{3.40}$$

com,

$\mu_{TE_1}$ – permeabilidade magnética relativa da primeira camada metálica do tubo envolvente;

$$Y_1 = R_{p_1}\sqrt{j\omega\mu_0\ \mu_{TE_1}/\rho_{TE_1}} \tag{3.41}$$

$R_{p_1}$ – raio da superfície interna da primeira camada metálica do tubo envolvente (m);

$\rho_{TE_1}$ – resistividade elétrica da primeira camada metálica do tubo envolvente (Ωm);

$$Q_{jj} = \ell n\left\{\left(\frac{R_{p1}}{R_j}\right)\left[1-\left(\frac{D_i}{R_{p1}}\right)^2\right]\right\} \tag{3.42}$$

$R_j$ – raio mais externo do condutor j (m);

$D_j$ – distância entre os centros do condutor j e do tubo envolvente (m).

### 3.3.2 – Submatriz $Z_{pjk}$

Em decorrência do envolvimento teórico[4], tem–se:

$$\mathbf{Z}_{pjk} = \begin{bmatrix} Z_{pjk} & Z_{pjk} & Z_{pjk} \\ Z_{pjk} & Z_{pjk} & Z_{pjk} \\ Z_{pjk} & Z_{pjk} & Z_{pjk} \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

onde:

$$Z_{pjk} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left\{\frac{\mu_{TE_1}[\ker_0(Y_1) + j\,kei_0(Y_1)]}{Y_1[j\,ker_1(Y_1) - kei_1(Y_1)]} + Q_{jk} + 2\mu_{TE_1}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{C_n}{n(1+\mu_{TE_1}) + Y_1\dfrac{K_{n-1}(Y_1)}{K_n(Y_1)}}\right\} \tag{3.44}$$

sendo,

$$Q_{jk} = \ell n \left[ \frac{R_{p1}}{\sqrt{D_j^2 + D_k^2 - 2D_j\ D_k\ \cos(\theta_{jk})}} \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{n} \qquad (3.45)$$

$D_j$ – foi definido anteriormente;

$D_k$ – distância entre os centros do condutor k e do tubo envolvente (m);

$\theta_{jk}$ – ângulo medido entre $D_j$ e $D_k$ com origem no centro do tubo envolvente (rad);

$$C_n = \left(\frac{D_j\ D_k}{R_{p1}^2}\right)^n \cos(n\theta_{jk}) \qquad (3.46)$$

## 3.4 – MATRIZ PARCIAL $Z_c$

Matriz que representa a conexão entre as superfícies interna e externa do tubo envolvente. Esta matriz acrescenta a influência das camadas metálicas existentes no tubo envolvente na impedância interna de todos os meios metálicos ou núcleo do cabo PT.

Aplicando–se a metodologia[4] e levando–se em consideração que todas as matrizes são simétricas, vem:

$$\begin{bmatrix} Z_{c_1} & Z_{c_1} & \cdots & Z_{c_1} & Z_{c_2} & Z_{c_4} & Z_{c_6} \\ Z_{c_1} & Z_{c_1} & \cdots & Z_{c_1} & Z_{c_2} & Z_{c_4} & Z_{c_6} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{c_1} & Z_{c_1} & \cdots & Z_{c_1} & Z_{c_2} & Z_{c_4} & Z_{c_6} \\ Z_{c_2} & Z_{c_2} & \cdots & Z_{c_2} & Z_{c_3} & Z_{c_4} & Z_{c_6} \\ Z_{c_4} & Z_{c_4} & \cdots & Z_{c_4} & Z_{c_4} & Z_{c_5} & Z_{c_6} \\ Z_{c_6} & Z_{c_6} & \cdots & Z_{c_6} & Z_{c_6} & Z_{c_6} & Z_{c_7} \end{bmatrix} \qquad (3.47)$$

Com base na análise teórica do item (3.2), percebe–se que os elementos da

matriz $\mathbf{Z_c}$ têm afinidades com os elementos da matriz $\mathbf{Z_i}$.

### 3.4.1 – Submatriz $\mathbf{Z_{c_1}}$

Representa a influência das camadas metálicas do tubo envolvente no cálculo da impedância interna de todos os meios metálicos envolvidos.

Para um cabo SC, interno, composto por condutor, blindagem e armação, $\mathbf{Z_{c_1}}$ pode ser vista como segue:

$$\mathbf{Z_{c_1}} = \begin{bmatrix} Z_{c_1} & Z_{c_1} & Z_{c_1} \\ Z_{c_1} & Z_{c_1} & Z_{c_1} \\ Z_{c_1} & Z_{c_1} & Z_{c_1} \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

sendo:

$$\begin{aligned} Z_{c_1} = \quad & z_{TE1_i} + z_{TE1_e} - 2z_{TE1_m} + z_{isol}TE1 + z_{TE2_i} + \\ & z_{TE2_e} - 2z_{TE2_m} + z_{isol}TE2 + z_{TE3_i} + z_{TE3_e} - \\ & 2z_{TE3_m} + z_{isol}TE3 \end{aligned} \tag{3.49}$$

Constata–se que, pelo fato da contribuição da influência do tubo envolvente nos cabos SC, internos, ser feita pelo elemento comum, $Z_{c_1}$, torna–se fácil considerar o agrupamento das submatrizes referentes aos cabos SC de energia e aos cabos SC de fibra ótica, formando uma submatriz correspondente. Tal submatriz contém o elemento comum referido e é de ordem equivalente ao resultado da multiplicação do

número de cabos SC de energia, pelo número de camadas metálicas por cabo SC de energia, adicionada ao produto equivalente para o caso do cabo de fibra ótica. Em síntese, de ordem igual ao número total de camadas metálicas envolvidas pelo tubo envolvente.

### 3.4.2 – Submatriz $Z_{c_2}$

Reproduz a impedância mútua entre cada meio metálico envolvido e a primeira camada metálica do tubo envolvente (TE1).

Nota–se que é uma submatriz coluna ou simetricamente, linha.

$$\mathbf{Z}_{c_2} = [Z_{c_2} \quad Z_{c_2} \quad Z_{c_2}] \tag{3.50}$$

Adotando processo semelhante ao item anterior, $\mathbf{Z}_{c_2}$ terá o número de elementos igual ao número total de camadas metálicas envolvidas pela primeira camada metálica do tubo envolvente.

Obter o elemento $Z_{c_2}$ tem por base a filosofia de circuito apresentada no item (3.2.1), com o envolvimento das impedâncias superficiais. Assim sendo, permite–se:

$$\begin{aligned} Z_{c_2} = \quad & z_{TE1_e} - z_{TE1_m} + z_{isol}TE1 + z_{TE2_i} + z_{TE2_e} - 2z_{TE_m} + \\ & z_{isol}TE2 + z_{TE3_i} + z_{TE3_e} - 2z_{TE3_m} + z_{isol}TE3 \end{aligned} \tag{3.51}$$

### 3.4.3 – Elemento $Z_{c_3}$

Significa a impedância própria da primeira camada metálica do tubo

envolvente.

Levando–se em consideração a formulação clássica, largamente empregada neste capítulo, tem–se:

$$Z_{c_3} = {}^{z}TE1_e + {}^{z}isolTE1 + {}^{z}TE2_i + {}^{z}TE2_e - 2{}^{z}TE_m + {}^{z}isolTE2 + {}^{z}TE3_i + {}^{z}TE3_e - 2{}^{z}TE3_m + {}^{z}isolTE3 \quad (3.52)$$

### 3.4.4 – Submatriz $Z_{c_4}$

Está associada à impedância mútua entre cada meio metálico envolvido pela segunda camada metálica do tubo envolvente e a mesma.

Apresenta–se com o aspecto de $Z_{c_2}$; porém, com o elemento comum $Z_{c_4}$ e adicionando um elemento no total. Segue–se:

$$z_{c_4} = {}^{z}TE2_e - {}^{z}TE2_m + {}^{z}isolTE2 + {}^{z}TE3_i + {}^{z}TE3_e - 2{}^{z}TE3_m + {}^{z}isolTE3 \quad (3.53)$$

### 3.4.5 – Elemento $Z_{c_5}$

Atribui–se à impedância própria da segunda camada metálica do tubo envolvente (TE2).

Por analogia à $Z_{c_3}$, tem–se:

$$Z_{c_5} = z_{TE2_e} + z_{isol}TE2 + z_{TE3_i} + z_{TE3_e} - 2z_{TE3_m} + z_{isol}TE3 \qquad (3.54)$$

### 3.4.6 – Submatriz $Z_{c_6}$

Conforme descrito em (3.4.2) e citado em (3.4.4), dada a facilidade para o tratamento computacional, representa–se $\mathbf{Z}_{c_6}$ como uma única submatriz para o cabo PT em estudo, sendo também uma submatriz coluna composta de tantos elementos quantas forem as camadas metálicas envolvidas pela terceira camada metálica do tubo envolvente; incluindo as duas primeiras camadas metálicas do tubo envolvente.

O elemento comum $Z_{c_6}$ representa a impedância mútua entre cada meio metálico envolvido pela terceira (última) camada metálica do tubo envolvente e a mesma.

$$Z_{c_6} = z_{TE3_e} - z_{TE3_m} + z_{isol}TE3 \qquad (3.55)$$

### 3.4.7 – Elemento $Z_{c_7}$

Refere–se à impedância própria da terceira camada metálica do tubo envolvente.

$$Z_{c_7} = z_{TE3_e} + z_{isol}TE3 \qquad (3.56)$$

Sendo as impedâncias superficiais, com base na formulação analítica de Schelkunoff, assim determinadas:

1) $z_{TE1_i}$ – impedância interna da superfície interna da primeira camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{TE1_i} = \frac{j\omega\mu_0\mu_{TE1}}{2\pi X_{TE1}} \frac{I_0(X_{TE1})\ K_1(X_{TE2}) + K_0(X_{TE1})\ I_1(X_{TE2})}{I_1(X_{TE2})\ K_1(X_{TE1}) - I_1(X_{TE1})\ K_1(X_{TE2})} \quad (3.57)$$

2) $z_{TE1_e}$ – impedância interna da superfície externa da primeira camada metálica do tubo envolvente (TE1);

$$z_{TE1_e} = \frac{j\omega\mu_0\mu_{TE1}}{2\pi X_{TE2}} \frac{I_0(X_{TE2})\ K_1(X_{TE1}) + K_0(X_{TE2})\ I_1(X_{TE1})}{I_1(X_{TE2})\ K_1(X_{TE1}) - I_1(X_{TE1})\ K_1(X_{TE2})} \quad (3.58)$$

3) $z_{TE1_m}$ – representa a impedância de transferência ou mútua entre as superfícies interna e externa da primeira camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{TE1_m} = \frac{\rho_{TE1}}{2\pi R_{p_1} R_{p_2}[I_1(X_{TE2})\ K_1(X_{TE1}) - I_1(X_{TE1}) K_1(X_{TE2})]} \quad (3.59)$$

4) $z_{isol_{TE1}}$ – é a impedância associada à variação do fluxo magnético com o tempo, no isolante externo à primeira camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{isol_{TE1}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n\left(\frac{R_{p_3}}{R_{p_2}}\right) \quad (3.60)$$

5) $z_{TE2_i}$ – trata–se da impedância interna da superfície interna da segunda camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{TE2_i} = \frac{j\omega\mu_0\mu_{TE2}}{2\pi X_{TE3}} \frac{I_0(X_{TE3})\ K_1(X_{TE4}) + K_0(X_{TE3})\ I_1(X_{TE4})}{I_1(X_{TE4})\ K_1(X_{TE3}) - I_1(X_{TE3})\ K_1(X_{TE4})} \tag{3.61}$$

6) $z_{TE2_e}$ – refere–se à impedância interna da superfície externa da segunda camada metálica do tubo envolvente (TE2);

$$z_{TE2_e} = \frac{j\omega\mu_0\mu_{TE2}}{2\pi X_{TE4}} \frac{I_0(X_{TE4})\ K_1(X_{TE3}) + K_0(X_{TE4})\ I_1(X_{TE3})}{I_1(X_{TE4})\ K_1(X_{TE3}) - I_1(X_{TE3})\ K_1(X_{TE4})} \tag{3.62}$$

7) $z_{TE2_m}$ – representa a impedância mútua ou de transferência entre as superfícies interna e externa da segunda camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{TEz_m} = \frac{\rho_{TE2}}{2\pi R_{p_3} R_{p_4}[I_1(X_{TE4})\ K_1(X_{TE3}) - I_1(X_{TE3})\ K_1(X_{TE4})]} \tag{3.63}$$

8) $z_{isol}{}_{TE2}$ – impedância devida ao fluxo magnético variando com o tempo, na camada isolante externa à segunda camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{isol}{}_{TE2} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n(\frac{R_{p_5}}{R_{p_4}}) \tag{3.64}$$

9) $z_{TE3_i}$ – impedância interna da superfície interna da terceira camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{TE3_i} = \frac{j\omega\mu_0\mu_{TE3}}{2\pi X_{TE5}} \frac{I_0(X_{TE5})\ K_1(X_{TE6}) + K_0(X_{TE5})\ I_1(X_{TE6})}{I_1(X_{TE6})\ K_1(X_{TE5}) - I_1(X_{TE5})\ K_1(X_{TE6})} \tag{3.65}$$

10) $z_{TE3_e}$ – trata–se da impedância interna da superfície externa da terceira camada metálica do tubo envolvente (TE3);

$$z_{TE3_e} = \frac{j\omega\mu_0\mu_{TE3}}{2\pi X_{TE6}} \frac{I_0(X_{TE6})\ K_1(X_{TE5}) + K_0(X_{TE6})\ I_1(X_{TE5})}{I_1(X_{TE6})\ K_1(X_{TE5}) - I_1(X_{TE5})\ K_1(X_{TE6})} \tag{3.67}$$

11) $z_{TE3_m}$ – refere–se à impedância mútua ou de transferência entre as superfícies interna e externa da terceira camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{TE3_m} = \frac{\rho_{TE3}}{2\pi R_{p5} R_{p6}[I_1(X_{TE6})\ K_1(X_{TE5}) - I_1(X_{TE5})\ K_1(X_{TE6})]} \tag{3.68}$$

12) $z_{isol}{}_{TE3}$ – está associada ao fluxo magnético variando no tempo, no isolante externo à terceira camada metálica do tubo envolvente;

$$z_{isol}{}_{TE3} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n(\frac{R_{p7}}{R_{p6}}) \tag{3.67}$$

sendo:

$R_{p_1}$ – raio da superfície interna da primeira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{p_2}$ – raio da superfície externa da primeira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{p_3}$ – raio da superfície interna da segunda camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{p_4}$ – raio da superfície externa da segunda camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{p_5}$ – raio da superfície interna da terceira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{p_6}$ – raio da superfície externa da terceira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{p_7}$ – raio da superfície externa da camada isolante externa à terceira camada metálica do tubo envolvente (capa externa) (m);

$\mu_{TE1}$ – permeabilidade magnética relativa da primeira camada metálica do tubo envolvente (adimensional);

$\mu_{TE2}$ – permeabilidade magnética relativa da segunda camada metálica do tubo envolvente (adimensional);

$\mu_{TE3}$ – permeabilidade magnética relativa da terceira camada metálica do tubo envolvente (adimensional);

$\rho_{TE1}$ – resistividade elétrica da primeira camada metálica do tubo envolvente ($\Omega$m);

$\rho_{TE2}$ – resistividade elétrica da segunda camada metálica do tubo envolvente ($\Omega$m);

$\rho_{TE3}$ – resistividade elétrica da terceira camada metálica do tubo envolvente ($\Omega$m).

Argumentos das funções de Bessel modificadas I e K:

$$X_{TE1} = R_{p_1} \sqrt{j\ \omega\ \mu_0\ \mu_{TE1}/\rho_{TE1}}$$

$$X_{TE2} = R_{p_2} \sqrt{j\ \omega\ \mu_0\ \mu_{TE1}/\rho_{TE1}}$$

$$X_{TE3} = R_{p_3} \sqrt{j\ \omega\ \mu_0\ \mu_{TE2}/\rho_{TE2}} \qquad (3.68)$$

$$X_{TE4} = R_{p_4} \sqrt{j\ \omega\ \mu_0\ \mu_{TE2}/\rho_{TE2}}$$

$$X_{TE5} = R_{p_5} \sqrt{j\ \omega\ \mu_0\ \mu_{TE3}/\rho_{TE3}}$$

$$X_{TE6} = R_{p_6} \sqrt{j\ \omega\ \mu_0\ \mu_{TE3}/\rho_{TE3}}$$

## 3.5– IMPEDÂNCIA MÚTUA ENTRE CABOS PT E IMPEDÂNCIA PRÓPRIA DE RETORNO PELO SOLO

Em complementação aos itens anteriores, para o cálculo matricial dos parâmetros elétricos longitudinais de um sistema de N–cabos PT, julga–se oportuno reapresentar a expressão matricial (1.3), porém retratando as impedâncias longitudinais; ou seja:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{1\,1} & Z_{1\,2} & Z_{1\,N} \\ Z_{1\,2} & Z_{2\,2} & Z_{2\,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{1N} & Z_{2N} & Z_{NN} \end{bmatrix} \tag{3.69}$$

sendo:

$\mathbf{Z}$ – definida no início deste capítulo;

$\mathbf{Z}_{ii}$ – também definida anteriormente; reescrevendo–a, para o caso do tubo envolvente considerado de espessura finita, vem:

$$\mathbf{Z}_{ii} = \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_p + \mathbf{Z}_c + \mathbf{Z}_0$$

$\mathbf{Z}_0$ – objeto de estudo neste item.

$Z_{0_{ij}}(i \neq j)$ – representa a matriz de impedâncias mútuas entre cabos do sistema elétrico em análise, com o envolvimento do solo, por unidade de comprimento. Assumindo que o sistema é linear, pela reciprocidade, $Z_{0_{ij}} = Z_{0_{ji}}$.

Em se tratando do caminho de retorno da corrente, sabe–se que, na prática, é feito através do neutro (blindagem, armação, etc.), ou através do solo/água do mar, ou através de ambos.

O problema foi extensamente pesquisado e analisado. Ainda o é. Pesquisadores como RUDENBERG, CAMPBELL, CARSON[8,9,10] e POLLACZEK[30] entre tantos outros[2,6,11,23,31,35,38,39,40] divulgaram trabalhos propondo métodos de cálculo. Destacam–se os trabalhos de Carson, cujas fórmulas analíticas de retorno pelo solo são amplamente utilizadas e inspiraram tantos outros.

Entretanto, uma solução completa e exata para o problema é impossível, face às complexidades existentes, como:

– o solo não é plano nem homogêneo e, em geral, apresenta dificuldades em obter características precisas;

– o solo, geralmente, tem condutividade heterogênea;

– o material que compõe a armação, usualmente, é ferromagnético (de características não lineares); etc..

Em princípio, toda a metodologia clássica baseia–se em hipóteses simplificativas, descritas no item (1.3), que introduzem consideráveis incertezas na determinação das impedâncias próprias de retorno pelo solo e das impedâncias mútuas entre cabos. Porém, na maioria dos casos, aceitáveis.

Sabe–se[38] que a corrente que flui axialmente no i–ésimo cabo PT, retornando pelo solo através da soma algébrica das correntes de todas as camadas metálicas do

mesmo, é responsável pela indução de uma fem em cada meio condutor do cabo j; sendo a mesma fem para todos os elementos condutores.

Deste comentário, segue–se que, em decorrência, todos os elementos da matriz $\mathbf{Z}_{0_{ij}}$ são iguais.

Adotando filosofia semelhante, tal observação é extensiva à matriz $\mathbf{Z}_{0_{ii}}$.

Portanto, tem–se:

$$\mathbf{Z}_{0_{ii}} = \begin{bmatrix} Z_{0_{ii}} & \cdots & Z_{0_{ii}} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{0_{ii}} & \cdots & Z_{0_{ii}} \end{bmatrix} \tag{3.70}$$

Sendo, $\mathbf{Z}_{0_{ii}}$ a parcela da matriz $\mathbf{Z}$ que corresponde à impedância de retorno pelo solo para o cabo i, com dimensão (m x m). Onde, m representa o número total de camadas metálicas do cabo PT, i.

$$\mathbf{Z}_{0_{ij}} = \begin{bmatrix} Z_{0_{ij}} & \cdots & Z_{0_{ij}} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{0_{ij}} & \cdots & Z_{0_{ij}} \end{bmatrix} \tag{3.71}$$

Neste caso, $\mathbf{Z}_{0_{ij}}$ refere–se à impedância mútua entre os cabos i e j, com dimensão (m x n).

Onde, m e r representam, respectivamente, o número total de camadas metálicas dos cabos PT, i e j.

Ressalta–se que a avaliação da influência do retorno pelo solo, extensiva ao cálculo das impedâncias, é feita aplicando–se metodologia compatível com o tipo de sistema:

– aéreo;
– subterrâneo;
– submarino.

### 3.5.1 – Metodologia de Carson para o Cálculo das Impedâncias de Retorno pelo Solo para Cabos Aéreos

É sabido que a análise exata do fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas pelos meios condutores de um sistema elétrico de cabos aéreos paralelos ao solo, é bastante complexa.

Conforme abordado no item (3.5), CARSON[9] propõe a solução, partindo–se de algumas hipóteses simplificativas do item (1.3): (a), (b), (c), (f), (g), (h), (i), (j), ($\ell$).

Com tais suposições, Carson considerou dois condutores cilíndricos, paralelos, de pequeno diâmetro, comparado com a distância entre eles e o solo. Supôs o solo plano e homogêneo de condutividade elétrica e constante dielétrica uniformes e o ar de condutividade uniforme muito menor do que à do solo; e ainda as permeabilidades magnéticas do ar e do solo iguais à permeabilidade magnética do vácuo, $\mu_0$.

Para a impedância de retorno pelo solo, tem–se:

$$Z_{0_{ij}} = Z^{0}_{ij} + Z'_{ij} \tag{3.72}$$

onde:

$Z^0_{ij}$ – refere–se à contribuição na condição de condutor e solo de condutividades infinitas (ideais);

$Z^1_{ij}$ – representa a impedância de retorno pelo solo em presença do solo não ideal.

De forma elementar, obtêm–se:

$$Z^0_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n(\frac{D_{ij}}{d_{ij}})$$

$$Z^0_{ii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ell n(\frac{2h_i}{R_e}) \qquad (3.73)$$

Admitindo–se as hipóteses de Carson, por definição[9], considerando–se a Figura (3.3), segue–se:

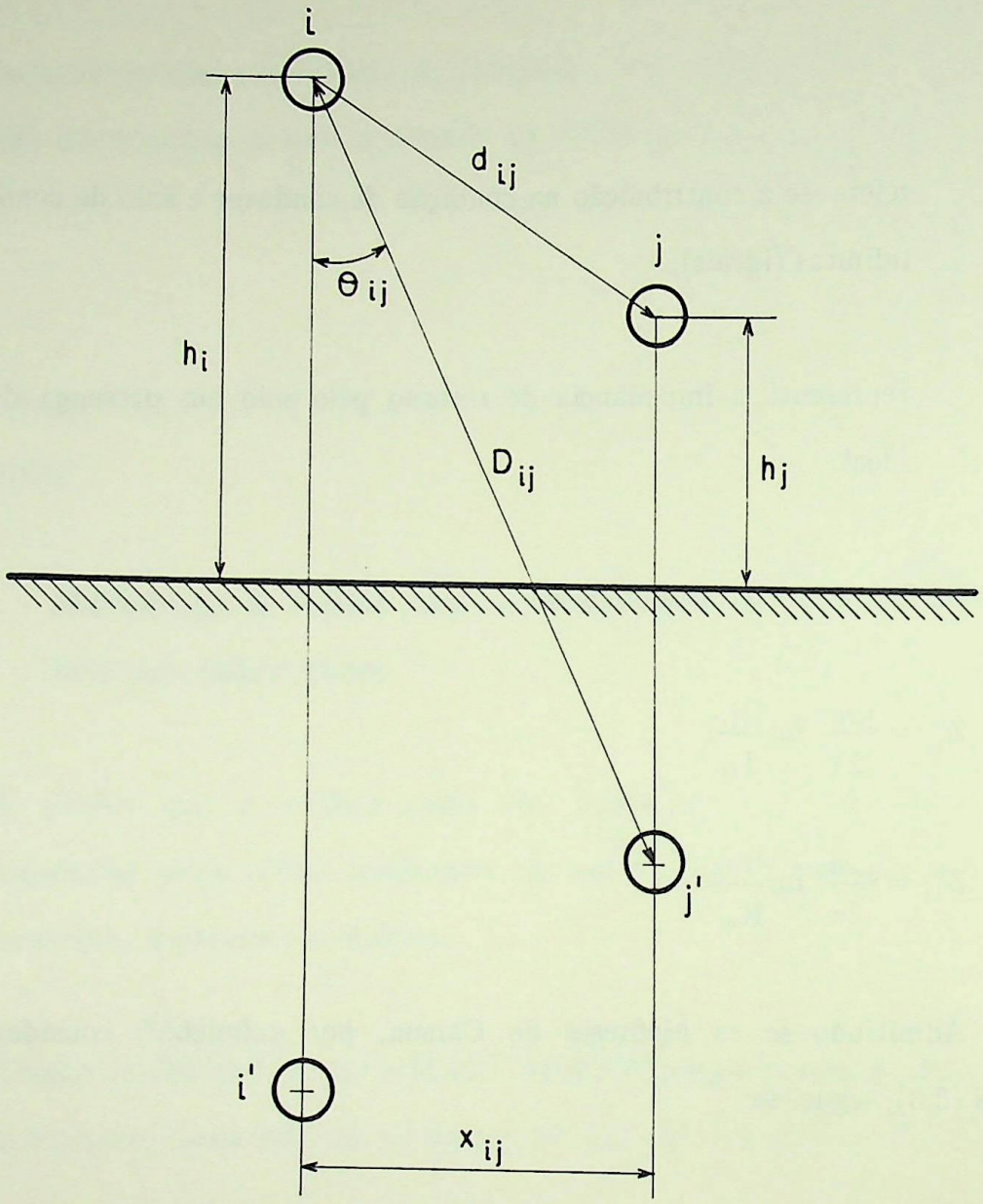



Fig. 3.3 – Disposição geométrica de dois cabos aéreos

$$Z'_{ij} = \frac{\mu_0 \omega}{\pi} \int_0^{\infty} (\sqrt{\xi^2 + j} - \xi)\, e^{-(h'_i + h'_j)\xi} \cos(x'_{ij}\, \xi)\, d\xi \tag{3.74}$$

$$Z'_{ii} = \frac{\mu_0 \omega}{\pi} \int_0^{\infty} (\sqrt{\xi^2 + j} - \xi)\, e^{-2h'_i \xi}\, d\xi \tag{3.75}$$

O cálculo dos parâmetros depende, entretanto, da evolução da integral infinita

da forma:

$$J(p,q) = \int_0^{\infty} (\sqrt{\xi^2 + j} - \xi)\, e^{-p\xi} \cos(q\,\xi)\, d\xi \tag{3.76}$$

Em termos desta integral de (3.76), permite–se escrever:

$$\begin{cases} Z'_{ij} = \frac{\mu_0 \omega}{\pi} J(h'_i + h'_j, x'_{ij}) \\ Z'_{ii} = \frac{\mu_0 \omega}{\pi} J(2h'_i, 0) \end{cases} \tag{3.77}$$

onde:

$\omega$, $\pi$ e $\mu_0$ são definidos no Apêndice I;

$D_{ij}$– distância entre os eixos do cabo i e da imagem do cabo j, em relação ao solo (m);

$$D_{ij} = \sqrt{(x_{ij})^2 + (h_i + h_j)^2} \tag{3.78}$$

$d_{ij}$– distância entre os eixos dos cabos i e j (m);

$$d_{ij} = \sqrt{(x_{ij})^2 + (h_i - h_j)^2} \tag{3.79}$$

$h_i$, $h_j$– respectivamente, representam as alturas médias dos cabos i e j, ao solo (m);

$R_e$ – raio mais externo do cabo i (m);

$x_{ij}$— distância horizontal entre os eixos dos cabos i e j ou diferença entre as abscissas dos dois cabos $(x_j - x_i)$ (m);

$\theta_{ij}$— tem o significado representado na Figura (3.3). Para i = j, reduz–se a zero (rad);

$$\theta_{ij} = \sin^{-1}\left(\frac{x_{ij}}{D_{ij}}\right) \tag{3.80}$$

e, ainda:

$$\begin{cases} h_i' = h_i \sqrt{\alpha} \\ h_j' = h_j \sqrt{\alpha} \\ x_{ij}' = x_{ij} \sqrt{\alpha} \\ \alpha = \dfrac{\mu_0 \omega}{\rho} \end{cases} \tag{3.81}$$

com,

$\rho$ – resistividade elétrica do solo ($\Omega$m).

Retornando à definição da função J, admitindo–se:

$$\begin{cases} \delta = \sqrt{p^2 + q^2} \\ \theta = \mathrm{atan}\,\dfrac{q}{p} \\ J = P + jQ \end{cases} \tag{3.82}$$

sendo P e Q reais, por similaridade,

$$\delta = D_{ij} \sqrt{\alpha} \tag{3.83}$$

Onde, $\delta$ representa, em valores reduzidos pelo parâmetro $\sqrt{\alpha}$, a distância entre os eixos do condutor i e da imagem do condutor j (distância entre o eixo do condutor i e o eixo da sua imagem para i = j).

Carson obteve as expressões:

$$\begin{cases} P = P(\delta, \theta) \\ Q = Q(\delta, \theta) \end{cases} \tag{3.84}$$

Sendo P e Q apresentadas em função das séries de termos do parâmetro adimensional $\delta$, e para $\theta$ em radianos.

$$P = \frac{\pi}{8}(1 - s_4) + \frac{1}{2}(\ell n \frac{2}{\delta} - \gamma)\, s_2 + \frac{1}{2}\theta\, s_2' - \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_1 + \frac{1}{2}\sigma_2 + \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_3 \tag{3.85}$$

$$Q = \frac{1}{4} + \frac{1}{2}(\ell n \frac{2}{\delta} - \gamma)(1 - s_4) - \frac{1}{2}\theta\, s_4' + \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_1 - \frac{\pi}{8}s_2 + \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_3 - \frac{1}{2}\sigma_4 \tag{3.86}$$

Sendo, nestas equações:

$\gamma$ – constante de Euler, definida no Apêndice I;

$$s_2 = \frac{1}{1!\ 2!}(\frac{\delta}{2})^2 \cos(2\theta) - \frac{1}{3!\ 4!}(\frac{\delta}{2})^6 \cos(6\theta) + \ldots$$

$$s_2' = \frac{1}{1!\ 2!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \operatorname{sen}(2\theta) - \frac{1}{3!\ 4!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^6 \operatorname{sen}(6\theta) + \ldots$$

$$s_4 = \frac{1}{2!\ 3!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^4 \cos(4\theta) - \frac{1}{4!\ 5!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^8 \cos(8\theta) + \ldots$$

$$s_4' = \frac{1}{2!\ 3!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^4 \operatorname{sen}(4\theta) - \frac{1}{4!\ 5!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^8 \operatorname{sen}(8\theta) + \ldots$$

$$\sigma_1 = \frac{\delta\cos(\theta)}{3} - \frac{\delta^5\cos(5\theta)}{3^2\ 5^2\ 7} + \frac{\delta^9\cos(9\theta)}{3^2\ 5^2\ 7^2\ 9^2\ 11} - \ldots \tag{3.87}$$

$$\sigma_3 = \frac{\delta^3\cos(3\theta)}{3^2\ 5} - \frac{\delta^7\cos(7\theta)}{3^2\ 5^2\ 7^2\ 9} + \frac{\delta^{11}\cos(11\theta)}{3^2\ 5^2\ 7^2\ 9^2\ 11^2\ 13} - \ldots$$

$$\sigma_2 = \left(1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\right)\frac{1}{1!\ 2!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \cos(2\theta) -$$

$$\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} - \frac{1}{8}\right)\frac{1}{3!\ 4!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^6 \cos(6\theta) + \ldots$$

$$\cong \frac{5}{4}\, s_2$$

$$\sigma_4 = \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{6}\right)\frac{1}{2!\ 3!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^4 \cos(4\theta) -$$

$$\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} - \frac{1}{10}\right)\frac{1}{4!\ 5!}\left(\frac{\delta}{2}\right)^8 \cos(8\theta) + \ldots$$

$$\cong \frac{5}{3}\, s_4$$

Para $\delta \leq \frac{1}{4}$, obtêm–se as expressões aproximadas seguintes:

$$P = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}}\delta\cos(\theta) + \frac{\delta^2}{16}\cos(2\theta)\left(0.6728 + \ell n\frac{2}{\delta}\right) + \frac{\delta^2}{16}\theta\,\mathrm{sen}(2\theta) \tag{3.88}$$

$$Q = -0.0386 + \frac{1}{2}\ell n\left(\frac{2}{\delta}\right) + \frac{1}{3\sqrt{2}}\delta\cos(\theta) \tag{3.89}$$

Para $\delta > 5$, as seguintes expansões assintóticas[9,31] podem ser empregadas:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\cos(\theta)}{\delta} - \frac{\cos(2\theta)}{\delta^2} + \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\cos(3\theta)}{\delta^3} + \frac{3}{\sqrt{2}}\frac{\cos(5\theta)}{\delta^5} + \frac{5}{\sqrt{2}}\frac{\cos(7\theta)}{\delta^7} + \ldots \tag{3.90}$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\cos(\theta)}{\delta} - \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\cos(3\theta)}{\delta^3} + \frac{3}{\sqrt{2}}\frac{\cos(5\theta)}{\delta^5} - \frac{5}{\sqrt{2}}\frac{\cos(7\theta)}{\delta^7} + \ldots \tag{3.91}$$

Para valores maiores de $\delta$ ($\delta > 10$), as expressões reduzem–se[9,31] para:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\cos(\theta)}{\delta} - \frac{\cos(\theta)}{\delta^2} \tag{3.92}$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\cos(\theta)}{\delta} \tag{3.93}$$

As séries de potências e as expansões assintóticas elaboradas por Carson, no passado, eram vitais para a evolução da integral que define a impedância adicional devida ao solo imperfeito.

Nos tempos atuais, a solução da integral por métodos numéricos é viável com o auxílio de computadores.

### 3.5.2 – Formulação de Pollaczek para o Cálculo das Impedâncias de Retorno pelo Solo para Cabos Subterrâneos

A impedância do retorno pelo solo de um sistema de cabos subterrâneos foi objeto de estudo para POLLACZEK[30], CARSON[10] e WEDEPOHL[38]. Como nas fórmulas de Carson para cabos aéreos, envolve séries infinitas.

É também impossível, conforme citações do item anterior, obter uma solução exata para o problema.

Partindo–se das hipóteses simplificativas descritas no item (1.3), consideram–se como básicas:

a) a terra é suposta um meio homogêneo com superfície plana, dividida em duas regiões semi–infinitas: solo e ar;

b) as permeabilidades magnéticas do ar e do solo são supostas iguais à permeabilidade magnética do vácuo, $\mu_0$.

A impedância elementar $Z_{0_{ij}}$ pode ser calculada pela fórmula correspondente à integral dada[38] por Pollaczek, considerando–se a Figura (3.4).

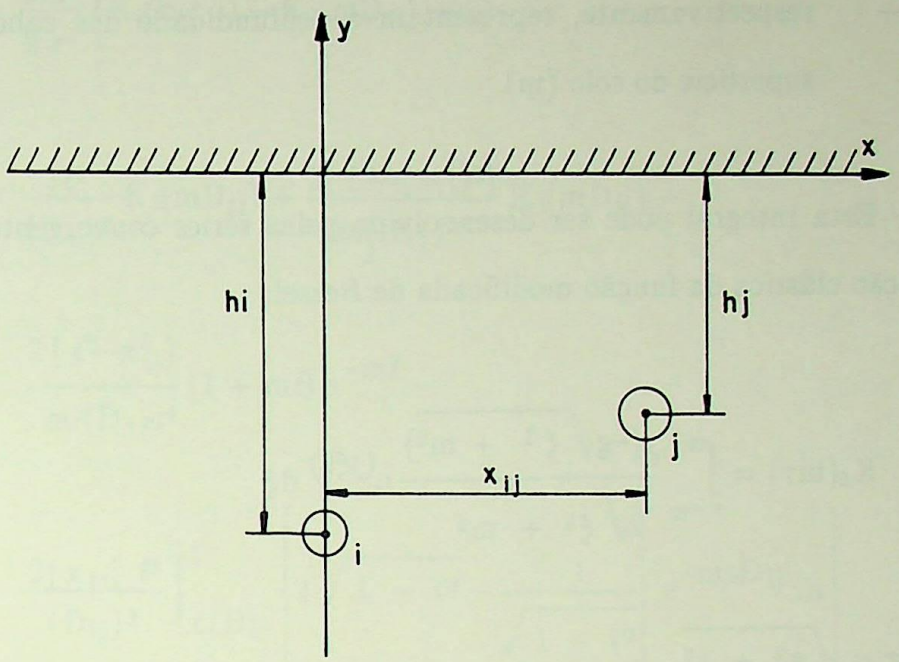



Fig. 3.4 – Configuração de dois cabos subterrâneos

$$Z_{0_{ij}} = \frac{\rho m^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{e^{\{-|h_i + h_j| \sqrt{\alpha^2 + m^2}\}}}{|\alpha| + \sqrt{\alpha^2 + m^2}} + \right.$$

$$\left. \frac{e^{\{-|h_i - h_j| \sqrt{\alpha^2 + m^2}\}} - e^{\{-|h_i + h_j| \sqrt{\alpha^2 + m^2}\}}}{2\sqrt{\alpha^2 + m^2}} \right\} e^{(j\alpha x_{ij})} \, d\alpha \qquad (3.94)$$

onde:

$\rho$ – resistividade do solo ($\Omega$m);

$$m = \sqrt{j \ \omega \ \mu_0 / \rho} \qquad (3.95)$$

$h_i, h_j$ – respectivamente, representam a profundidade dos cabos i e j abaixo da superfície do solo (m).

Esta integral pode ser desenvolvida pelas séries convergentes, partindo–se da definição clássica da função modificada de Bessel:

$$K_0(m\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{\{-g\sqrt{\xi^2 + m^2}\}}}{2\sqrt{\xi^2 + m^2}} e^{(j\xi s)}\, d\xi \tag{3.96}$$

com, $\tau = \sqrt{g^2 + s^2}$.

A equação (3.96) inserida em (3.94) permite a simplificação:

$$Z_{0_{ij}} = \frac{\rho m^2}{2\pi} \{K_0(md_{ij}) - K_0(mD_{ij}) + I_1\} \tag{3.97}$$

onde:

$$\begin{cases} d_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2} \\ D_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + (h_i + h_j)^2} \\ I_1 = \displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{\{-|h_i + h_j|\sqrt{\alpha^2 + m^2}\}}}{|\alpha| + \sqrt{\alpha^2 + m^2}} e^{(j\alpha x_{ij})}\, d\alpha \end{cases} \tag{3.98}$$

Desenvolvendo–se a integral $I_1$ segundo WEDEPOHL[38], tem–se:

$$Z_{0_{ij}} = \frac{\rho m^2}{2\pi}\left\{K_0(md_{ij}) - K_0(mD_{ij}) + \right.$$

$$\frac{2\ell^2}{(D_{ij})^2} K_2(mD_{ij}) + \frac{2(\ell^2 - (x_{ij})^2)}{m(D_{ij})^3} K_1(mD_{ij}) -$$

$$\frac{2(\ell^2 - x_{ij}^2)}{m^2(D_{ij})^4}(1 + m\ell)\, e^{-m\ell} -$$

$$\left.\frac{2|x_{ij}|\,\ell^2}{(D_{ij})^2}\int_{\ell/D_{ij}}^{1}\left\{2\sqrt{1 - t^2} - \frac{1}{\sqrt{1 - t^2}}\right\} e^{-mtD_{ij}}\, dt\right\} \qquad (3.99)$$

sendo:

$K_0$, $K_1$ e $K_2$ – funções modificadas de Bessel de segunda espécie, com detalhamento teórico no Capítulo VI;

$\ell$ – representa o valor absoluto da soma das profundidades dos cabos i e j;

$x_{ij}$ – refere–se à distância horizontal entre os eixos dos cabos i e j (m).

Extendendo–se o cálculo à impedância própria de retorno pelo solo para um cabo colocado na profundidade h, abaixo da superfície do solo, como mostrado na Figura (3.5), assume–se que:

$$\begin{cases} D_{ii} \simeq 2h \\ d_{ii} \simeq R_e \\ x_{ii} \simeq 0 \end{cases} \tag{3.100}$$

Onde, $R_e$ significa o raio mais externo do cabo i (m). Salienta–se que não é possível obter o cálculo exato. No entanto, é aceitável o envolvimento de valores aproximados, sempre observando que foram supostas, na concepção da formulação, distâncias envolvidas muito maiores do que as dimensões transversais do cabo, extremamente importante no tocante à distribuição perfeitamente cilíndrica do campo.

Pelas deduções das equações para $Z_{0_{ij}}$, inserindo–se (3.100), vem:

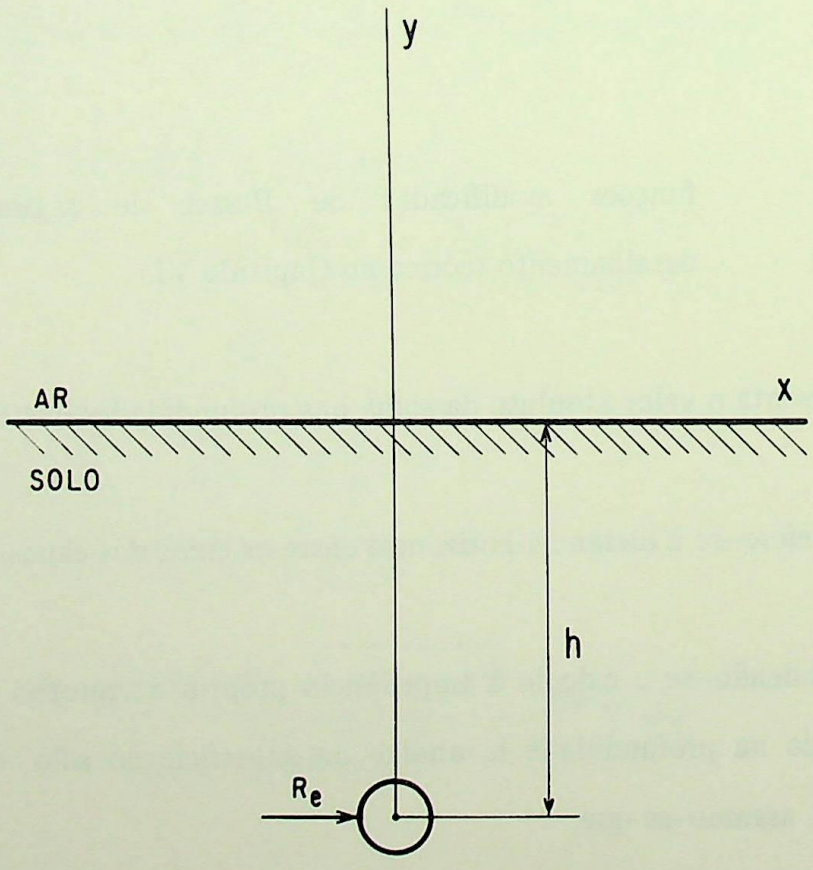



Fig. 3.5 – Configuração de um cabo subterrâneo

$$Z_{0_{ii}} = \frac{\rho m^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{e^{\{-|2h|\sqrt{\alpha^2 + m^2}\}}}{|\alpha| + \sqrt{\alpha^2 + m^2}} + \right.$$

$$\left. \frac{1 - e^{\{-2h\sqrt{\alpha^2 + m^2}\}}}{2\sqrt{\alpha^2 + m^2}} \right\} d\alpha \qquad (3.101)$$

Adotando–se o desenvolvimento teórico de Wedepohl para a evolução da integral, segue–se:

$$Z_{0_{ii}} = \frac{\rho m^2}{2\pi} \{K_0(mR_e) - K_0(2mh) + 2K_2(2mh) + \frac{1}{mh} K_1(2mh) -$$

$$\frac{1}{8m^2h^2} (1 + 2mh)\, e^{-2mh}\} \qquad (3.102)$$

Destaca–se que o Apêndice IV apresenta algumas manipulações feitas na equação básica de definição das impedâncias própria e mútua entre cabos, com o envolvimento do solo e aplicações de métodos de cálculos numéricos.

### 3.5.3 – Impedâncias de Retorno pelo Mar para Cabos Submarinos

Os cabos submarinos diferem em alguns aspectos dos cabos subterrâneos diretamente enterrados ou em dutos e dos cabos aéreos. Em geral, os cabos submarinos têm armação metálica; podem ser fabricados em longos comprimentos (não aceitam conexões no meio do mar) e são instalados com grandes distâncias entre eles.

Nesta formulação, por hipótese, o mar é assumido ser um meio de dimensões infinitas.

No que concerne o mar, somente a corrente total fluindo nele é de interesse, e não a distribuição entre o mar e o solo mais abaixo. Desta forma, a impedância de retorno pelo mar é calculada com uma aproximação irregular de sua geometria; ou seja, o cabo é considerado como completamente cercado pelo mar indefinido. A validade de tal aproximação é discutida na referência[6].

Considerando–se a definição da impedância superficial de Schelkunoff, a inclusão do efeito do retorno pelo mar é feita com simplicidade.

No caso de admitir uma camada condutora externamente indefinida ($D_e \to \infty$), como o mar, permite que a sua impedância interna (impedância própria de retorno), aplicando–se os devidos limites e propriedades das funções modificadas de Bessel[1,31], torne–se[6]:

$$Z_{0_{ii}} = \frac{m\rho}{\pi D_i} \frac{K_0(\frac{mD_i}{2})}{K_1(\frac{mD_i}{2})} \tag{3.103}$$

sendo:

$$m = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\mu_r}{\rho}}$$

$\mu_r$ – permeabilidade magnética relativa da água do mar. Em geral, considerada igual a um;

$\rho$ – resistividade da água do mar ($\Omega$m);

$D_i$ – diâmetro mais externo do cabo, coincide com o diâmetro mais interno do "condutor" mar (m).

O efeito mútuo entre cabos é facilmente considerado, adotando–se procedimento similar.

No mar indefinido, o campo elétrico E', na distância s de um cabo de diâmetro externo $D_i$ e corrente interna $I_i$ é assim definido:

$$E' = \frac{\rho m}{\pi D_i} \frac{K_0(m\,s)}{K_1(\frac{mD_i}{2})} I_i \qquad (3.104)$$

admitindo–se $s \gg \frac{D_i}{2}$.

Onde, s representa a distância entre o centro do cabo i e o ponto de cálculo do campo elétrico (m).

Supondo–se que na distância s do cabo i será colocado o cabo j, conforme mostra a Figura (3.6), a impedância mútua entre eles devida a corrente $I_i$ que circula no cabo i é obtida da relação:

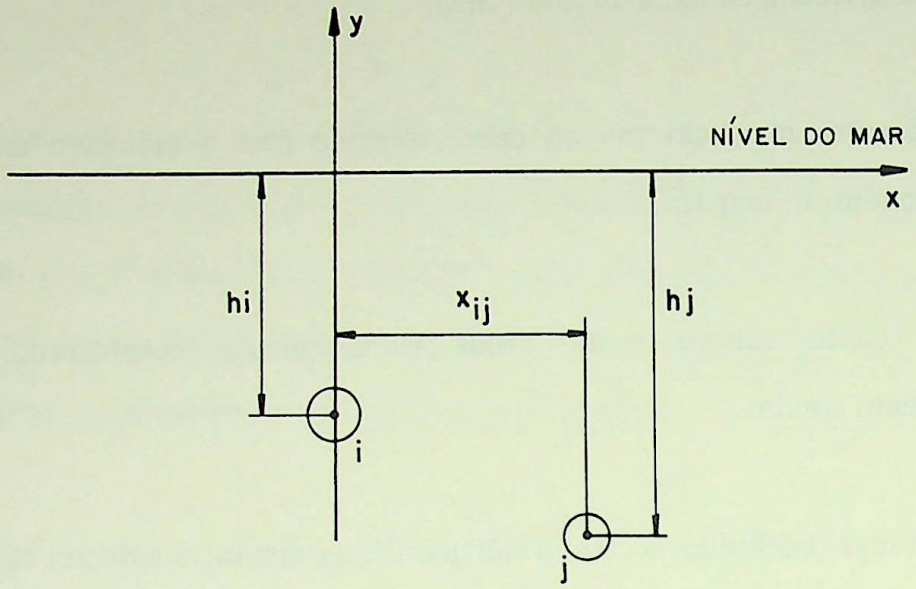



Fig. 3.6 – Configuração de dois cabos submarinos

$$Z_{0_{ij}} = \frac{E'}{I_i} \tag{3.105}$$

Portanto,

$$Z_{0_{ij}} = \frac{m\rho}{\pi D_i} \frac{K_0(ms)}{K_1(\frac{mD_i}{2})} \tag{3.106}$$

Com o objetivo de manter a reciprocidade $Z_{0_{ij}} = Z_{0_{ji}}$, torna–se necessário obter a impedância mútua entre os cabos pelo valor médio entre i–j e j–i como segue:

$$Z_{0_{ij}} = \frac{m\rho}{2\pi} \left\{ \frac{K_0(ms)}{D_{ii} K_1(\frac{mD_{ii}}{2})} + \frac{K_0(ms)}{D_{ij} K_1(\frac{mD_{ij}}{2})} \right\} \tag{3.107}$$

sendo:

$D_{i_i}$ – diâmetro mais externo do cabo i (m);

$D_{i_j}$ – diâmetro mais externo do cabo j (m);

$K_0$ e $K_1$ – funções modificadas de Bessel;

$\pi$, $\mu_0$, $\omega$ – definidas no Apêndice I.

## 3.6 – SISTEMA DE CABOS COAXIAIS UNIPOLARES

No presente capítulo, até então, a abordagem dos cálculos foi feita considerando um sistema de N–cabos PT.

Finalmente, cumpre discutir o caso de um sistema de N–cabos coaxiais unipolares (cabos SC). Feita tal suposição, a matriz **Z** para o sistema será obtida pela expressão seguinte:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_i + \mathbf{Z}_0 \tag{3.108}$$

sendo,

$\mathbf{Z}_i$ – matriz de impedância interna do sistema elétrico de cabos ($\Omega$/m);

$$\mathbf{Z_i} = \begin{bmatrix} Z_{i_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{i_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \\ 0 & 0 & \dots & Z_{i_N} \end{bmatrix} \tag{3.109}$$

$\mathbf{Z_0}$ – matriz de impedância de retorno pelo solo para o sistema em análise ($\Omega$/m).

$$\mathbf{Z_0} = \begin{bmatrix} Z_{0_{1\,1}} & Z_{0_{1\,2}} & \dots & Z_{0_{1N}} \\ Z_{0_{1\,2}} & Z_{0_{2\,2}} & \dots & Z_{0_{2N}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{0_{1N}} & Z_{0_{2N}} & \dots & Z_{0_{NN}} \end{bmatrix} \tag{3.110}$$

O cálculo das submatrizes de $\mathbf{Z_i}$ e $\mathbf{Z_0}$ é feito adotando–se a formulação correspondente, apresentada nos itens anteriores.

Portanto, para cada cabo SC que compõe o sistema (j = 1, N) a submatriz correspondente em $\mathbf{Z_i}$ pode ser indicada como segue, dependendo da formação do cabo. Neste caso, considerando–se constituído por condutor, blindagem e armação.

$$\mathbf{Z_{ij}} = \begin{bmatrix} Z_{i_{cc}} & Z_{i_{bc}} & \dots & Z_{i_{ac}} \\ Z_{i_{bc}} & Z_{i_{bb}} & \dots & Z_{i_{ba}} \\ Z_{i_{ac}} & Z_{i_{ba}} & \dots & Z_{i_{aa}} \end{bmatrix} \tag{3.111}$$

Para a submatriz $\mathbf{Z_{0_{ij}}}$, (i = 1, N e j = 1, N), tem–se:

$$\mathbf{Z}_{0_{ij}} = \begin{bmatrix} Z_{0_{ij}} & Z_{0_{ij}} & \cdots & Z_{0_{ij}} \\ Z_{0_{ij}} & Z_{0_{ij}} & \cdots & Z_{0_{ij}} \\ Z_{o_{ij}} & Z_{0_{ij}} & \cdots & Z_{0_{ij}} \end{bmatrix} \tag{3.112}$$

# CAPÍTULO IV

## METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA MATRIZ DAS ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS DE UM SISTEMA DE CABOS

Partindo–se da relação (1.2) transcrita em (4.1), torna–se possível o cálculo dos parâmetros elétricos transversais de um sistema de cabos elétricos, com as mesmas características descritas no Capítulo III para o sistema.

Por conseguinte,

$$\frac{dI}{dx} = - Y V \qquad (4.1)$$

onde, **V** e **I** são definidos no Capítulo V;

**Y** – matriz completa de n x n elementos, referentes às admitâncias transversais entre os n–elementos metálicos do sistema de cabos, por unidade de comprimento, em presença do solo.

De forma similar, adotam–se os comentários feitos no início do Capítulo III que são retratados aqui, sucintamente.

A matriz **Y** pode ser obtida para um sistema de N–cabos PT, segundo às relações (4.2), (4.3) e (4.4). A expressão matricial (4.3) ou (4.4) deve ser incluída N–vezes na matriz completa; uma vez que se refere à submatriz de admitâncias transversais próprias do cabo i (i = 1, N).

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\,\omega\,\mathbf{P}^{-1} \qquad (4.2)$$

onde, por hipótese, do ponto de vista quase estacionário, o ar é considerado sem perdas, sendo também desprezadas as perdas nos dielétricos. Desta forma, considera–se a matriz de condutâncias (G) nulas.

P – representa a matriz de coeficientes de potencial do sistema de cabos e é dada da seguinte forma, por cabo:

a) sendo o tubo envolvente de espessura infinita:

$$P_{ii} = P_i + P_p \tag{4.3}$$

b) para o tubo envolvente do cabo em análise, de espessura finita, comparada com a profundidade de penetração no interior do mesmo, tem–se:

$$P_{ii} = P_i + P_p + P_c + P_0 \tag{4.4}$$

sendo as matrizes parciais designadas a seguir:

$P_i$ – matriz de coeficientes de potencial internos dos cabos SC, internos, de energia e de fibra ótica do cabo PT i; por unidade de comprimento;

$P_p$ – matriz que leva em consideração as parcelas de coeficientes de potencial interno próprio e mútuo entre os cabos SC, internos, com referência à superfície interna da primeira camada metálica do tubo envolvente do cabo PT i; por unidade de comprimento;

$P_c$ – matriz de contribuição dos coeficientes de potencial devidos à influência das camadas isolantes existentes no tubo envolvente do cabo PT i, em análise, por

camadas isolantes existentes no tubo envolvente do cabo PT i, em análise, por unidade de comprimento;

$P_0$ – matriz de coeficientes de potencial do cabo PT i, no ar.

## 4.1 – CÁLCULO DA MATRIZ PARCIAL $P_i$

Assumindo–se as investigações feitas no item (3.2), segue–se a matriz que define $P_i$:

$$\begin{bmatrix} P_{i_{c1}} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{i_{c2}} & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & & & & & & \\ 0 & \dots & & P_{i_{cp}} & & & & & & \\ 0 & \dots & & & P_{i_{FO_1}} & & & & & \\ \vdots & & & & & P_{i_{FO_2}} & & & & \\ 0 & \dots & & & & & P_{i_{FO_q}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

com os seus elementos caracterizados em seguida:

$P_{i_{cj}}(j=1,p)$ – submatriz de coeficientes de potencial internos de um cabo SC interno, de energia;

$P_{i_{FOj}}(j=p+1,p+q)$ – submatriz de coeficientes de potencial internos de um cabo SC, interno, de fibra ótica.

Quanto aos zeros no final da matriz $P_i$, têm o mesmo significado citado para a

matriz $\mathbf{Z}_i$, no item (3.2).

### 4.1.1 – Submatriz $\mathbf{P}_{i_{cj}}$

Admitindo–se um cabo SC composto de condutor, blindagem e armação representado pelo corte transversal da Figura (4.1), com tratamento analítico extremamente simples e considerando o circuito equivalente da Figura (4.2), permite–se obter os elementos da submatriz $\mathbf{P}_{i_{cj}}$.

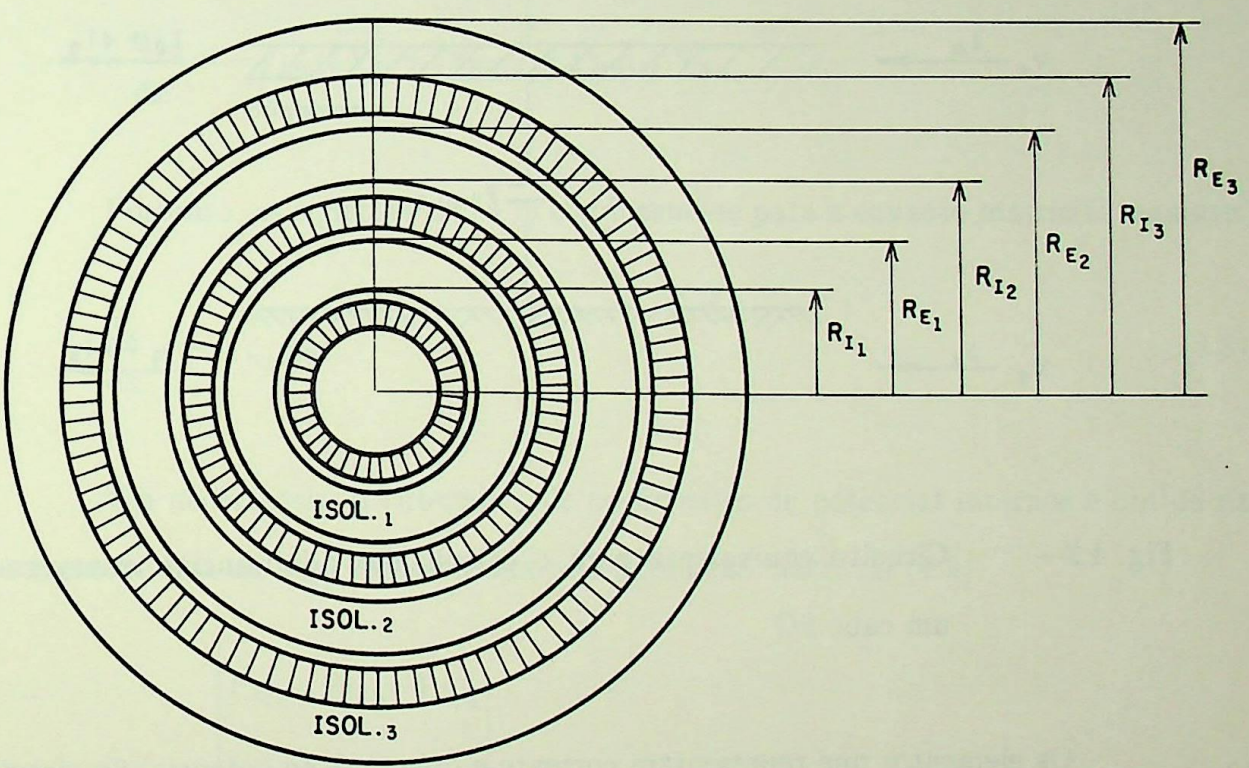



Fig. 4.1 – Corte transversal de um cabo SC dando ênfase às camadas isolantes

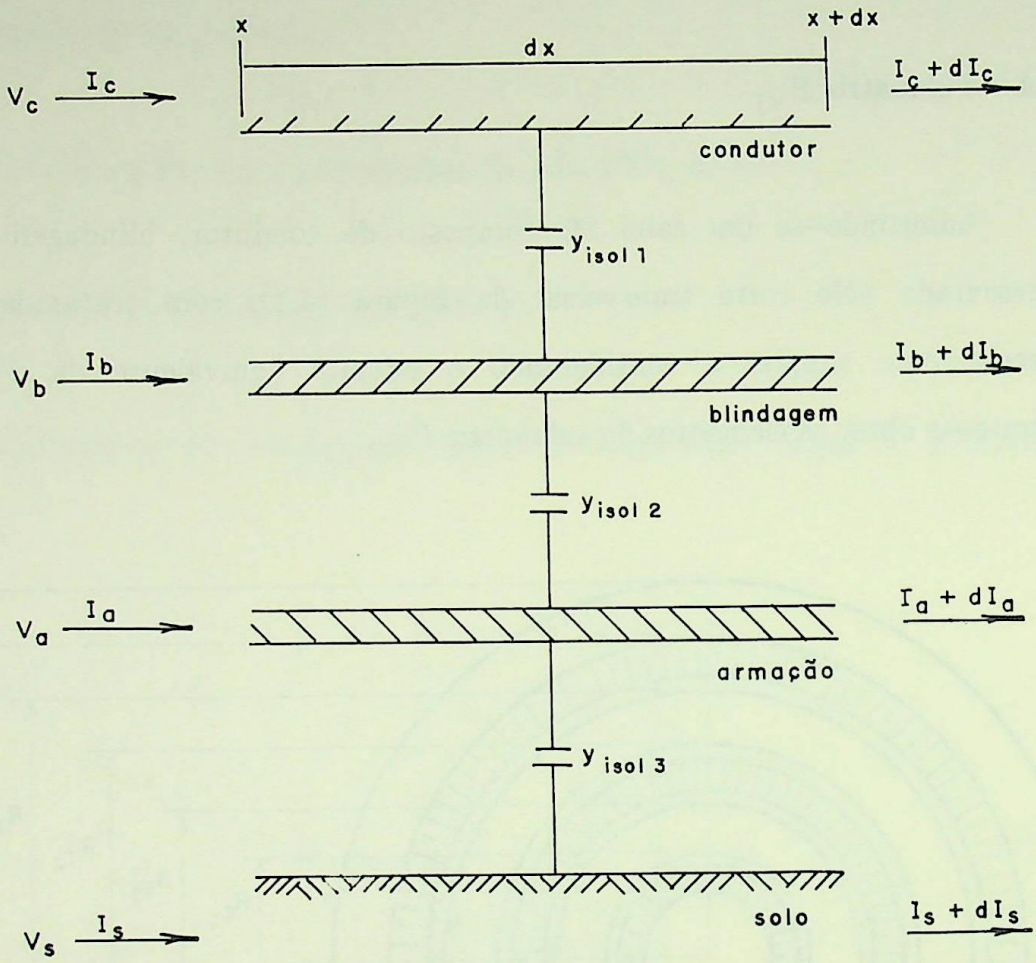



Fig. 4.2 – Circuito equivalente para o cálculo das admitâncias transversais de um cabo SC

Os elementos que representam corrente e diferença de potencial no circuito da Figura (4.2) são os mesmos definidos no item (3.2.1) para a Figura (3.1).

Partindo–se do circuito, tem–se:

$$I_c = y_{isol_1}\, dx(V_c - V_b) + I_c + dI_c$$

$$I_b = y_{isol_1}\, dx(V_b - V_c) + y_{isol_2}\, dx(V_b - V_a) + I_b + dI_b$$

$$I_a = y_{isol_2}\, dx(V_a - V_b) + y_{isol_3}\, dx\, V_a + I_a + dI_a \tag{4.6}$$

Das equações (4.6), deduzindo–as, obtêm–se:

$$-\frac{dI_c}{dx} = y_{isol_1} V_c - y_{isol_1} V_b$$

$$-\frac{dI_b}{dx} = -y_{isol_1} V_c + (y_{isol_1} + y_{isol_2}) V_b - y_{isol_3} V_a \tag{4.7}$$

$$-\frac{dI_a}{dx} = -y_{isol_2} V_b + (y_{isol_2} + y_{isol_3}) V_a$$

Portanto, as equações de (4.7) conduzem–se para a equação matricial seguinte:

$$\frac{dI}{dx} = -\mathbf{Y}_{i_{cj}}\, V \tag{4.8}$$

Em decorrência, a submatriz de coeficientes de potencial internos é obtida da relação inversa de $\mathbf{Y}_{i_{cj}}$, representada pela expressão matricial (4.9).

$$\mathbf{P}_{i_{cj}} = \begin{bmatrix} P_{i_{cc}} & P_{i_{cb}} & P_{i_{ca}} \\ P_{i_{cb}} & P_{i_{bb}} & P_{i_{ab}} \\ P_{i_{ca}} & P_{i_{ab}} & P_{i_{aa}} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

Com seus elementos assim definidos:

a) $P_{i_{cc}} = p_c + p_b + p_a$

b) $P_{i_{bb}} = p_b + p_a$

c) $P_{i_{cb}} = p_b + p_a$

d) $P_{i_{aa}} = p_a$ (4.10)

e) $P_{i_{ca}} = p_a$

f) $P_{i_{ba}} = p_a$

Os termos que constituem os cálculos das equações (4.10) estão relacionados inversamente com os elementos admitâncias do circuito equivalente da Figura (4.2). Obtendo–se sua formulação na teoria clássica, segue–se:

1) $p_c$ – coeficiente de potencial interno do isolante externo ao condutor ou da primeira camada isolante.

$$p_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1} \ell n(\frac{R_{E_1}}{R_{I_1}}) \tag{4.11}$$

2) $p_b$ – coeficiente de potencial interno do isolante externo à blindagem ou da segunda camada isolante.

$$p_b = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_2} \ell n(\frac{R_{E_2}}{R_{I_2}}) \tag{4.12}$$

3) $p_a$ – coeficiente de potencial interno do isolante externo à armação ou da terceira camada isolante.

$$p_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_3}\ell n\left(\frac{R_{E_3}}{R_{I_3}}\right) \qquad (4.13)$$

onde:

$\epsilon_0$ – permissividade ou constante dielétrica do vácuo (melhor definida no Apêndice I);

$\epsilon_1$, $\epsilon_2$ e $\epsilon_3$ – respectivamente, representam as permissividades relativas das primeira, segunda e terceira camadas isolantes do cabo SC, interno, de energia;

$R_{I_1}$, $R_{I_2}$ e $R_{I_3}$ – referem–se, nesta ordem, aos raios internos das três camadas isolantes do cabo SC interno, de energia (m);

$R_{E_1}$, $R_{E_2}$ e $R_{E_3}$ – trata–se dos raios das superfícies externas das três camadas isolantes, respectivamente, do cabo SC interno de energia (m).

### 4.1.2 – Submatriz $P_{i_{FOj}}$

Representa a submatriz de coeficientes de potencial internos de um cabo SC, interno, de fibra ótica por unidade de comprimento.

Conforme mencionado no item (3.2.2), admitindo–se a semelhança construtiva, com caráter elétrico, entre os cabos SC de energia e fibra ótica, faz–se a analogia quanto aos cálculos de $\mathbf{P}_{i_{FOj}}$ e $\mathbf{P}_{i_{cj}}$. Desta forma, permite–se:

$$P_{i_{FOj}} = \begin{bmatrix} P_{i_{FO_{cc}}} & P_{i_{FO_{bc}}} & P_{i_{FO_{ca}}} \\ P_{i_{FO_{bc}}} & P_{i_{FO_{bb}}} & P_{i_{FO_{ba}}} \\ P_{i_{FO_{ca}}} & P_{i_{FO_{ba}}} & P_{i_{FO_{aa}}} \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

Cujos elementos são obtidos com a mesma formulação apresentada no item anterior, para os elementos de $P_{i_{cj}}$.

## 4.2 – MATRIZ PARCIAL $P_p$

Matriz que tem por finalidade considerar as parcelas de coeficientes de potencial internos próprios e mútuos entre os cabos SC, internos, de energia e de fibra ótica com referência à superfície interna da primeira camada metálica do tubo envolvente. $P_p$, de forma similar à expressão (3.38), afigura–se:

$$P_p = \begin{bmatrix} P_{p11} & P_{p12} & \cdots & P_{pj1} & 0 & 0 & 0 \\ P_{p12} & P_{p22} & \cdots & P_{pj2} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{pj1} & P_{pj2} & \cdots & P_{pjj} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

### 4.2.1 – Submatriz $P_{pjj}$

Refere–se à parcela de coeficiente de potencial próprio do cabo SC, interno, j ($j = 1, p + q$), com referência à primeira camada metálica do tubo envolvente.

Sendo p o número total de cabos SC, internos, de energia e q representa o número total de cabos SC, internos, de fibra ótica.

Tem a mesma dimensão da submatriz $\mathbf{Z}_{pjj}$. É definida pelo elemento comum $P_{jj}$, ou seja:

$$\mathbf{P}_{pjj} = \begin{bmatrix} P_{jj} & P_{jj} & P_{jj} \\ P_{jj} & P_{jj} & P_{jj} \\ P_{jj} & P_{jj} & P_{jj} \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

com[4]:

$$P_{jj} = \frac{Q_{jj}}{2\pi \ \epsilon_{p1} \ \epsilon_0} \tag{4.17}$$

$Q_{jj}$– mesma expressão definida em (3.42);

$\epsilon_{p1}$– permissividade relativa do isolante interno à primeira camada metálica do tubo envolvente (enchimento).

### 4.2.2 – Submatriz $\mathbf{P_{pjk}}$

Trata–se dos coeficientes de potencial mútuos entre cabos SC, internos, de energia, de fibra ótica e entre cabos de energia e fibra ótica com referência à superfície interna da primeira camada metálica do tubo envolvente, do cabo PT em análise. Tem a mesma definição para os seus elementos, levando–se em consideração as características de cada cabo SC.

Quanto à dimensão, vale a abordagem feita para a submatriz $\mathbf{Z}_{pjk}$.

Em decorrência do exposto, segue–se:

$$P_{pjk} = \begin{bmatrix} P_{jk} & P_{jk} & P_{jk} \\ P_{jk} & P_{jk} & P_{jk} \\ P_{jk} & P_{jk} & P_{jk} \end{bmatrix} \tag{4.18}$$

Tendo o seu elemento comum a definição seguinte:

$$P_{jk} = \frac{Q_{jk}}{2\pi \ \epsilon_0 \ \epsilon_{p1}} \tag{4.19}$$

com:

$Q_{jk}$ – tem a mesma definição da equação (3.45).

## 4.3 – MATRIZ PARCIAL $P_c$

Matriz que representa a contribuição do tubo envolvente no cálculo dos coeficientes de potencial internos de todas as camadas isolantes do cabo PT.

Com procedimento análogo à (3.47), tem–se:

$$P_c = \begin{bmatrix} P_{c1} & P_{c1} & \cdots & P_{c1} & P_{c2} & P_{c4} & P_{c6} \\ P_{c1} & P_{c1} & \cdots & P_{c1} & P_{c2} & P_{c4} & P_{c6} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{c1} & P_{c1} & \cdots & P_{c1} & P_{c2} & P_{c4} & P_{c6} \\ P_{c2} & P_{c2} & \cdots & P_{c2} & P_{c3} & P_{c4} & P_{c6} \\ P_{c4} & P_{c4} & \cdots & P_{c4} & P_{c4} & P_{c5} & P_{c6} \\ P_{c6} & P_{c6} & \cdots & P_{c6} & P_{c6} & P_{c6} & P_{c7} \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

### 4.3.1 – Submatriz $P_{c1}$

Esta submatriz adiciona a influência das camadas isolantes do tubo envolvente no cálculo dos coeficientes de potencial internos de todos os cabos SC, internos, de energia e de fibra ótica.

Admitindo–se um cabo SC, interno, composto por condutor, blindagem e armação, $P_{c1}$ é dada da seguinte forma:

$$P_{c1} = \begin{bmatrix} P_{c1} & P_{c1} & P_{c1} \\ P_{c1} & P_{c1} & P_{c1} \\ P_{c1} & P_{c1} & P_{c1} \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

sendo:

$$P_{c1} = p_{TE1} + p_{TE2} + p_{TE3} \tag{4.22}$$

### 4.3.2 – Submatriz $P_{c2}$

Representa os coeficientes de potencial mútuos entre os meios envolvidos e a primeira camada isolante do tubo envolvente.

Percebe–se, de maneira similar à $Z_{c2}$, que se refere à uma submatriz coluna, com o mesmo elemento $P_{c2}$.

Cumpre observar, que no que concerne às dimensões das submatrizes de $P_c$, as constatações feitas para $Z_c$, também são válidas aqui.

Dando prosseguimento, tem–se:

$$P_{c2} = P_{c1} \tag{4.23}$$

### 4.3.3 – Elemento $P_{c3}$

Designa o coeficiente de potencial próprio da primeira camada isolante do tubo envolvente

$$P_{c3} = P_{c1} \tag{4.24}$$

### 4.3.4 – Submatriz $P_{c4}$

Representa os coeficientes de potencial mútuos entre os meios envolvidos e a segunda camada isolante do tubo envolvente.

Os comentários feitos para $P_{c2}$ são extensivos à $P_{c4}$.

Também definida pelo elemento comum $P_{c4}$.

$$P_{c4} = p_{TE2} + p_{TE3} \tag{4.25}$$

### 4.3.5 – Elemento $P_{c5}$

Diz respeito ao coeficiente de potencial próprio da segunda camada isolante do tubo envolvente.

$$P_{c5} = P_{c4} \tag{4.26}$$

### 4.3.6 – Submatriz $P_{c6}$

Submatriz que contém o elemento comum $P_{c6}$ que considera os coeficientes de potencial mútuos entre os meios envolvidos e a terceira camada isolante do tubo envolvente do cabo PT em estudo.

$$P_{c6} = p_{TE3} \tag{4.27}$$

### 4.3.7 – Elemento $P_{c7}$

Refere–se ao coeficiente de potencial próprio da terceira camada isolante do tubo envolvente do cabo PT.

$$P_{c7} = P_{c6} \tag{4.28}$$

sendo:

$p_{TE1}$ – coeficiente de potencial interno equivalente da primeira camada isolante do tubo envolvente, definida entre as duas primeiras camadas metálicas do mesmo;

$$p_{TE1} = \frac{1}{2\pi\ \epsilon_0\ \epsilon_{p2}}\ \ell n\left(\frac{R_{E1}}{R_{I1}}\right) \tag{4.28}$$

**Nota:** se existirem duas camadas isolantes entre as camadas metálicas, $p_{TE1}$ será a resultante das duas, ou seja:

$$p_{TE1} = \frac{1}{2\pi\ \epsilon_0\ \epsilon_{p2}} \ln\left(\frac{R_{E1}}{R_{I1}}\right) + \frac{1}{2\pi\ \epsilon_0\ \epsilon_{p3}} \ln\left(\frac{R_{E2}}{R_{I2}}\right) \qquad (4.29)$$

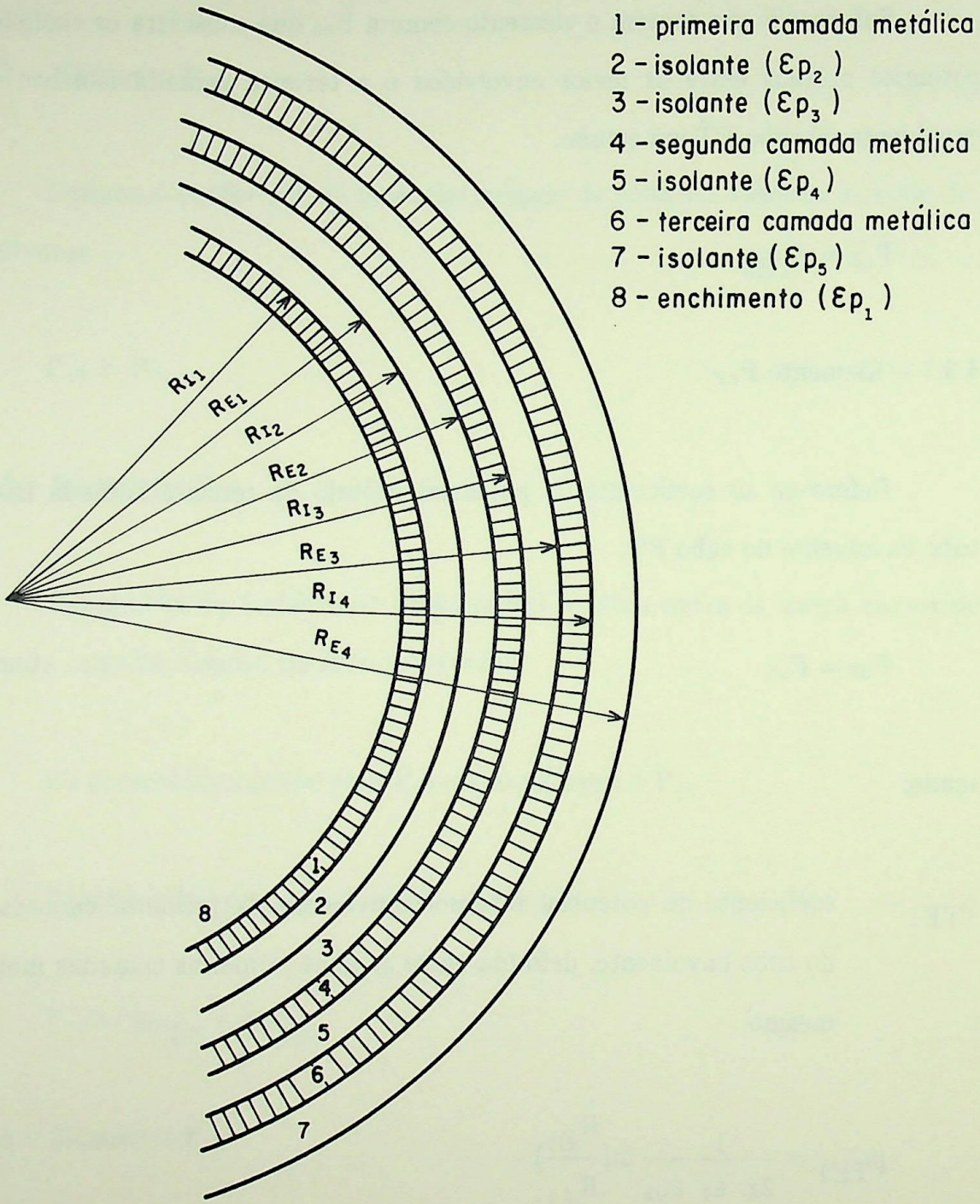



Fig. 4.3 — Parte de um corte transversal de um tubo envolvente dando ênfase às camadas isolantes

$\epsilon_{p2}$ – permissividade relativa da primeira camada isolante (2), externa à primeira camada metálica do tubo envolvente (adimensional);

$\epsilon_{p3}$ – permissividade relativa da segunda camada isolante (3), externa à primeira camada metálica do tubo envolvente (adimensional);

$R_{I1}$ – raio da superfície interna da primeira camada isolante (2), externa à primeira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{E1}$ – raio da superfície externa da primeira camada isolante (2), externa à primeira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{I2}$ – raio da superfície interna da segunda camada isolante (3), externa à primeira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{E2}$ – raio da superfície externa da segunda camada isolante (3), externa à primeira camada metálica do tubo envolvente (m);

$p_{TE2}$ – coeficiente de potencial interno da segunda camada isolante (equivalente) do tubo envolvente;

$$p_{TE2} = \frac{1}{2\pi\ \epsilon_0\ \epsilon_{p4}}\ \ell n(\frac{R_{E3}}{R_{I3}}) \qquad (4.30)$$

$\epsilon_{p4}$ – permissividade relativa da terceira camada isolante (5), externa à segunda camada metálica do tubo envolvente (adimensional);

$R_{I3}$ – raio da superfície interna da terceira camada isolante (5), externa à

segunda camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{E3}$ – raio da superfície externa da terceira camada isolante (5), externa à segunda camada metálica do tubo envolvente (m);

$p_{TE3}$ – coeficiente de potencial interno da terceira camada isolante (equivalente) ou capa externa do tubo envolvente;

$$p_{TE3} = \frac{1}{2\pi\ \epsilon_0\ \epsilon_{p5}} \ell n(\frac{R_{E4}}{R_{I4}}) \qquad (4.31)$$

$\epsilon_{p5}$ – permissividade da camada isolante (7) externa à terceira camada metálica do tubo envolvente (adimensional);

$R_{I4}$ – raio da superfície interna da camada isolante (7) externa à terceira camada metálica do tubo envolvente (m);

$R_{E4}$ – raio da superfície externa da camada isolante (7) externa à terceira camada metálica do tubo envolvente (m).

## 4.4 – COEFICIENTES DE POTENCIAL MÚTUOS ENTRE CABOS PT E PRÓPRIOS – EM PRESENÇA DO AR

Considerando–se a expressão para a matriz de impedâncias longitudinais de um sistema de N–cabos retratada em (3.69), buscando similaridade, para a matriz completa de coeficientes de potencial, tem–se:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

sendo:

$\mathbf{P}$ e $\mathbf{P}_{ii}$ – definidas no início desse capítulo;

$\mathbf{P}_{0_{ij}}(i \neq j)$ – representa a matriz de coeficientes de potencial mútuos entre cabos do sistema elétrico em análise, com o envolvimento do ar, por unidade de comprimento.

Quanto às dimensões de $\mathbf{P}_{0_{ii}}$ e $\mathbf{P}_{0_{ij}}$, consideram–se todas as observações feitas para as matrizes correspondentes de impedâncias longitudinais.

Ressalta–se que $\mathbf{P}_{0_{ii}}$ complementa a determinação das matrizes parciais da relação (4.4), para um cabo PT.

De forma semelhante às expressões (3.70) e (3.71), têm–se:

a) considerando–se a Figura (4.4), segue–se:

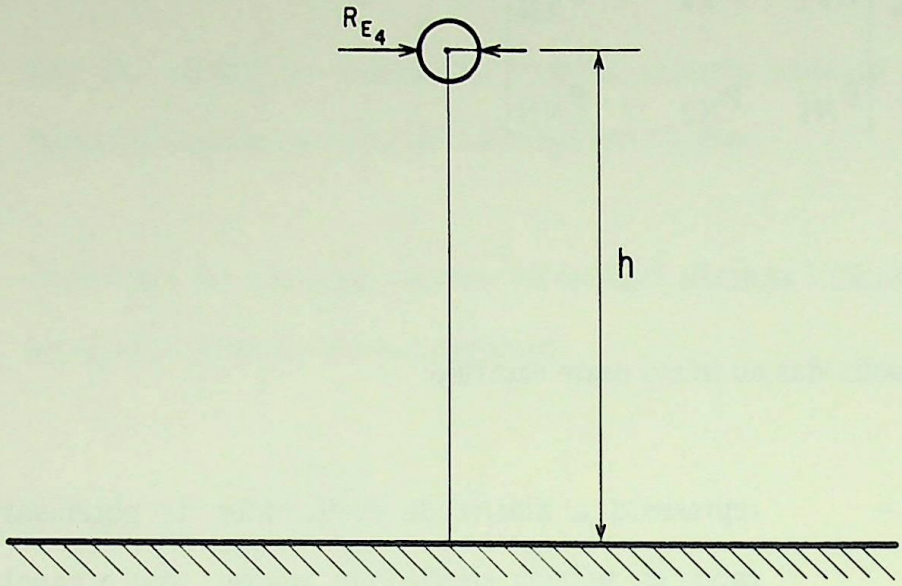



Fig. 4.4 – Configuração aérea de um cabo

$$\mathbf{P}_{0_{ii}} = \begin{bmatrix} P_{0_{ii}} & \cdots & P_{0_{ii}} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{0_{ii}} & \cdots & P_{0_{ii}} \end{bmatrix} \tag{4.33}$$

Sendo, $\mathbf{P}_{0_{ii}}$ responsável pela contribuição do espaço na matriz de coeficientes de potencial para um sistema de cabos aéreos.

Com base na teoria[4,31] clássica elementar, obtém–se:

$$p_{0_{ii}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ell n(\frac{2\,h}{R_{E4}}) \tag{4.34}$$

Onde:

h – altura média do eixo do cabo à superfície do solo (m);

$R_{E4}$ – raio mais externo do cabo (m).

b) Para os coeficientes de potencial mútuos entre cabos, tem–se:

$$P_{0_{ij}} = \begin{bmatrix} P_{0_{ij}} & \cdots & P_{0_{ij}} \\ \vdots & & \\ P_{0_{ij}} & \cdots & P_{0_{ij}} \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

Levando–se em consideração a Figura (3.3), da formulação analítica, vem:

$$P_{0_{ij}} = \frac{1}{2\pi\ \epsilon_0}\ \ell n(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}) \tag{4.36}$$

Sendo $d_{ij}$ e $D_{ij}$ definidos no item (3.51).

Em se tratando de cabos subterrâneos[38], o solo age como uma blindagem eletrostática para os cabos, tornando os elementos $P_{0_{ij}}$ (i = 1, m; j = 1, m), nulos.

Onde, m representa o número total de camadas metálicas do sistema de cabos.

# CAPÍTULO V

## REPRESENTAÇÃO DAS TRANSFORMADAS SIMÉTRICAS

### 5.1 – INTRODUÇÃO

Desde 1912 que vários artigos têm sido publicados possibilitando a resolução de um sistema de fases desequilibradas(*) pela transformação em novas componentes capazes de resolver o problema com facilidade e rapidez. Entre eles, autores como STOKVIS, BLONDEL, FORTESCUE, EDITH CLARKE, EDELMAN[13] e outros contribuíram apresentando métodos e aplicações para a resolução de vários problemas encontrados em sistemas elétricos.

Neste trabalho, dar–se–á ênfase ao método das transformadas em componentes simétricas; por ser geralmente o mais utilizado.

Entretanto, salienta–se que não é aconselhável a aplicação desta metodologia em casos de sistemas de cabos elétricos com fases não transpostas e de extensão longa; ou ainda com o comprimento de um ciclo de transposição da ordem ou maior que um quarto (1/4) do comprimento de onda, sendo comum de ocorrer nas altas freqüências. Para esses tipos de sistemas, as dificuldades encontradas com o acoplamento entre as fases, podem ser resolvidas pelo emprego da técnica de transformação modal, não abordada neste trabalho.

A apresentação clássica do método das transformadas simétricas é feita partindo de considerações simples mais significativas, sobre a rede trifásica. Os

---

(*) Quando os elementos da diagonal principal e fora da diagonal de uma matriz são iguais entre si, caracterizam uma propriedade denominando matrizes "balanceadas" que, geralmente representam sistemas equilibrados.

elementos que agem na rede elétrica são considerados como resultantes da transformação no domínio das componentes simétricas, a saber:

1) componente homopolar (de ordem 0), também conhecida como componente de seqüência zero;

2) componente direta (de ordem 1), também conhecida como componente de seqüência positiva;

3) componente inversa (de ordem 2), também conhecida como componente de seqüência negativa.

Esses três grupos de transformadas devem ser encontrados de tal forma que a sua composição restitua em cada fase o valor original. A possibilidade de determinar essas transformadas resulta de uma construção geométrica simples permitindo obter os parâmetros correspondentes ao funcionamento num simétrico da rede elétrica.

Ao mesmo tempo, torna–se mais fácil e mais geral abordar este problema inspirando–se na teoria das transformações ou mudanças de coordenadas.

O conjunto das tensões, correntes e das grandezas associadas: impedâncias, admitâncias, potência, etc. da rede original (ABC), formulado em componentes de fase, é modificado aplicando as equações que caracterizam uma transformação ou mudança de coordenadas.

As novas equações conduzem as conexões entre os elementos da rede original à rede imagem. Em cada caso particular não é necessário transformar a rede inteira, que é dividida em redes parciais correspondentes a uma matriz impedância ou

admitância, à qual é aplicada a transformação.

É possível mostrar que as redes com simetria cíclica podem, pela escolha de uma matriz de transformação, ser transformadas de tal forma que as redes resultantes sejam inteiramente desacopladas.

O estudo monofásico da rede trifásica (impedâncias industriais) é feito através das impedâncias que caracterizam a rede direta, e a rede inversa, enquanto as que caracterizam a rede homopolar estão associadas ao funcionamento da rede envolvendo a terra. Esta simplificação que permite o caráter de simetria cíclica da rede dada, é perdida com assimetrias intervenientes; estas conduzem a acoplamentos entre as três redes transformadas.

O estudo utilizando a forma racionalizada[13] das equações de transformação, perrmite que a escolha das coordenadas conduza à uma transformação guardando invariante a forma da potência, onde resulta a possibilidade de realizar um circuito de conversão das grandezas entre elas.

O estudo do sistema elétrico através da mudança apropriada de coordenadas, oferece uma grande vantagem sobre a representação direta, que é o fato de que o esquema a ser realizado não comporta acoplamento entre as fases para a mesma rede transformada.

A utilização destas transformadas, em particular das componentes simétricas, permite uma boa simplificação do estudo das redes, feita com o auxílio de computadores digitais.

Teoricamente para utilizar as equações associadas às transformações

simétricas, no que se refere à diagonalização, os cabos devem estar continuamente transpostos no sistema elétrico. No entanto, o seu uso é permitido, com suficiente precisão, para sistemas com transposições práticas, tais como:

1) a seção de transposição é aproximadamente igual ao comprimento do cabo ou a um submúltiplo do mesmo;

2) o comprimento de um ciclo completo de transposição (três seções para um circuito simples) é sensivelmente menor do que um quarto (1/4) do comprimento de onda na freqüência envolvida no estudo.

Portanto, a matriz de impedâncias longitudinais não transpostas pode ser transformada diretamente, considerando a metodologia para sistemas transpostos. Este processo é análogo para a matriz das admitâncias transversais. O acoplamento entre os termos é ignorado, se o sistema é "praticamente" transposto.

Os elementos da diagonal principal da matriz transformada são as quantidades de seqüências desejadas. Os elementos fora da diagonal principal são aproximadamente nulos e representam o acoplamento entre as seqüências (pela não transposição real do sistema).

## 5.2 – ASPECTOS TEÓRICOS

Para que o método de cálculo das transformadas simétricas seja coerente com a rede original, lhe são impostas as seguintes condições[13]:

1) a transformação das correntes e das tensões será definida pela mesma matriz;

2) a potência total na rede inicial e na rede transformada será igual (sistema invariante em potência).

A aplicação da primeira condição permite escrever as seguintes relações:

$$V_{ABC} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

$$V_{012} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

$$I_{ABC} = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

$$I_{012} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

Sendo:

As grandezas de índices (ABC) são grandezas referentes à rede original, nas componentes de fase.

As grandezas de índices (012) referem–se à rede transformada, nas componentes de seqüências homopolar, direta e inversa.

T é a matriz de transformação (será descrita mais adiante) tendo $T^{-1}$ como sua matriz inversa.

A segunda condição imposta conduz à equação seguinte:

$$\Sigma S = V_A I_A^* + V_B I_B^* + V_C I_C^*$$

$$= [V_A \; V_B \; V_C] \begin{bmatrix} I_A^* \\ I_B^* \\ I_C^* \end{bmatrix} \equiv [V_0 \; V_1 \; V_2] \, T^t \, T^* \begin{bmatrix} I_0^* \\ I_1^* \\ I_2^* \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

$$\Sigma S = \Sigma P + j\Sigma Q \equiv [V_0 \; V_1 \; V_2] \begin{bmatrix} I_0^* \\ I_1^* \\ I_2^* \end{bmatrix}$$

As identidades das duas formas bilineares devem ser satisfeitas quaisquer que sejam as variáveis; segue então, que:

$$T^t \, T^* = 1 \tag{5.6}$$

A tradução matemática das duas condições impostas a priori, permite concluir que a matriz T deve ser unitária(*). Exige–se ainda que tal matriz transforme uma matriz impedância (ou admitância) simétrica em uma matriz diagonal levando a ausência de acoplamentos na rede transformada.

É fácil mostrar que a transformação

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

(*) A norma dos vetores de uma matriz unitária é igual a 1; desta forma, as transformadas que asseguram a invariância da potência são conhecidas como transformadas normalizadas.

com $a = e^{j2\pi/3}$, definida pela matriz unitária, satisfaz às condições impostas.

Verifica–se ainda que esta matriz é unitária, ou seja:

$$\mathbf{T}^t\,\mathbf{T}^* = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 1 \qquad (5.8)$$

Esta relação também permite mostrar que a inversa desta matriz, $\mathbf{T}^{-1}$, é obtida formando a sua transconjugada:

$$\mathbf{T}^{-1} = (\mathbf{T}^t)^* = \frac{1}{\sqrt{3}}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \qquad (5.9)$$

Introduzindo a matriz (5.7) em (5.1) e (5.3) e supondo que as tensões e as correntes das fases A, B e C estejam ligadas pela equação linear seguinte:

$$\mathbf{V}_{ABC} = \mathbf{Z}_{ABC}\,\mathbf{I}_{ABC} \qquad (5.10)$$

obtém–se:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \mathbf{T}\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{ABC}\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{ABC}\,\mathbf{T}\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \qquad (5.11)$$

Multiplicando à esquerda por $T^{-1} = (T^t)^*$, obtém:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = (T^t)^* \, Z_{ABC} \, T \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

admitindo que:

$$(T^t)^* \, Z_{ABC} \, T = Z_{012} \tag{5.13}$$

A transformação representada por (5.13) é uma transformação complexa congruente. Ela resulta da multiplicação à direita por uma matriz não singular e à esquerda pela sua transconjugada. Como a matriz de transferência T é unitária, a transformação é ao mesmo tempo uma transformação de similitude.

Percebe–se que a equação (5.12) possui a mesma forma da equação (5.10) tendo $Z_{012}$ como a matriz impedância da rede transformada.

Partindo de uma matriz de impedâncias $Z_{ABC}$, na qual a simetria das fases se traduz em igualdade dos elementos desta matriz, que estão situados sobre uma mesma paralela à diagonal principal, a matriz T transforma portanto a matriz de impedâncias simétrica em uma matriz diagonal(*); resultando num cálculo simples (caso de uma rede transposta ou "praticamente" transposta).

Esta mudança de coordenadas, desde que a rede inicial tenha uma completa

---

(*) Para que uma matriz seja transformada em matriz diagonal por uma matriz unitária, ela deve ser permutável com a sua transconjugada (matriz normal). O cálculo mostra que:

$$Z_{ABC}(Z^*_{ABC})^t = (Z^t_{ABC})^* \, Z_{ABC}$$

simetria cíclica, induz à rede transformada um desacoplamento entre as três componentes, no caso trifásico; o que caracteriza os modos independentes da matriz impedância: sistemas homopolar, direto e inverso (0, 1, 2).

Porém, se a rede original comporta em alguns pontos, elementos que não participam da simetria do conjunto, a rede transformada conterá conexões entre suas componentes. Exemplos de tais casos podem ser vistos em estudos de curtos–circuitos monofásicos, bifásicos à terra, etc.

## 5.3 – GENERALIZAÇÃO AOS SISTEMAS POLIFÁSICOS

As transformadas simétricas podem ser igualmente introduzidas nas redes onde o número de fases é diferente de três. Para uma rede m–fásica a matriz de definição das transformadas simétricas se escreve:

$$T = \frac{1}{\sqrt{m}} \begin{bmatrix} \epsilon_m^0 & \epsilon_m^0 & \cdots & \epsilon_m^0 \\ \epsilon_m^0 & \epsilon_m^{-1\cdot 1} & \cdots & \epsilon_m^{-1\cdot(m-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \epsilon_m^0 & \epsilon_m^{-(m-1)\cdot 1} & \cdots & \epsilon_m^{-(m-1)(m-1)} \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

Sendo:

$$\epsilon_m = e^{j2\pi/m}$$

O elemento (i, k) desta matriz é, portanto:

$$T_{ik} = \frac{1}{\sqrt{m}} \epsilon_m^{-(i-1)(k-1)} \tag{5.15}$$

Esta generalização continua sendo válida para a aplicação da equação (5.13) no sentido de obter as matrizes das impedâncias longitudinais e das admitâncias transversais de componentes simétricas do cabo.

A notação habitual para os elementos da matriz transformada de impedâncias será mantida. Ou seja,

$Z_{11} = Z_0$ (impedância homopolar);

$Z_{22} = Z_1$ (impedância direta);

$Z_{33} = Z_2$ (impedância inversa), etc., sendo também similar para a matriz transformada de admitâncias.

Como já descrito, também as transformadas simétricas generalizadas, no caso das redes à simetria cíclica, conduzem às redes transformadas desacopladas.

## 5.4– PREPARAÇÃO DO SISTEMA PARA O CÁLCULO DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

Considerando uma seção de um sistema homogêneo de cabos multicondutores, curta, comparada com o comprimento da onda propagada, em regime alternado senoidal, em função da freqüência, com referência à terra, pode–se representá–la sob a forma:

$$\frac{dV}{dx} = -Z\,I \tag{5.16}$$

$$\frac{dI}{dx} = -Y\,V \tag{5.17}$$

Sendo[25,31]:

V – matriz coluna complexa, de n elementos; representa a tensão transversal em cada condutor (cada camada metálica) do sistema de cabos em relação ao solo;

I – matriz coluna complexa, de n elementos; representa a corrente correspondente em cada condutor;

Z – matriz de n x n elementos correspondentes às impedâncias longitudinais entre os n condutores do sistema de cabos, por unidade de comprimento, em presença do solo; sendo uma matriz complexa não singular cujos elementos da diagonal representam as impedâncias próprias e os elementos fora da diagonal representam as impedâncias mútuas(*) ;

Y – matriz de (n x n) elementos correspondentes às admitâncias transversais entre os n condutores do sistema de cabos, por unidade de comprimento, em presença do solo; tendo os elementos da diagonal principal como admitâncias próprias e os elementos fora da diagonal como admitâncias mútuas(*).

Para a transformação do sistema original de cabos em componentes simétricas, tornam–se necessárias algumas manipulações matemáticas nas matrizes **Z** e **Y** da rede primitiva, quanto às condições de aterramento das camadas metálicas: blindagens e/ou armações.

---

(*) Admitindo que as matrizes das impedâncias longitudinais **Z** e das admitâncias transversais **Y** representem sistemas lineares obedecendo ao teorema de reciprocidade da rede que se exprime pela simetria, vem:

$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^t$, $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}^t$ levando a $Z_{ij} = Z_{ji}$ e $Y_{ij} = Y_{ji}$

Pela natureza do estudo, caracteriza–se a real importância de cada camada metálica para o sistema, tornando–a ou não num elemento de fase para a matriz. As camadas metálicas que não interferem diretamente no estudo, podem ser eliminadas porém, mantendo a sua influência nas matrizes **Z** e **Y**. Essas eliminações são feitas introduzindo as seguintes condições terminais:

### 5.4.1 – Camadas Metálicas Aterradas

Por hipótese, a terra é a referência de potencial; aterrando um dos condutores de índice k, permite que,

$$V_k = 0 \tag{5.18}$$

desde que não seja importante considerar o campo eletromagnético associado às correntes de condução transversais à direção da rede elétrica.

O efeito da ligação à terra do condutor k na matriz **Y**, impõe que a linha de índice k e a coluna de índice k desta matriz sejam suprimidas (não alterando os índices originais referentes aos demais condutores). Isto pode ser facilmente verificado levando a condição (5.18) à equação matricial (5.17).

Observa–se ainda que a condição (5.18) permite escrever:

$$\frac{dV_k}{dx} = 0 \tag{5.19}$$

Esta hipótese é razoável desde que a distância entre os pontos de aterramento seja menor do que um quarto do comprimento de onda. Na freqüência industrial, é sempre possível de ser verdadeira. Nas altas freqüências é difícil de afirmar.

Substituindo (5.19) em (5.16), vem:

$$\sum_{j} Z_{kj} I_j = 0 \qquad (5.20)$$

com:

$$I_k = - Z_{kk}^{-1} \sum_{j \neq k} Z_{kj} I_j \qquad (5.21)$$

Por conseguinte, o efeito da corrente $I_k$ fica contido implicitamente na matriz **Z** através da redução da mesma, dando ao elemento genérico de índices (r, s), o valor:

$$Z'_{rs} = Z_{rs} - Z_{rk} Z_{kk}^{-1} Z_{ks} \qquad (5.22)$$

sendo:

$Z_{rs}$– elemento (r, s) de **Z** antes da "eliminação" da linha k e da coluna k desta matriz;

$Z'_{rs}$– elemento (r, s) da matriz **Z**, após essa "eliminação" (não alterando os índices originais referentes aos demais condutores);

$Z_{rk}$, $Z_{ks}$ e $Z_{kk}$ – respectivamente, são os elementos (r, k), (k, s) e (k, k) da matriz **Z** antes da "eliminação".

Por outro lado, a matriz **Y** sofrerá tantas "eliminações" de linhas e colunas quantas forem as camadas metálicas aterradas, respeitando sempre os índices

originais referentes aos outros condutores, levando à redução da ordem da matriz.

Da mesma forma, os termos da matriz **Z** serão reduzidos um a um, aplicando a expressão (5.22), também respeitando os índices originais referentes aos outros condutores, implicando na redução da ordem da matriz.

### 5.4.2 – Camadas Metálicas Isoladas

Por hipótese, estando isolado o condutor de índice k, implica em:

$$I_k = 0 \tag{5.23}$$

O efeito da condição (5.23) na equação matricial (5.16) levará à redução da matriz **Z**, suprimindo a linha de índice k e a coluna de índice k (não alterando os índices originais referentes aos demais condutores).

A condição (5.23) também implica em:

$$\frac{dI_k}{dx} = 0 \tag{5.24}$$

Portanto, substituindo a equação (5.24) na equação matricial (5.17), obtém:

$$\sum_j Y_{kj}\, V_j = 0 \tag{5.25}$$

Conseqüentemente,

$$V_k = - Y_{kk}^{-1} \sum_{j \neq k} Y_{kj}\, V_j \tag{5.26}$$

Usando manipulações similares à obtenção dos elementos da matriz **Z** reduzida do item (5.4.1), obtêm–se as admitâncias transversais através de:

$$Y'_{rs} = Y_{rs} - Y_{rk}\, Y_{kk}^{-1}\, Y_{ks} \qquad (5.27)$$

Sendo:

$Y_{rs}$– elemento (r, s) da matriz **Y**, antes da eliminação da linha k e da coluna k da mesma;

$Y'_{rs}$– elemento (r, s) da matriz **Y**, após essa "eliminação" (não alterando os índices originais referentes aos demais condutores);

$Y_{rk}$, $Y_{ks}$ e $Y_{kk}$ – respectivamente, são os elementos (r, k), (k, s) e (k, k) da matriz **Y** antes da "eliminação".

Aplicando sucessivamente as reduções das matrizes **Z** e **Y**, levando em consideração os efeitos de aterramento ou isolação dos condutores (blindagens e/ou armações), resultarão nas matrizes $\mathbf{Z}_f$ e $\mathbf{Y}_f$ que relacionam os grupos de condutores de interesse ("fases") para o estudo, através das equações seguintes:

$$\frac{d\mathbf{V}_f}{dx} = -\mathbf{Z}_f\, \mathbf{I}_f \qquad (5.28)$$

$$\frac{d\mathbf{I}_f}{dx} = -\mathbf{Y}_f\, \mathbf{V}_f \qquad (5.29)$$

Sendo:

$V_f$ – matriz coluna de m elementos (m é o número de "fases" consideradas, sendo $m \leq n$), representando as tensões transversais (vetores complexos) das fases 1, 2, ..., m, com referência ao plano de terra, perpendicular à direção da linha, de coordenada longitudinal x, do sistema de cabos;

$I_f$ – matriz coluna de m elementos representando as correntes totais (vetores complexos) nas "fases" 1, 2, ..., m, do sistema de cabos;

$Z_f$ – matriz de (m x m) elementos correspondentes às impedâncias longitudinais entre as m "fases" do sistema de cabos, por unidade de comprimento, em presença do solo e do efeito das ligações das camadas metálicas (blindagens e/ou armações) de cada cabo SC;

$Y_f$ – matriz de (m x m) elementos correspondentes às admitâncias transversais entre as m "fases" do sistema de cabos, por unidade de comprimento, em presença do solo e do efeito das ligações das camadas metálicas de cada cabo SC.

## 5.5– TRANSFORMAÇÃO DAS MATRIZES DE IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS E ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS EM COMPONENTES SIMÉTRICAS

Reduzindo–se as matriz **Z** e **Y** em $\mathbf{Z_f}$ e $\mathbf{Y_f}$, pela aplicação das hipóteses feitas quanto às condições de aterramento e/ou isolação, faz–se a transformação de $\mathbf{Z_f}$ e $\mathbf{Y_f}$ em coordenadas simétricas, obtendo–se $\mathbf{Z_s}$ e $\mathbf{Y_s}$.

Reescrevendo a equação matricial (5.28) para a impedância, vem:

$$\Delta V_f = Z_f \, I_f \tag{5.29}$$

onde,

$\Delta V_f$– representa a matriz coluna da queda de tensão entre dois pontos da mesma "fase" com referência à terra;

$Z_f$ e $I_f$ – foram definidos no item 5.4.2.

Similar à equação (5.11), pela transformação das coordenadas simétricas, resulta:

$$T \, \Delta V_s = Z_f \, T \, I_s \tag{5.30}$$

em decorrência,

$$\Delta V_s = T^{-1} \, Z_f \, T \, I_s \tag{5.31}$$

Permitindo concluir que,

$$Z_s = T^{-1} \, Z_f \, T \tag{5.32}$$

com as grandezas de índices (s) referindo–se à rede transformada em coordenadas simétricas e as grandezas de índices (f) referindo–se à rede em coordenadas de fase.

$T$ e $T^{-1}$ – representam, respectivamente, a matriz de transformação e a sua inversa, apresentadas nas expressões (5.7) e (5.9), para um sistema

trifásico simétrico. Para sistemas polifásicos retrata–se T pela expressão (5.14) e extensiva à $\mathbf{T}^{-1}$ pela definição (5.9);

$\mathbf{Z_s}$ – matriz das impedâncias longitudinais de componentes simétricas do sistema de cabos.

Para um cabo trifásico atendendo os aspectos teóricos abordados no item (5.2), a matriz $\mathbf{Z_s}$ pode ser vista da forma seguinte:

$$\mathbf{Z_s} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \tag{5.33}$$

Sendo:

$Z_{00}$– a impedância própria longitudinal de seqüência zero ou homopolar;

$Z_{11}$– a impedância própria longitudinal de seqüência positiva ou direta;

$Z_{22}$– a impedância própria longitudinal de seqüência negativa ou inversa;

$Z_{01}$– a impedância mútua entre as seqüências zero e positiva;

$Z_{02}$– a impedância mútua entre as seqüências zero e negativa;

$Z_{12}$– a impedância mútua entre as seqüências positiva e negativa.

Analogamente, para a matriz das admitâncias transversais, voltando à forma matricial (5.29), vem:

$$\Delta I_f = Y_f \, V_f \tag{5.34}$$

Aplicando a transformação das coordenadas simétricas, segue–se:

$$T \, \Delta I_s = Y_f \, T \, V_s \tag{5.35}$$

conseqüentemente,

$$\Delta I_s = T^{-1} \, Y_f \, T \, V_s \tag{5.36}$$

Nota–se que:

$$Y_s = T^{-1} \, Y_f \, T \tag{5.37}$$

Sendo,

$Y_s$– a matriz das admitâncias transversais de componentes simétricas do sistema de cabo.

Podendo também, para um cabo trifásico, seguindo os aspectos teóricos apresentados no item (5.2), similar à expressão (5.33), representá–la por:

$$Y_s = \begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{01} & Y_{02} \\ Y_{10} & Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{20} & Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \tag{5.38}$$

cujos elementos significam:

$Y_{00}$– a admitância própria transversal de seqüência zero ou homopolar;

$Y_{11}$– a admitância própria transversal de seqüência positiva ou direta;

$Y_{22}$– a admitância própria transversal de seqüência negativa ou inversa;

$Y_{01}$– a admitância mútua entre as seqüências zero e positiva;

$Y_{02}$– a admitância mútua entre as seqüências zero e negativa;

$Y_{12}$– a admitância mútua entre as seqüências positiva e negativa.

## 5.6– CÁLCULO DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS PARA K–CIRCUITOS TRIFÁSICOS ACOPLADOS

Num sistema de cabos elétricos, estando k–circuitos trifásicos acoplados e em paralelo, após às devidas reduções das camadas metálicas quanto às condições de aterramento, obtém–se um sistema de ordem 3k x 3k.

Desta forma, com base na equação matricial (5.31), generalizando–a aos k–circuitos e aplicando as devidas transformações, em componentes simétricas, vem:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{s_I} \\ \Delta V_{s_{II}} \\ \vdots \\ \Delta V_{s_k} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} T^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{I-I} & Z_{I-II} & \cdots & Z_{I-k} \\ Z_{II-I} & Z_{II-II} & \cdots & Z_{II-k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{k-I} & Z_{k-II} & \cdots & Z_{k-k} \end{bmatrix} \right.$$

$$\left[\begin{array}{cccc} T & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & T & \ldots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \ldots & T \end{array}\right] \left[\begin{array}{c} I_{s_I} \\ I_{s_{II}} \\ \vdots \\ I_{s_k} \end{array}\right] \tag{5.39}$$

Sendo:

$\Delta V_{s_I}, \Delta V_{s_{II}} \ldots, \Delta V_{s_k}$ – são respectivamente, as submatrizes (3x1) das quedas de tensões de componentes simétricas, dos circuitos I, II, ..., k;

$I_{s_I}, I_{s_{II}}, \ldots, I_{s_k}$ – são respectivamente, as submatrizes (3x1) das correntes de componentes simétricas, dos circuitos I, II, ..., k;

$Z_{I-I}, Z_{II-II}, \ldots, Z_{k-k}$ – são respectivamente, as submatrizes (3x3) das impedâncias próprias, em coordenadas de fase, dos circuitos I, II, ..., k;

$Z_{I-II}, \ldots, Z_{I-k}$ – são respectivamente, as submatrizes (3x3) das impedâncias mútuas, em coordenadas de fase, entre os circuitos I e II, ..., I e k.

Verifica–se com facilidade que a matriz das impedâncias longitudinais de componentes simétricas dos k–circuitos trifásicos acoplados entre si, pode ser obtida da relação (5.39), como segue:

$$\begin{bmatrix} Z_{s_{I-I}} & Z_{s_{I-II}} & \cdots & Z_{s_{k-I}} \\ Z_{s_{II-I}} & Z_{s_{II-II}} & \cdots & Z_{s_{k-II}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{s_{k-I}} & Z_{s_{k-II}} & \cdots & Z_{s_{k-k}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} T^{-1} Z_{I-I} T & T^{-1} Z_{I-II} T & \cdots & T^{-1} Z_{I-k} T \\ T^{-1} Z_{II-I} T & T^{-1} Z_{II-II} T & \cdots & T^{-1} Z_{II-k} T \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ T^{-1} Z_{k-I} T & T^{-1} Z_{k-II} T & \cdots & T^{-1} Z_{k-k} T \end{bmatrix} \qquad (5.40)$$

Sendo:

$Z_{s_{I-I}}, Z_{s_{II-II}}, \ldots, Z_{s_{kk}}$ – são respectivamente, as submatrizes (3x3) das impedâncias próprias longitudinais de componentes simétricas, conforme a que foi apresentada na expressão (5.33), para os circuitos I, II, ..., k;

$Z_{s_{I-II}}, \ldots, Z_{s_{I-k}}$ – são respectivamente, as submatrizes (3x3) das impedâncias mútuas de componentes simétricas entre os circuitos I e II, ..., I e k.

De forma análoga aos cálculos das impedâncias longitudinais reproduzidos pela expressão matricial (5.40), é desenvolvido o cálculo das componentes simétricas das admitâncias transversais de um sistema de cabos de k–circuitos trifásicos acoplados e em paralelo.

## 5.7 – COMPONENTES SIMÉTRICAS PARA CABOS BIPOLARES

Como foi visto em itens anteriores, a idéia das componentes simétricas pode ser generalizada para m–fases. Para o caso de um cabo bipolar, a sua aplicação é simples.

Não há necessidade de transposição para um cabo simétrico bipolar, porque as impedâncias já são iguais com:

$$\mathbf{Z_f} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_s \end{bmatrix} \tag{5.41}$$

sendo:

$Z_s$ – impedância longitudinal própria de cada fase (cabo SC) para o "loop" formado pela fase e o retorno pelo solo;

$Z_m$ – impedância longitudinal mútua entre as duas fases.

Para a tensão e a corrente, a transformação é idêntica e se constitui em:

$$\mathbf{I_s} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{I_f} \tag{5.42}$$

$$\mathbf{I_f} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{I_s} \tag{5.43}$$

conduzindo à matriz associada de componentes simétricas $\mathbf{Z_s}$. Sendo:

$$\mathbf{Z_S} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 \\ 0 & Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_S+Z_m & 0 \\ 0 & Z_S-Z_m \end{bmatrix} \tag{5.44}$$

Para quantidades de seqüências não normalizadas os fatores de (5.42) e (5.43) seriam respectivamente, $1/2$ e $1$, ao invés de $1/\sqrt{2}$.

Salienta–se que a normalização não influencia a impedância de seqüência, porque os fatores sempre se cancelam no produto $\mathbf{T^{-1}\, Z_f\ T}$. Entretanto, estes influenciam as correntes e as tensões conforme expressado.

# CAPÍTULO VI

## FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DAS FUNÇÕES MODIFICADAS DE BESSEL

### 6.1 – INTRODUÇÃO

Para o cálculo dos parâmetros elétricos de um sistema de cabos, julga–se de grande importância o conhecimento das soluções de equações diferenciais do tipo apresentado em seguida:

$$z^2 \frac{d^2W}{dz^2} + z \frac{dW}{dz} - (z^2 + \nu^2)\, W = 0 \qquad (6.1)$$

com,

z e W – podem ser variáveis complexas e W é função de z;

$\nu$ – parâmetro, em geral, complexo.

As soluções da equação (6.1) são, usualmente, combinações lineares das funções $I_\nu(z)$, $I_{-\nu}(z)$ e $K_\nu(z)$, que constituem soluções particulares da equação (6.1) e são conhecidas como funções modificadas de Bessel.

$I_\nu(z)$ e $I_{-\nu}(z)$ são linearmente independentes, exceto quando $\nu$ é um inteiro.

$K_\nu(z)$ tende para zero com $|z| \to \infty$ e o $|\arg z| < \frac{\pi}{2}$.

Para todos os valores de $\nu$, $I_\nu(z)$ e $K_\nu(z)$ são linearmente independentes.

Assim sendo, no presente capítulo são abordadas as séries ascendentes, as séries assintóticas e as aproximações polinomiais das funções modificadas de Bessel; dando ênfase às variações também chamadas de funções de Kelvin que norteiam o cálculo em dependência da freqüência, dos parâmetros elétricos de cabos.

## 6.2 – SÉRIES ASCENDENTES PARA $I_\nu(z)$

Para $|\arg z| < \pi$, têm–se as séries completas ou ascendentes da função $I_\nu(z)$, sob a forma:

$$I_\nu(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2k}}{k!\Gamma(\nu+k+1)} \tag{6.2}$$

Sendo:

$\Gamma(z)$ – função "GAMMA", definida[1] no Apêndice I.

### 6.2.1 – Funções $I_0(z)$ e $I_1(z)$[1,31]

Referem–se às funções de Bessel de primeiro tipo, de ordem zero e primeira ordem, respectivamente.

Da relação (6.2), obtêm–se:

$$I_0(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2k}}{(k!)^2} = 1 + \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^2}{(1!)^2} + \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^4}{(2!)^2} + \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^6}{(3!)^2} + \ldots \tag{6.3}$$

$$I_1(z)=\frac{z}{2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(\frac{z}{2})^{2k}}{k!(k+1)!}=\frac{z}{2}+\frac{(\frac{z}{2})^3}{1!2!}+\frac{(\frac{z}{2})^5}{2!3!}+\frac{(\frac{z}{2})^7}{3!4!}+\ldots \tag{6.4}$$

## 6.3 – SÉRIES ASCENDENTES PARA $K_\nu(z)$

As funções $K_\nu(z)$, para $\nu$ não inteiro, podem pôr–se sob a forma:

$$K_\nu(z)=\frac{\pi}{2}\frac{I_{-\nu}(z)-I_\nu(z)}{\operatorname{sen}(\nu\pi)} \tag{6.5}$$

Para $\nu = n$, inteiro, as funções $K_n$ podem ser encontradas através de (6.6) ou (6.7),

$$K_n(z)=\frac{\pi}{2}\lim_{\nu\to n}\frac{I_{-\nu}(z)-I_\nu(z)}{\operatorname{sen}(\nu\pi)} \tag{6.6}$$

ou

$$K_n(z)=\frac{1}{2}(\frac{z}{2})^{-n}\sum_{k=0}^{n-1}\frac{(n-k-1)!}{k!}(-1)^k(\frac{z}{2})^{2k}+$$

$$(-1)^{n+1}\ell n(\frac{z}{2})\,I_n(z)+(-1)^n\frac{1}{2}(\frac{z}{2})^n$$

$$\sum_{k=0}^{\infty}\{\psi(k+1)+\psi(n+k+1)\}\frac{(\frac{z}{2})^{2k}}{k!(n+k)!} \tag{6.7}$$

atendendo o requisito seguinte:

$$-\pi < \arg z < \pi.$$

Nota–se que para n assumindo valor nulo, o primeiro somatório da expressão (6.7), também se anula.

$\psi-$ função PSI, também conhecida como função "DIGAMMA", sendo definida no Apêndice I.

### 6.3.1 – Funções $K_0(z)$ e $K_1(z)$[1,31]

Figuram–se como as funções modificadas de Bessel de segundo tipo. Sendo, respectivamente, de ordem zero e de primeira ordem.

Da equação (6.7), obtêm–se:

$$K_0(z) = -\left[\ell n(\frac{z}{2}) + \gamma\right] I_0(z) + \frac{(\frac{z}{2})^2}{(1!)^2} + (1 + \frac{1}{2})\frac{(\frac{z}{2})^4}{(2!)^2} +$$

$$(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3})\frac{(\frac{z}{2})^6}{(3!)^2} + (1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4})\frac{(\frac{z}{2})^8}{(4!)^2} + \ldots \qquad (6.8)$$

$$K_1(z) = \frac{1}{2}(\frac{z}{2})^{-1} + (-1)^2\,\ell n(\frac{z}{2})\, I_1(z) + (-1)\frac{1}{2}\frac{z}{2}$$

$$\left\{\left[-\gamma + (-\gamma + \frac{1}{1})\right]\frac{1}{0!\ 1!} + \left[(-\gamma + \frac{1}{1}) + (-\gamma + \frac{1}{1} + \frac{1}{2})\right]\frac{(\frac{z}{2})^2}{1!\ 2!} + \right.$$

$$\left.\left[(-\gamma + \frac{1}{1} + \frac{1}{2}) + (-\gamma + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3})\right]\frac{(\frac{z}{2})^4}{2!\ 3!} + \ldots\right\} \qquad (6.9)$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{z}{2}\right)^{-1} + \ell n\left(\frac{z}{2}\right) I_1(z) + \gamma \frac{z}{2}\left[1 + \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^2}{1!\ 2!} + \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^4}{2!\ 3!} + \ldots\right] -$$

$$\frac{1}{2}\frac{z}{2}\left[1 + \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2}\right)\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^2}{1!\ 2!} + \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right)\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^4}{2!\ 3!} + \ldots\right]$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{z}{2}\right)^{-1} + \left[\ell n\left(\frac{z}{2}\right) + \gamma\right] I_1(z) - \frac{1}{2}\frac{z}{2} - \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{4}\right)\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^3}{1!\ 2!} - \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\right)\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^5}{2!\ 4!} -$$

$$\left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{8}\right)\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^7}{3!\ 4!} - \ldots$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{z}{2}\right)^{-1} + \left[\ell n\left(\frac{z}{2}\right) + \gamma\right] I_1(z) - \frac{1}{2}\frac{z}{2} - \frac{1}{4}\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^3}{1!\ 2!} - \frac{1}{6}\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^5}{2!\ 3!} -$$

$$\frac{1}{8}\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^7}{3!\ 4!} - \ldots - \frac{1}{1}\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^3}{1!\ 2!} - \left(\frac{1}{1} + \frac{2}{2}\right)\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^5}{2!\ 3!} - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right)\frac{\left(\frac{z}{2}\right)^7}{3!\ 4!} - \ldots \tag{6.10}$$

## 6.4 – EXPANSÕES ASSINTÓTICAS PARA $I_\nu(z)$

Para o $|z|$ muito grande, têm–se as aproximações assintóticas para as funções de primeiro tipo.

Sendo $|\arg z| < \frac{\pi}{2}$ e $\mu = 4\nu^2$, tem–se:

$$I_\nu(z) \approx \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}} \left\{ 1 - \frac{\mu-1}{8z} + \frac{(\mu-1)(\mu-9)}{2!(8z)^2} - \frac{(\mu-1)(\mu-9)(\mu-25)}{3!(8z)^3} + \ldots \right\} \tag{6.11}$$

### 6.4.1 – Funções $I_0(z)$ e $I_1(z)$

Com respeito às séries assintóticas para as funções modificadas de primeiro tipo, ordem zero e primeira ordem, da expressão (6.11), resultam:

$$I_0(z) \approx \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}} \left\{ 1 + \frac{1}{8z} + \frac{1.9}{2!(8z)^2} + \frac{1.9.25}{3!(8z)^3} + \ldots \right\} \tag{6.12}$$

$$I_1(z) \approx \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}} \left\{ 1 - \frac{3}{8z} - \frac{3.5}{2!(8z)^2} - \frac{3.5.21}{3!(8z)^3} - \ldots \right\} \tag{6.13}$$

## 6.5 – EXPANSÕES ASSINTÓTICAS PARA $K_\nu(z)$

Sendo $|\arg z| < \frac{3}{2}\pi$ e $\mu = 4\nu^2$, têm–se para $|z|$ muito elevado, as expansões assintóticas para $K_\nu(z)$:

$$K_\nu(z) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2z}}\, e^{-z} \left\{ 1 + \frac{\mu-1}{8z} + \frac{(\mu-1)(\mu-9)}{2!(8z)^2} + \frac{(\mu-1)(\mu-9)(\mu-25)}{3!(8z)^3} + \ldots \right\} \tag{6.14}$$

### 6.5.1 – Funções $K_0(z)$ e $K_1(z)$

Para as séries assintóticas das funções modificadas de Bessel de segundo tipo, de ordem zero e primeira ordem; da equação (6.14), originam–se:

$$K_0(z) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2z}}\, e^{-z} \left\{ 1 - \frac{1}{8z} + \frac{1.9}{2!(8z)^2} - \frac{1.9.25}{3!(8z)^3} + \ldots \right\} \tag{6.15}$$

$$K_1(z) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2z}}\, e^{-z} \left\{ 1 + \frac{3}{8z} - \frac{3.5}{2!(8z)^2} + \frac{3.5.21}{3!(8z)^3} - \ldots \right\} \tag{6.16}$$

## 6.6 – RELAÇÕES DERIVADAS

As seguintes relações envolvendo derivadas das funções I e K são vistas com grande interesse para alguns cálculos:

$$\frac{d}{dz} I_0(z) = I_1(z)$$

$$\frac{d}{dz} K_0(z) = - K_1(z)$$

$$\frac{d}{dz} [z\, I_1(z)] = z\, I_0(z) \tag{6.17}$$

$$\frac{d}{dz} [z\, K_1(z)] = - z\, K_0(z)$$

Em aplicações no caso de sistemas elétricos, as variáveis z que aparecem em equações diferenciais do tipo (6.1) geralmente são complexas.

## 6.7 – APLICAÇÕES NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE CABOS

Em estudos e cálculos dos parâmetros elétricos de sistemas de cabos, bem como envolvendo linhas elétricas[31], empregando grandezas senoidais, é freqüente o uso da representação complexa seguinte:

$$z = x\, e^{j\pi/4} \tag{6.18}$$

No entanto, é de grande importância para os cálculos numéricos, o emprego de uma formulação baseada em valores reais.

Como conseqüência e necessidade dos estudos, foram desenvolvidas e aplicadas as funções modificadas de Bessel de ordem inteira ou funções de Kelvin que consideram o argumento da forma (6.18), possibilitando o emprego de valores reais em seu desenvolvimento.

### 6.7.1 – Definições e Propriedades das Funções Modificadas de Bessel[1]

$$\mathrm{ber}_{\nu}(x) + j\,\mathrm{bei}_{\nu}(x) = e^{j\nu\pi/2}\, I_{\nu}(z) \tag{6.19}$$

$$\mathrm{ker}_{\nu}(x) + j\,\mathrm{kei}_{\nu}(x) = e^{-j\nu\pi/2}\, K_{\nu}(z) \tag{6.20}$$

onde:

$\nu$ – ordem da função, valor real;

x – argumento das funções parciais (ber, bei, ker, kei), é do tipo real positivo;

$I_{\nu}$ – função de Bessel de primeira espécie de ordem $\nu$;

$K_{\nu}$ – função de Bessel de segunda espécie de ordem $\nu$.

Desta forma,

$$I_0(x\, e^{j\pi/4}) = \mathrm{ber}_0(x) + j\,\mathrm{bei}_0(x)$$

$$I_1(x\, e^{j\pi/4}) = -\, j\, ber_1(x) + bei_1(x)$$

$$K_0(x\, e^{j\pi/4}) = ker_0(x) + j\, kei_0(x) \tag{6.21}$$

$$K_1(x\, e^{j\pi/4}) = j\, ker_1(x) - kei_1(x)$$

Sendo que as funções:

$$ber_\nu(x) + j\, bei_\nu(x)$$

$$ber_{-\nu}(x) + j\, bei_{-\nu}(x) \tag{6.22}$$

$$ker_\nu(x) + j\, kei_\nu(x)$$

$$ker_{-\nu}(x) + j\, kei_{-\nu}(x)$$

são soluções da equação diferencial

$$x^2W'' + xW' - (jx^2 + \nu^2)\, W = 0 \tag{6.23}$$

e as funções

$$ber_\nu(x),\ ber_{-\nu}(x)$$

$$bei_\nu(x),\ bei_{-\nu}(x) \tag{6.24}$$

$$ker_\nu(x),\ ker_{-\nu}(x)$$

$\text{kei}_{\nu}(x)$, $\text{kei}_{-\nu}(x)$

são soluções da equação diferencial

$$x^4W^{iv}+2x^3W'''-(1+2\nu^2)\,(x^2W'' - xW') + (\nu^4 - 4\nu^2 + x^4)\,W = 0 \qquad (6.25)$$

### 6.7.2 – Séries Ascendentes das Parcelas ber, bei, ker e kei

São as séries completas, desenvolvidas para qualquer ordem ($\nu$ = n inteiro) e argumentos menores.

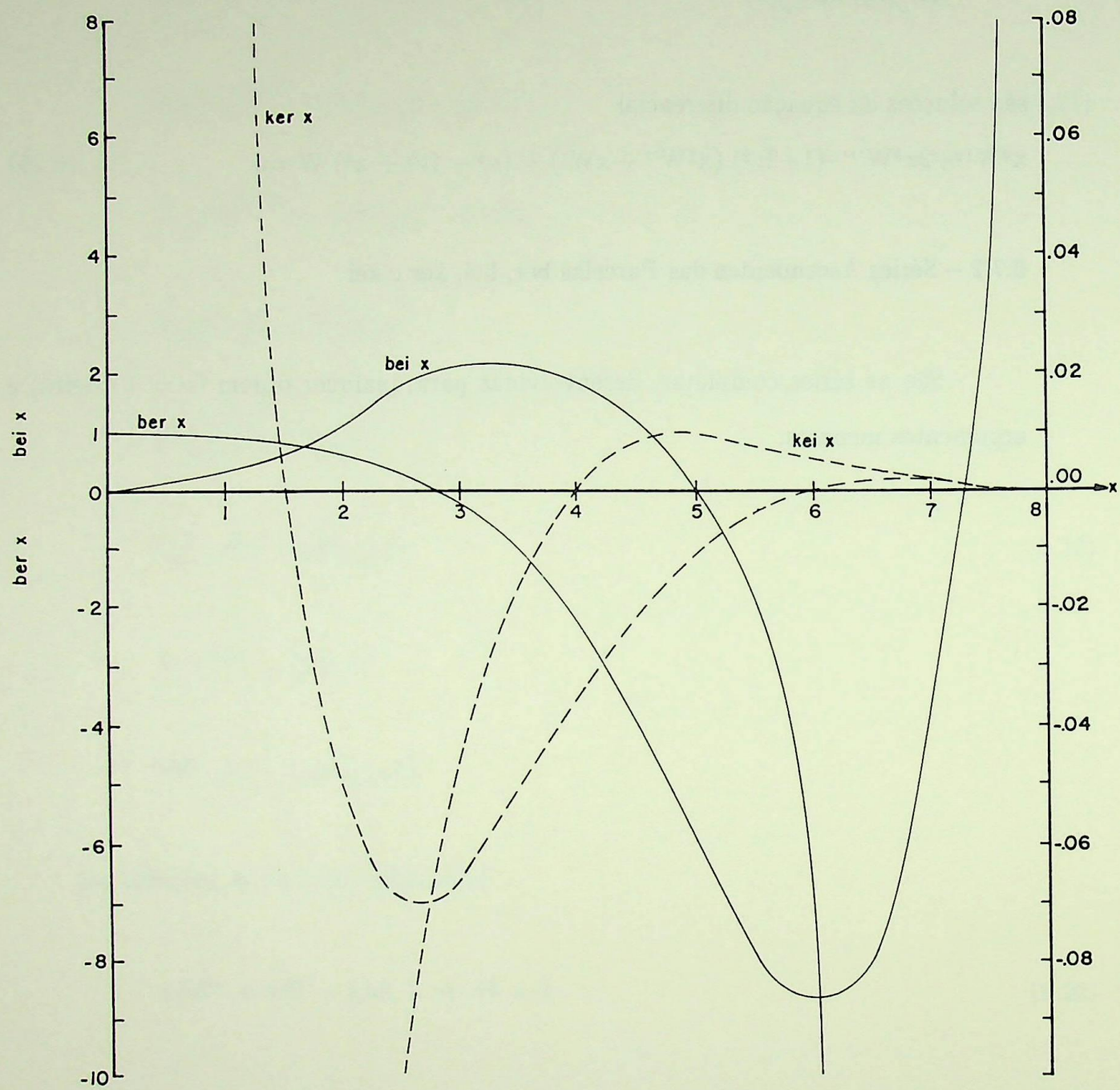



Fig. 6.1 – Comportamento das parcelas ber, bei, ker e kei em função do argumento $x^1$

### 6.7.2.1 – Série de $ber_n(x)$

$$ber_n(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos\left[\left(\frac{3}{4}\,n + \frac{1}{2}\,k\right)\pi\right]}{k!\;\Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k \qquad (6.26)$$

6.7.2.2 – Série de $bei_n(x)$

$$bei_n(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos\left[\left(\frac{3}{4}\, n + \frac{1}{2}\, k\right)\pi\right]}{k!\ \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k \tag{6.27}$$

6.7.2.3 – Série de $ker_n(x)$

$$ker_n(x) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\, x\right)^{-n} \sum_{k=0}^{n-1} arg_1 - \ell n\left(\frac{x}{2}\right) ber_n(x) + \frac{\pi}{4}\, bei_n(x) + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\, x\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} arg_2 \tag{6.28}$$

onde:

$$arg_1 = \cos(arg_3)\, \frac{(n-k-1)!}{k!} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k \tag{6.29}$$

$$arg_2 = \cos(arg_3)\, \frac{\psi(k+1) + \psi(n+k+1)}{k!\,(n+k)!} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k \tag{6.30}$$

$$arg_3 = \left(\frac{3}{4}\, n + \frac{1}{2}\, k\right)\pi \tag{6.31}$$

6.7.2.4 – Série de $kei_n(x)$

$$kei_n(x) = -\frac{1}{2}\left(\frac{x}{2}\right)^{-n} \sum_{k=0}^{n-1} sen\left[\left(\frac{3}{4}\, n + \frac{1}{2}\, k\right)\pi\right]$$

$$\frac{(n-k-1)!}{k!} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k - \ell n\left(\frac{x}{2}\right) bei_n(x) - \frac{\pi}{4}\, ber_n(x) +$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \operatorname{sen}\left[\left(\frac{3}{4}n + \frac{1}{2}k\right)\pi\right] \frac{\psi(k+1)+\psi(n+k+1)}{k!\,(n+k)!} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k \tag{6.32}$$

As manipulações matemáticas para fins de implementação computacional encontram–se no Apêndice V.

### 6.7.3 – Séries Assintóticas das Parcelas ber, bei, ker e kei

São expansões assintóticas das séries ascendentes. São convenientes para grandes valores do argumento (x).

#### 6.7.3.1 – Série de $ber_n(x)$

$$ber_n(x) = \frac{e^{(x/\sqrt{2})}}{\sqrt{2\pi x}} [f_n(x)\cos\alpha + g_n(x)\operatorname{sen}\alpha] -$$

$$\frac{1}{\pi}[\operatorname{sen}(2n\pi)\,ker_n(x) + \cos(2n\pi)\,kei_n(x)] \tag{6.33}$$

onde:

$f_n$, $g_n$ e $\alpha$ são definidas nas expressões (6.38) e (6.39).

#### 6.7.3.2 – Série de $bei_n(x)$

$$bei_n(x) = \frac{e^{(x/\sqrt{2})}}{\sqrt{2\pi x}} [f_n(x)\operatorname{sen}\alpha - g_n(x)\cos\alpha] +$$

$$\frac{1}{\pi}[\cos(2n\pi)\ \mathrm{ker}_n(x) - \mathrm{sen}(2n\pi)\ \mathrm{kei}_n(x)] \tag{6.34}$$

### 6.7.3.3 – Série de $\mathrm{ker}_n(x)$

$$\mathrm{ker}_n(x) = \sqrt{\pi/(2x)}\ e^{(-x/\sqrt{2})}[f_n(-x)\cos\beta - g_n(-x)\ \mathrm{sen}\ \beta] \tag{6.35}$$

sendo $\beta$ definida na expressão (6.37).

### 6.7.3.4 – Série de $\mathrm{kei}_n(x)$

$$\mathrm{kei}_n(x) = \sqrt{\pi/(2x)}\ e^{(-x/\sqrt{2})}[-f_n(-x)\ \mathrm{sen}\ \beta - g_n(-x)\ \cos\beta] \tag{6.36}$$

Sendo:

$$\alpha = (x/\sqrt{2}) + (n/2 - 1/8)\ \pi$$

$$\beta = (x/\sqrt{2}) + (n/2 + 1/8)\ \pi = \alpha + \pi/4 \tag{6.37}$$

Com $\mu = 4n^2$, vem:

$$f_n(\pm x) \approx 1 + \sum_{k=1}^{\infty} (\mp 1)^k \frac{(\mu-1)(\mu-9)\ldots(\mu-(2k-1)^2)}{k!(8x)^k} \cos(k\frac{\pi}{4}) \tag{6.38}$$

$$g_n(\pm x) \approx \sum_{k=1}^{\infty} (\mp 1)^k \frac{(\mu-1)(\mu-9)\ \ldots\ (\mu-(2k-1)^2)}{k!\ (8x)^k} \mathrm{sen}\ (k\frac{\pi}{4}) \tag{6.39}$$

### 6.7.4 – Aproximações Polinomiais

Foram desenvolvidas para qualquer valor do argumento (x) e apenas para as ordens (n) zero e um. Para argumentos menores ou iguais a oito (para o cálculo dos parâmetros elétricos dos cabos, o argumento das funções de Bessel é sempre positivo) as aproximações polinomiais são feitas baseadas nas séries ascendentes ou completas. Para argumentos maiores do que oito, as aproximações polinomiais são oriundas das expansões assintóticas.

#### 6.7.4.1 – Aproximações Polinomiais para Ordem Zero e Argumentos Menores ou Iguais a Oito para as Parcelas $ber_0(x)$, $bei_0(x)$, $ker_0(x)$ e $kei_0(x)$

Considerando,

$n = 0$

$0 \leq x \leq 8$, vem:

a) função $ber_0(x)$

$$ber_0(x) = 1 - 64(x/8)^4 + 113.77777774\,(x/8)^8 - 32.36345652(x/8)^{12} + 2.64191397(x/8)^{16} - 0.08349609(x/8)^{20} + 0.00122552(x/8)^{24} - 0.00000901(x/8)^{28} + \epsilon \qquad (6.40)$$

onde, $|\epsilon| < 1 \,.\, 10^{-9}$

b) função $bei_0(x)$

$$bei_0(x) = 16(x/8)^2 - 113.77777774(x/8)^6 + 72.81777742(x/8)^{10} -$$

$$10.56765779(x/8)^{14} + 0.52185615(x/8)^{18} - 0.01103667(x/8)^{22} +$$

$$0.00011346(x/8)^{26} + \epsilon \qquad (6.41)$$

onde, $|\epsilon| < 6 \cdot 10^{-9}$

c) função $ker_0(x)$

$$ker_0(x) = -\ell n(\frac{x}{2}) ber_0(x) + \frac{\pi}{4} bei_0(x) - 0.57721566 - 59.05819744(x/8)^4 +$$

$$171.36272133(x/8)^8 - 60.60977451(x/8)^{12} + 5.65539121(x/8)^{16} -$$

$$0.19636347(x/8)^{20} + 0.00309699(x/8)^{24} - 0.00002458(x/8)^{28} + \epsilon$$

(6.42)

onde, $|\epsilon| < 1 \cdot 10^{-8}$

d) Função $kei_0(x)$

$$kei_0(x) = -\ell n(\frac{x}{2}) bei_0(x) - \frac{\pi}{4} ber_0(x) + 6.76454936(x/8)^2 -$$

$$142.91827687(x/8)^6 + 124.23569650(x/8)^{10} - 21.30060904(x/8)^{14} +$$

$$1.17509064(x/8)^{18}-0.02695875(x/8)^{22}+0.00029532(x/8)^{26}+\epsilon \tag{6.43}$$

onde, $|\epsilon| < 3 \cdot 10^{-9}$.

6.7.4.2 – **Aproximações Polinomiais para Ordem Zero e Argumentos Maiores do que Oito para $ker_0(x)$, $kei_0(x)$, $ber_0(x)$ e $bei_0(x)$**

Sendo:

$n = 0$

$x > 8$, logo:

a) funções $ker_0(x)$ e $kei_0(x)$

As funções $ker_0(x)$ e $kei_0(x)$ são definidas a partir da equação (6.42)

$$ker_0(x) + j\, kei_0(x) = f(x)\,(1 + \epsilon_1) \tag{6.44}$$

onde:

$$f(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} \exp\left[-\frac{1+j}{\sqrt{2}}\, x + \theta(-x)\right] \tag{6.45}$$

$|\epsilon_1| < 1 \cdot 10^{-7}$

exp – função exponencial

$$\theta(x)= \quad (0.0000000 - 0.3926991\ j) + (0.0110486 - 0.0110485\ j)(8/x) +$$

$$(0.0000000 - 0.0009765\ j)(8/x)^2 + (-0.0000906 - 0.0000901\ j((8/x)^3 +$$

$$(-0.0000252 + 0.0000000j)(8/x)^4 + (-0.0000034 + 0.0000051\ j)(8/x)^5 +$$

$$(0.0000006 + 0.0000019\ j)(8/x)^6 \qquad (6.46)$$

b) funções $ber_0(x)$ e $bei_0(x)$

Utilizando–se da equação (6.44), as funções $ber_0(x)$ e $bei_0(x)$ são obtidas como segue:

$$ber_0(x) + j\ bei_0(x) - \frac{j}{\pi}(ker_0(x) + j\ kei_0(x)) = g(x)\ (1+\epsilon_2) \qquad (6.47)$$

com,

$$g(x)= \quad \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} \exp\left[\frac{1+j}{\sqrt{2}}\, x + \theta(x)\right] \qquad (6.48)$$

$$|\epsilon_2| < 3 \cdot 10^{-7}$$

exp – foi definida na expressão (6.45).

### 6.7.4.3 – Aproximações Polinomiais para Ordem 1

a) funções $\mathrm{ber}_1(x)$ e $\mathrm{bei}_1(x)$

Estas funções são obtidas em decorrência da resolução do sistema de equações abaixo:

$$\begin{cases} \sqrt{2}\,\mathrm{ber}'(x) = \mathrm{ber}_1(x) + \mathrm{bei}_1(x) \\ \sqrt{2}\,\mathrm{bei}'(x) = -\,\mathrm{ber}_1(x) + \mathrm{bei}_1(x) \end{cases} \tag{6.49}$$

cujas soluções encontradas são:

$$\mathrm{bei}_1(x) = \frac{\sqrt{2}}{2}\,(\mathrm{ber}'(x) + \mathrm{bei}'(x)) \tag{6.50}$$

$$\mathrm{ber}_1(x) = \frac{\sqrt{2}}{2}\,(\mathrm{ber}'(x) + \mathrm{bei}'(x)) \tag{6.51}$$

b) funções $\mathrm{ker}_1(x)$ e $\mathrm{kei}_1(x)$

Observa–se, também, que estas funções são soluções do seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \sqrt{2}\,\mathrm{ker}'(x) = \mathrm{ker}_1(x) + \mathrm{kei}_1(x) \\ \sqrt{2}\,\mathrm{kei}'(x) = -\,\mathrm{ker}_1(x) + \mathrm{kei}_1(x) \end{cases} \tag{6.52}$$

Portanto,

$$\text{kei}_1(x) = \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\text{ker}'(x) + \text{kei}'(x)\right) \tag{6.53}$$

$$\text{ker}_1(x) = \frac{\sqrt{2}}{2}\left(\text{ker}'(x) - \text{kei}'(x)\right) \tag{6.54}$$

**6.7.4.4 – Aproximações Polinomiais para ber'(x), bei'(x), ker'(x) e kei'(x)**

Para o argumento (x) menor ou igual a oito

a) função ber'(x)

$0 \leq x \leq 8$

$$\begin{aligned}\text{ber}'(x) = \quad & x[-4(x/8)^2 + 14.22222222(x/8)^6 - 6.06814810(x/8)^{10} + \\ & 0.66047849(x/8)^{14} - 0.02609253(x/8)^{18} + 0.00045957(x/8)^{22} - \\ & 0.00000394(x/8)^{26}] + \epsilon \end{aligned} \tag{6.55}$$

onde, $|\epsilon| < 2.1 \cdot 10^{-8}$

b) função bei'(x)

$0 \leq x \leq 8$

$$\text{bei}'(x) = \quad x\left[\frac{1}{2} - 10.66666666(x/8)^4 + 11.37777772(x/8)^8 -\right.$$

$$2.31167514(x/8)^{12} + 0.14677204(x/8)^{16} - 0.00379386(x/8)^{20} +$$

$$0.00004609(x/8)^{24}\Big] + \epsilon \qquad (6.56)$$

onde, $|\epsilon| < 7 \cdot 10^{-8}$

c) função ker'(x)

$$0 \leq x \leq 8$$

$$\text{ker'}(x) = -\ell n(\frac{x}{2})\,\text{ber'}(x) - \frac{1}{x}\,\text{ber}_0(x) + (\frac{\pi}{4})\,\text{bei'}(x) +$$

$$x[-3.69113734(x/8)^2 + 21.42034017(x/8)^6 -$$

$$11.36433272(x/8)^{10} + 1.41384780(x/8)^{14} -$$

$$0.06136358(x/8)^{18} + 0.00116137(x/8)^{22} -$$

$$0.00001075(x/8)^{26}] + \epsilon \qquad (6.57)$$

onde, $|\epsilon| < 8 \cdot 10^{-8}$

d) função kei'(x)

$$0 \leq x \leq 8$$

$$\text{kei'}(x) = -\ell n(\frac{x}{2})\,\text{bei'}(x) - \frac{1}{x}\,\text{bei}_0(x) - (\frac{\pi}{4})\,\text{ber'}(x) +$$

$$x[0.21139217 - 13.39858846(x/8)^4 + 19.41182758(x/8)^8 -$$

$$4.65950823(x/8)^{12} + 0.33049424(x/8)^{16} - 0.00926707(x/8)^{20} +$$

$$0.00011997(x/8)^{24}] + \epsilon \qquad (6.58)$$

onde, $|\epsilon| < 7.10^{-8}$.

6.7.4.5 – **Aproximações Polinomiais para ker'(x), kei'(x), ber'(x) e bei'(x) tendo Argumento Maior do que Oito**

a) funções ker'(x) e kei'(x)

$x > 8$

São definidas através da equação seguinte:

$$\text{ker'}(x) + j\,\text{kei'}(x) = -f(x)\,\phi(-x)\,(1 + \epsilon_3) \qquad (6.59)$$

Entretanto,

f(x) já foi definida na equação (6.45) e

$|\epsilon_3| < 2 \,.\, 10^{-7}$

sendo,

$$\phi(x)= \quad (0.7071068 + 0.7071068\ j) + (-0.0625001 - 0.0000001\ j)(8/x) +$$

$$(-0.0013813 + 0.0013811\ j)(8/x)^2 + (0.0000005 + 0.0002452\ j)(8/x)^3 +$$

$$(0.0000346 + 0.0000338\ j)(8/x)^4 + (0.0000117 - 0.0000024\ j)(8/x)^5 +$$

$$(0.0000016 - 0.0000032\ j)(8/x)^6 \qquad (6.60)$$

Fazendo:

$$\phi(x) = \mathrm{Re}[\phi(x)] + j\ \mathrm{Im}[\phi(x)] \qquad (6.61)$$

onde:

$\mathrm{Re}[\phi(x)]$ – parte real da função $\phi(x)$;
$\mathrm{Im}[\phi(x)]$ – parte imaginária da função $\phi(x)$.

Reescrevendo a expressão (6.59), separando as partes real e imaginária convenientemente, obtêm–se ker'(x) e kei'(x):

$$\mathrm{ker'}(x)+j\ \mathrm{kei'}(x)= \quad -\left[\sqrt{\frac{\pi}{2x}}\left(\exp\left(\mathrm{Re}[\theta(-x)] - \frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right.\right.$$

$$\left(\cos\left(\mathrm{Im}[\theta(-x)] - \frac{x}{\sqrt{2}}\right) + j\left(\mathrm{sen}\left(\mathrm{Im}[\theta(-x)] -\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right)\right)\right] (\mathrm{Re}[\phi(-x)] + j\ \mathrm{Im}[\phi(-x)]) \qquad (6.62)$$

Permitindo escrever:

$$\ker'(x)= \left[\sqrt{\frac{\pi}{2x}}\exp(\mathrm{Re}[\theta(-x)]-\frac{x}{\sqrt{2}})\right] \left\{(\mathrm{sen}(\mathrm{Im}[\theta(-x)]-\frac{x}{\sqrt{2}}\mathrm{Im}[\phi(-x)])- (\cos(\mathrm{Im}[\theta(-x)]-\frac{x}{\sqrt{2}})\,\mathrm{Re}[\phi(-x)])\right\} \quad (6.63)$$

$$\mathrm{kei}'(x)= -\sqrt{\frac{\pi}{2x}}\exp(\mathrm{Re}[\theta(-x)]-\frac{x}{\sqrt{2}}) \left\{(\cos(\mathrm{Im}[\theta(-x)]-\frac{x}{\sqrt{2}})\,\mathrm{Im}[\phi(-x)])+ (\mathrm{sen}(\mathrm{Im}[\theta(-x)]-\frac{x}{\sqrt{2}})\,\mathrm{Re}[\phi(-x)])\right\} \quad (6.64)$$

b) Funções ber'(x) e bei'(x)

Para $x > 8$, as aproximações polinomiais para ber'(x) e bei'(x) são definidas a partir da equação que se segue:

$$\mathrm{ber}'(x)+j\mathrm{bei}'(x)-\frac{j}{\pi}(\ker'(x)+j\,\mathrm{kei}'(x))=g(x)\phi(x)(1+\epsilon_4) \quad (6.65)$$

onde, $|\epsilon_4| < 3 \cdot 10^{-7}$.

É evidente que para obter ker'(x) e bei'(x) separadamente, torna–se necessária a aplicação de alguns recursos matemáticos de natureza extremamente simples, como observa–se a seguir:

$$\text{ber'(x)} + \text{j bei'(x)} = \frac{1}{\pi}\,\text{ker'(x)} - \frac{1}{\pi}\,\text{kei'(x)} + \frac{1}{\sqrt{2\pi x}}$$

$$\exp\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \text{Re}[\theta(x)]\right)\left(\cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \text{Im}[\theta(x)]\right) +\right.$$

$$\left.\text{j sen}\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \text{Im}[\theta(x)]\right)\right)\left(\text{Re}[\phi(x)] + \text{jIm}[\phi(x)]\right) \tag{6.66}$$

Levando a:

$$\text{ber'(x)} = \frac{-\text{kei'(x)}}{\pi} + \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} \cdot \exp\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \text{Re}[\theta(x)]\right)$$

$$\left\{\text{Re}[\phi(x)] \cdot \cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \text{Im}[\theta(x)]\right) - \text{Im}[\phi(x)]\right.$$

$$\left.\text{sen}\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \text{Im}[\theta(x)]\right)\right\} \tag{6.67}$$

e

$$\text{bei'(x)} = \frac{\text{ker'(x)}}{\pi} + \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} \cdot \exp\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \text{Re}[\theta(x)]\right)$$

$$\left\{ \mathrm{Im}[\phi(x)]\,\cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \mathrm{Im}[\theta(x)]\right) + \mathrm{Re}[\phi(x)] \right.$$

$$\left. \mathrm{sen}\left(\frac{x}{\sqrt{2}} + \mathrm{Im}[\theta(x)]\right) \right\} \tag{6.68}$$

Cumpre, finalmente, salientar que as rotinas de cálculos das funções modificadas de Bessel foram desenvolvidas no campo numérico real. Para tais, foram elaborados manipulações e recursos matemáticos no Apêndice V, aplicados diretamente às várias parcelas das funções, aqui explanadas.

# CAPÍTULO VII

# CÁLCULO COMPUTACIONAL DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SISTEMA DE CABOS

## 7.1 – ABORDAGEM GERAL

Dado que o objetivo do trabalho realizado envolve a pesquisa, apresentação e a discussão dos aspectos teóricos e fundamentos para o cálculo dos parâmetros elétricos de um sistema de cabos, em dependência da freqüência; em complemento, de modo a possibilitar a obtenção de tais parâmetros, desenvolveu–se um programa computacional em FORTRAN 77.

O programa baseia–se nos conceitos teóricos e hipóteses assumidas nos capítulos anteriores.

Todavia, em decorrência das facilidades de se trabalhar com números reais, tanto em face de diminuir a propagação dos erros numéricos, quanto da maior precisão alcançada, importantes para os processos de convergências das várias séries encontradas na metodologia apresentada e, principalmente, para as funções modificadas de Bessel, optou–se pelo desenvolvimento de módulos computacionais de natureza numérica no campo dos reais.

Quanto às funções modificadas de Bessel, pela aplicação imperativa nos cálculos dos parâmetros elétricos dos cabos, foram desenvolvidas as séries gerais ou ascendentes, as expansões assintóticas das séries e as aproximações polinomiais. Durante a fase do desenvolvimento do programa observou–se o comportamento dessas funções no tocante à sensibilidade de convergência das séries e foram feitos testes

exaustivos com o intuito de encontrar faixas de maior confiabilidade de cada função.

Em seguida, criaram–se desvios automáticos para os critérios adotados delimitando as faixas, permitindo, em cada cálculo, a atuação da série mais correta.

O programa permite obter, na freqüência dada, as matrizes parciais em **Z** e as matrizes completas em coordenada de fase das impedâncias longitudinais ($\Omega$/m) e das admitâncias transversais (S/m), considerando cada camada metálica como um condutor.

Para o mesmo sistema, permite–se também, obter as matrizes reduzidas pelas condições de aterramento e/ou isolação, conforme a disposição das camadas metálicas do sistema, formando circuitos, pela indicação do usuário; bem como, obter as correspondentes matrizes de componentes simétricas, sempre possível, para as impedâncias longitudinais ($\Omega$/m) e para as admitâncias transversais (S/m).

As dimensões do programa levam as matrizes à ordem máxima de oitenta e quatro limitando–se o sistema de cabos como segue:

- até 4 cabos PT, trifásicos, contendo 3 cabos de fibra ótica por cabo, possibilitando até 3 camadas metálicas por cabo SC (cabo de energia e cabo de fibra ótica) no interior do cabo PT e 3 camadas metálicas no tubo envolvente;

- até 7 cabos PT, trifásicos, sem cabo de fibra ótica, contendo até 3 camadas metálicas por cabo SC interno e no tubo envolvente;

- até 28 cabos monofásicos, constituídos de até 3 camadas metálicas por cabo.

Além disso, acrescenta–se a possibilidade de formação de circuitos variados, em paralelo e acoplados entre si, obedecendo os limites seguintes:

– até 4 circuitos de cabos trifásicos, com 21 elementos metálicos por circuito;

– até 7 circuitos de cabos trifásicos, com 12 elementos metálicos por circuito;

– até 9 circuitos trifásicos de cabos monofásicos com 9 elementos metálicos por circuito;

– até 14 circuitos trifásicos de cabos monofásicos, com 6 elementos metálicos por circuito;

– até 28 circuitos trifásicos de cabos monofásicos, com 3 elementos metálicos por circuito;

– até 14 circuitos bifásicos de cabos monofásicos, com 6 elementos metálicos por circuito;

– até 28 circuitos monofásicos, com 3 elementos metálicos por circuito;

– até 42 circuitos monofásicos, com dois elementos metálicos por circuito;

– até 84 circuitos monofásicos, com um elemento metálico por circuito.

Para um mesmo sistema de cabos, possibilita–se a coexistência de circuitos de tipos diferentes (trifásicos, bifásicos e monofásicos), desde que obedeça a inequação a seguir:

$$X.N_x + Y.N_y + Z.N_z \leq 84 \qquad (7.1)$$

Sendo:

X – número de circuitos trifásicos;

$N_x$ – número de elementos metálicos por circuito trifásico;

Y – número de circuitos bifásicos;

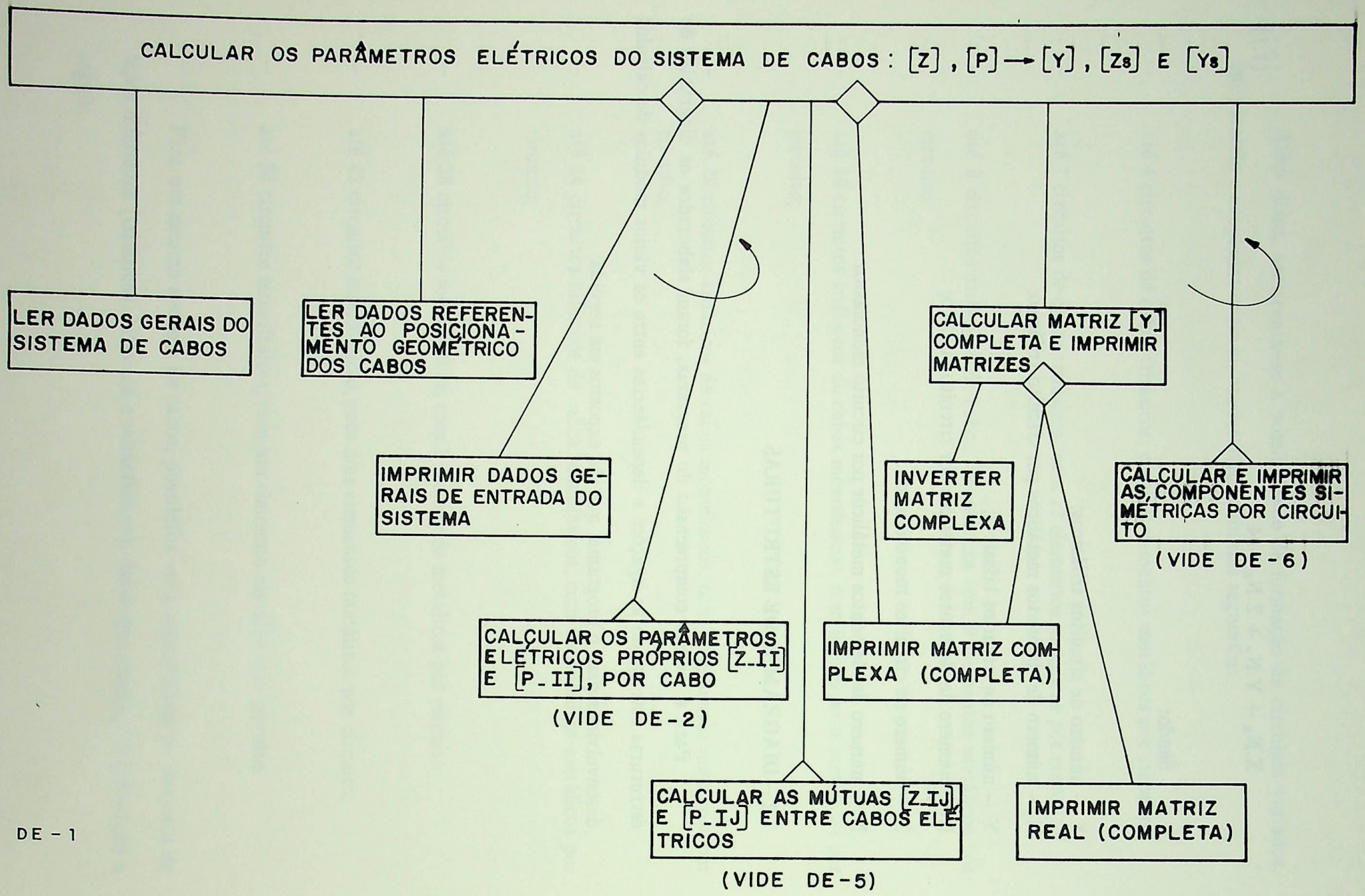
$N_y$ – número de elementos metálicos por circuito bifásico;

Z – número de circuitos monofásicos;

$N_z$ – número de elementos metálicos por circuito monofásico.

## 7.2 – DIAGRAMAS DE ESTRUTURAS

Para a melhor compreensão do programa, foram elaborados os diagramas de estruturas retratando as ligações e dependências entre os vários módulos de cálculos desenvolvidos para o programa, que são expostos em seguida:


CALCULAR OS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SISTEMA DE CABOS : [Z] , [P] → [Y] , [Zs] E [Ys]
LER DADOS GERAIS DO SISTEMA DE CABOS
LER DADOS REFERENTES AO POSICIONAMENTO GEOMÉTRICO DOS CABOS
IMPRIMIR DADOS GERAIS DE ENTRADA DO SISTEMA
CALCULAR OS PARÂMETROS ELÉTRICOS PRÓPRIOS [Z_II] E [P_II], POR CABO
(VIDE DE-2)
CALCULAR AS MÚTUAS [Z_IJ] E [P_IJ] ENTRE CABOS ELÉTRICOS
(VIDE DE-5)
CALCULAR MATRIZ [Y] COMPLETA E IMPRIMIR MATRIZES
INVERTER MATRIZ COMPLEXA
IMPRIMIR MATRIZ COMPLEXA (COMPLETA)
CALCULAR E IMPRIMIR AS COMPONENTES SIMÉTRICAS POR CIRCUITO
(VIDE DE-6)
IMPRIMIR MATRIZ REAL (COMPLETA)

DE - 1

(VEM DE DE-1)

CALCULAR OS PARÂMETROS ELÉTRICOS PRÓPRIOS [Z_II] E [P_II], POR CABO

CALCULAR AS MATRIZES PARCIAIS DE [Z] E [P], IMPRIMI-LAS E INCORPORÁ-LAS AS SUB-MATRIZES [Z_II] E [P_II] REFERENTES AO CABO QUE ENTRA NOS CÁLCULOS PELA PRIMEIRA VEZ. INCLUIR [Z_II] E [P_II] NAS MATRIZES COMPLETAS [Z] E [P].

(VIDE DE-3)

BUSCAR OS PARÂMETROS DO CABO IGUAL (MESMAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ELÉTRICAS) A ESTE E INCLUÍ-LOS NAS SUB-MATRIZES DIAGONAIS DAS MATRIZES COMPLETAS [Z] E [P], NESTA POSIÇÃO.

CALCULAR P/ CABOS AÉREOS:

Z0_II

P0_II

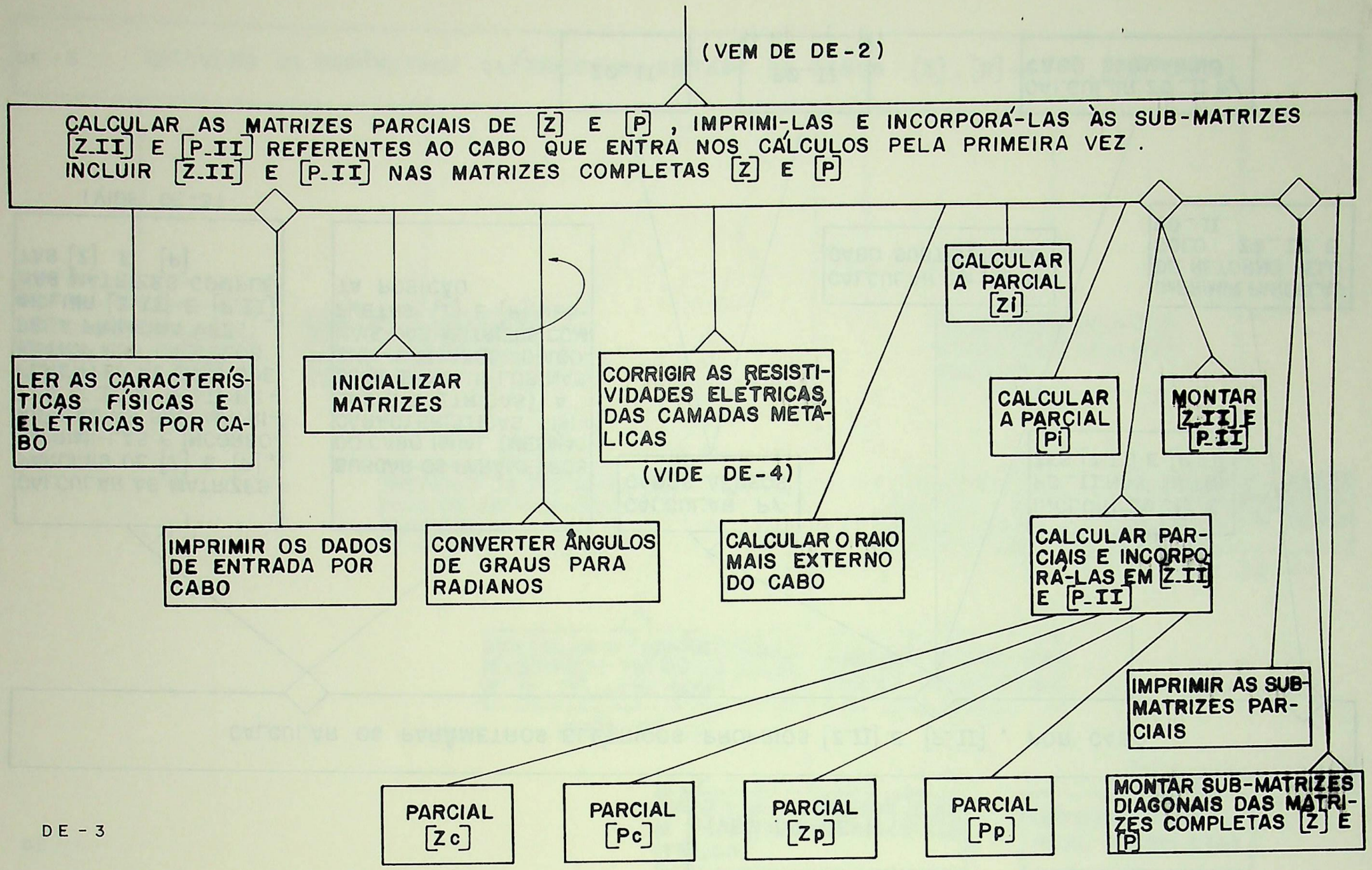
CALCULAR Z0_II P/ CABO SUBTERRÂNEO

INCLUIR Z0_II E P0_II NAS MATRIZES [Z_II] E [P_II]

CALCULAR Z0_II P/ CABO SUBMARINO

IMPRIMIR PARCELAS DE RETORNO PELO SOLO: Z0_II E P0_II

DE - 2


(VEM DE DE-2)
CALCULAR AS MATRIZES PARCIAIS DE [Z] E [P] , IMPRIMI-LAS E INCORPORÁ-LAS ÀS SUB-MATRIZES [Z_II] E [P_II] REFERENTES AO CABO QUE ENTRA NOS CÁLCULOS PELA PRIMEIRA VEZ . INCLUIR [Z_II] E [P_II] NAS MATRIZES COMPLETAS [Z] E [P]
LER AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ELÉTRICAS POR CABO
INICIALIZAR MATRIZES
CORRIGIR AS RESISTIVIDADES ELÉTRICAS DAS CAMADAS METÁLICAS
(VIDE DE-4)
CALCULAR A PARCIAL [Zi]
CALCULAR A PARCIAL [Pi]
MONTAR [Z_II] E [P_II]
IMPRIMIR OS DADOS DE ENTRADA POR CABO
CONVERTER ÂNGULOS DE GRAUS PARA RADIANOS
CALCULAR O RAIO MAIS EXTERNO DO CABO
CALCULAR PARCIAIS E INCORPORÁ-LAS EM [Z_II] E [P_II]
IMPRIMIR AS SUB-MATRIZES PARCIAIS
PARCIAL [Zc]
PARCIAL [Pc]
PARCIAL [Zp]
PARCIAL [Pp]
MONTAR SUB-MATRIZES DIAGONAIS DAS MATRIZES COMPLETAS [Z] E [P]

DE - 3

(VEM DE DE-3)

CORRIGIR AS RESISTIVIDADES ELÉTRICAS DAS CAMADAS METÁLICAS

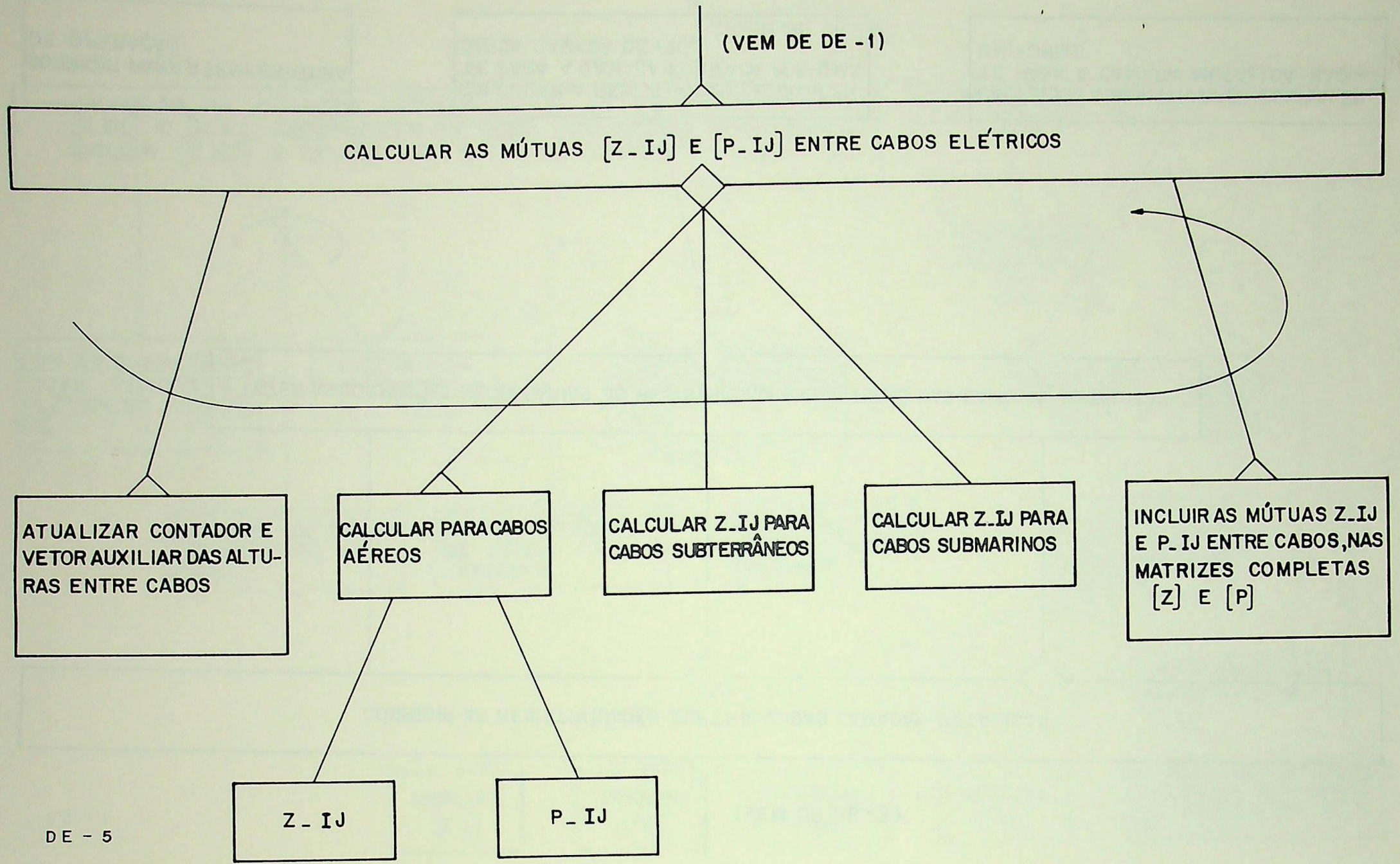
FAZER AS CORREÇÕES NECESSÁRIAS ÀS RESISTIVIDADES ELÉTRICAS DAS CAMADAS METÁLICAS

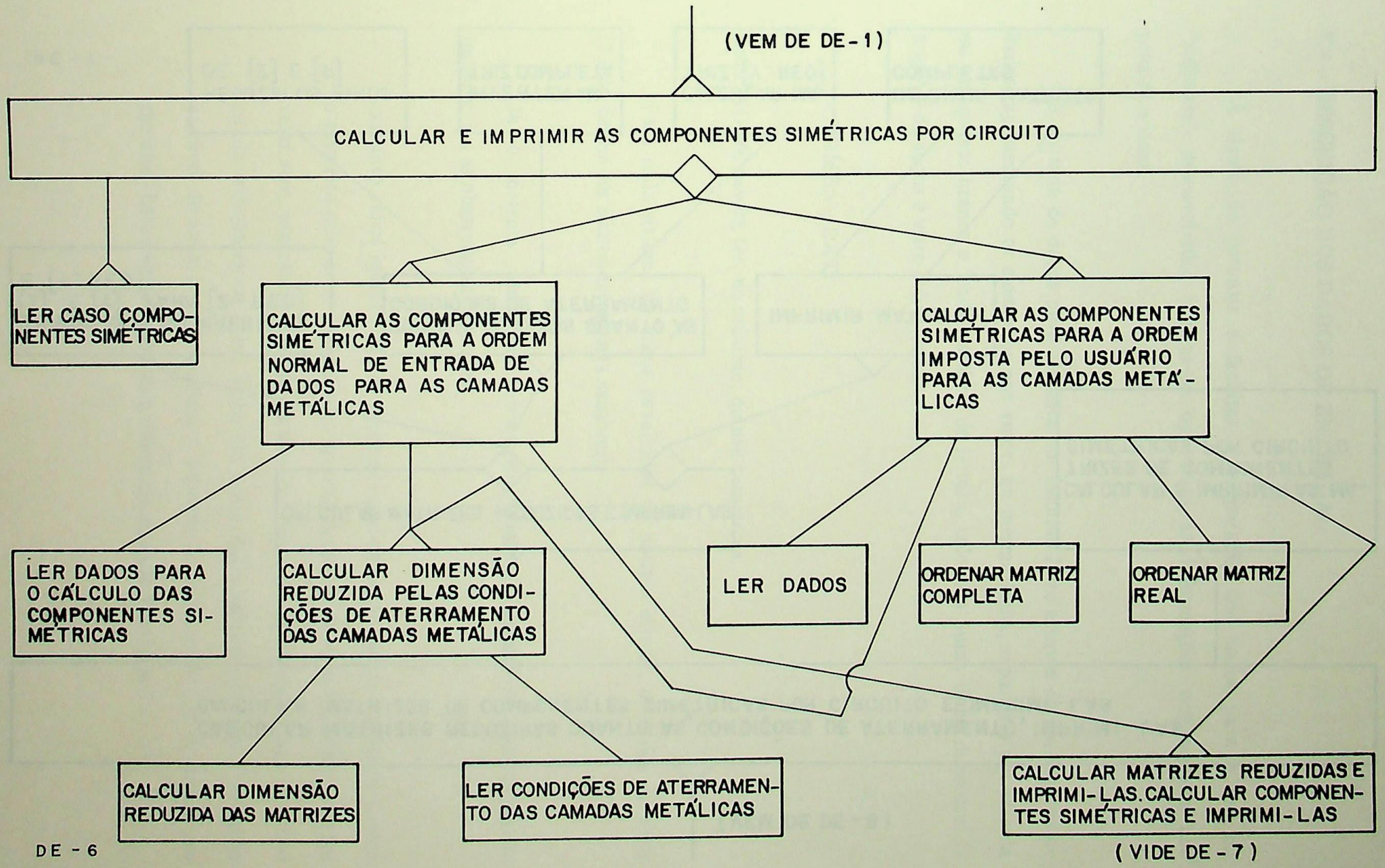
CORRIGIR PARA A TEMPERATURA DE OPERAÇÃO

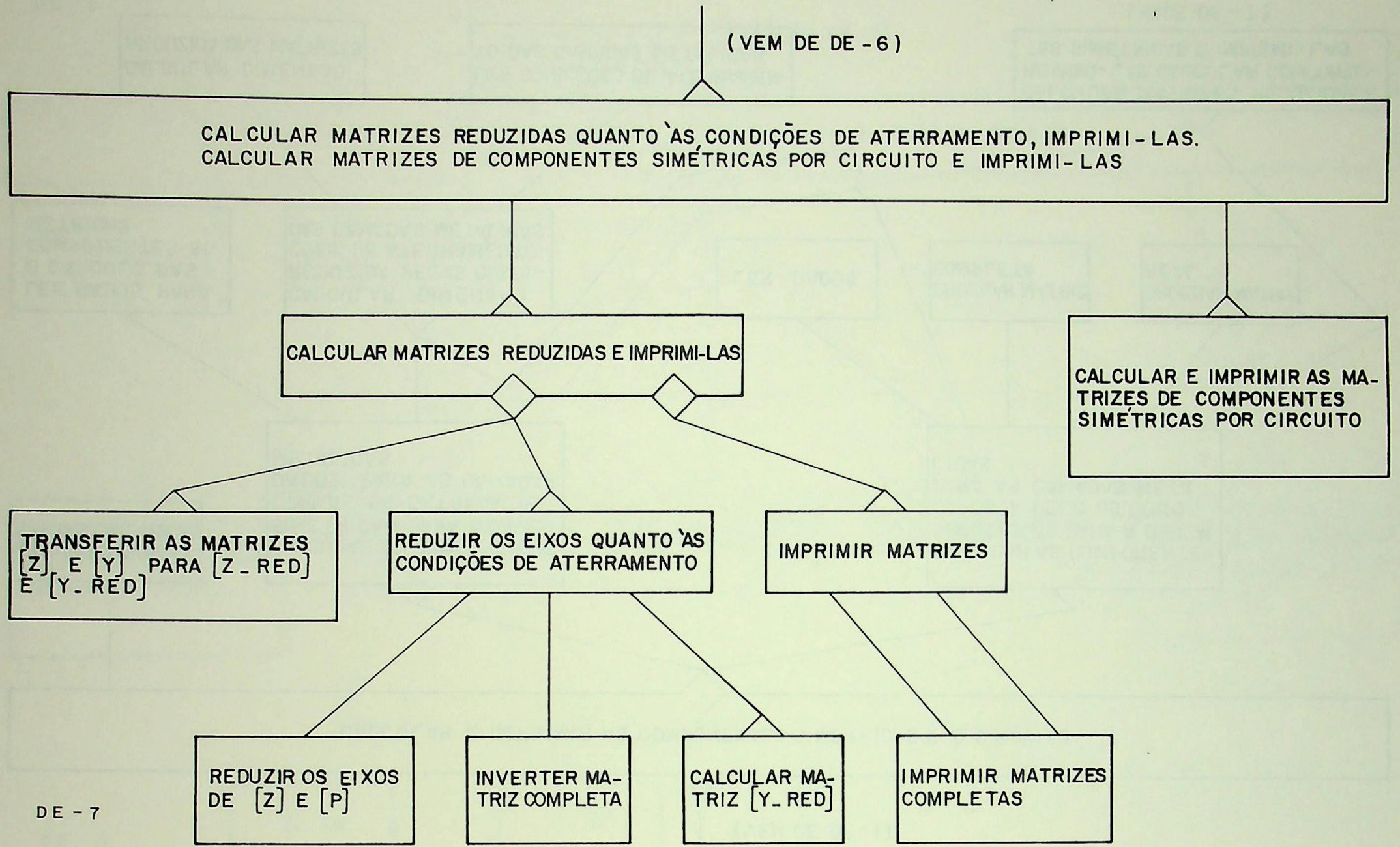
CALCULAR A RESISTIVIDADE EQUIVALENTE PARA A CAMADA FORMADA POR UMA ÚNICA CAMADA DE FIOS

CALCULAR A RESISTIVIDADE EQUIVALENTE PARA A CAMADA METÁLICA NÃO UNIFORME

DE - 4


(VEM DE DE -1)
CALCULAR AS MÚTUAS [Z_IJ] E [P_IJ] ENTRE CABOS ELÉTRICOS
ATUALIZAR CONTADOR E VETOR AUXILIAR DAS ALTURAS ENTRE CABOS
CALCULAR PARA CABOS AÉREOS
CALCULAR Z_IJ PARA CABOS SUBTERRÂNEOS
CALCULAR Z_IJ PARA CABOS SUBMARINOS
INCLUIR AS MÚTUAS Z_IJ E P_IJ ENTRE CABOS, NAS MATRIZES COMPLETAS [Z] E [P]
Z_IJ
P_IJ
DE - 5


(VEM DE DE-1)
CALCULAR E IMPRIMIR AS COMPONENTES SIMÉTRICAS POR CIRCUITO
LER CASO COMPONENTES SIMÉTRICAS
CALCULAR AS COMPONENTES SIMÉTRICAS PARA A ORDEM NORMAL DE ENTRADA DE DADOS PARA AS CAMADAS METÁLICAS
CALCULAR AS COMPONENTES SIMÉTRICAS PARA A ORDEM IMPOSTA PELO USUÁRIO PARA AS CAMADAS METÁLICAS
LER DADOS PARA O CÁLCULO DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS
CALCULAR DIMENSÃO REDUZIDA PELAS CONDIÇÕES DE ATERRAMENTO DAS CAMADAS METÁLICAS
LER DADOS
ORDENAR MATRIZ COMPLETA
ORDENAR MATRIZ REAL
CALCULAR DIMENSÃO REDUZIDA DAS MATRIZES
LER CONDIÇÕES DE ATERRAMENTO DAS CAMADAS METÁLICAS
CALCULAR MATRIZES REDUZIDAS E IMPRIMI-LAS. CALCULAR COMPONENTES SIMÉTRICAS E IMPRIMI-LAS
DE-6
(VIDE DE-7)


(VEM DE DE-6)
CALCULAR MATRIZES REDUZIDAS QUANTO ÀS CONDIÇÕES DE ATERRAMENTO, IMPRIMI-LAS.
CALCULAR MATRIZES DE COMPONENTES SIMÉTRICAS POR CIRCUITO E IMPRIMI-LAS
CALCULAR MATRIZES REDUZIDAS E IMPRIMI-LAS
CALCULAR E IMPRIMIR AS MATRIZES DE COMPONENTES SIMÉTRICAS POR CIRCUITO
TRANSFERIR AS MATRIZES [Z] E [Y] PARA [Z_RED] E [Y_RED]
REDUZIR OS EIXOS QUANTO ÀS CONDIÇÕES DE ATERRAMENTO
IMPRIMIR MATRIZES
REDUZIR OS EIXOS DE [Z] E [P]
INVERTER MATRIZ COMPLETA
CALCULAR MATRIZ [Y_RED]
IMPRIMIR MATRIZES COMPLETAS
DE-7

## 7.3 – DESCRIÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

A título de permitir e facilitar a preparação dos dados para o uso do "software" desenvolvido, tornam–se oportunas as informações que seguem nos próximos itens.

A entrada de dados deve ser feita em formato livre através de um arquivo de dados; apresentando os elementos por vetor, na mesma linha, separados por vírgula ou espaço em branco e, cada variável de leitura, colocada numa linha diferente. O arquivo de dados é visto sob a forma:

<NOME> . DAT

onde, NOME deverá ter, no máximo, quinze caracteres.

Para cada sistema de cabos envolvidos no mesmo estudo, os dados do item (7.3.1) devem ser fornecidos apenas uma vez.

Se o sistema comporta cabos em paralelo, tornam–se extremamente importantes as observações seguintes:

– existinto cabos iguais (com as mesmas características físicas e elétricas), para o primeiro cabo a ser calculado, a primeira variável do item 7.3.2 deve receber valor zero, esperando que seja fornecido o bloco de dados seguintes à variável citada, referentes ao cabo. Para um outro cabo idêntico, apenas a primeira variável do item (7.3.2) receberá o número do cabo igual que já entrou nos cálculos. Este número obedece a ordem de entrada dos cabos.

**Exemplo** Considera–se um sistema com 4 cabos, sendo 1, 3 e 4 iguais. Devem ser fornecidos os dados para o cabo número 1, seguidos pelos dados de entrada para o cabo número 2; para o cabo número 3, a primeira variável do item (7.3.2) deve receber valor 1 sem necessitar dos dados seguintes, referentes ao cabo; de forma similar, ocorre para o cabo número 4.

– se forem diferentes, o bloco de dados referentes à cada cabo deve ser preenchido, conforme a ordem de entrada dos mesmos nos cálculos.

Ressalta–se que a primeira variável do item (7.3.2) sempre receberá um valor, independente do bloco de dados, por cabo, apresentado em seguida a esta variável.

### 7.3.1 – Dados Gerais do Sistema de Cabos

1) Identificação do caso

É uma variável de tipo "CHARACTER * 66".

São duas linhas de comentários identificando o caso a ser executado, de até sessenta e seis colunas cada uma, colocadas entre "plics" (’). As duas linhas devem ser preenchidas; não necessariamente, as sessenta e seis colunas.

2) Freqüência do sistema (Hz)

É uma variável de tipo real.

É a freqüência que se deseja fazer o estudo.

3) Resistividade do solo envolvido no estudo ($\Omega$m)

É uma variável de tipo real.

4) Tipo da instalação dos cabos no sistema

É uma variável do tipo inteiro, com as seguintes atribuições:

1 – sistema de cabos aéreos;

2 – sistema de cabos subterrâneos;

3 – sistema de cabos submarinos.

5) Número de cabos do sistema

É um número do tipo inteiro.

Obedece as limitações citadas no item (7.1).

6) Opção de impressão dos dados gerais do sistema e dos dados fornecidos por cabo do sistema (dados lidos)

É uma variável que aceita uma das seguintes atribuições:

0 – não imprime os dados de entrada;

1 – imprime todos os dados de entrada.

7) Controle da impressão das matrizes

A escolha da impressão das matrizes é feita assumindo um dos valores:

0– não imprime as matrizes;

1– impressão de todas as matrizes citadas no item (7.1);

2– impressão só das matrizes completas Z e Y;

3– impressão só das matrizes reduzidas pelas condições de aterramento das camadas metálicas, $Z_{red}$ e $Y_{red}$, e das matrizes de componentes simétricas, $Z_s$ e $Y_s$.

8) Variável que define o número de cálculos das componentes simétricas por execução do programa

É uma variável do tipo inteiro.

9) Vetor das alturas ou profundidades dos cabos conforme a sua instalação (aérea, subterrânea ou submarina) (m)

Vetor cujos elementos são do tipo real e representam as distâncias médias entre os eixos de cada cabo e a superfície do solo.

10) Vetor das distâncias horizontais entre cabos (m)

Cada elemento representa a distância horizontal entre os eixos de dois cabos. Partindo–se de um cabo referencial, segue–se até o último cabo. Trata–se de valores do tipo real. O preenchimento dos mesmos submete–se à seqüência: 1–2, 1–3, ..., 1–n; 2–3, ..., 2–n; ...; (n–1) – n.

### 7.3.2 – Dados Gerais por Cabo em Estudo

1) Variável de identificação do cabo quanto à sua presença nos cálculos

Se o cabo estiver entrando nos cálculos pela primeira vez, esta variável deve receber valor zero, fazendo o programa aguardar, em seguida, o bloco de dados referentes ao cabo. Se o cabo tem as mesmas características físicas e elétricas de um outro cabo já fornecido, apenas lhe é atribuído o número (pela seqüência de entrada dos dados por cabo) do outro cabo; tornando–se desnecessário o bloco de dados referentes ao cabo.

2) Vetor de informações gerais por cabo em estudo

Vetor, cujos elementos quantificam dados constituintes do cabo. Contém oito posições, com valores do tipo inteiro e devem ser preenchidas na mesma linha, obedecendo a seguinte ordem, dentro dos limites estabelecidos:

1– número de cabos SC, internos, de energia, para o cabo PT em estudo, (0, 1 ou 3);
2– número de camadas isolantes por cabo SC de energia, para o cabo PT em estudo, (0–3);
3– número de camadas metálicas por cabo SC de energia, para o cabo PT em estudo, (0–3);
4– número de cabos de fibra ótica para o cabo PT em estudo, (0–3);
5– número de camadas isolantes por cabo de fibra ótica, para o cabo PT em estudo, (0–3);
6– número de camadas metálicas por cabo de fibra ótica, para o cabo PT em estudo, (0–3);

7– número de camadas metálicas no tubo envolvente do cabo PT em estudo, (0–3);

8– número de camadas isolantes no tubo envolvente do cabo PT em estudo, (0–3).

3) Vetor das distâncias entre os centros dos cabos SC internos e do tubo envolvente (m)

São valores do tipo real.

Os dados devem estar em linhas diferentes, obedecendo a descrição seguinte:

– DJ1 é o primeiro elemento, refere–se à distância entre os centros do cabo SC, interno, de energia e do tubo envolvente.

Uma vez que os cálculos baseiam–se na hipótese dos cabos SC serem eqüidistantes dentro do tubo envolvente, o valor de DJ1 é o mesmo para cabos trifásicos, sendo necessário apenas um valor. Se o cabo for monofásico DJ1 deve receber valor zero.

Se o valor de DJ1 não for conhecido, pode ser obtido pela aproximação que segue:

$$DJ1 = \frac{2\sqrt{3}\ R_e}{3} \qquad (7.2)$$

sendo Re o raio mais externo do cabo SC de energia.

– DJ2 é o segundo elemento. Refere–se à distância entre os centros do cabo SC de fibra ótica (caso exista) e do tubo envolvente.

Esta posição só será preenchida se houver cabo de fibra ótica no cabo em estudo. Caso contrário, deve ser omitida.

De forma análoga à DJ1, DJ2, pode ser obtida pela aproximação:

$$DJ2 = \frac{\sqrt{3}\ R_e}{3} + \sqrt{2R_e\ .\ R_{fe}} \qquad (7.3)$$

com

$R_e$ – definida anteriormente;

$R_{fe}$ – raio mais externo do cabo de fibra ótica.

4) Vetor dos ângulos entre cabos SC, internos (grau)

Os seus elementos são do tipo real.

São os ângulos formados entre os eixos dos cabos SC, internos, de energia; entre os eixos dos cabos de fibra ótica (caso existam) e entre os eixos dos cabos SC de energia e cabos de fibra ótica para o mesmo cabo PT envolvido nos cálculos.

Os elementos devem submeter–se à ordem seguinte, na mesma linha; com os ângulos formados entre:

– cabo SC de energia, para o cabo PT em estudo;

– cabo de fibra ótica, para o cabo PT em estudo;
– cabo SC de energia 1 e o cabo de fibra ótica 1;
– cabo SC de energia 2 e o cabo de fibra ótica 1;
– cabo SC de energia 3 e o cabo de fibra ótica 1;
– cabo SC de energia 1 e o cabo de fibra ótica 2;
– cabo SC de energia 2 e o cabo de fibra ótica 2;
– cabo SC de energia 3 e o cabo de fibra ótica 2;
– cabo SC de energia 1 e o cabo de fibra ótica 3;
– cabo SC de energia 2 e o cabo de fibra ótica 3;
– cabo SC de energia 3 e o cabo de fibra ótica 3.

São tantas posições para o vetor, quantos ângulos existirem entre os cabos SC internos. Entretanto, a primeira posição necessita ser sempre preenchida. Se o cabo for monofásico, recebe valor zero.

### 7.3.3 – Dados por Cabo SC, Interno, de Energia do Cabo PT em Estudo

Salienta–se que o bloco de dados fornecidos neste item, deve ocorrer uma única vez por cabo PT; pois uma das hipóteses assumidas na teoria é que os cabos SC, internos, de energia sejam iguais entre si. O mesmo procedimento é adotado para os cabos SC de fibra ótica (caso existam).

1) Vetor dos raios das superfícies internas das camadas metálicas por cabo SC, interno, de energia (m)

Deve receber valores do tipo real.

O primeiro elemento representa o raio da superfície interna da primeira

camada metálica ou núcleo do cabo SC; se for do tipo condutor sólido, o seu valor é zero.

O último elemento do vetor refere–se ao raio da superfície externa da última camada isolante do cabo SC. Destina–se ao controle de fim de cálculo.

O limite do número de elementos é quatro.

2) Vetor dos raios das superfícies externas das camadas metálicas por cabo SC, interno, de energia (m)

São valores reais, dispostos na mesma linha. O limite do número de elementos é três.

3) Vetor das permeabilidades magnéticas relativas das camadas metálicas por cabo SC, interno, de energia

Vetor cujos elementos são do tipo real; tem dimensão igual a três.

4) Vetor das temperaturas de referência das resistividades elétricas das camadas metálicas por cabo SC, interno, de energia ($^0$C)

Trata–se das temperaturas para as quais são fornecidos os valores das resistividades elétricas do material metálico que constitui a camada condutora; obtidas, usualmente, em tabelas. Sendo 20$^0$C o valor mais empregado para estas temperaturas. O valor de cada elemento deve ser do tipo real e o número máximo de elementos é três.

5) Vetor das resistividades elétricas das camadas metálicas, nas temperaturas de referência, por cabo SC, interno, de energia ($\Omega$m)

Possui elementos do tipo real, com dimensão igual a três.

6) Vetor dos coeficientes de correção das resistividades elétricas nas temperaturas de referência, das camadas metálicas, por cabo SC, interno, de energia (1/$^{o}$C)

São valores do tipo real. Permite o número máximo de três elementos.

7) Vetor das temperaturas de operação das camadas metálicas por cabo SC de energia ($^{0}$C)

Vetor, cujos elementos são do tipo real e representam a temperatura de operação para cada camada metálica do cabo SC, tendo no máximo, três elementos.

8) Vetor do número de fios das camadas metálicas formadas por uma única camada de fios, por cabo SC de energia

Contém elementos do tipo inteiro. Tais valores representam o número de fios da camada metálica. Para a camada metálica não formada por uma única camada de fios, ser–lhe–á atribuído valor zero. O número máximo de elementos no vetor é três.

9) Vetor das áreas efetivas das camadas metálicas não uniformes e das formadas por mais de uma camada de fios, por cabo SC de energia (m$^{2}$)

São dados do tipo real, com o número máximo de elementos no vetor igual a três.

No caso de camadas metálicas uniformes ou formadas por uma única camada de fios, receberão valor zero.

10) Vetor dos raios das superfícies internas das camadas isolantes por cabo SC de energia (m)

Vetor de valores reais e dimensão igual a três.

11) Vetor dos raios das superfícies externas das camadas isolantes por cabo SC de energia (m)

Vetor de elementos do tipo real e dimensão igual a três.

12) Vetor das constantes dielétricas relativas das camadas isolantes por cabo SC de energia

Vetor de elementos do tipo real e dimensão igual a três.

### 7.3.4 – Dados por Cabo SC de Fibra Ótica do Cabo PT em Estudo

Havendo cabo(s) de fibra ótica, os dados necessários, face às características similares dos cálculos, são os mesmos descritos no bloco de dados do item (7.3.3); entretanto, referem–se ao cabo de fibra ótica.

### 7.3.5 – Dados do Tubo Envolvente do Cabo PT em Estudo

No caso de cabo trifásico, o tubo envolvente (o qual caracteriza um cabo PT,

conforme definido no Capítulo II) deve existir contendo, no mínimo, uma camada metálica.

Os dados necessários para a inclusão do tubo envolvente nos cálculos são os mesmos retratados no item (7.3.3); porém, tratando–se das características relativas ao tubo envolvente. No entanto, para este caso, o vetor das constantes dielétricas pode conter até 4 elementos, sendo o primeiro relativo ao valor da constante dielétrica do enchimento.

### 7.3.6 – Dados Referentes ao Cálculo das Componentes Simétricas para o Sistema de Cabos em Estudo

Os dados descritos neste item devem ser fornecidos tantas vezes quantos forem os cálculos das componentes simétricas definidos pela oitava variável do item (7.3.1). Se o valor atribuído a tal variável foi zero, equivale ao não preenchimento do bloco de dados seguintes.

1) Variável que definirá a opção do usuário quanto aos tipos de seqüência dos elementos metálicos por circuito, recebendo as seguintes atribuições:

   1– a ordem das camadas metálicas que formam os circuitos obedece a ordem da entrada de dados por cabo (eliminando as blindagens e armações quanto às condições de aterramento e/ou isolação das mesmas);

   2– a entrada de dados para os cálculos gerais poderá ser, inclusive, na seqüência imposta pelos itens anteriores; porém, neste caso, o usuário será responsável pela ordem dos elementos metálicos que formam cada circuito. Por conseguinte, tornar–se–á necessário a composição do vetor

informando a seqüência das camadas metálicas por circuito arbitrado.

Observa–se que atribuindo valor diferente dos citados para esta opção, o programa interpretará como a escolha de não calcular as componentes simétricas do sistema de cabos em estudo.

2) Número de circuitos em paralelo e acoplados no mesmo sistema, por cálculo das componentes simétricas.

É uma variável do tipo inteiro.

Já abordado no item (7.1), cada circuito pode ser formado por um cabo trifásico ou um conjunto de cabos monofásicos, com as devidas blindagens e armações metálicas eliminadas, desde que a variável anterior (opção do usuário) tenha recebido valor um. Se lhe foi atribuído valor dois, formam–se circuitos até com blindagens e armações, obedecendo os limites impostos no item (7.1).

3) Informação dos tipos de circuitos do sistema por cálculo das componentes simétricas

Os tipos de circuitos serão definidos respeitando–se as seguintes atribuições:

0 – os circuitos são de tipos variáveis (trifásicos, bifásicos e/ou monofásicos);
1 – todos os circuitos são monofásicos;
2 – todos os circuitos são bifásicos;
3 – todos os circuitos são trifásicos.

Se, somente se este parâmetro receber valor zero, o próximo vetor deverá ser

fornecido.

4) Vetor dos tipos de circuitos do sistema, por cálculo das componentes simétricas

Vetor, cujos elementos podem receber valor 1, 2 ou 3, guardando por posição, o tipo do circuito do sistema; respectivamente, monofásico, bifásico ou trifásico. Leva em consideração a ordem de entrada dos dados por cabo e por circuito, de forma seqüencial.

São tantos elementos quantos forem os circuitos do sistema; no máximo até oitenta e quatro. Este vetor só existirá se a variável anterior receber valor zero.

5) Vetor dos elementos metálicos por circuito do sistema em estudo

Vetor de elementos do tipo inteiro, que representam a ordem dos elementos metálicos por circuito, conforme a exigência do usuário.

Esta seqüência poderá ser, por exemplo, todos os condutores importantes para o estudo, formando os conjuntos ordenados por circuito, seguidos pelos que serão eliminados pelas condições de aterramento e/ou isolação.

Este vetor só será fornecido se a primeira variável do item corrente receber valor dois.

São tantos elementos quantas forem as camadas metálicas do sistema em estudo; no máximo oitenta e quatro.

6) Vetor das condições de aterramento de todas as camadas metálicas do sistema de cabos em estudo, por cálculo das componentes simétricas

Vetor que receberá por posição um dos valores seguintes, correspondente à camada metálica descrita em posição equivalente no vetor da quinta variável deste item:

0 – núcleo do condutor de energia ou camada metálica importante para o estudo;
1 – camada metálica isolada (sem ligação para a terra);
2 – camada metálica solidamente aterrada ou aterrada nas extremidades.

A seqüência dos dados para este vetor respeita o seguinte:

– se à primeira variável deste item, quanto à opção da ordem dos elementos metálicos, foi atribuído valor um, este vetor terá a seqüência da entrada de dados por cabo: camadas metálicas dos cabos SC de energia, camadas metálicas dos cabos SC de fibra ótica e camadas metálicas do tubo envolvente por cabo PT em estudo;

– se a variável mencionada recebeu valor dois, a ordem dos elementos deste vetor será correspondente à ordem dos elementos metálicos do sistema, pela opção do usuário, do vetor descrito na quinta variável deste item.

Ressalta–se, ainda, que o primeiro elemento deste vetor de informações sobre o aterramento deverá vir numa linha e os demais elementos na linha seguinte.

## 7.4 – ARQUIVO DE SAÍDA

O programa para o cálculo dos parâmetros elétricos de um sistema de cabos, gera a saída de dados em um arquivo contendo o mesmo nome do arquivo de entrada de dados; porém, com extensão (.SAI).

## 7.5 – APRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA EXEMPLO

Os cálculos dos parâmetros elétricos de um sistema exemplo na condição de aéreo, subterrâneo ou submarino, encontram–se descritos no Apêndice VI, apresentando os arquivos de dados de entrada (que descreve o sistema) e saída (resultados obtidos).

# CAPÍTULO VIII

# ALGUMAS INVESTIGAÇÕES PARA UM SISTEMA EXEMPLO

## 8.1 – ASPECTOS GERAIS

A título de observar o comportamento dos parâmetros longitudinais (R e L) com a variação da freqüência, apresenta–se um sistema exemplo formado por um cabo PT, constituído por três cabos SC, internos, de energia. Foram feitos vários estudos para situações distintas de cálculo para este sistema.

Com base nos resultados obtidos foram plotados gráficos mostrando o comportamento das resistências, indutâncias e reatâncias indutivas longitudinais (próprias e mútuas de coordenada de fase, próprias homopolares ou de seqüência zero e próprias não homopolares ou de seqüências positiva e negativa) com o crescimento da freqüência até 1 MHz. No caso das indutâncias, para uma melhor avaliação do comportamento com a freqüência até 1 kHz, foram plotados para todos os casos gráficos com escala linear.

A fim de verificar a influência da freqüência nas várias camadas metálicas, constituintes do cabo, foram plotadas algumas curvas representativas das resistências e indutâncias longitudinais, por camada metálica do cabo PT, em dependência com a freqüência.

Para confirmar a independência da freqüência para as capacitâncias transversais, conforme assumido no desenvolvimento teórico, foram feitos alguns gráficos que mostram o comportamento da capacitância com a freqüência.

## 8.2 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E ELETROMAGNÉTICAS DO SISTEMA EXEMPLO

– Cabo elétrico PT

– Formação: 3 cabos SC (300 $mm^2$) 15/25 kV

– Freqüência: 1 a $10^6$ Hz

– Resistividade do solo ($\Omega$m):

. cabo aéreo: 10, 100, 1000 e 5000

. cabo subterrâneo: 10, 100 e 1000

– Altura/profundidade (m):

. cabo aéreo: 5 e 10

. cabo subterrâneo: 0.5

– Número de camadas metálicas:

. por cabo SC, interno: 2

. para o tubo envolvente: 2

– Número de camadas isolantes:

. por cabo SC, interno: 2

. para o tubo envolvente: 3

– Distância entre os centros do cabo SC, interno, de energia e do tubo envolvente (m): 0.282 900 E–01

– Ângulos entre cabos SC, internos, de energia: $120^0$

– Raios internos das camadas metálicas (m):

. por cabo SC, interno: 0.0, 0.202 E–01

. para o tubo envolvente: 0.525 E–01, 0.584 5 E–01

– Raios externos das camadas metálicas (m):

. por cabo SC, interno: 0.103 E–01, 0.229 E–01

. para o tubo envolvente: 0.535 E–01, 0.645 E–01

- Permeabilidades magnéticas relativas das camadas metálicas:
  . por cabo SC, interno: 0.999 991, 0.999 983
  . para o tubo envolvente: 0.999 991, 30
- Temperaturas de referência para as camadas metálicas ($^0$C):
  . por cabo SC, interno: 20, 20
  . para o tubo envolvente: 20, 20
- Resistividades elétricas nas respectivas temperaturas de referência ($\Omega$m):
  . por cabo SC, interno: 0.172 410 E–07, 0.206 5 E–06
  . para o tubo envolvente: 0.12 410 E–07, 0.171 E–06
- Coeficientes de correção das resistividades elétricas nas temperaturas de referência ($^0C^{-1}$):
  . por cabo SC, interno: 0.393 E–02, 0.41 E–02
  . para o tubo envolvente: 0.393 E–02, 0.45 E–02
- Temperaturas de operação das camadas metálicas ($^0$C):
  . por cabo SC, interno: 75, 60
  . para o tubo envolvente: 45, 40
- Área efetiva da primeira camada metálica, por cabo SC de energia: 0.3 E–03 $m^2$
- Número de fios da segunda camada metálica (armação) do tubo envolvente: 59
- Raios internos das camadas isolantes (m):
  . por cabo SC, interno: 0.116 E–01, 0.231 E–01
  . para o tubo envolvente: 0.536 E–01, 0.56 E–01, 0.647 E–01
- Raios externos das camadas isolantes (m):
  . por cabo SC, interno: 0.184 E–01, 0.245 E–01
  . para o tubo envolvente: 0.56 E–01, 0.584 5 E–01, 0.68 E–01
- Permissividades relativas dos dielétricos:
  . por cabo SC, interno: 2.6, 2.3
  . para o enchimento: 2.6

. para o tubo envolvente: 2.3, 2.6, 2.6

A condição de blindagens e a armação solidamente aterradas foi incluída nos cálculos.

As simulações foram feitas através do programa desenvolvido no computador VAX 8650 da Universidade Federal do Rio de Janeiro, descrito no Capítulo VII.

Cumpre informar que, em média, cada caso por freqüência, gasta aproximadamente, quarenta minutos de CPU. Fato que dificultou a exploração de outras situações e cabos diferentes do citado.

No Apêndice VII apresentam–se tabelas dos resultados obtidos nos cálculos, correspondentes respectivamente, aos gráficos plotados nas Figuras (8.1) a (8.46).

As curvas, por grupos de figuras, têm as mesmas características adotadas e as discriminações feitas a seguir:

1) Figuras (8.1) a (8.6):

. sistema aéreo;

. resistividade do solo = 10 $\Omega$m;

. altura = 5 m.

Para o comportamento com a freqüência, têm–se, respectivamente, resistências, indutâncias, indutâncias para freqüências mais baixas (escala linear), resistências e indutâncias, resistências por camadas metálicas e indutâncias por camadas metálicas.

2) Para as figuras entre (8.7) e (8.12), com:

. sistema aéreo;

. resistividade do solo = 10 Ωm;

. altura = 10 m.

A correspondência equivalente é feita de forma semelhante e respectiva às figuras citadas em (1).

3) De forma similar ocorre para as figuras (8.13) a (8.18), assumindo–se:

. sistema aéreo;

. resistividade do solo = 100 Ωm;

. altura = 10 m.

4) Para o grupo de figuras entre (8.19) e (8.26), tem–se a dependência com a freqüência para, de forma seqüencial: resistências, indutâncias, indutâncias para freqüências mais baixas (até 1000 Hz), resistências e indutâncias, capacitâncias, resistências por camadas metálicas e indutâncias por camadas metálicas, respectivamente, fazendo–se as considerações seguintes:

. sistema aéreo;

. resistividade do solo = 1000 Ωm;

. altura = 10 m.

5) Para as figuras apresentadas entre (8.27) e (8.31), foram adotadas as características que seguem:

. sistema aéreo;

. resistividade do solo = 5000 Ωm;

. altura = 10 m.

Representando–se, respectivamente, a variação com a freqüência das resistências, das indutâncias, das indutâncias para baixas freqüências (até 1000 Hz), das resistências e indutâncias e das resistências por camadas metálicas.

6) Levando–se em consideração as figuras (8.32) a (8.35), foram supostos:

. sistema subterrâneo;

. resistividade do solo = 10 Ωm;

. profundidade = 0.5 m.

Obtendo–se o comportamento com a freqüência das resistências, das indutâncias, das indutâncias nas baixas freqüências e das resistências e indutâncias.

7) Este comentário é extensivo ao grupo de figuras (8.36) a (8.39), admitindo–se:

. sistema subterrâneo;

. resistividade do solo = 100 Ωm;

. profundidade = 0.5 m.

8) Para as figuras compreendidas entre (8.40) e (8.46), foram adotados:

. sistema subterrâneo;

. resistividade do solo = 1000 Ωm;

. profundidade = 0.5 m.

Respectivamente, representando–se a variação com a freqüência das resistências, das indutâncias para as baixas freqüências, das resistências e indutâncias, das capacitâncias transversais (comprovando–se, neste caso, que não há influência da freqüência, conforme filosofia adotada), das resistências por camada metálica e das indutâncias por camada metálica constituintes do cabo.

9) Finalmente, considerando–se o grupo de figuras (8.47) a (8.54), tem–se a informar que representam o comportamento com a freqüência de curvas simultâneas para resistências e reatâncias (próprias e mútuas em coordenada de fase, próprias em componentes simétricas de seqüência zero e seqüência positiva), para todos os casos explorados.

Para maior facilidade de identificação, indicam–se, em cada figura, o tipo de instalação do cabo e os valores correspondentes da resistividade do solo e da altura ou profundidade.

As parcelas por camada metálica estão definidas no Apêndice VII.

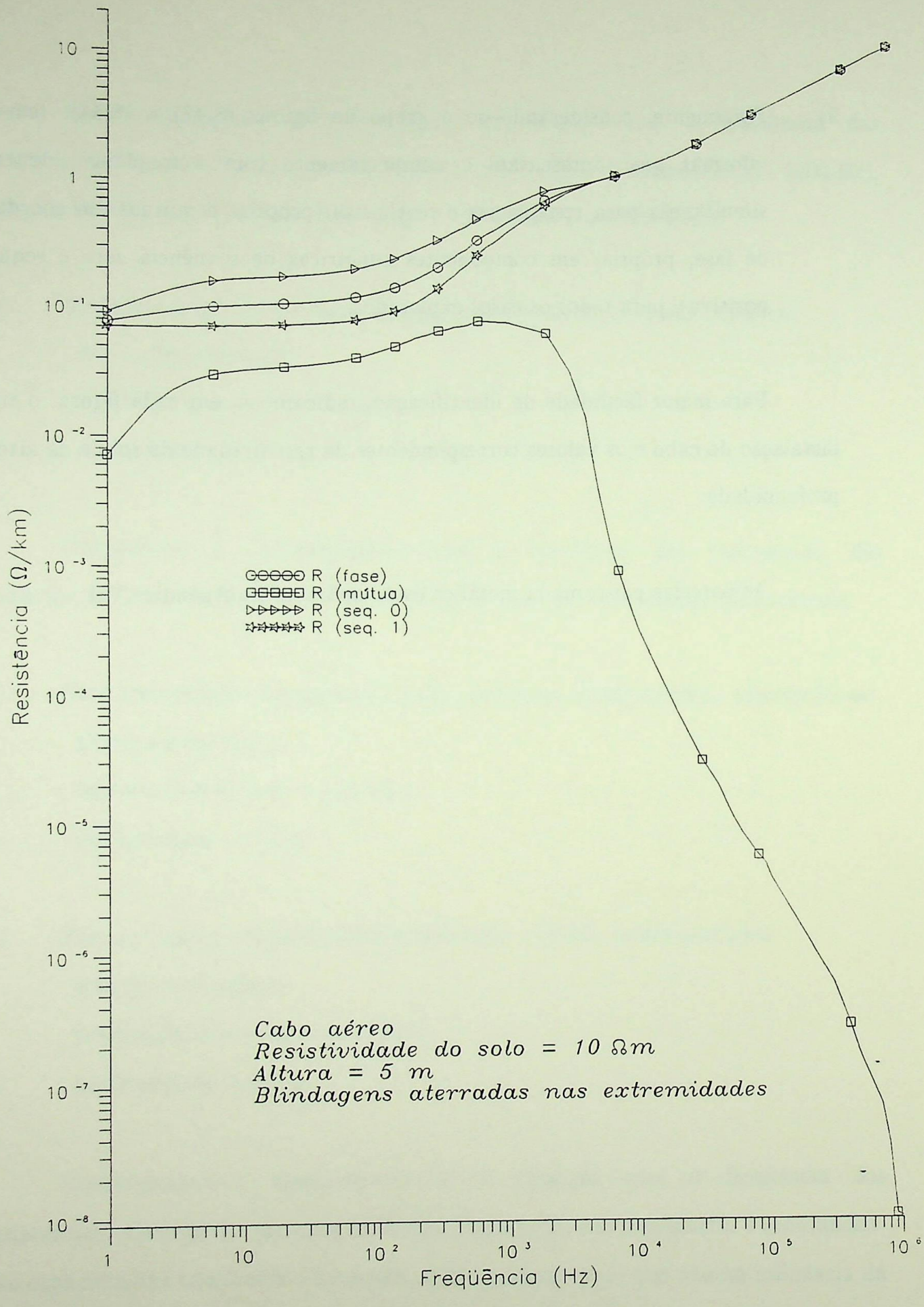



*Figura 8.1 - Comportamento da resistência com a freqüência*

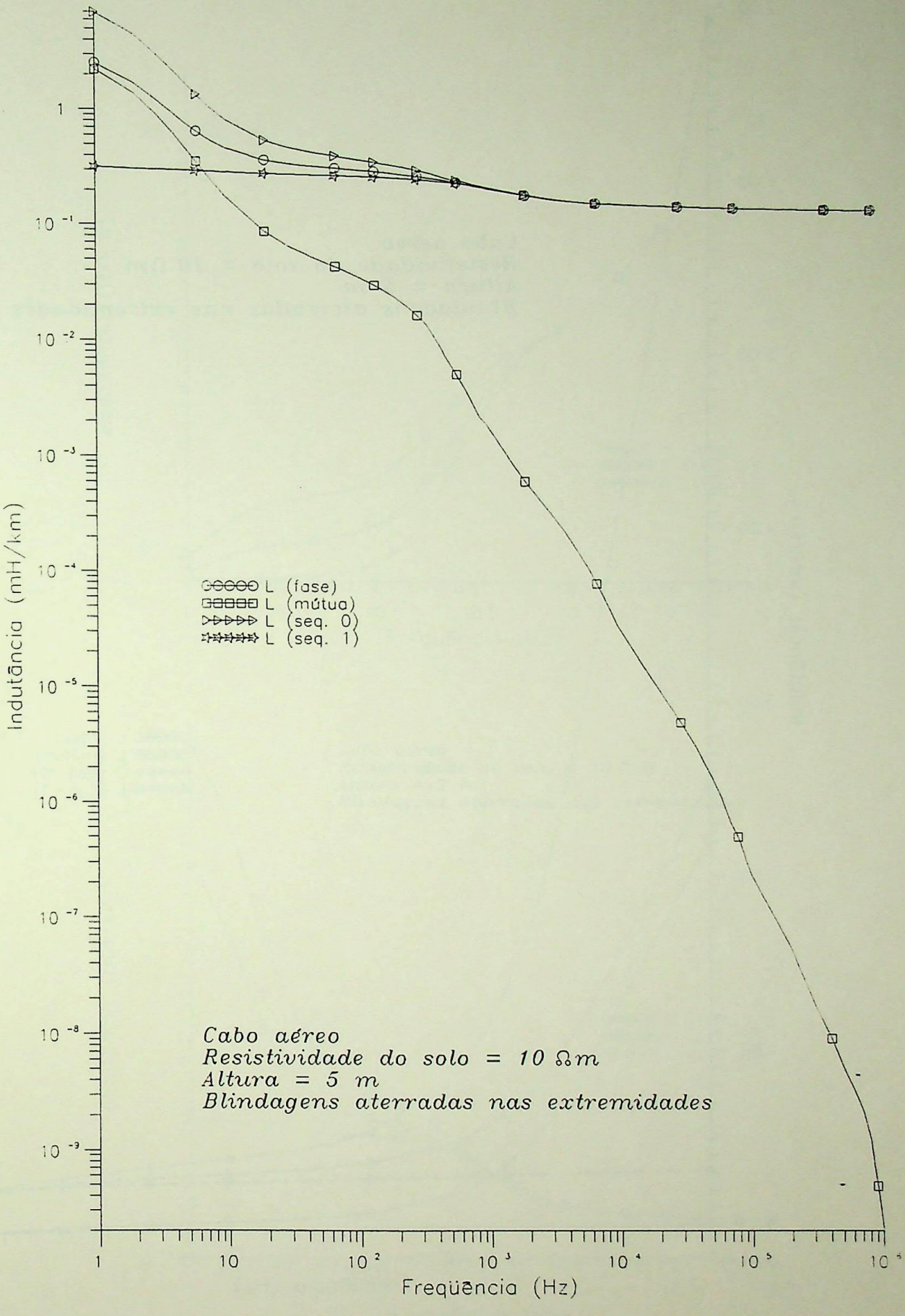



*Figura 8.2 - Comportamento da indutância com a freqüência*

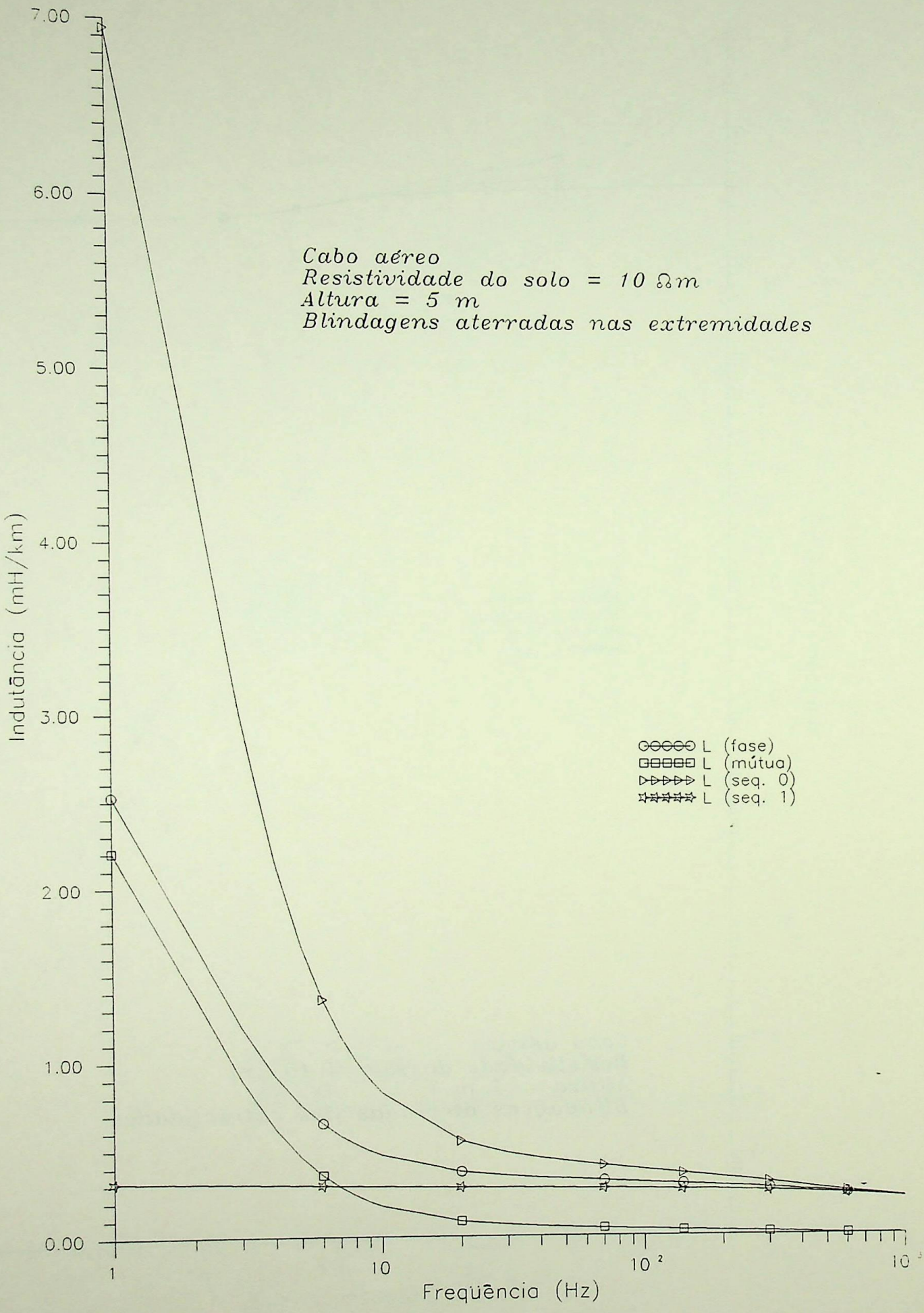



*Figura 8.3 - Comportamento da indutância com a freqüência*

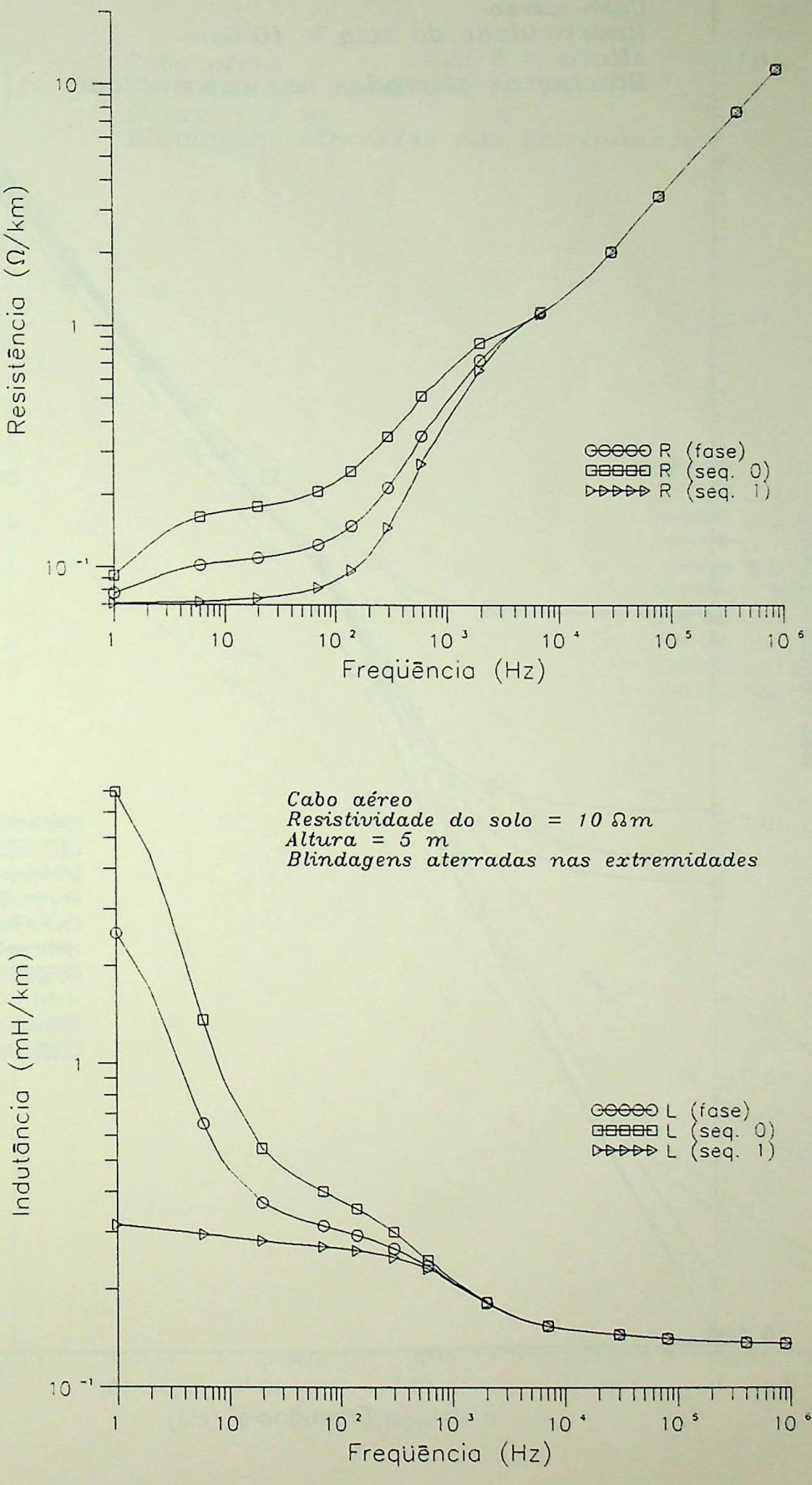



*Figura 8.4* - *Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

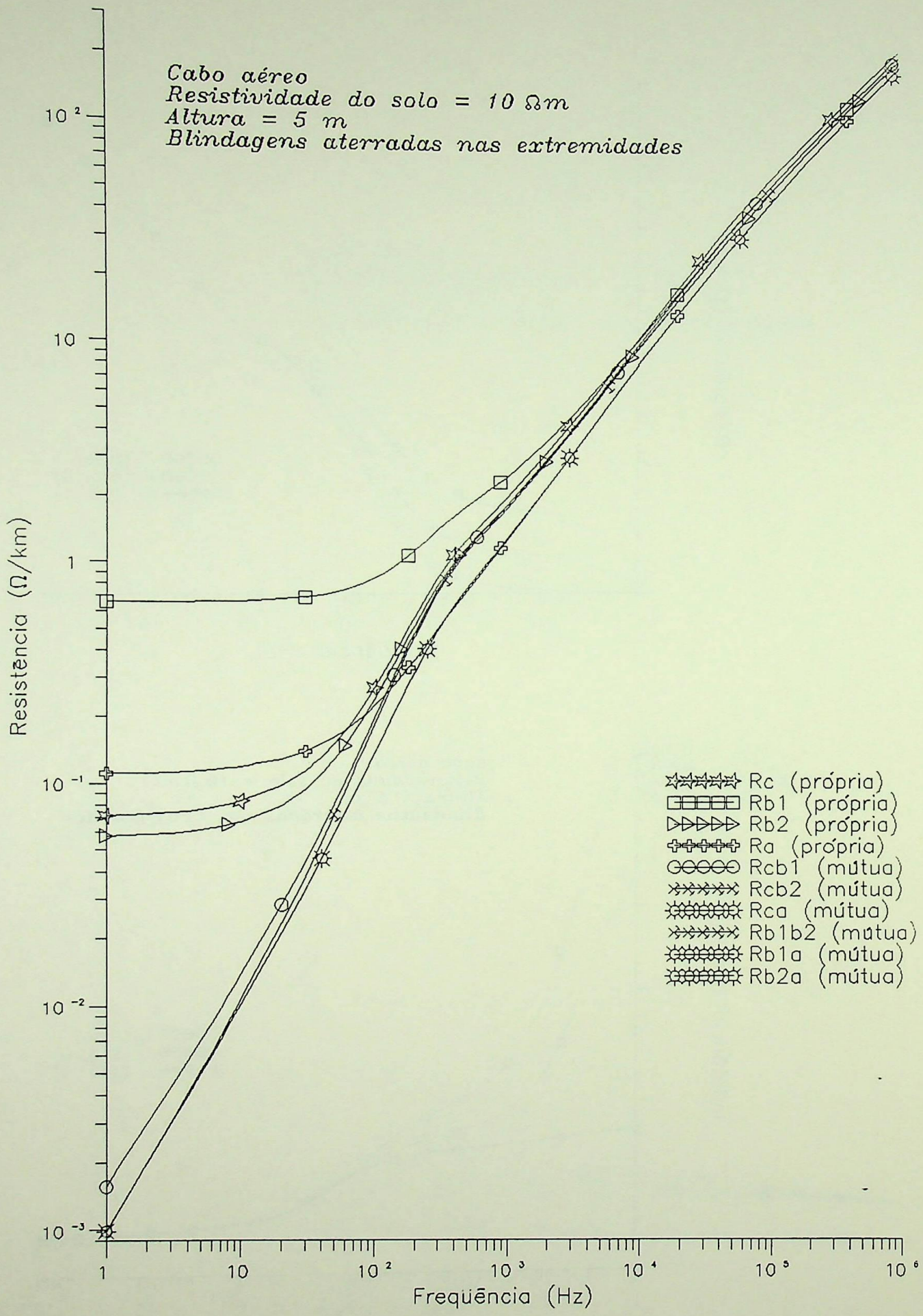



*Figura 8.5 - Comportamento das resistências próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

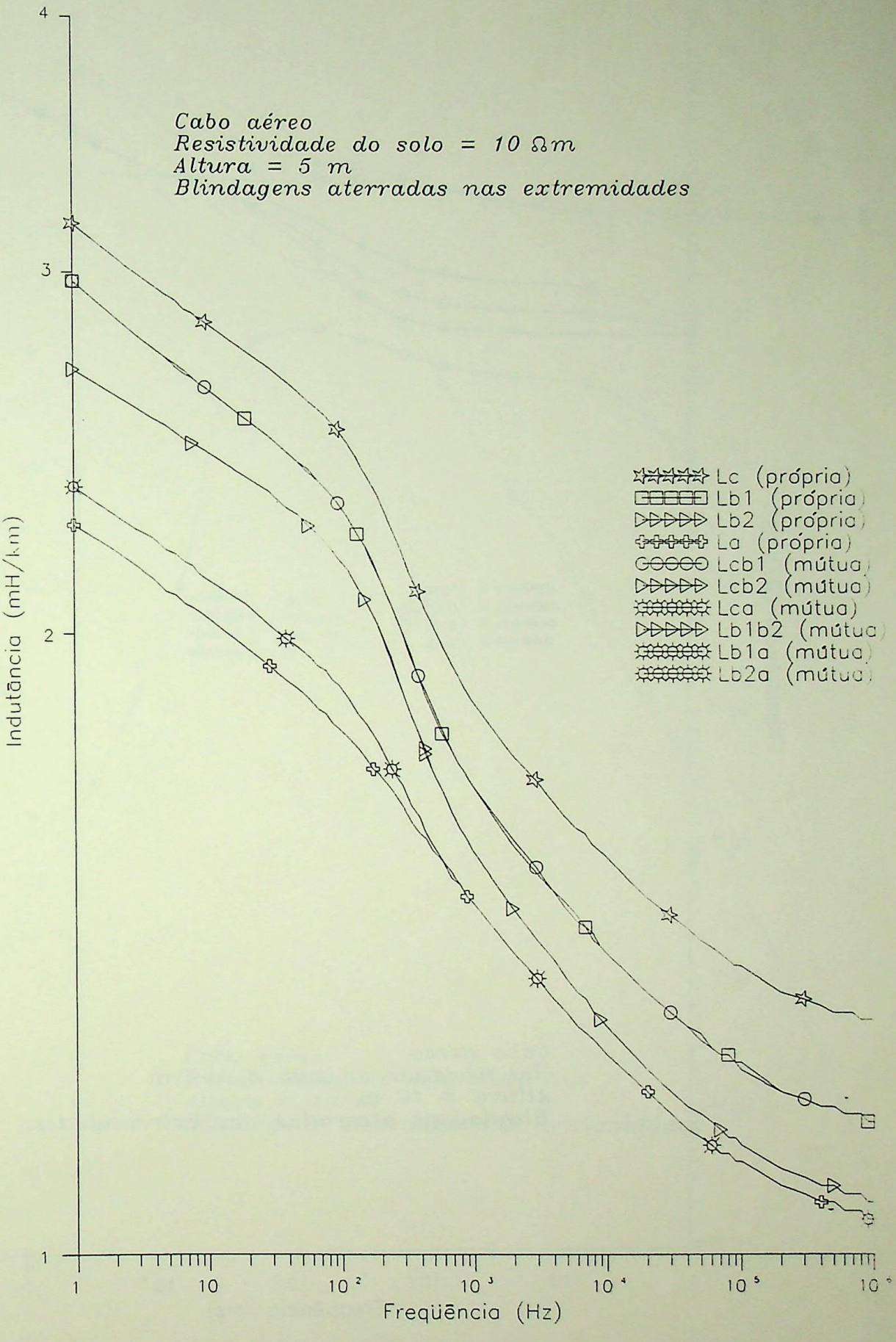



*Figura 8.6 - Comportamento das indutâncias próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

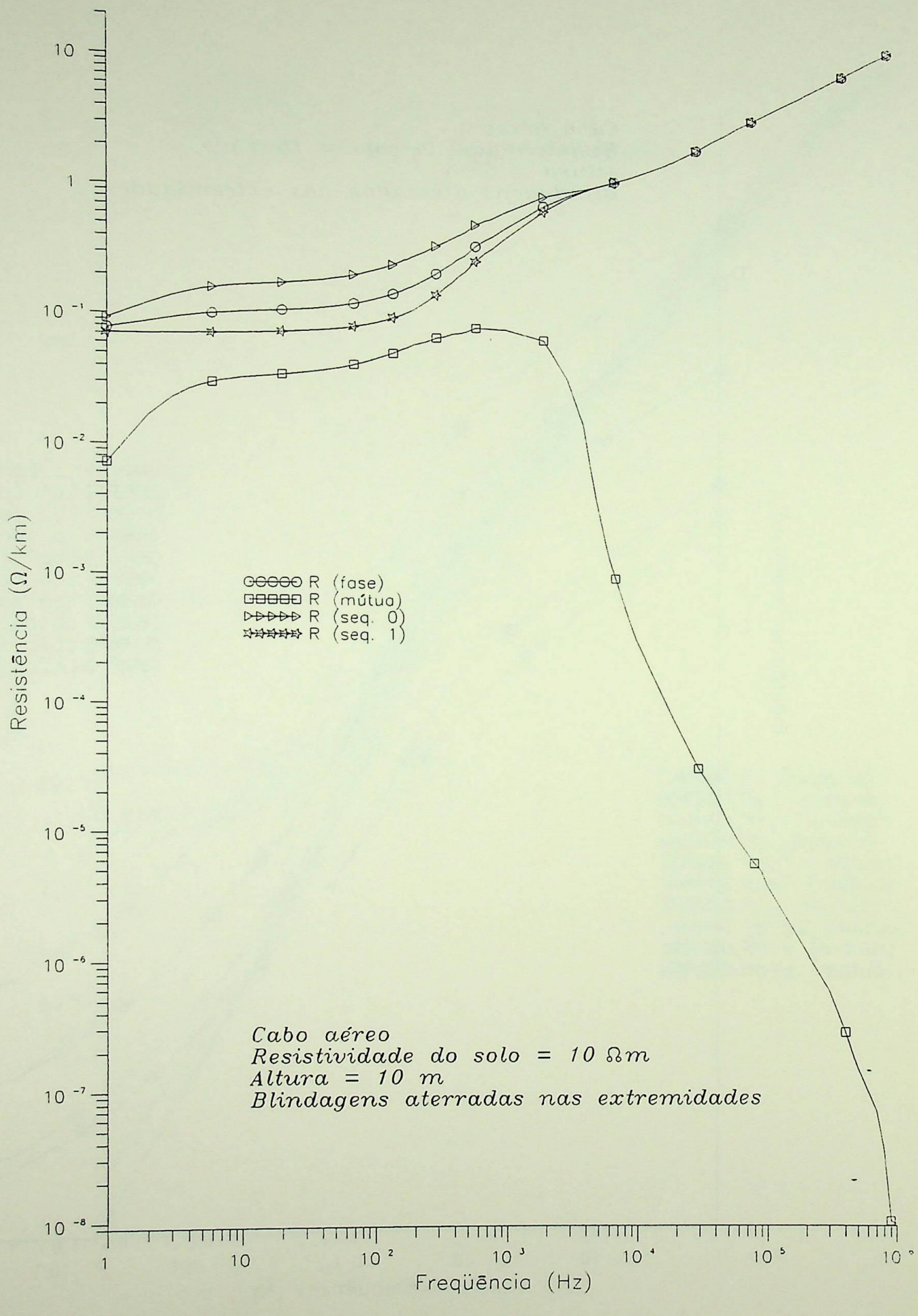



*Figura 8.7 - Comportamento da resistência com a freqüência*

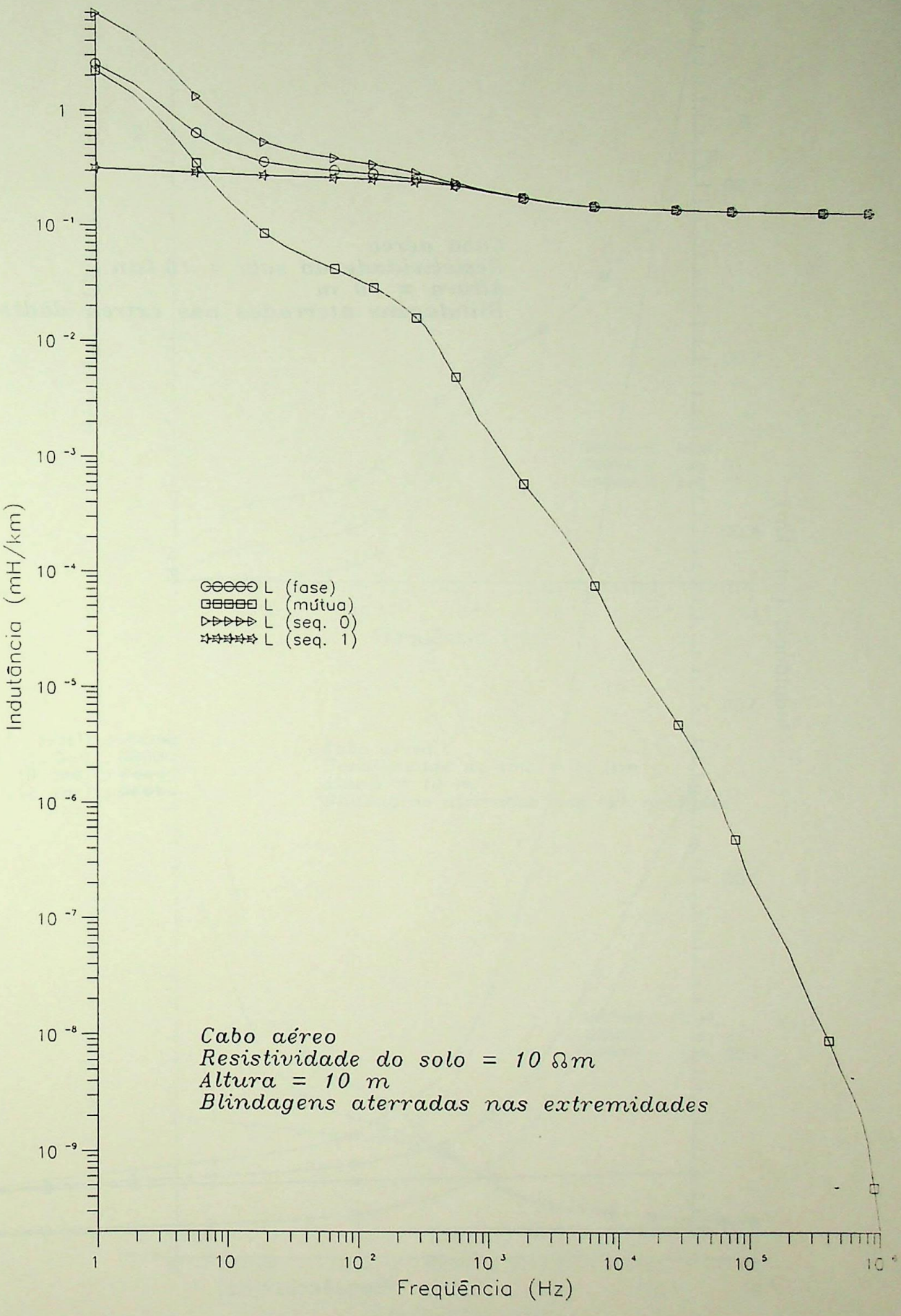



*Figura 8.8 - Comportamento da indutância com a freqüência*

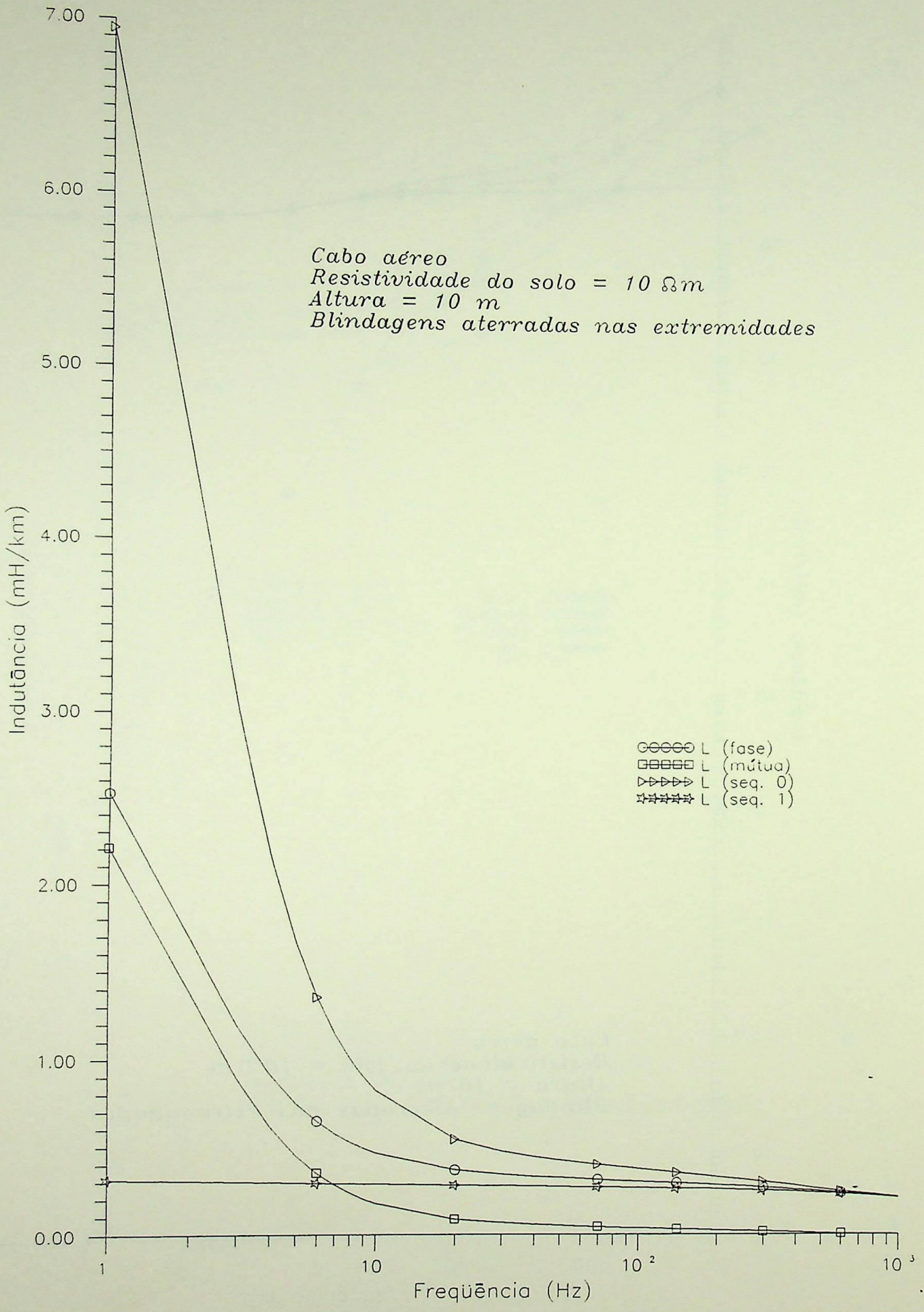



*Figura 8.9 - Comportamento da indutância com a freqüência*

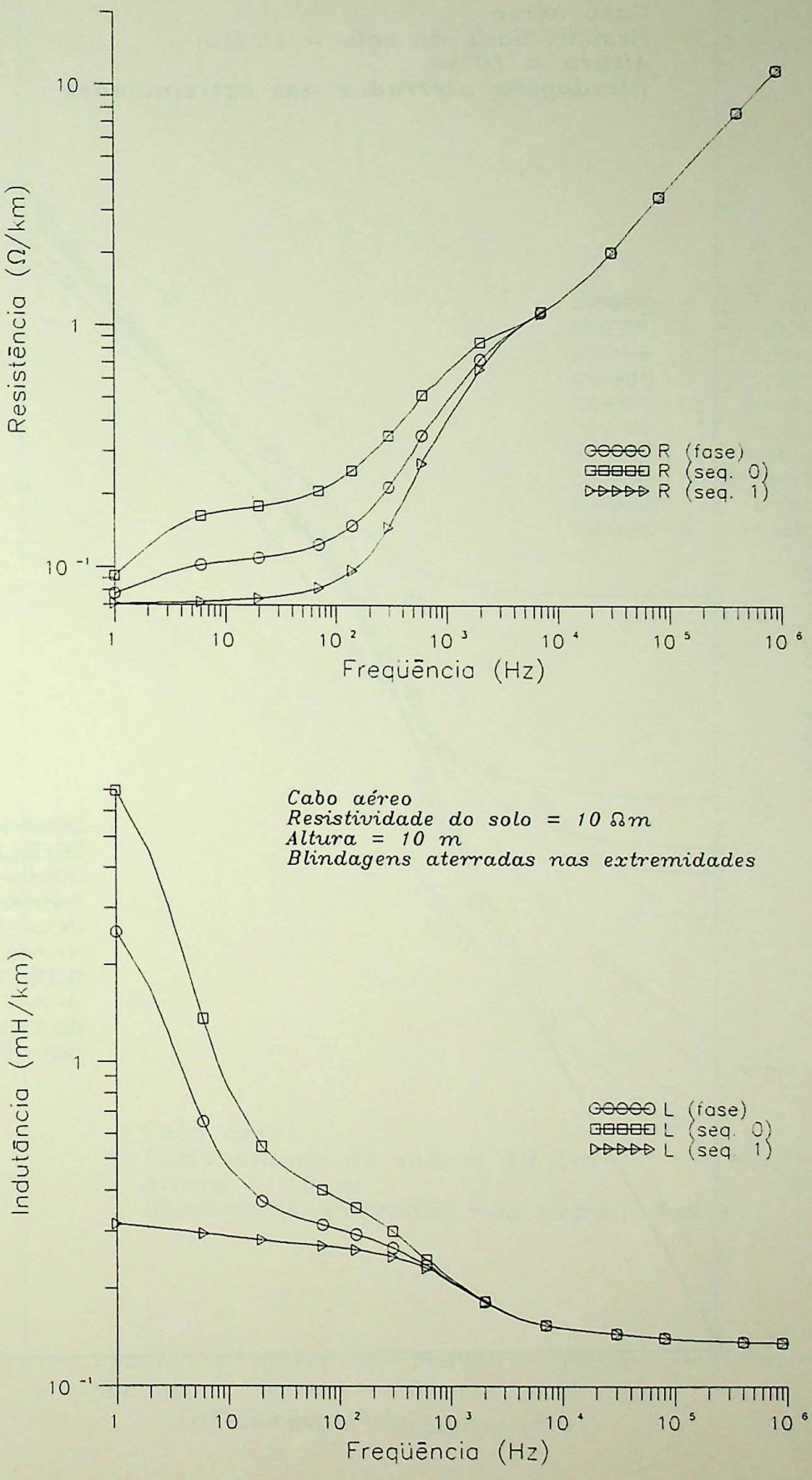



*Figura 8.10* - *Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

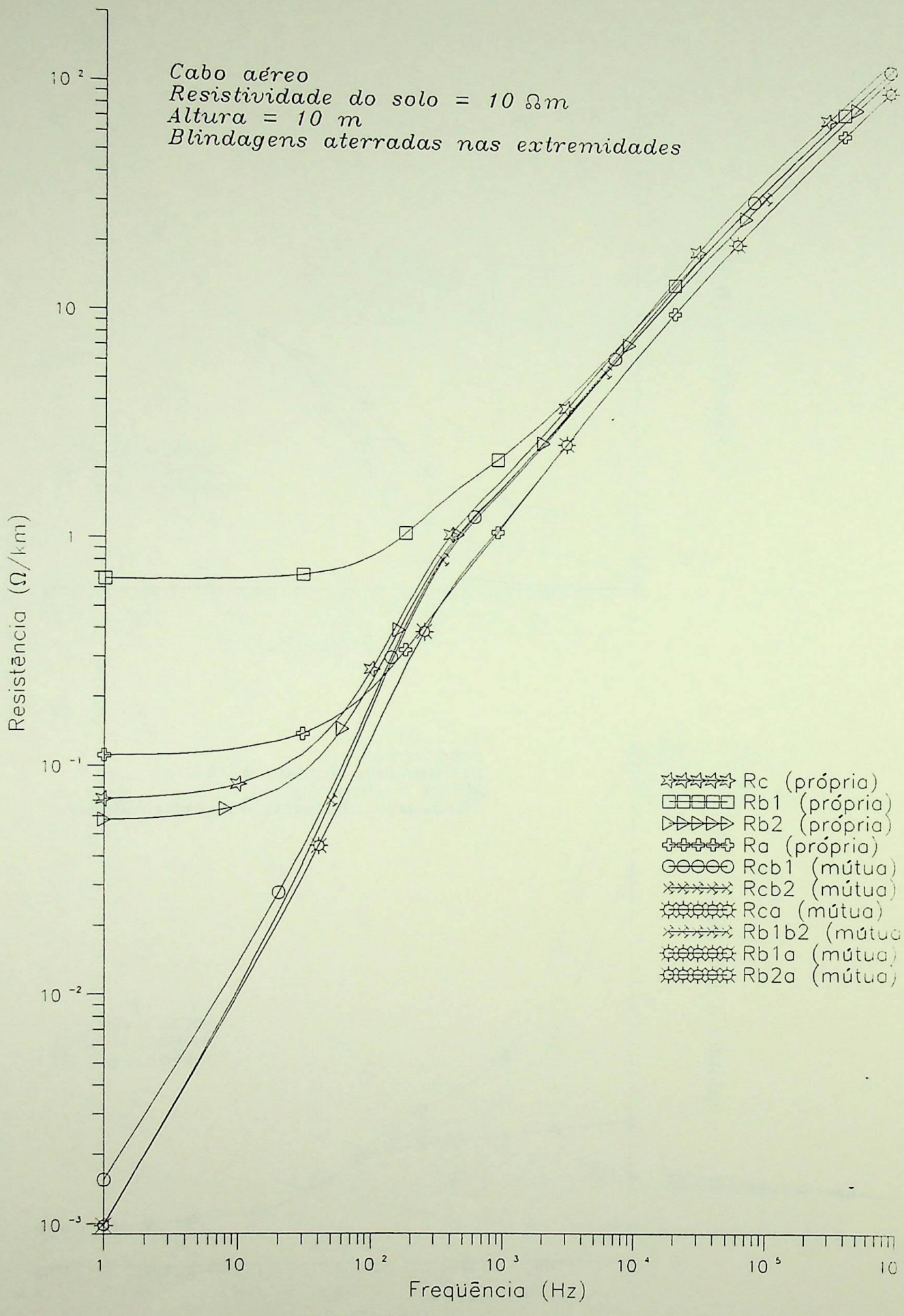



*Figura 8.11* - *Comportamento das resistências próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

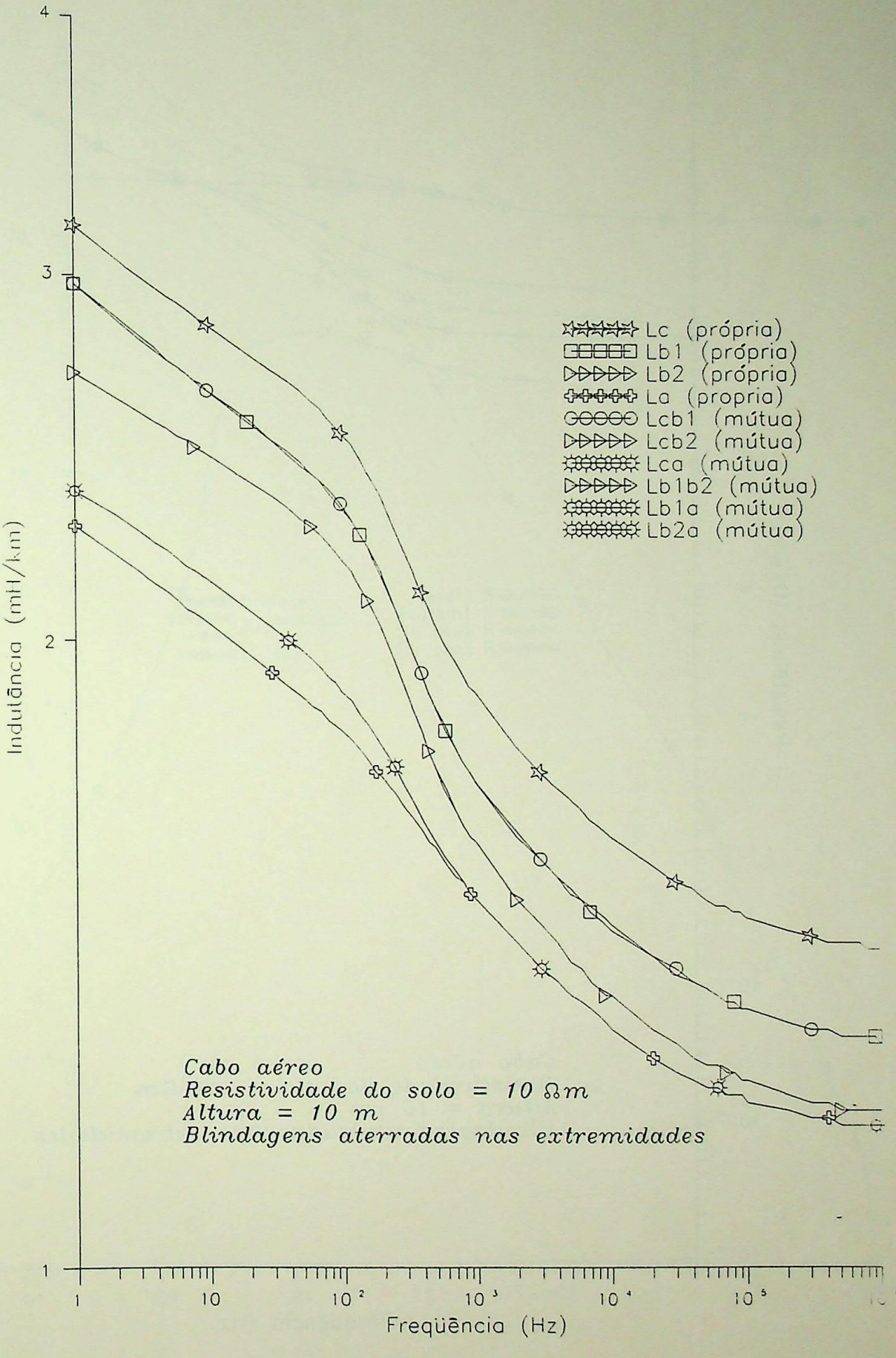



*Figura 8.12* - *Comportamento das indutâncias próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

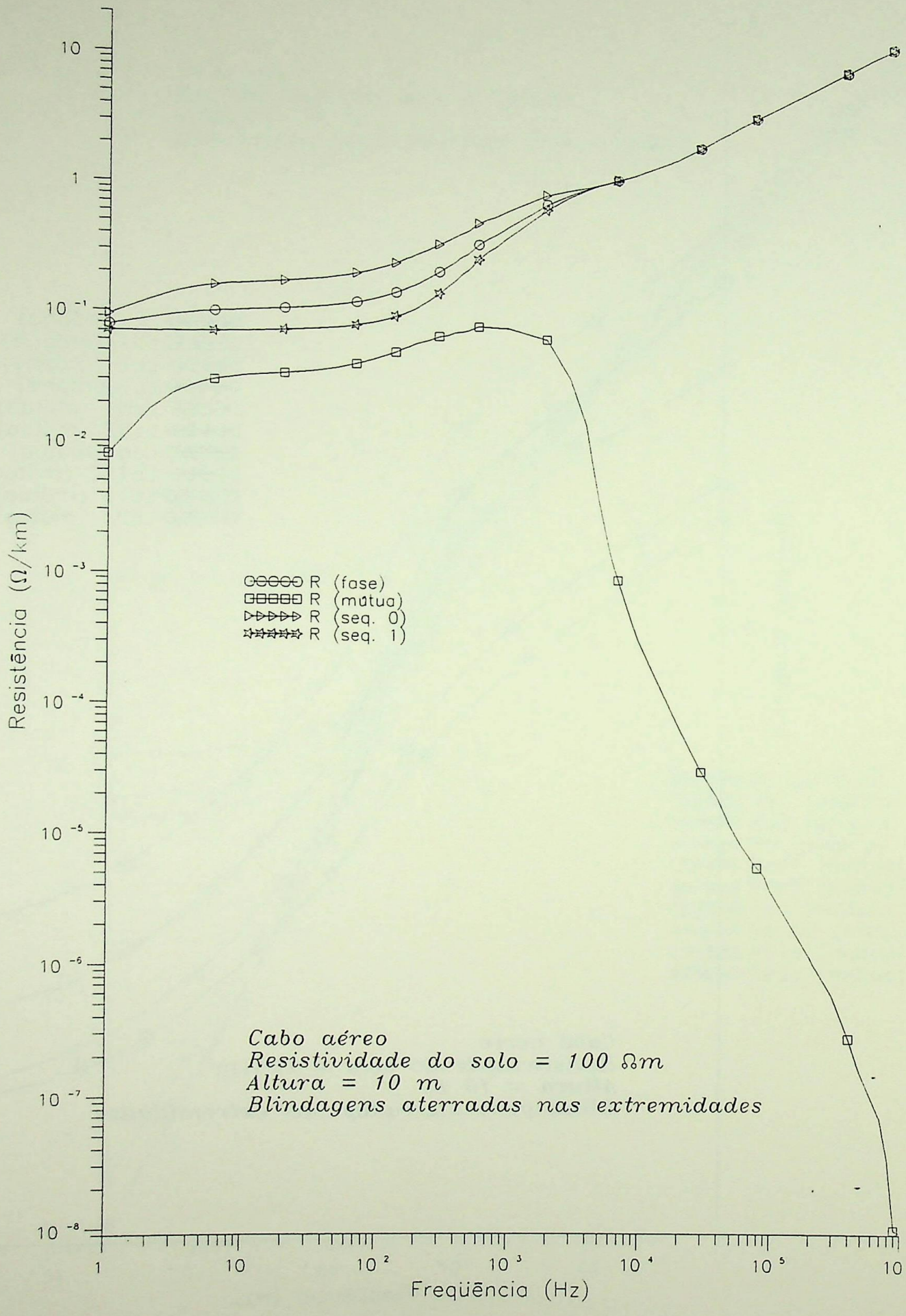



*Figura 8.13 - Comportamento da resistência com a freqüência*

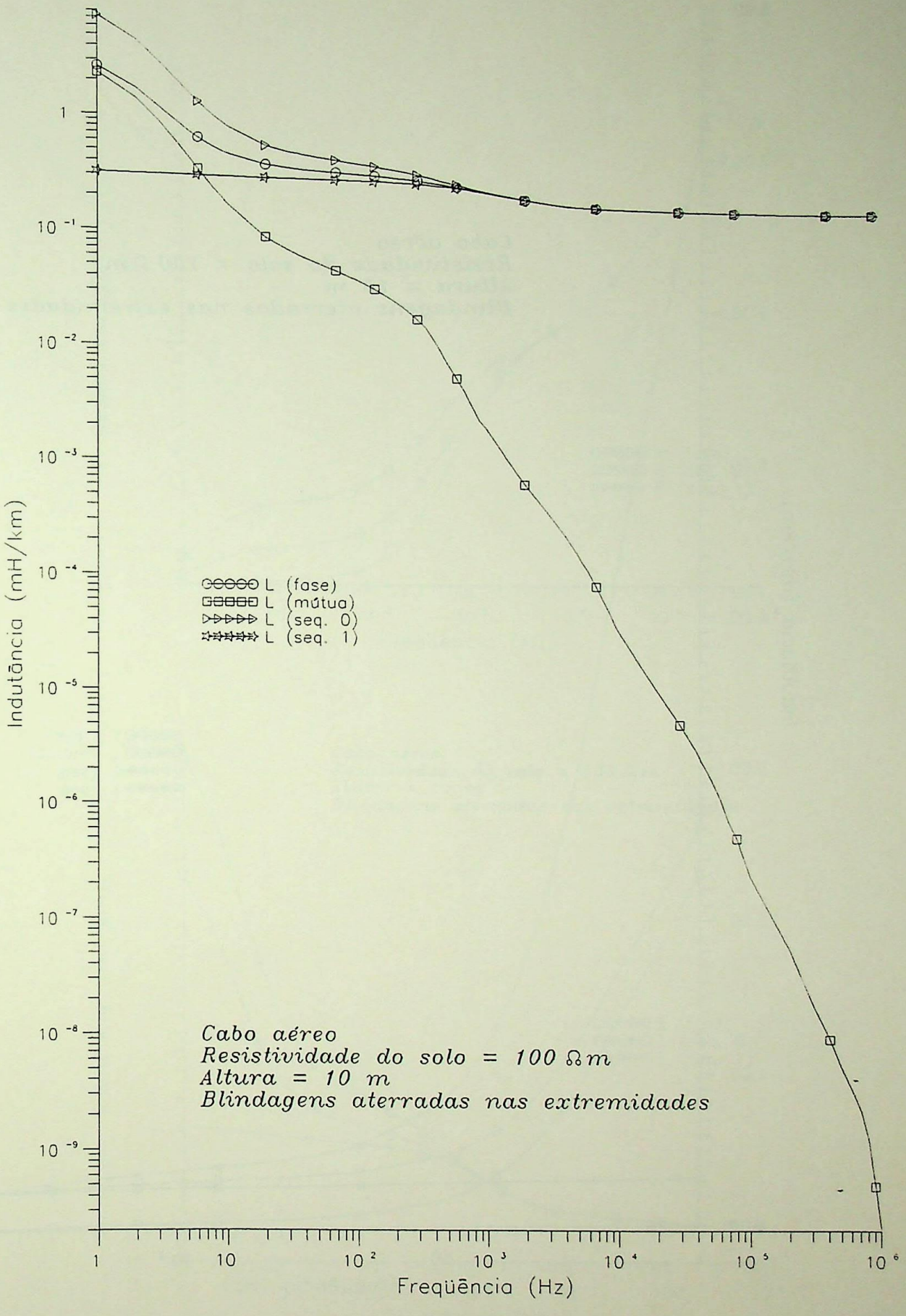



*Figura 8.14* - *Comportamento da indutância com a freqüência*

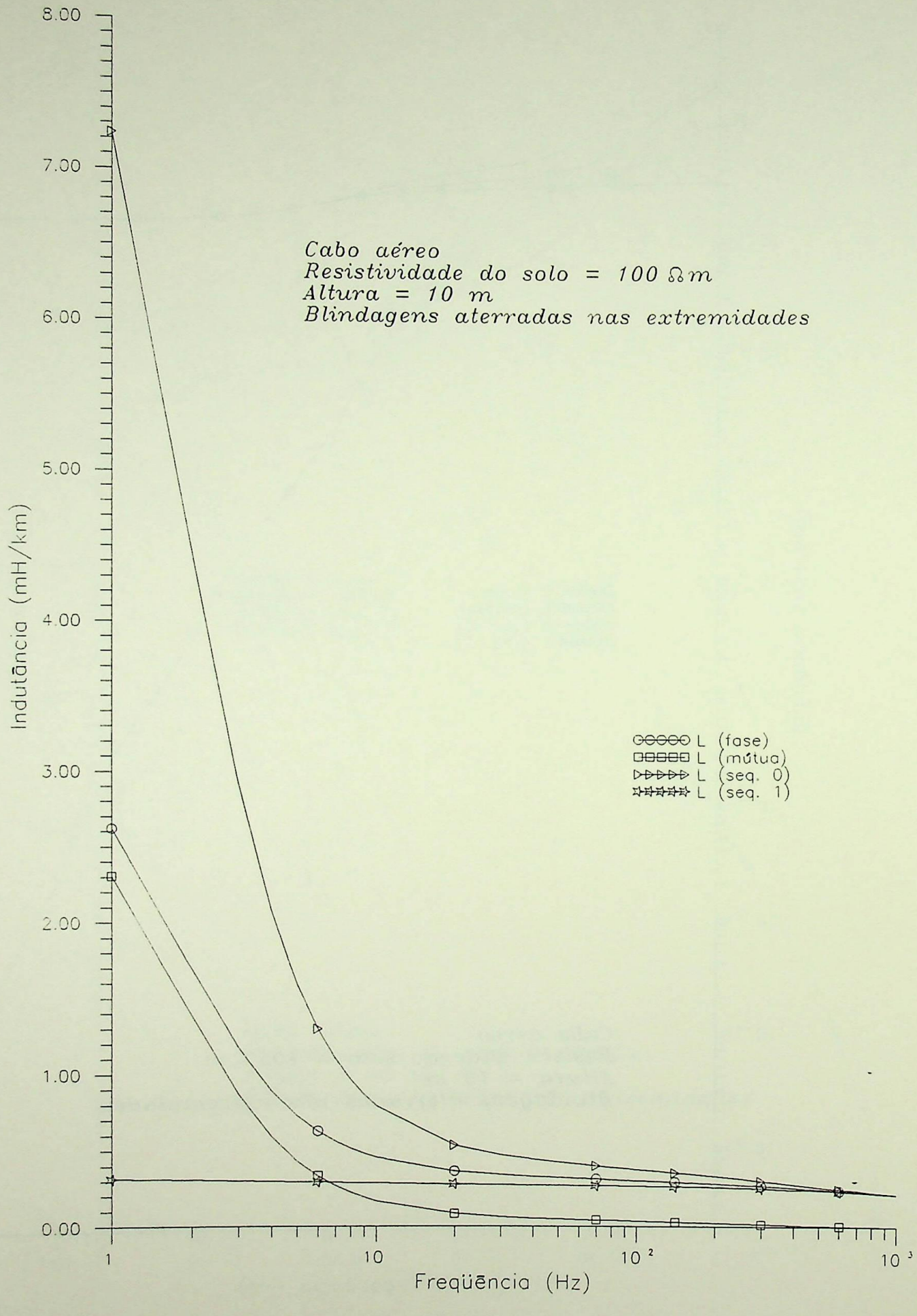



*Figura 8.15 - Comportamento da indutância com a freqüência*

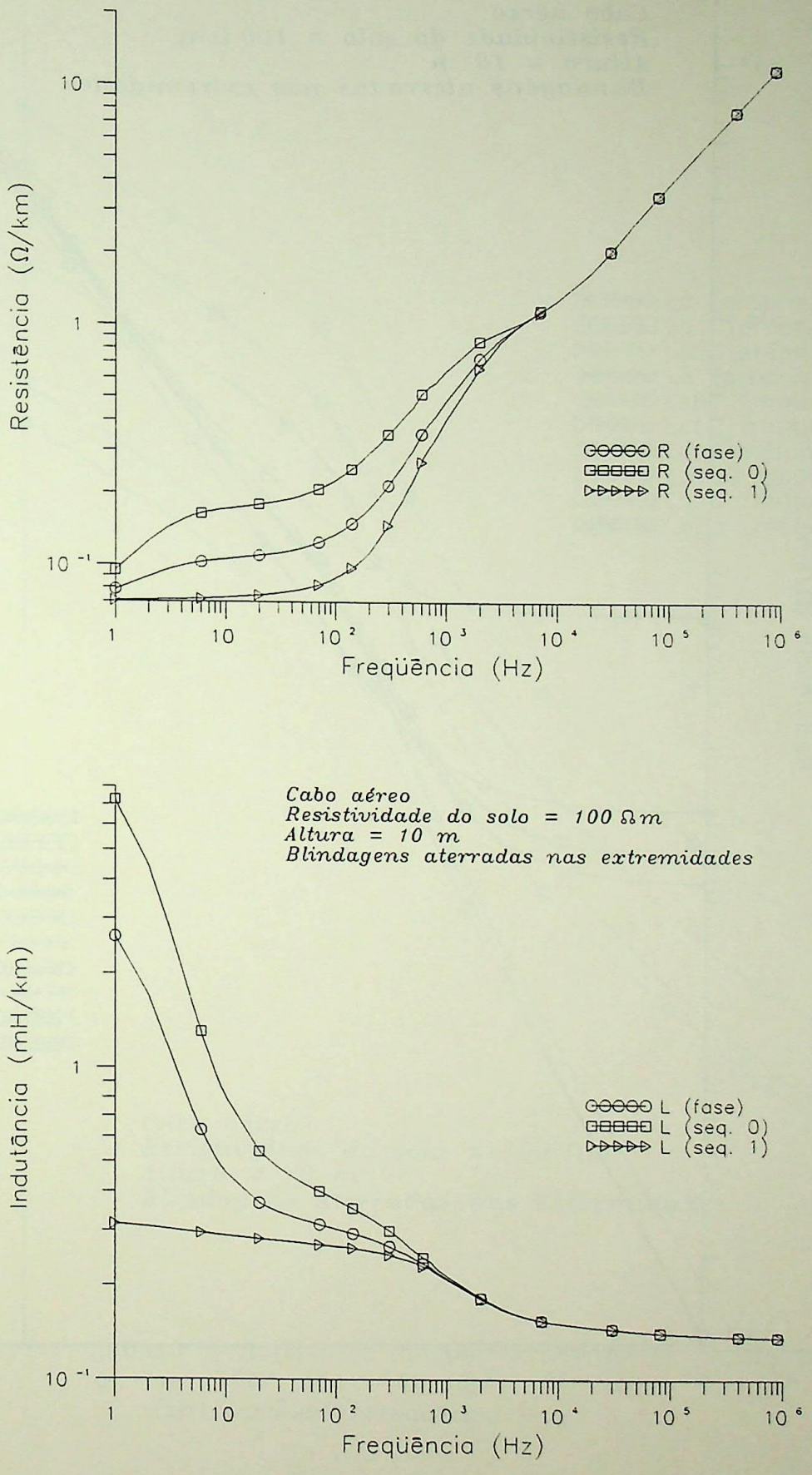



*Figura 8.16* - *Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

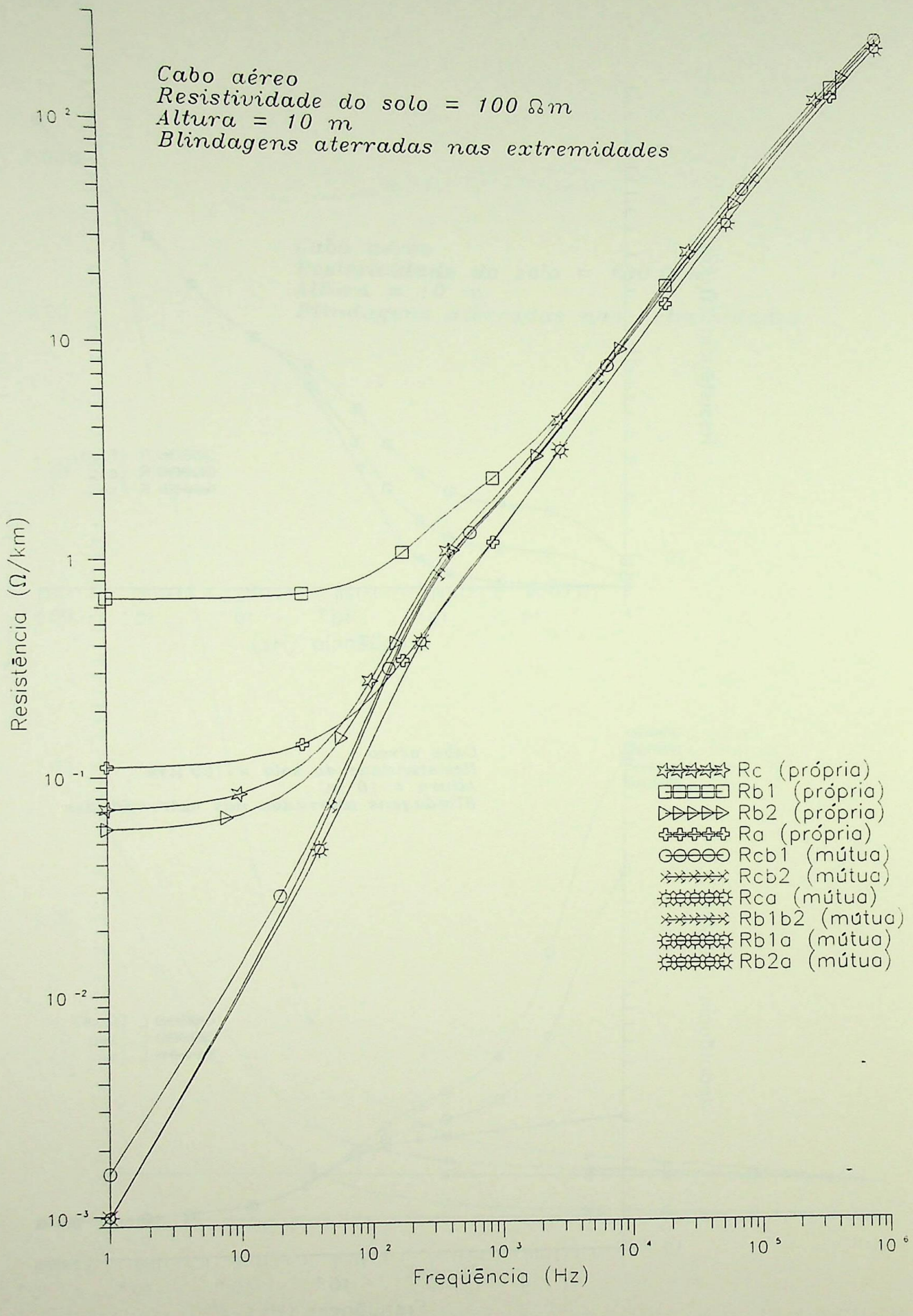



*Figura 8.17* - Comportamento das resistências próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo

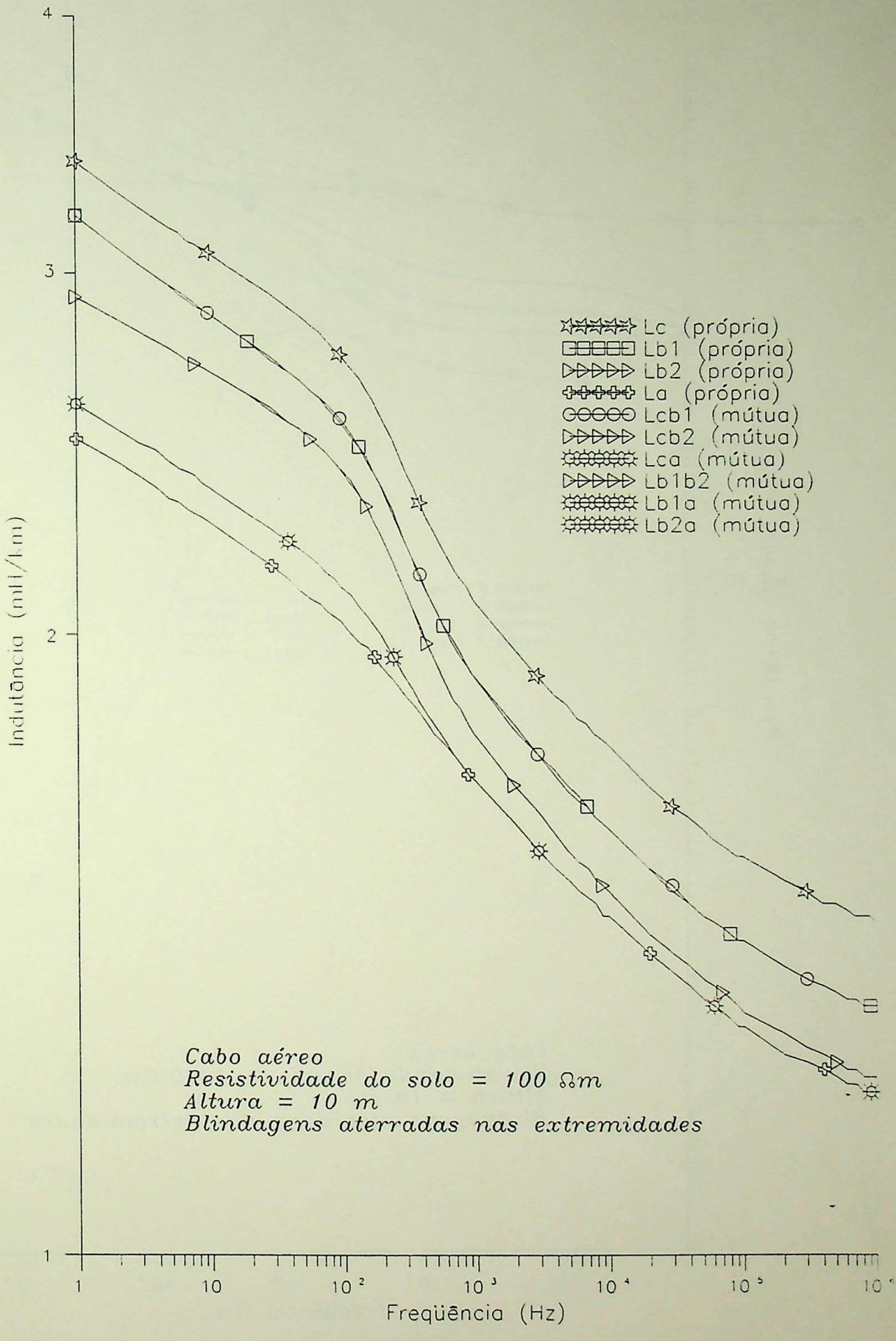



*Figura 8.18* - *Comportamento das indutâncias próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

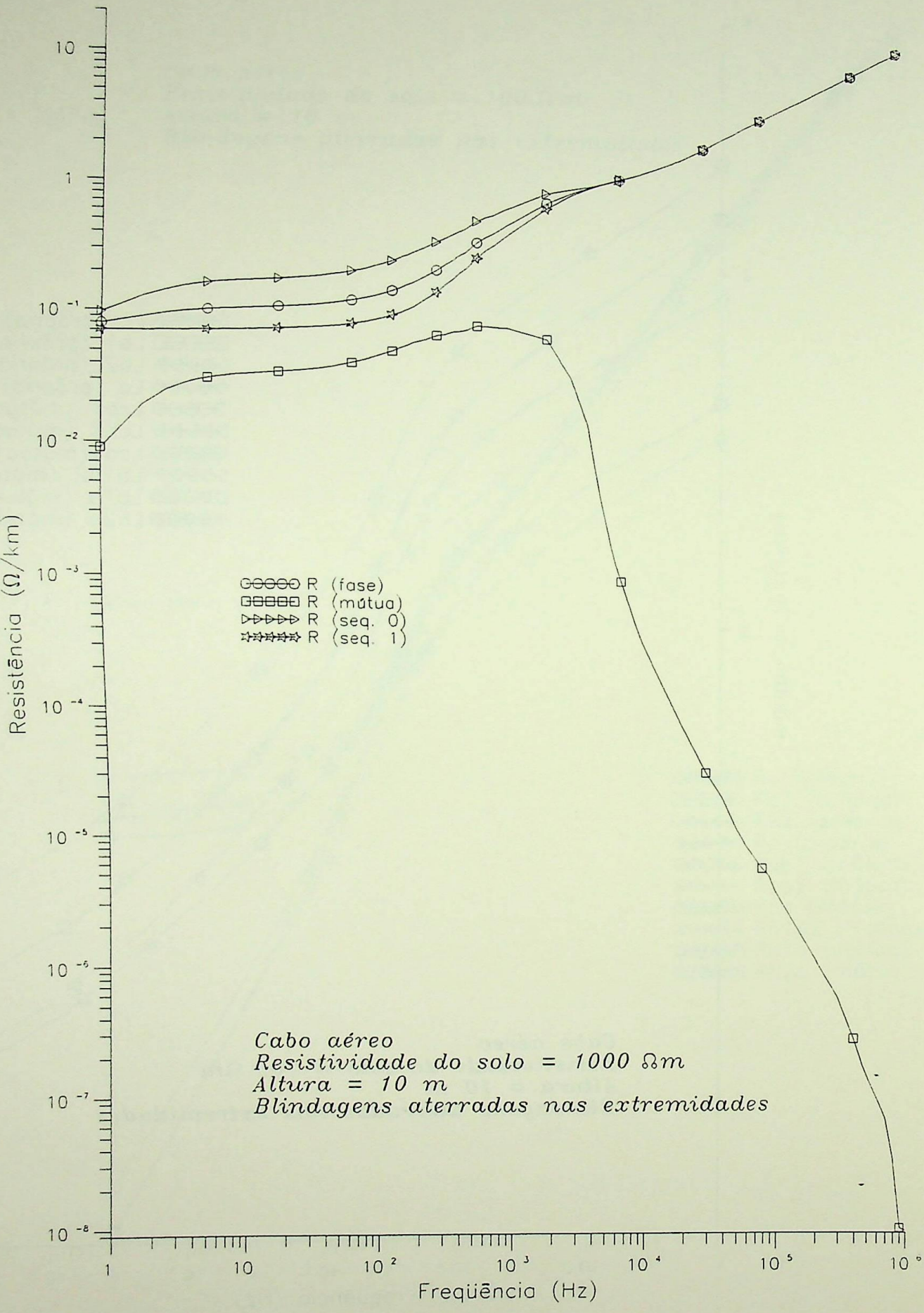



*Figura 8.19 - Comportamento da resistência com a freqüência*

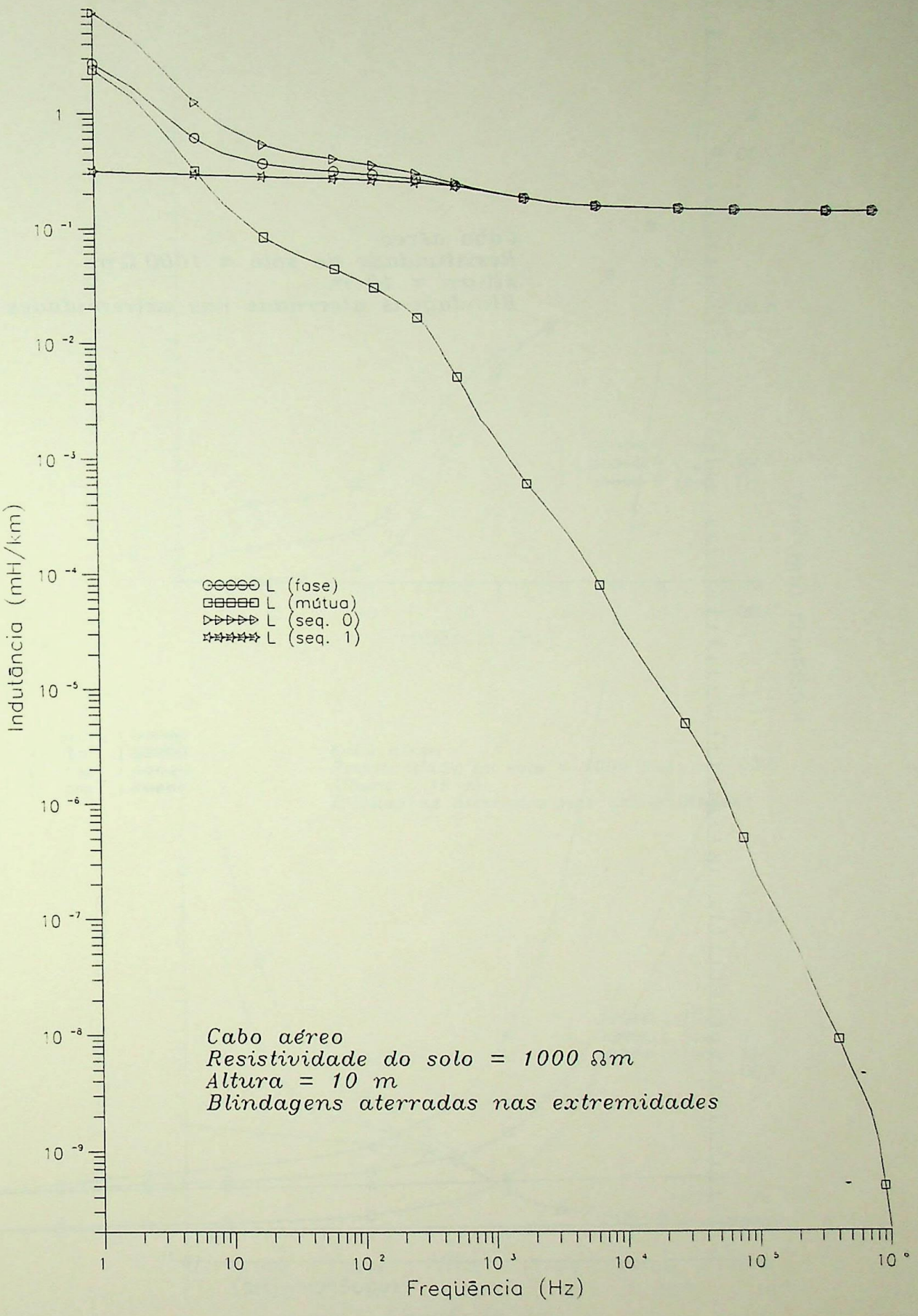



*Figura 8.20* - *Comportamento da indutância com a freqüência*

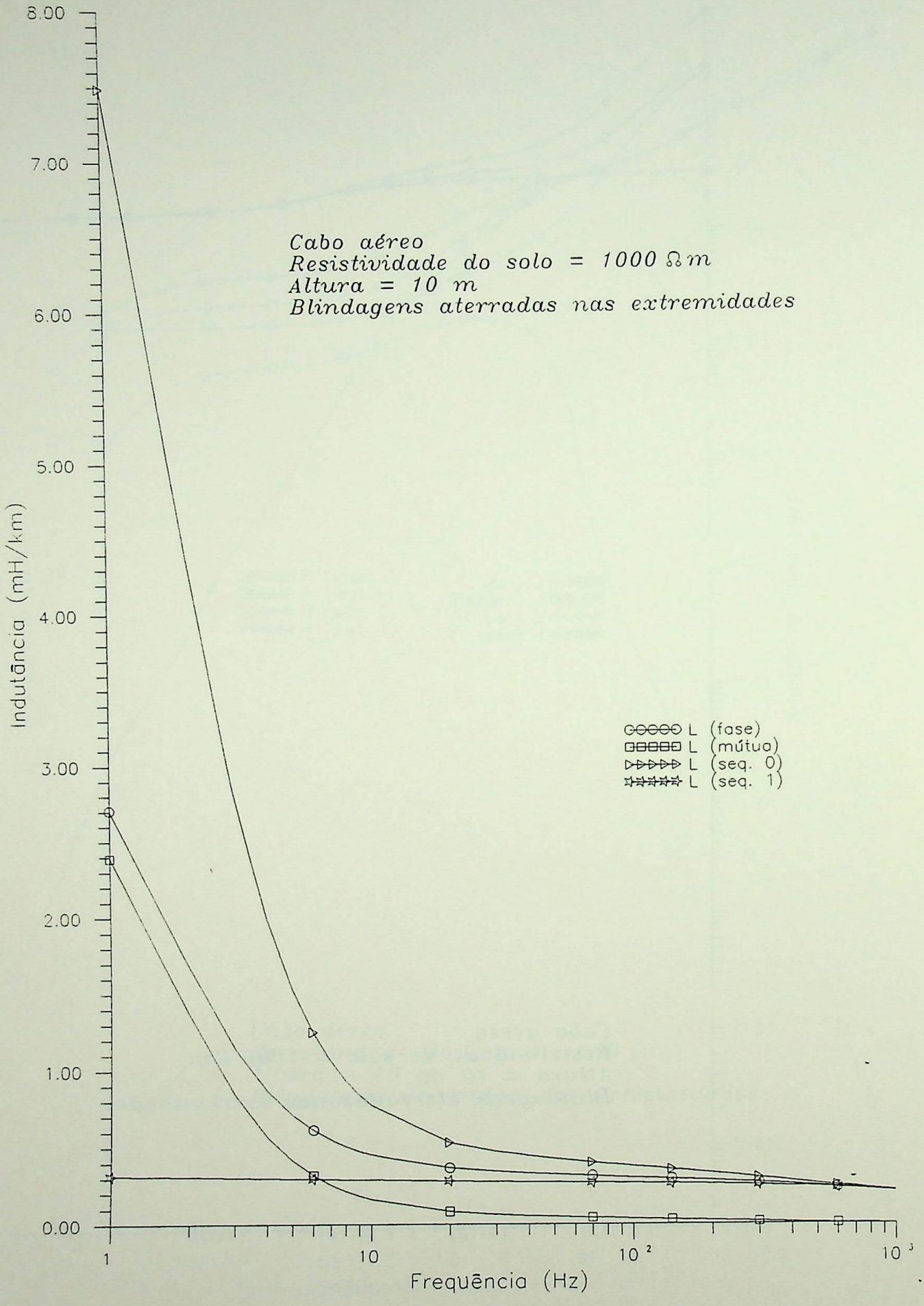



*Figura 8.21 - Comportamento da indutância com a freqüência*

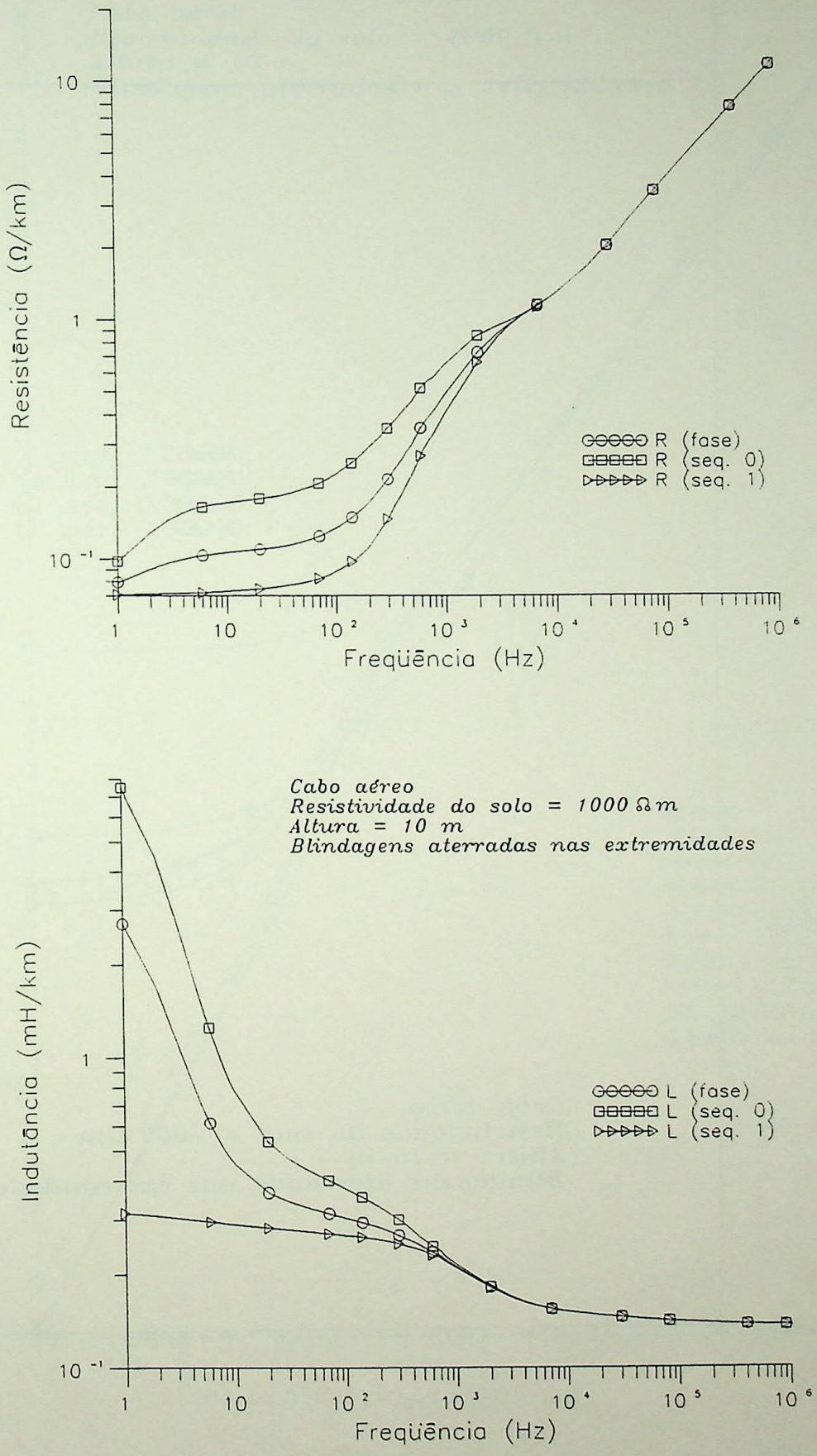



*Figura 8.22* - *Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

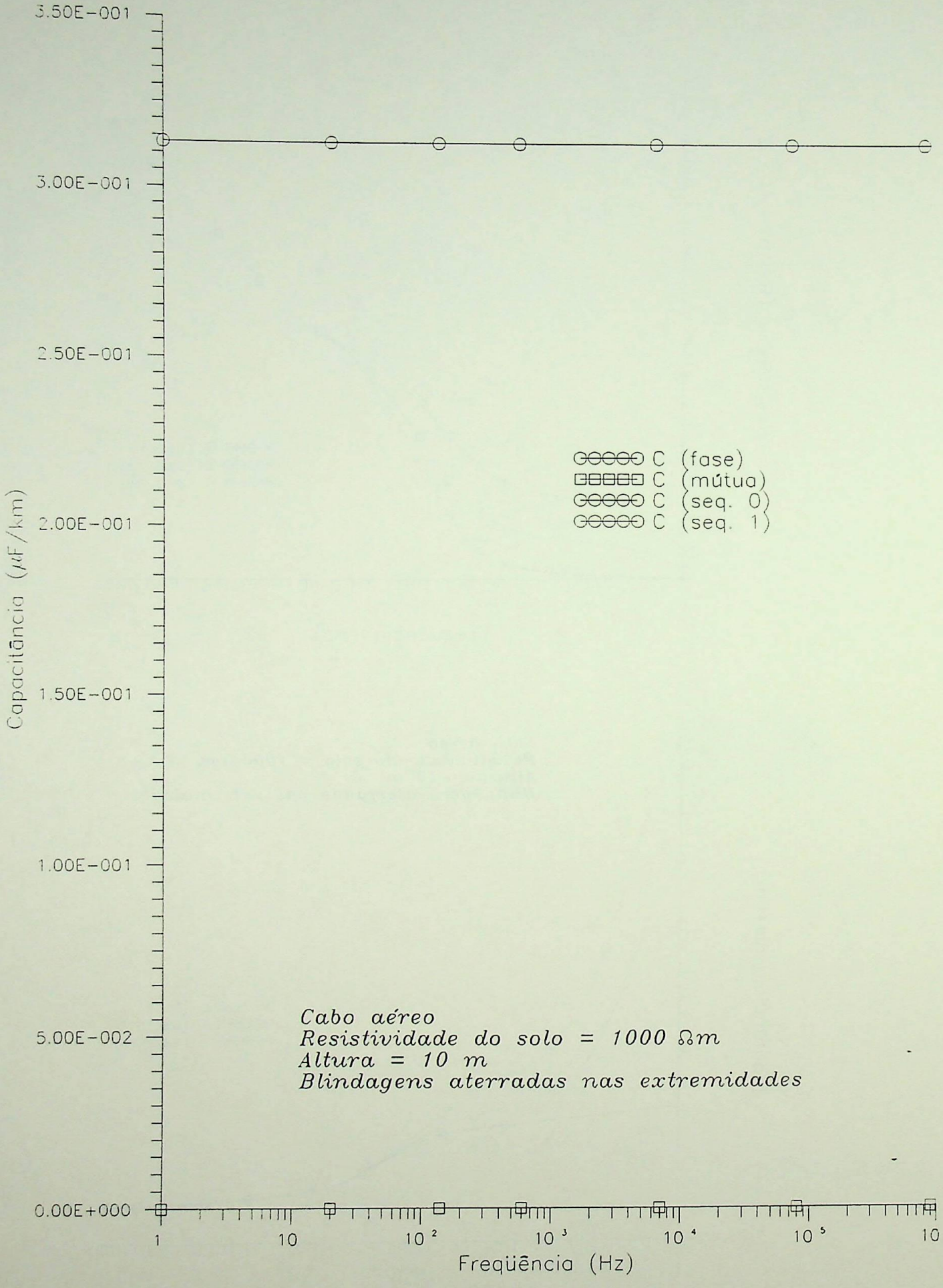



*Figura 8.23 - Comportamento da capacitância com a freqüência*

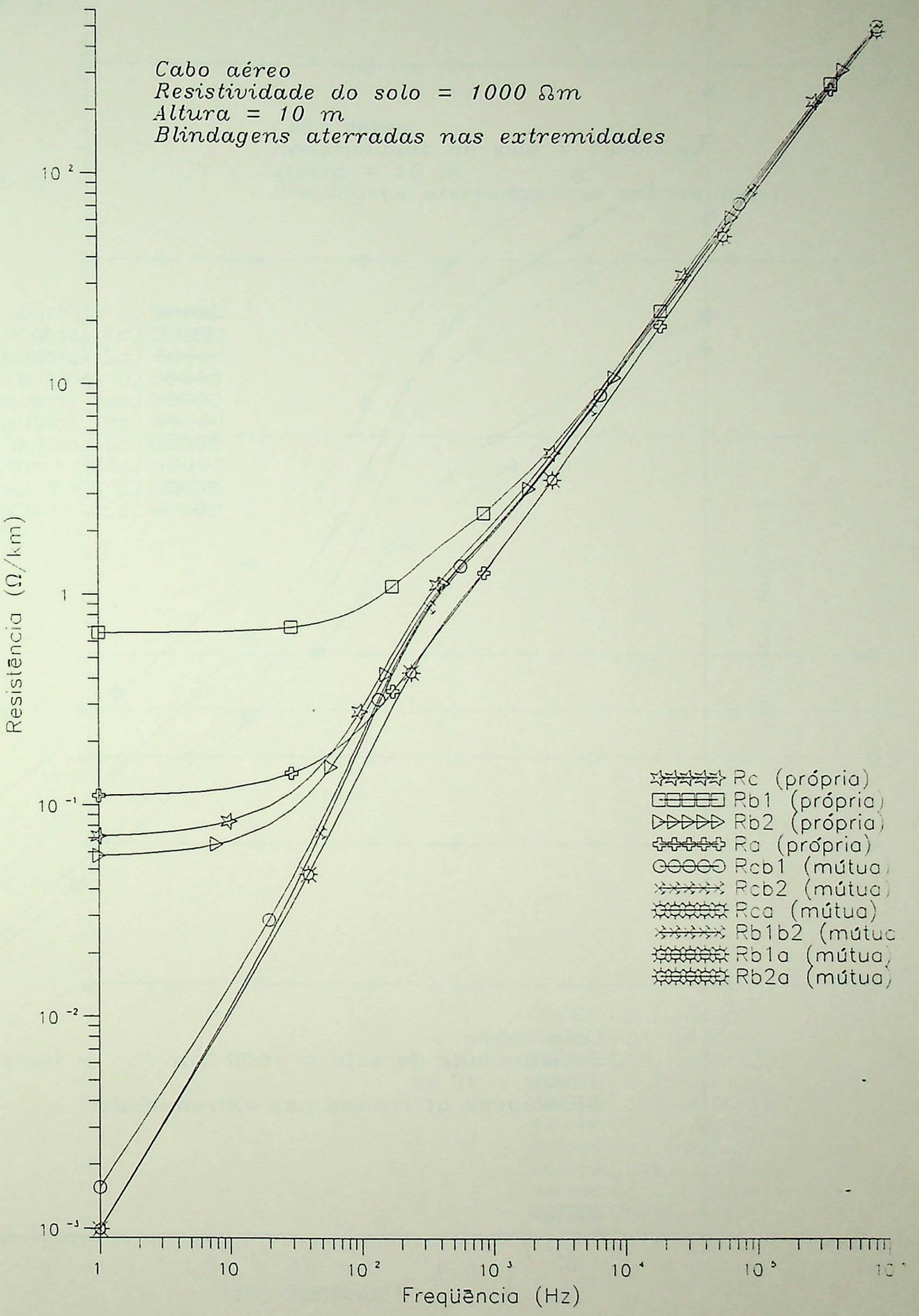



*Figura 8.24* - *Comportamento das resistências próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

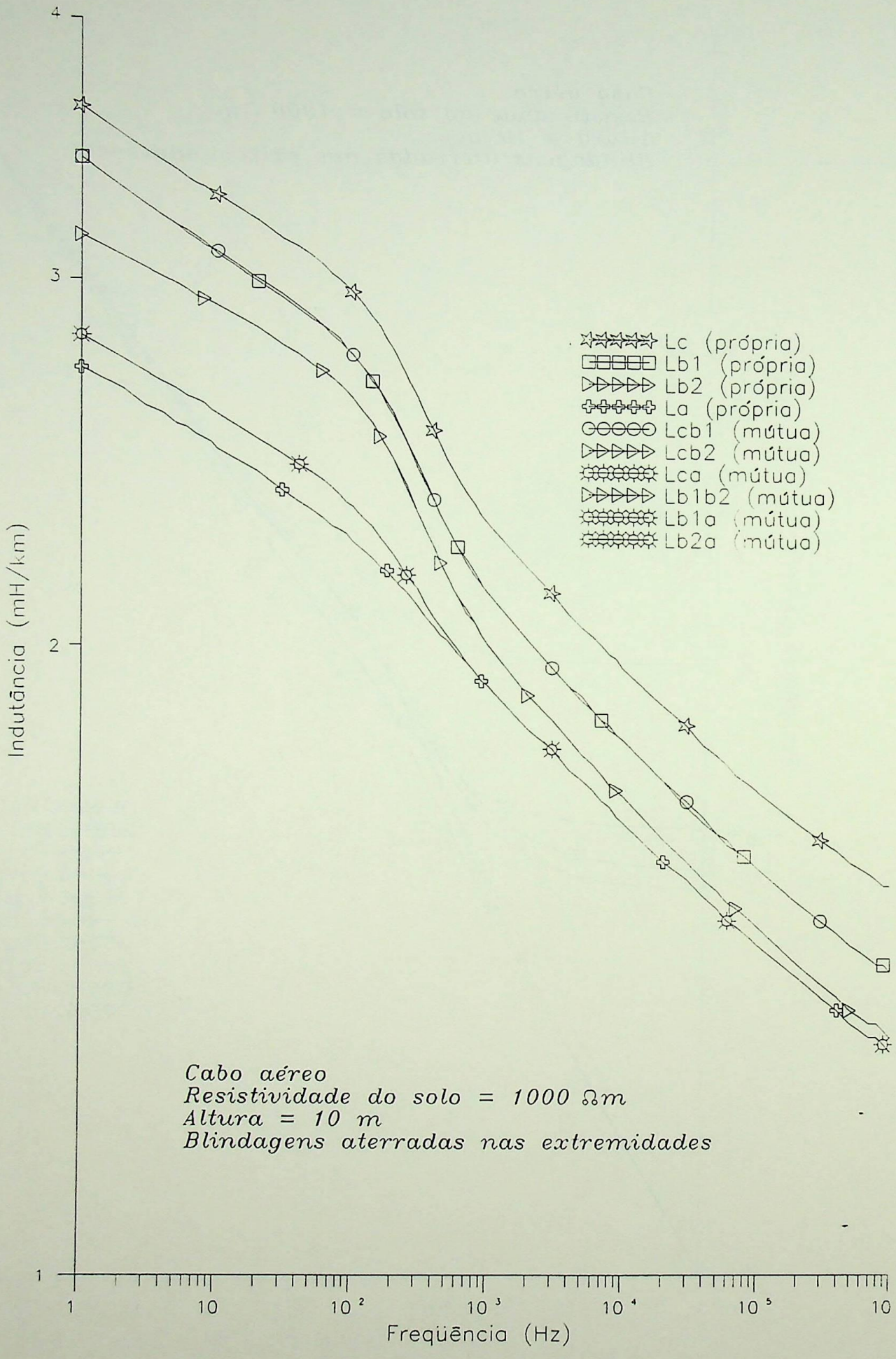



*Figura 8.25* - *Comportamento das indutâncias próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

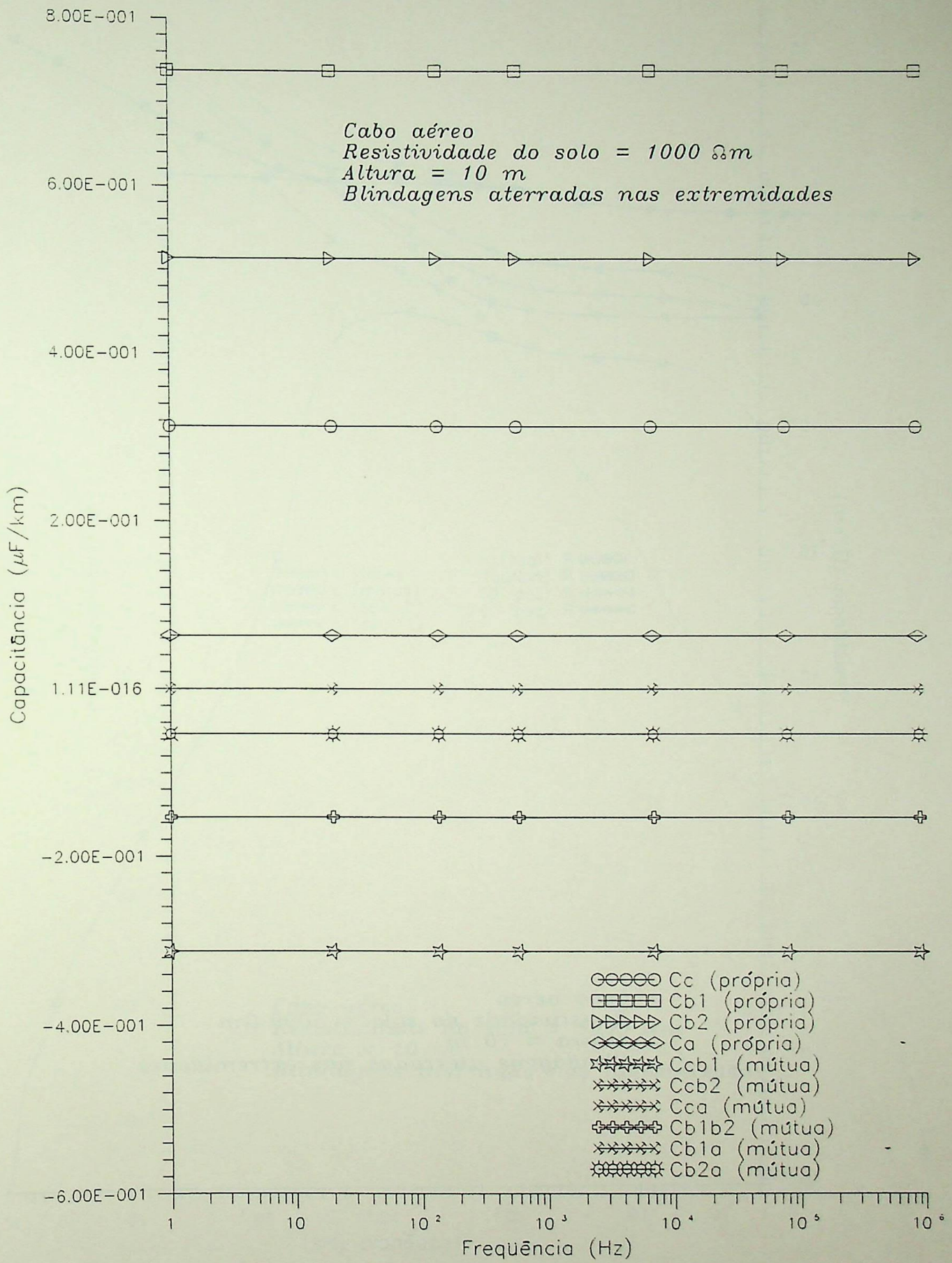



*Figura 8.26* - *Comportamento das capacitancias próprias e mútuas das camadas isolantes do cabo*

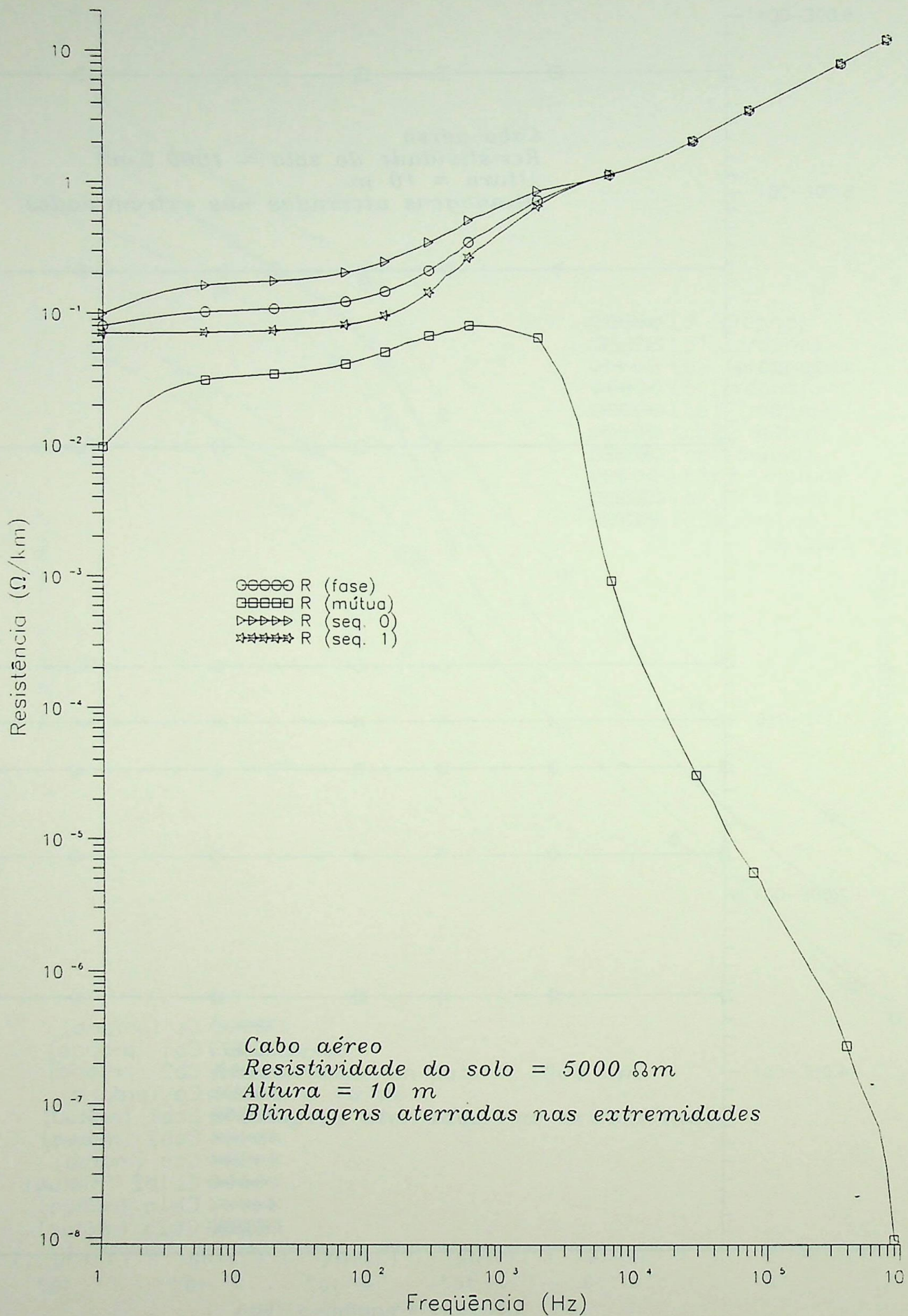



*Figura 8.27* - *Comportamento da resistência com a freqüência*

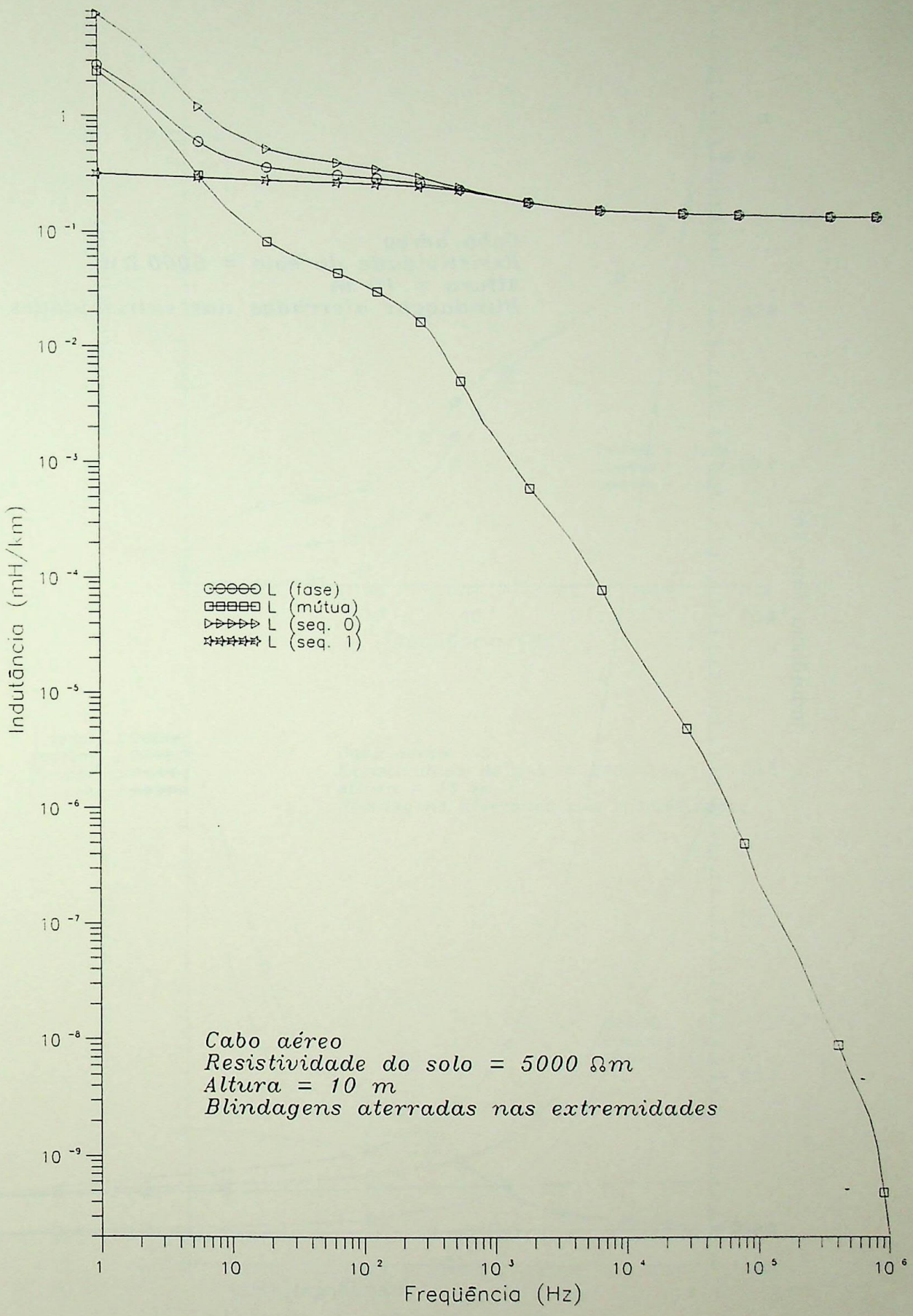



*Figura 8.28 - Comportamento da indutância com a freqüência*

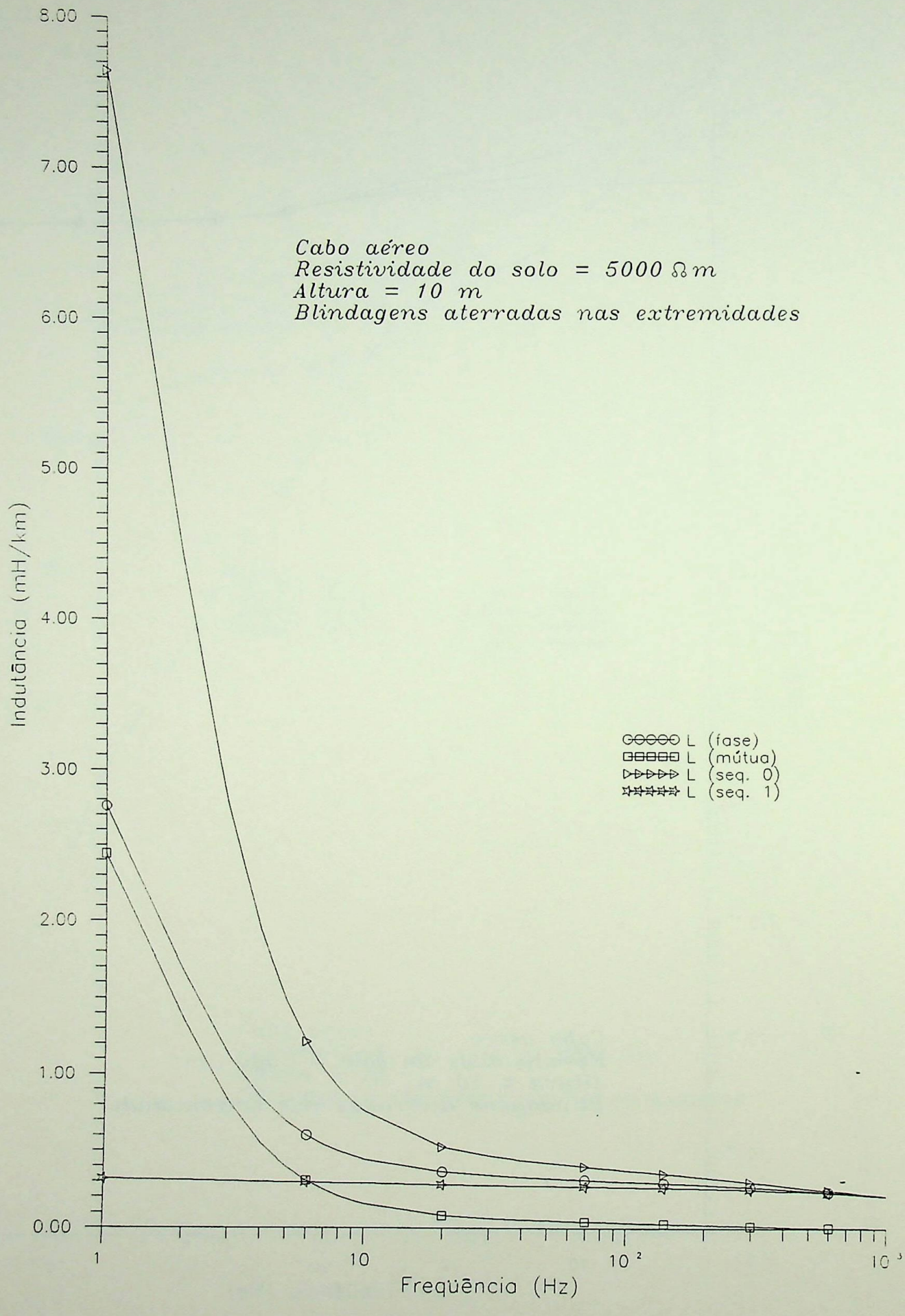



*Figura 8.29* - *Comportamento da indutância com a freqüência*

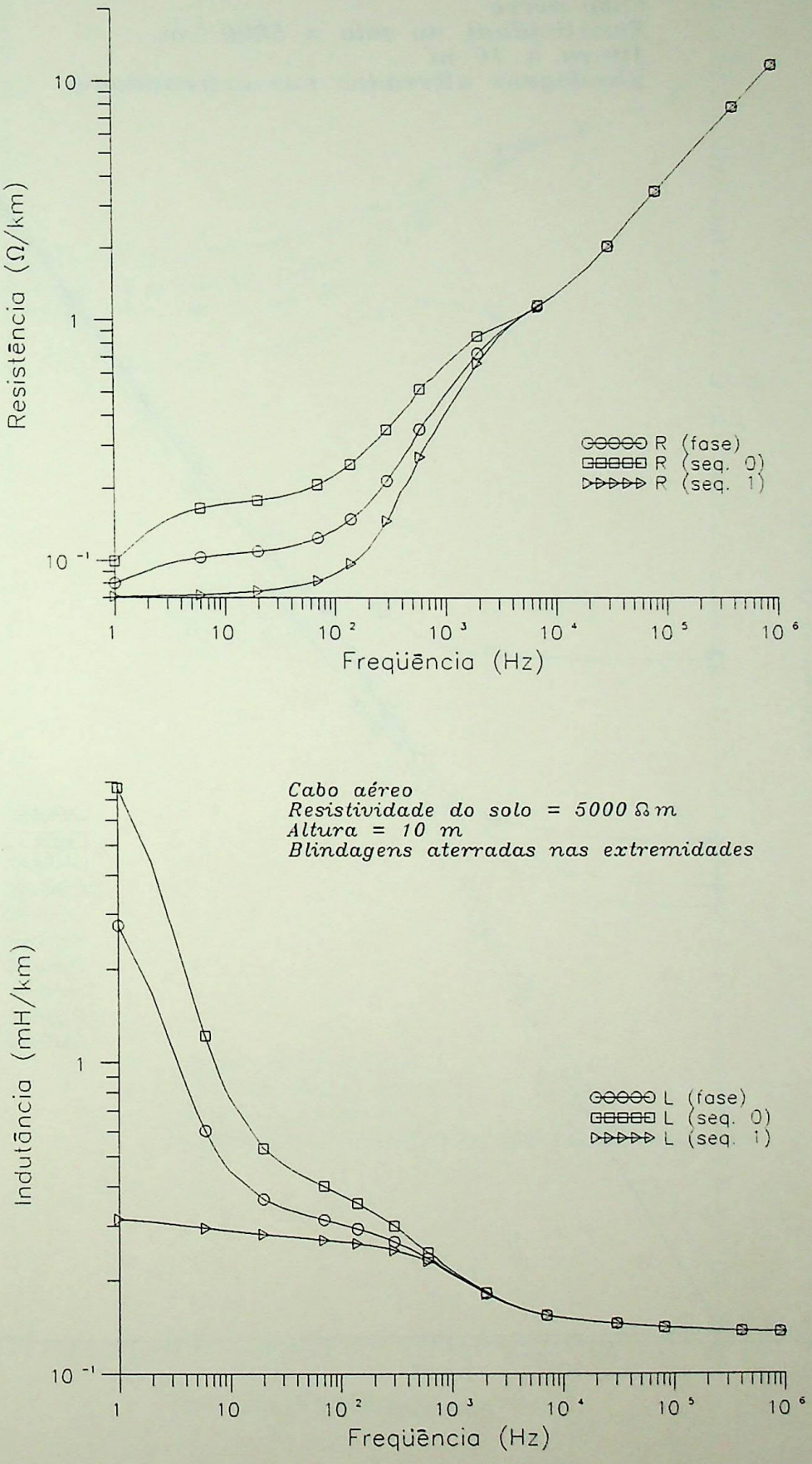



*Figura 8.30* - *Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

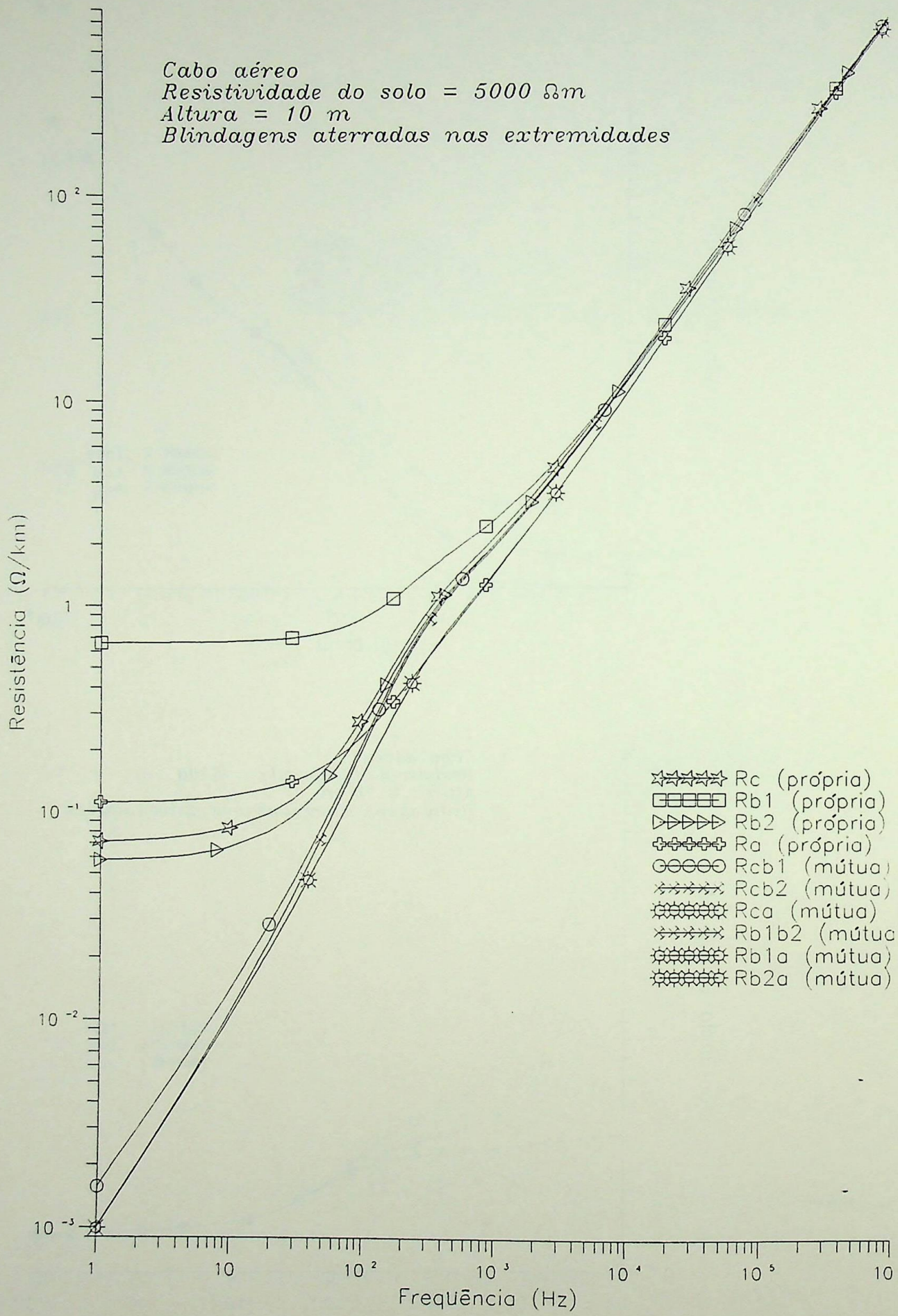



*Figura 8.31* - Comportamento das resistências próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo

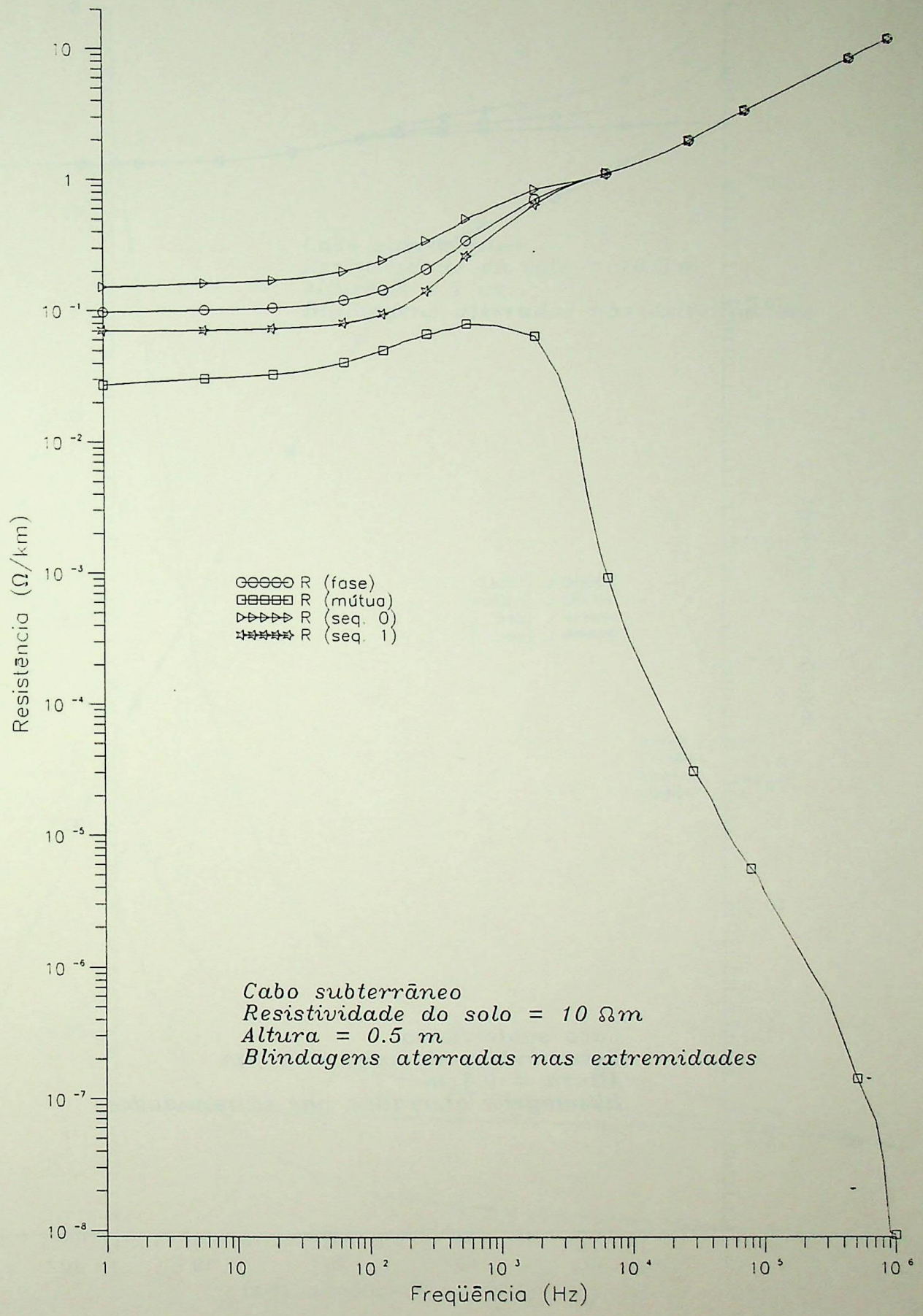



*Figura 8.32* - *Comportamento da resistência com a freqüência*

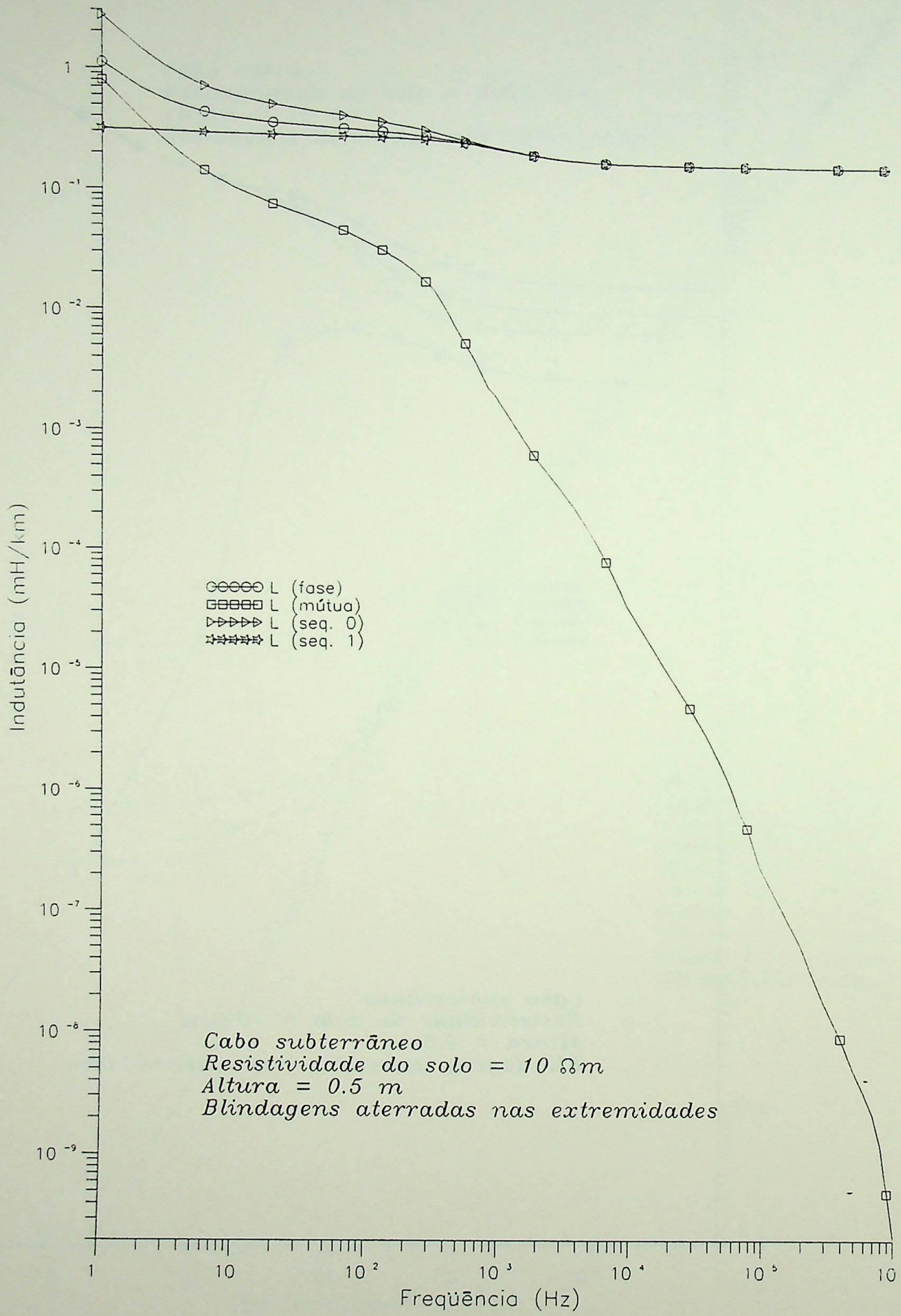



*Figura 8.33 - Comportamento da indutância com a freqüência*

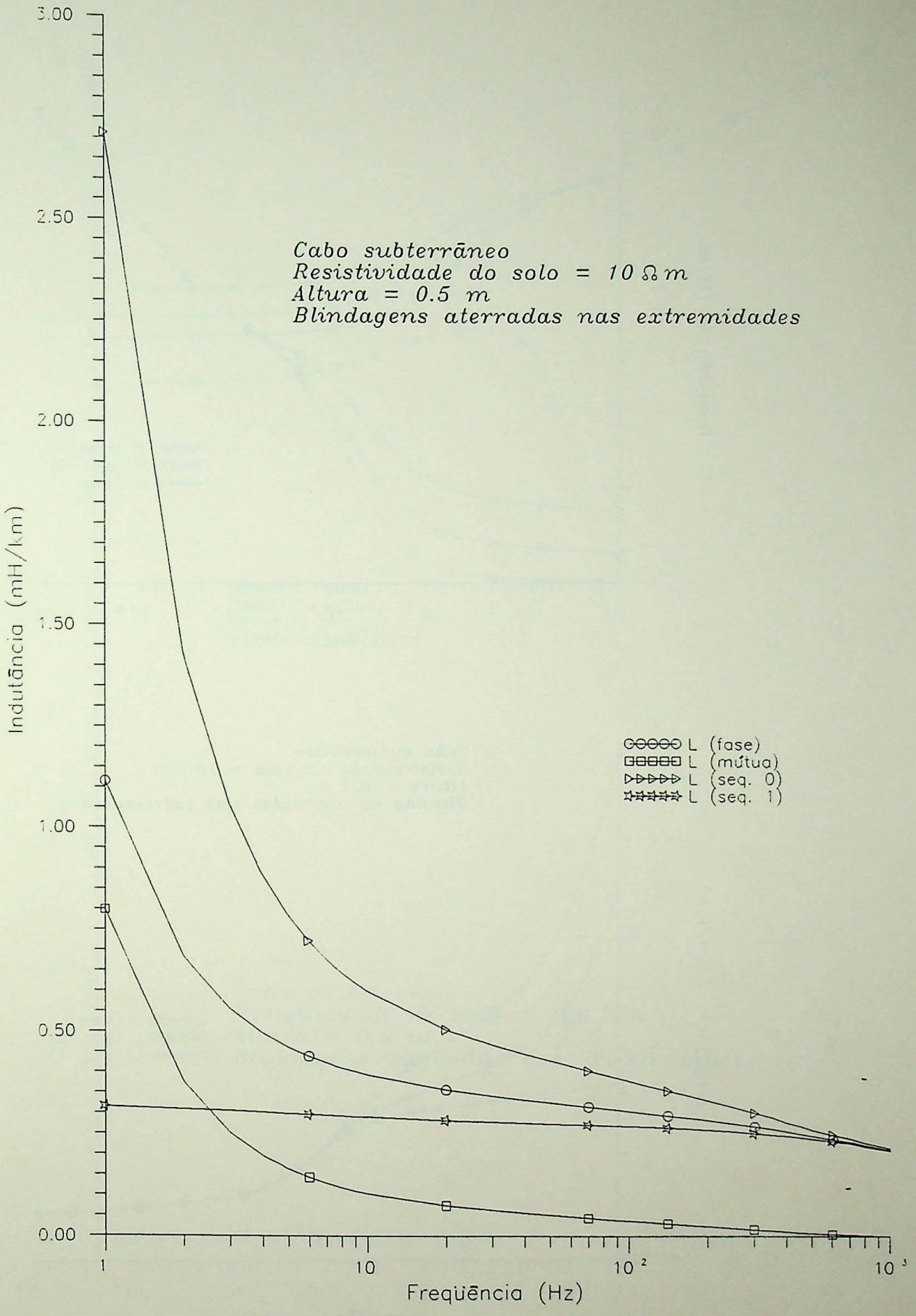
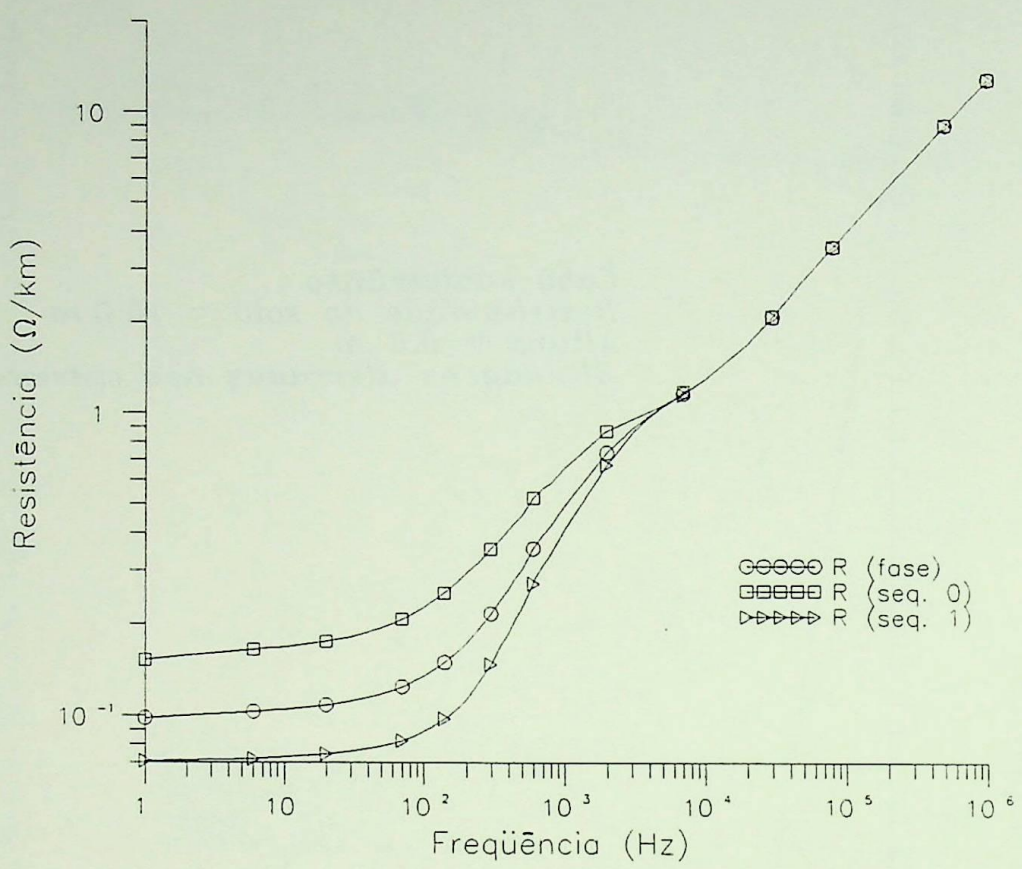



*Figura 8.34* - *Comportamento da indutância com a freqüência*



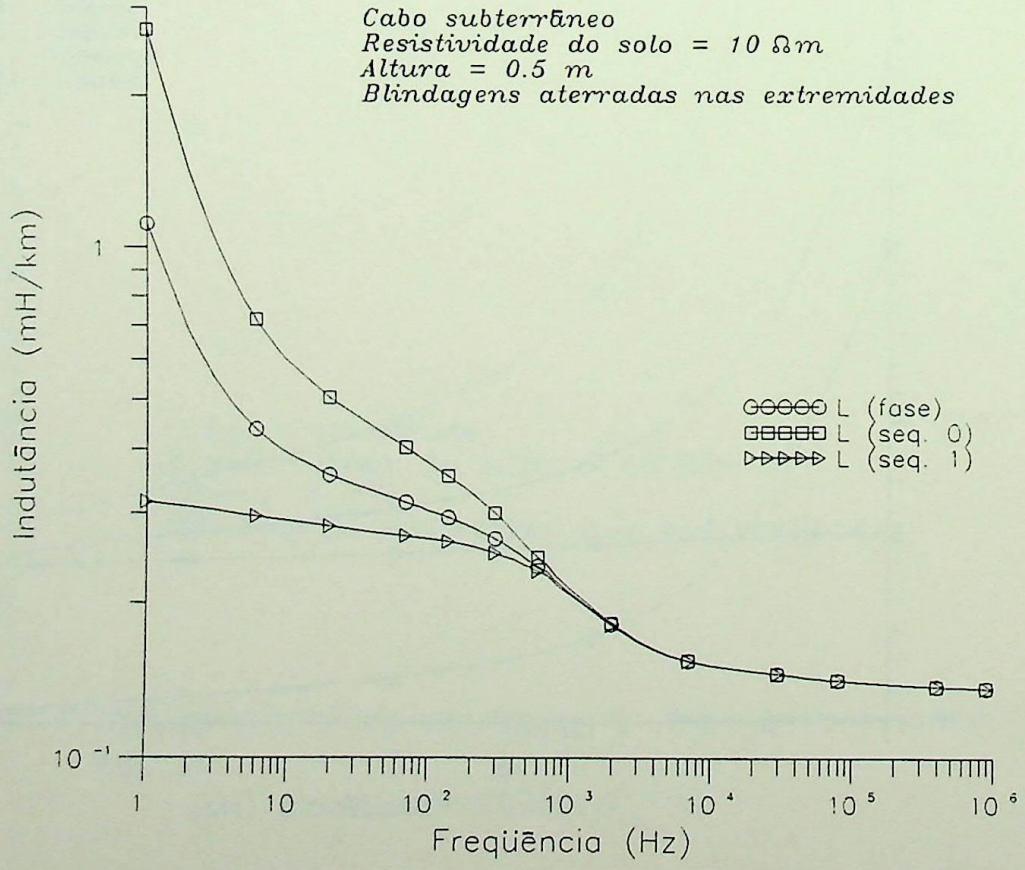




*Figura 8.35 - Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

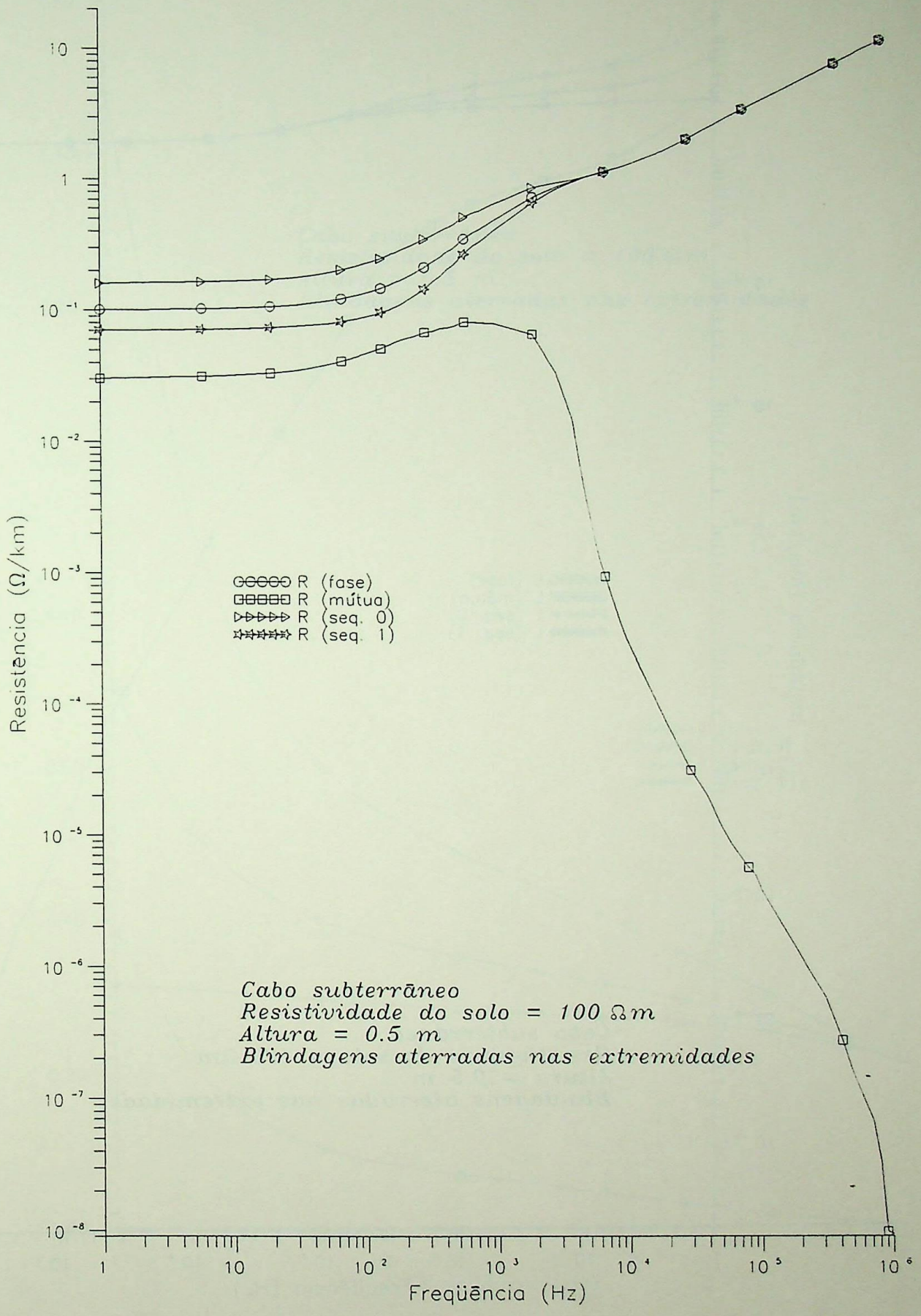



*Figura 8.36* - *Comportamento da resistência com a freqüência*

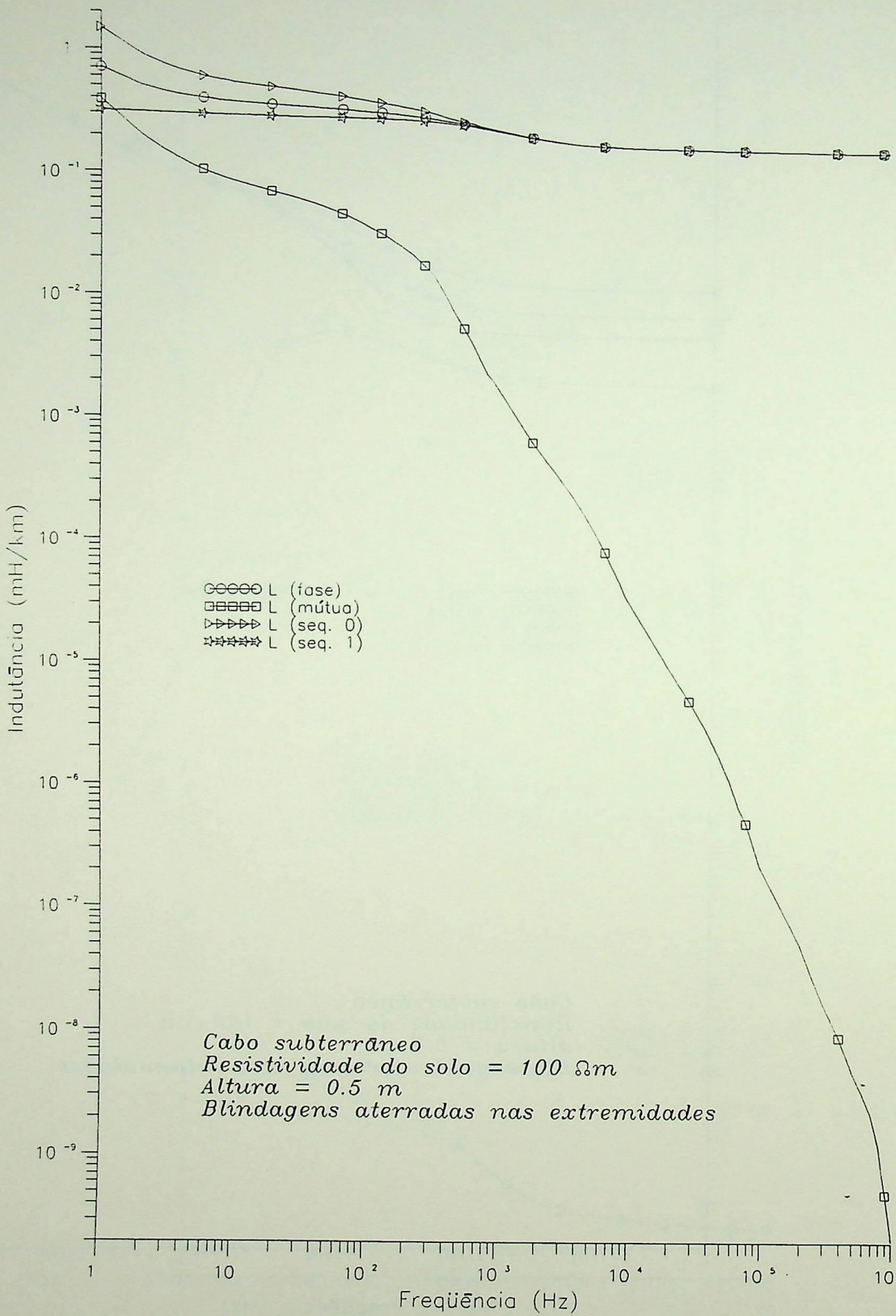



*Figura 8.37 - Comportamento da indutância com a freqüência*

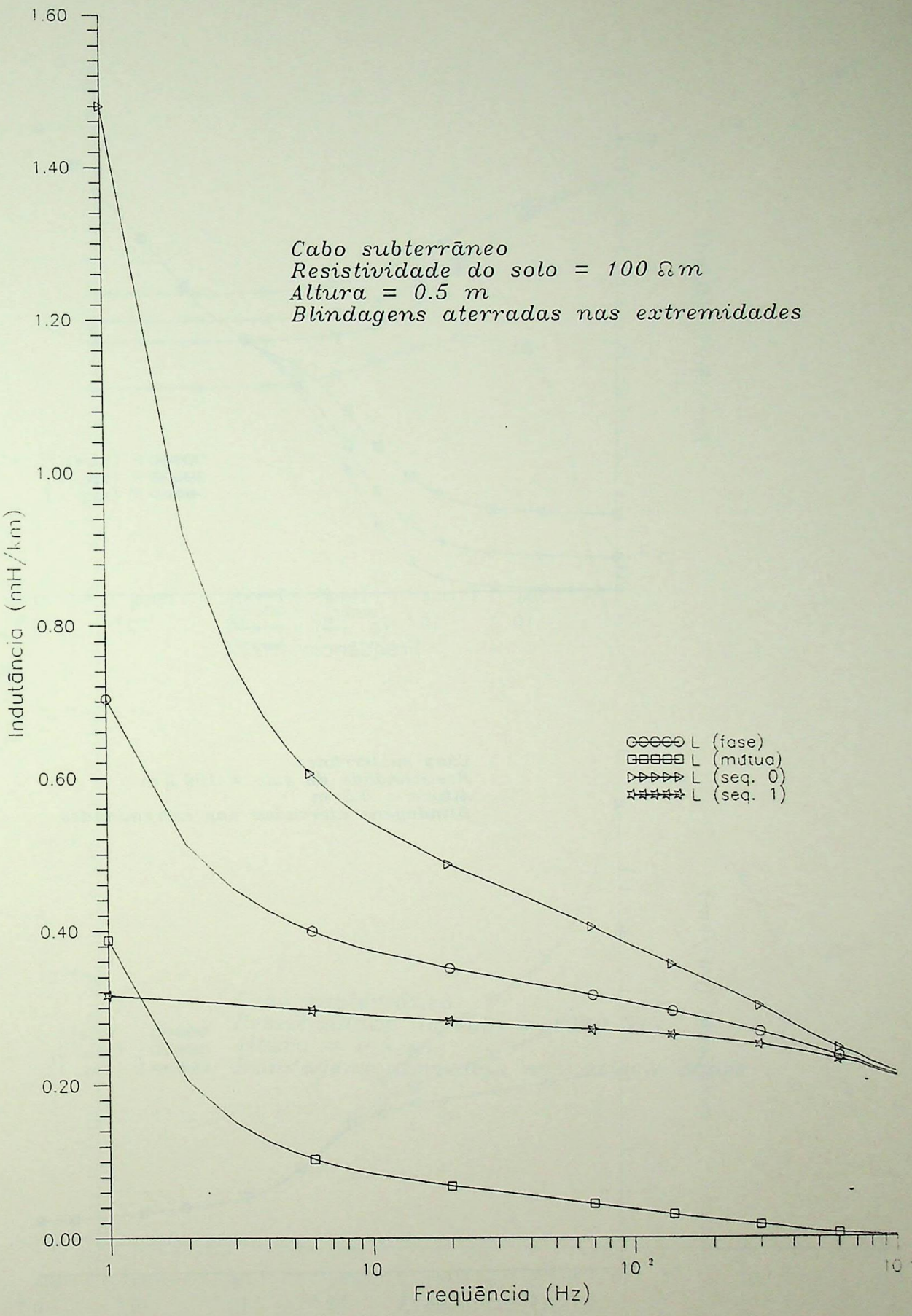



*Figura 8.38* - Comportamento da indutância com a freqüência

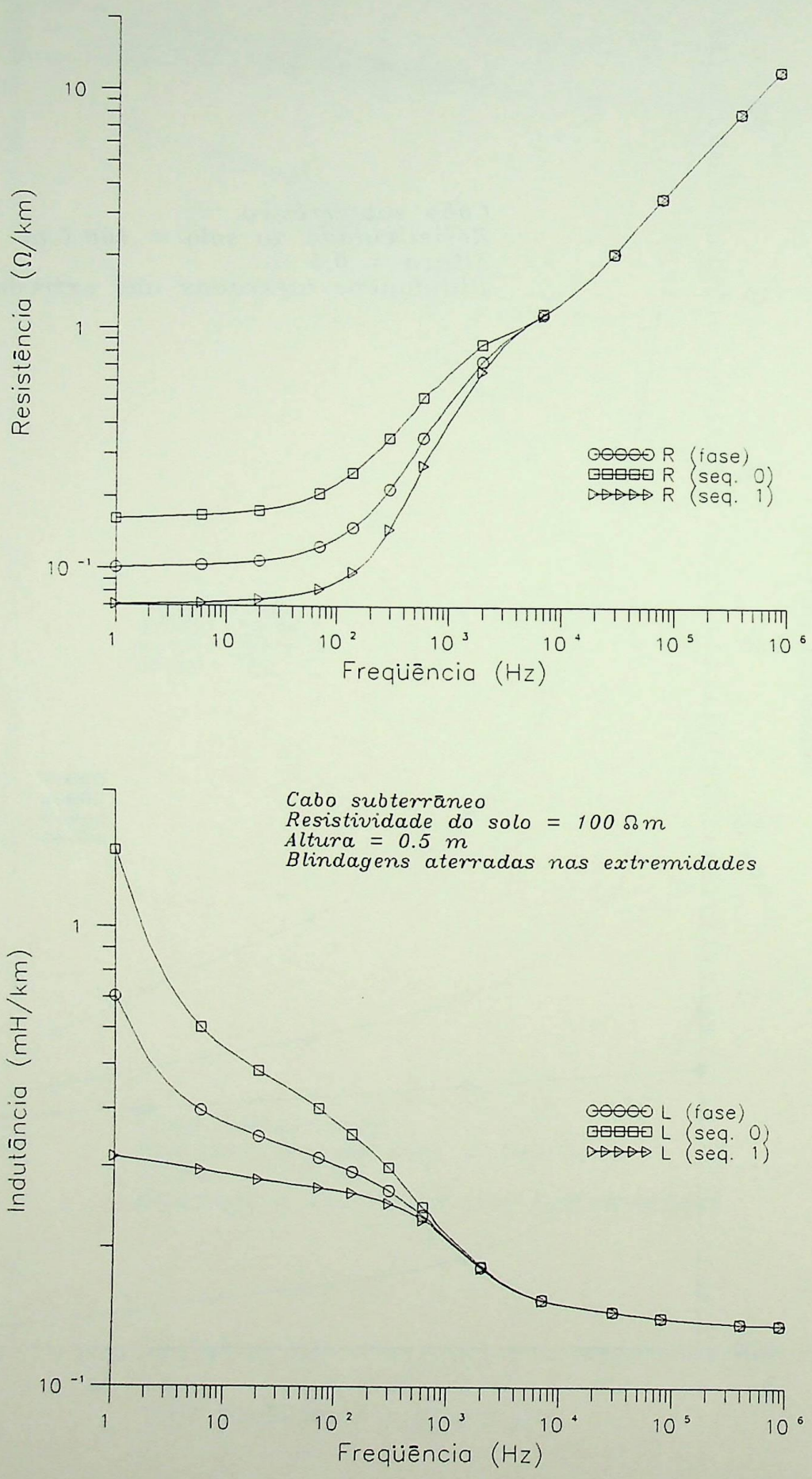



*Figura 8.39* - *Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

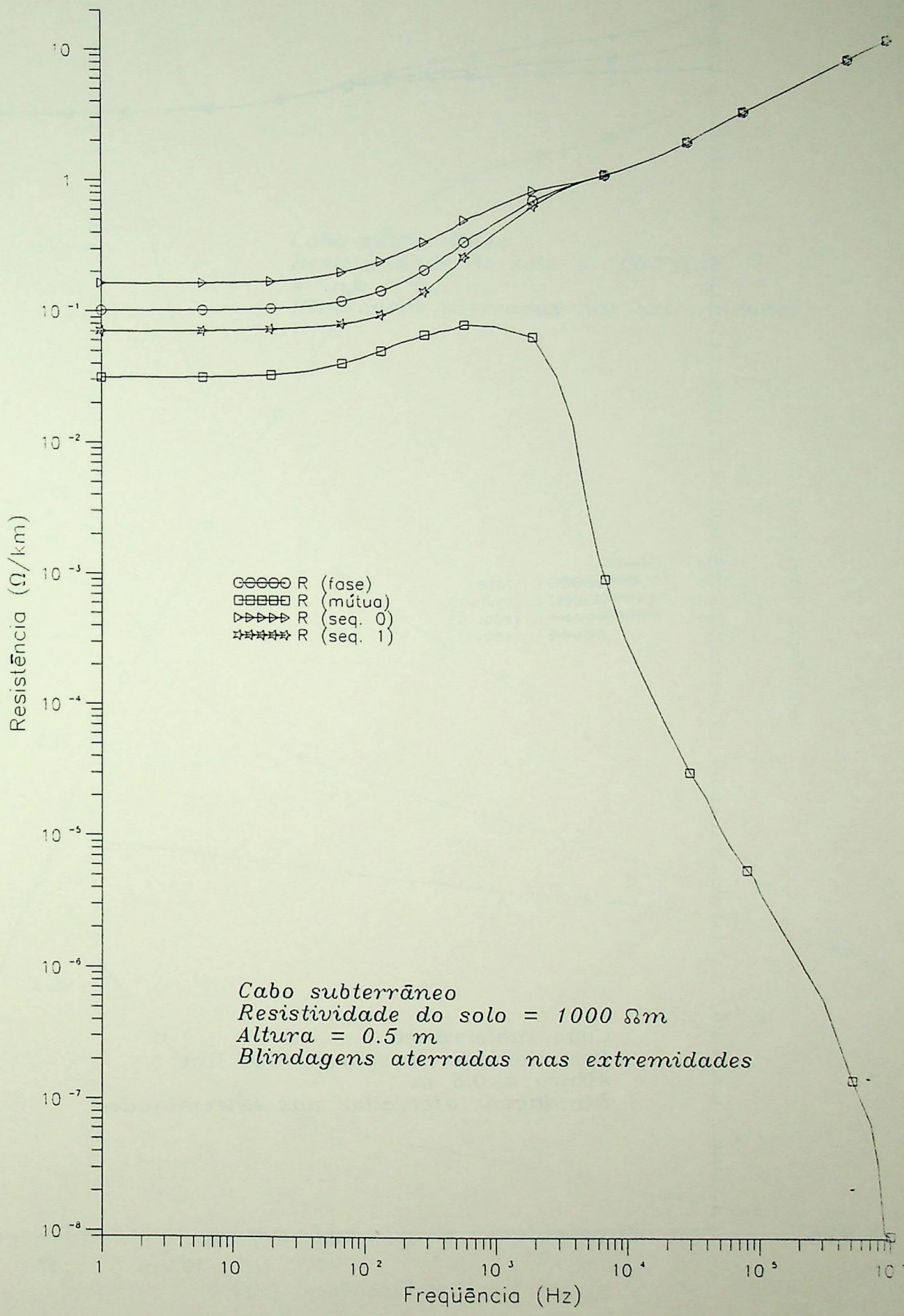



*Figura 8.40* - *Comportamento da resistência com a freqüência*

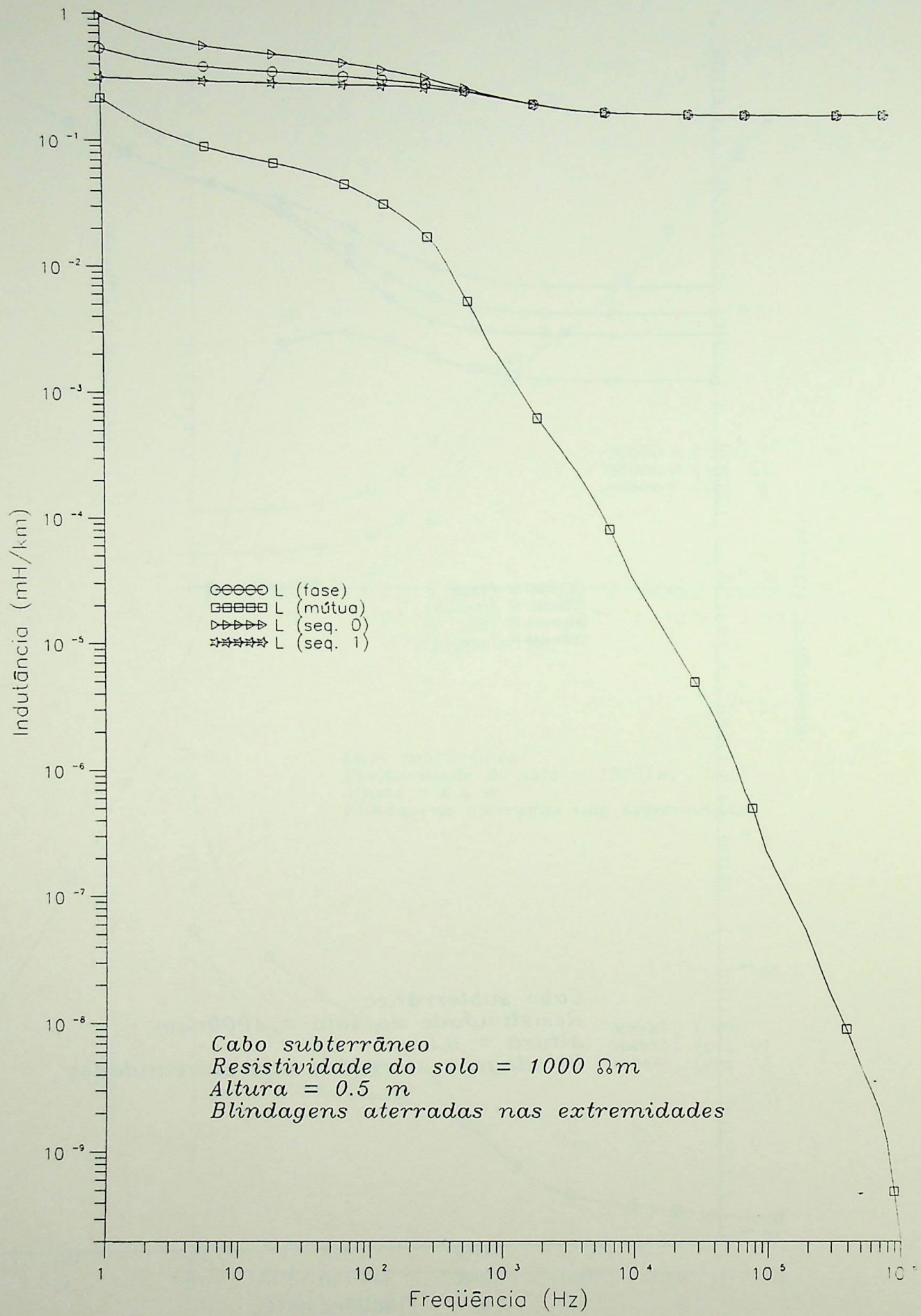



*Figura 8.41* - *Comportamento da indutância com a freqüência*

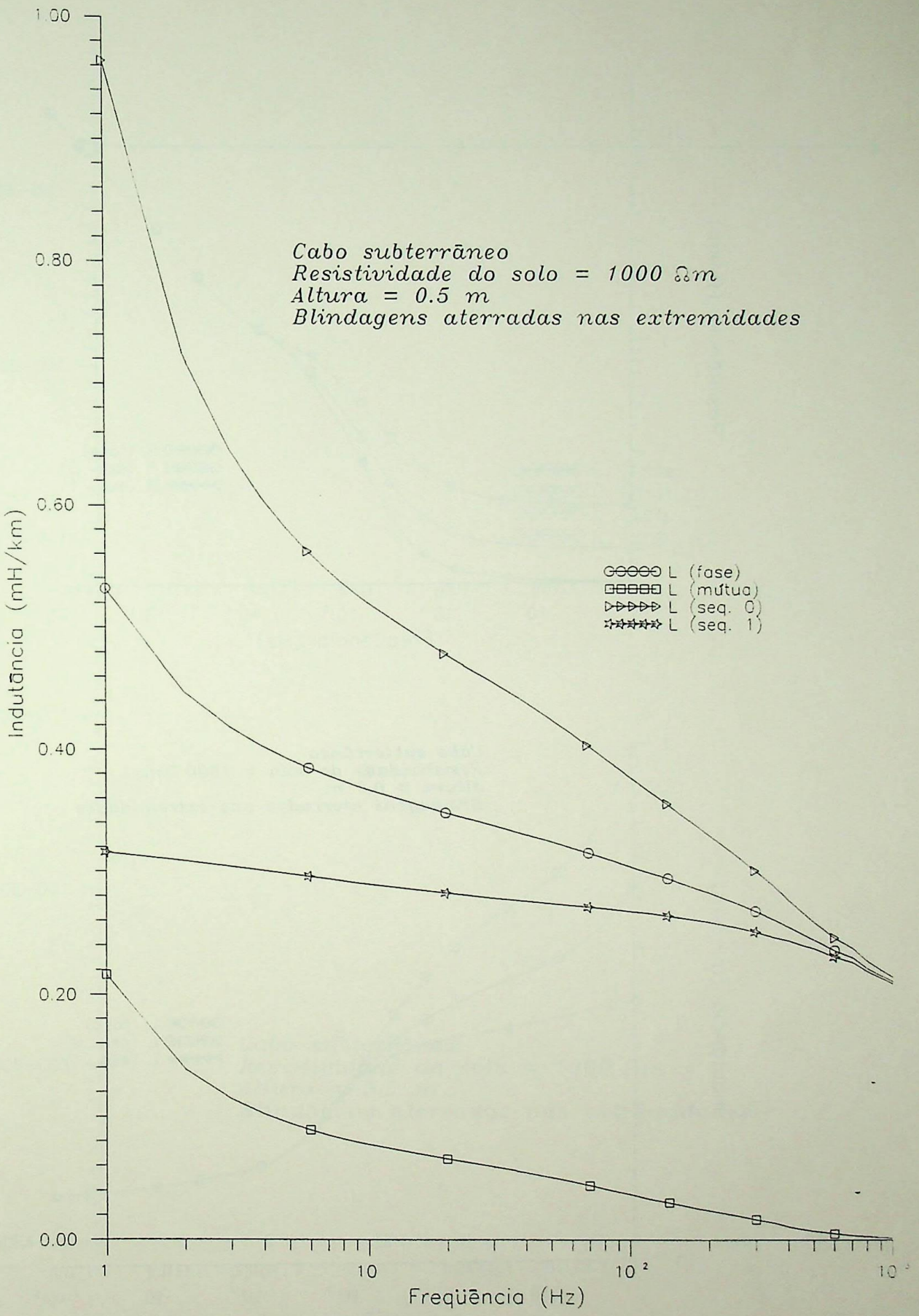



*Figura 8.42* - *Comportamento da indutância com a freqüência*

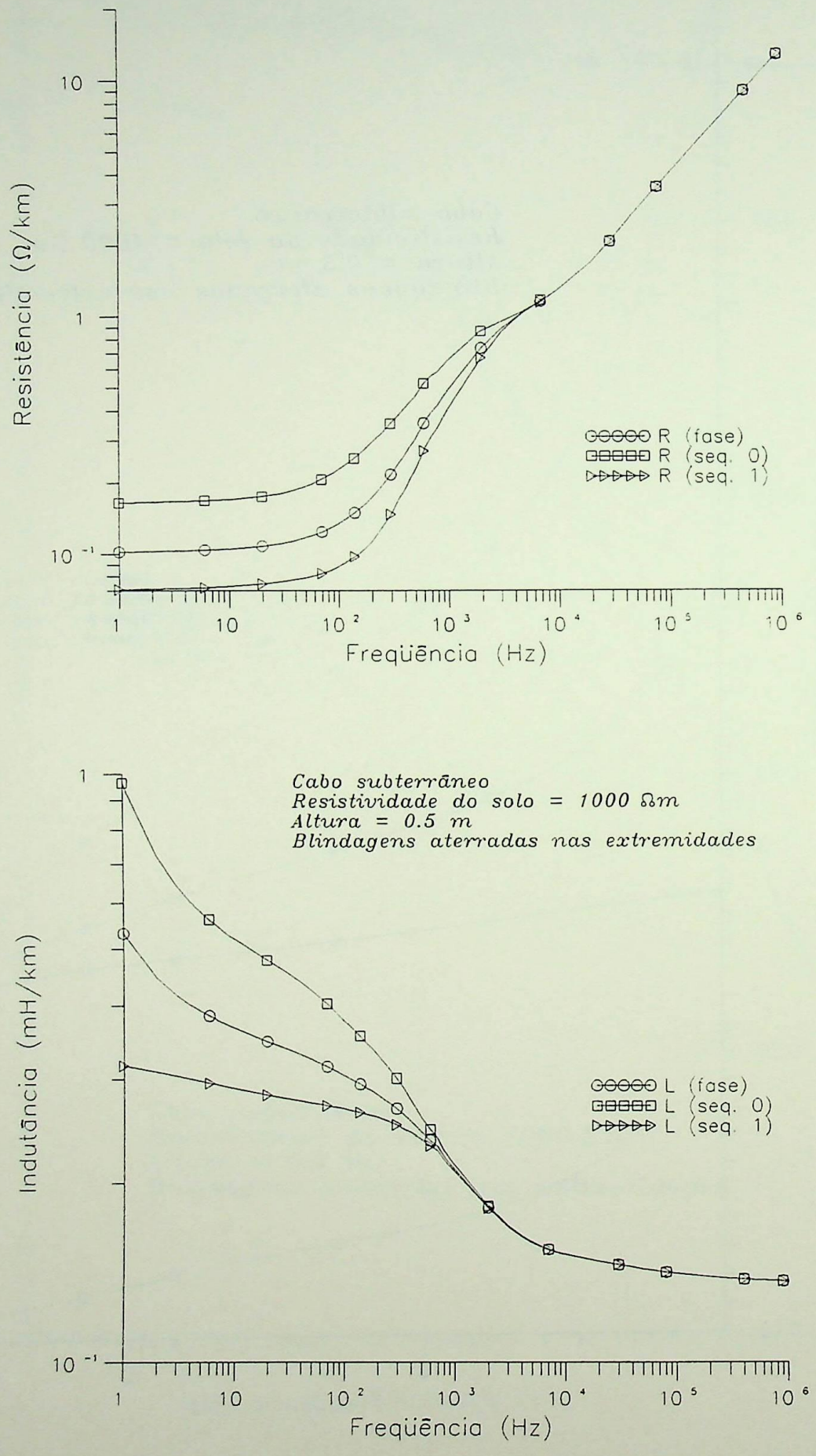



*Figura 8.43* - *Comportamento da resistência e da indutância com a freqüência*

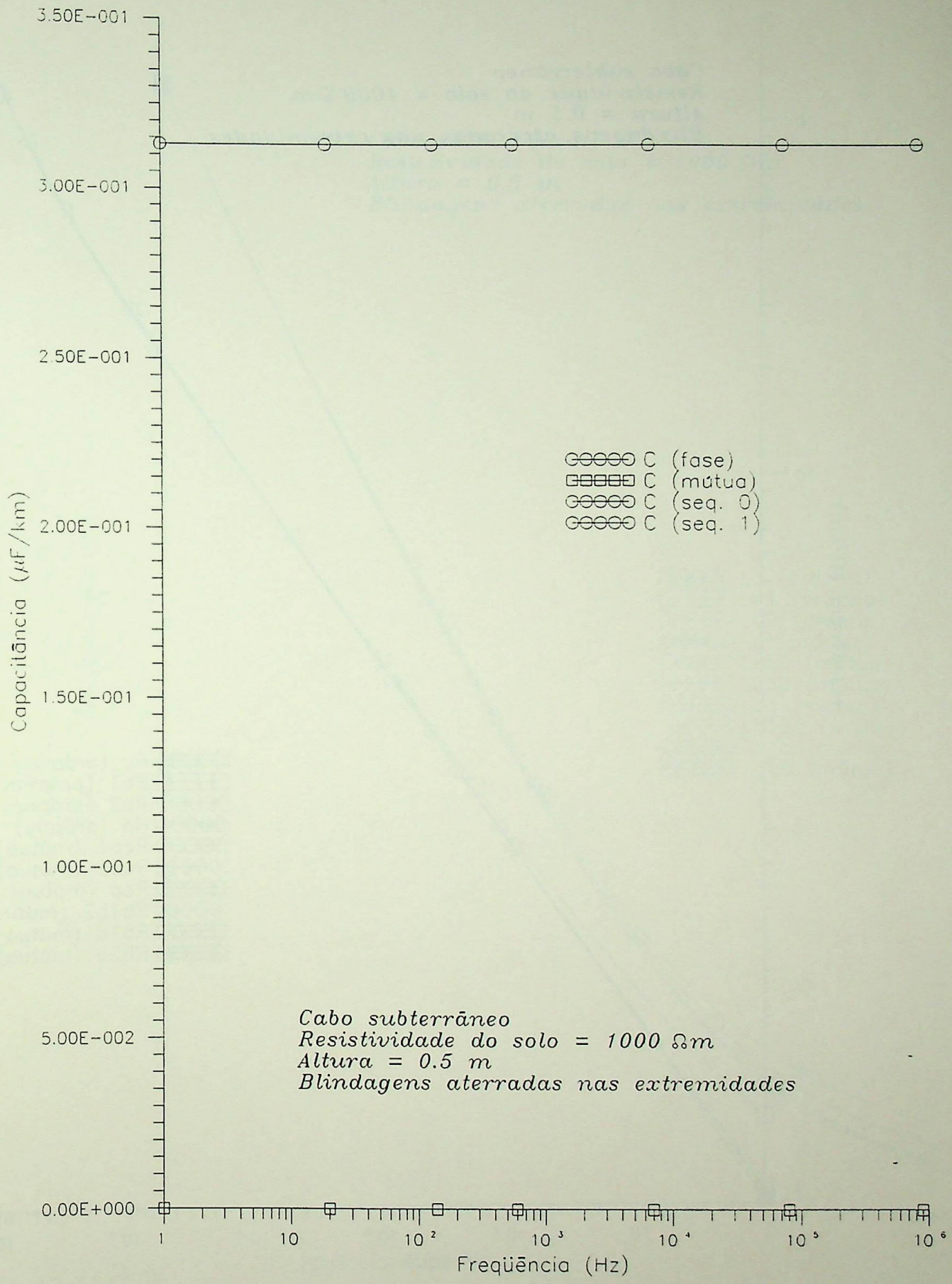



*Figura 8.44 - Comportamento da capacitância com a freqüência*

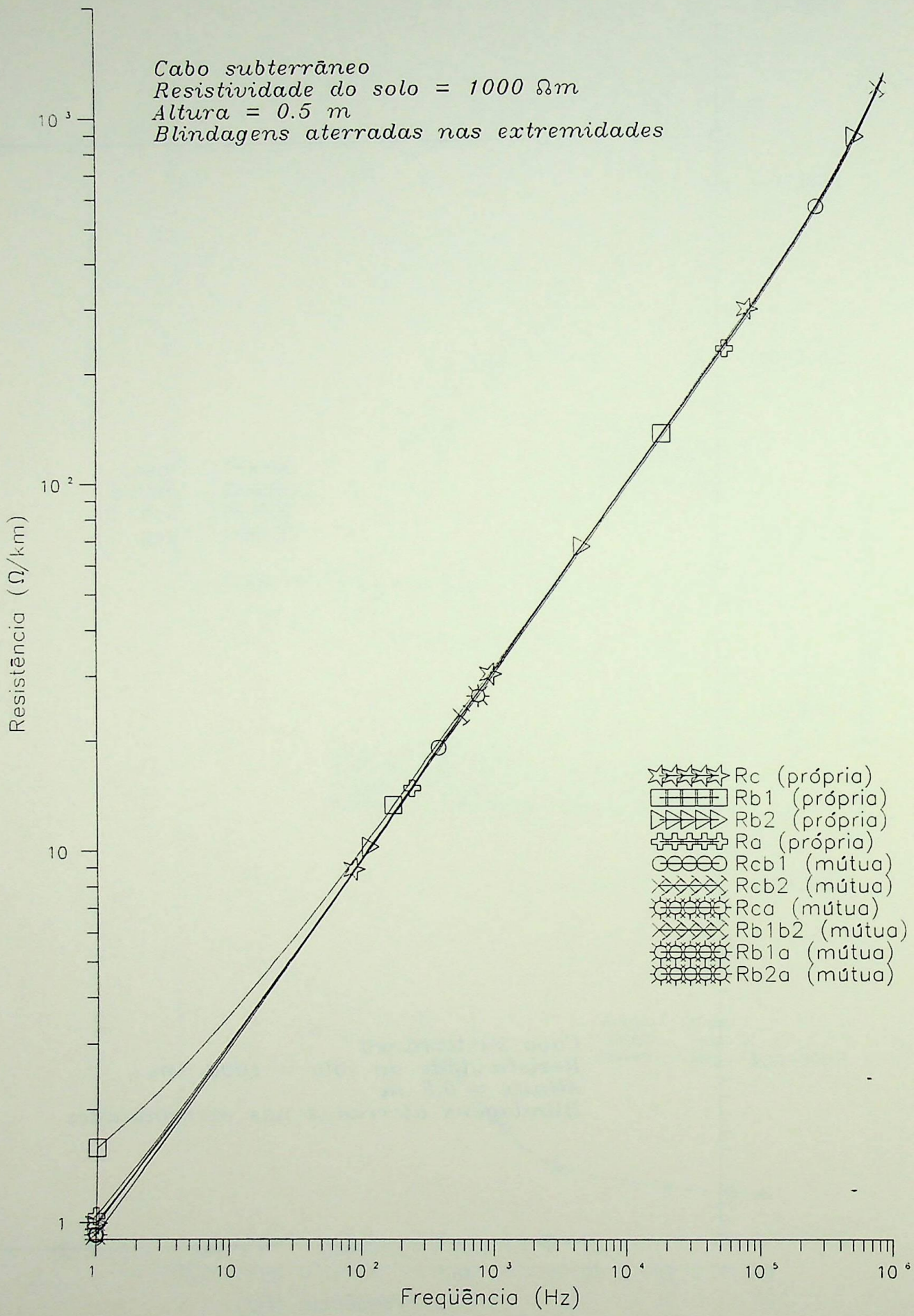



*Figura 8.45* - *Comportamento das resistências próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

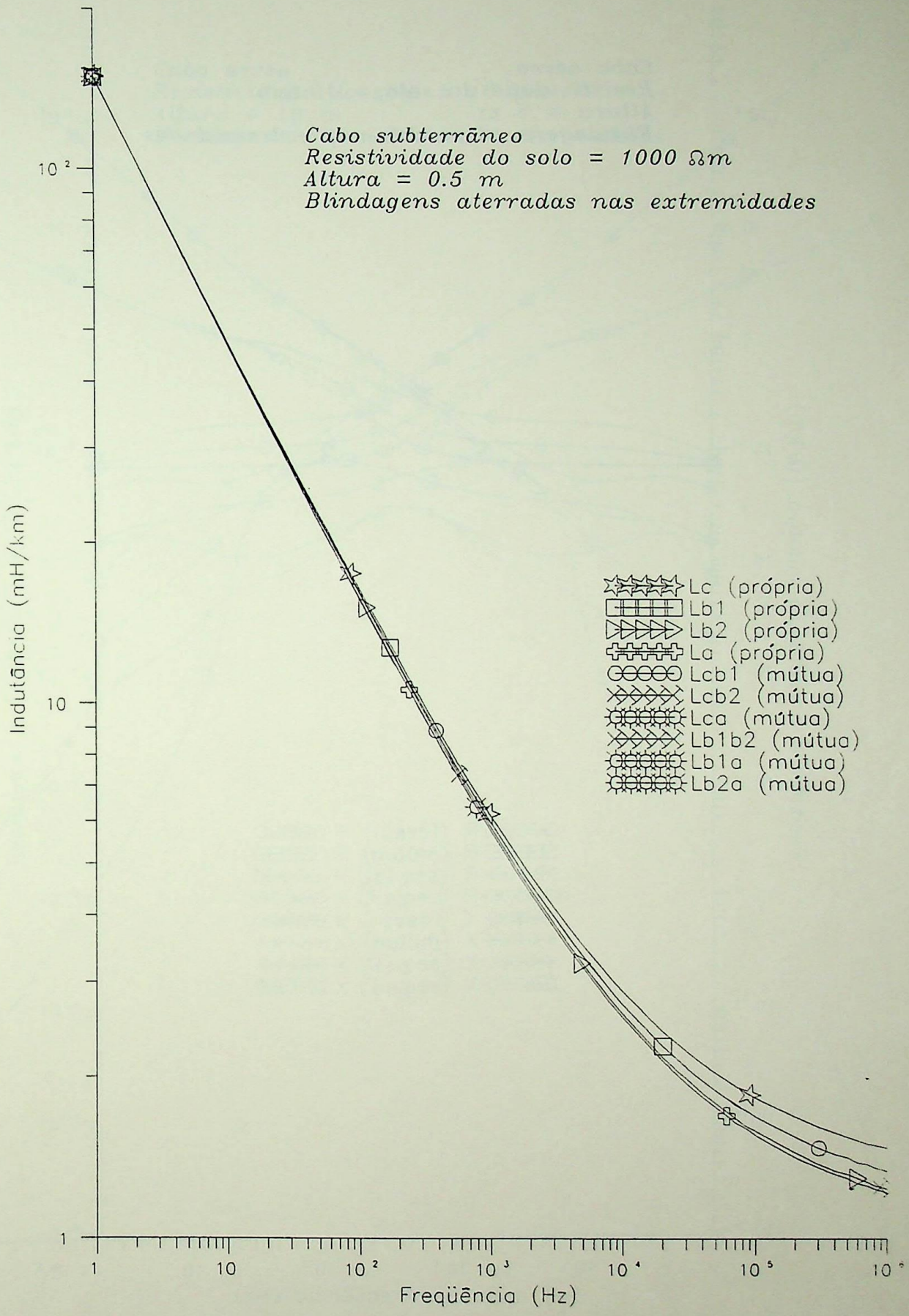



*Figura 8.46* - *Comportamento das indutâncias próprias e mútuas das camadas metálicas do cabo*

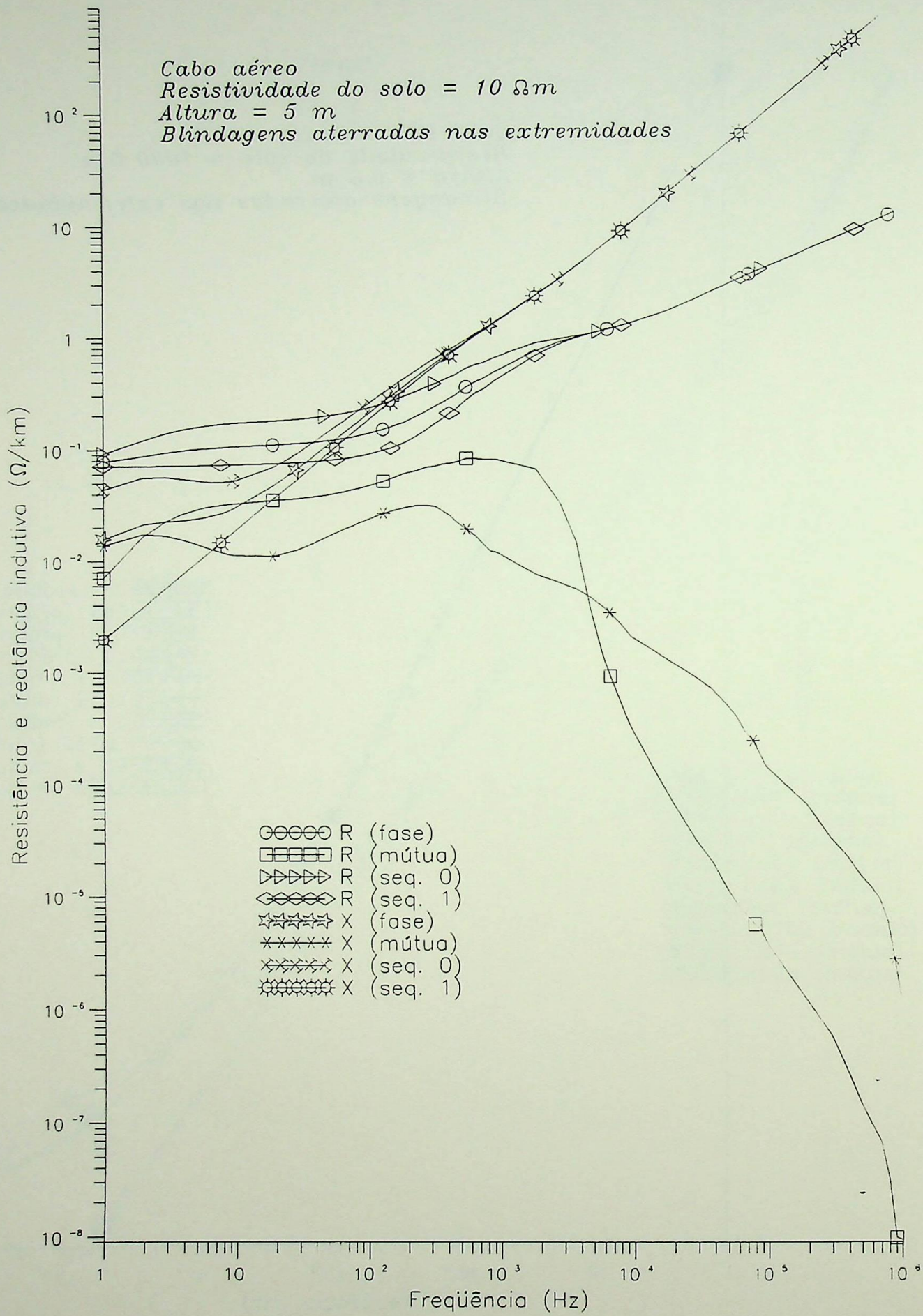



*Figura 8.47 - Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

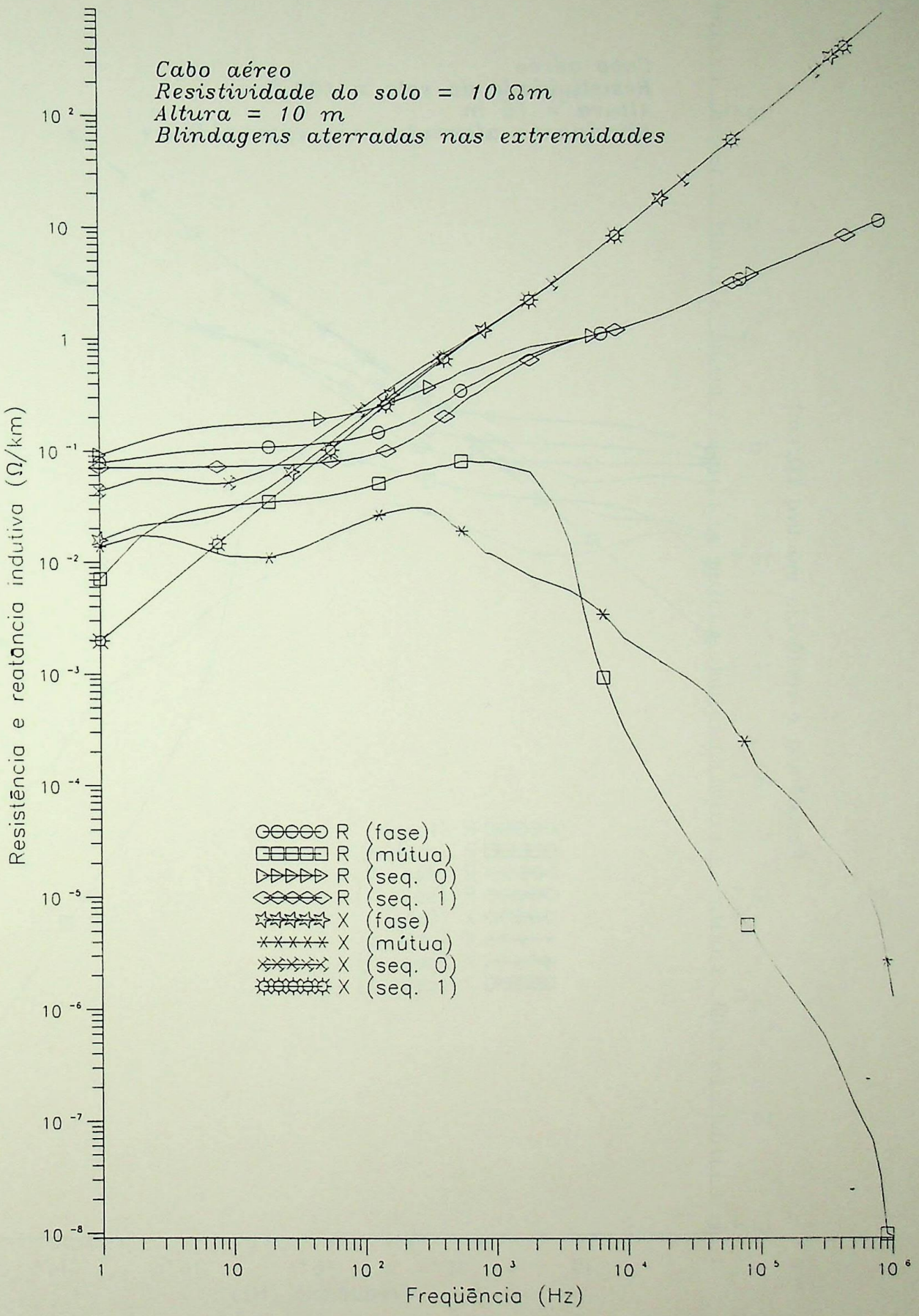



*Figura 8.48* - *Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

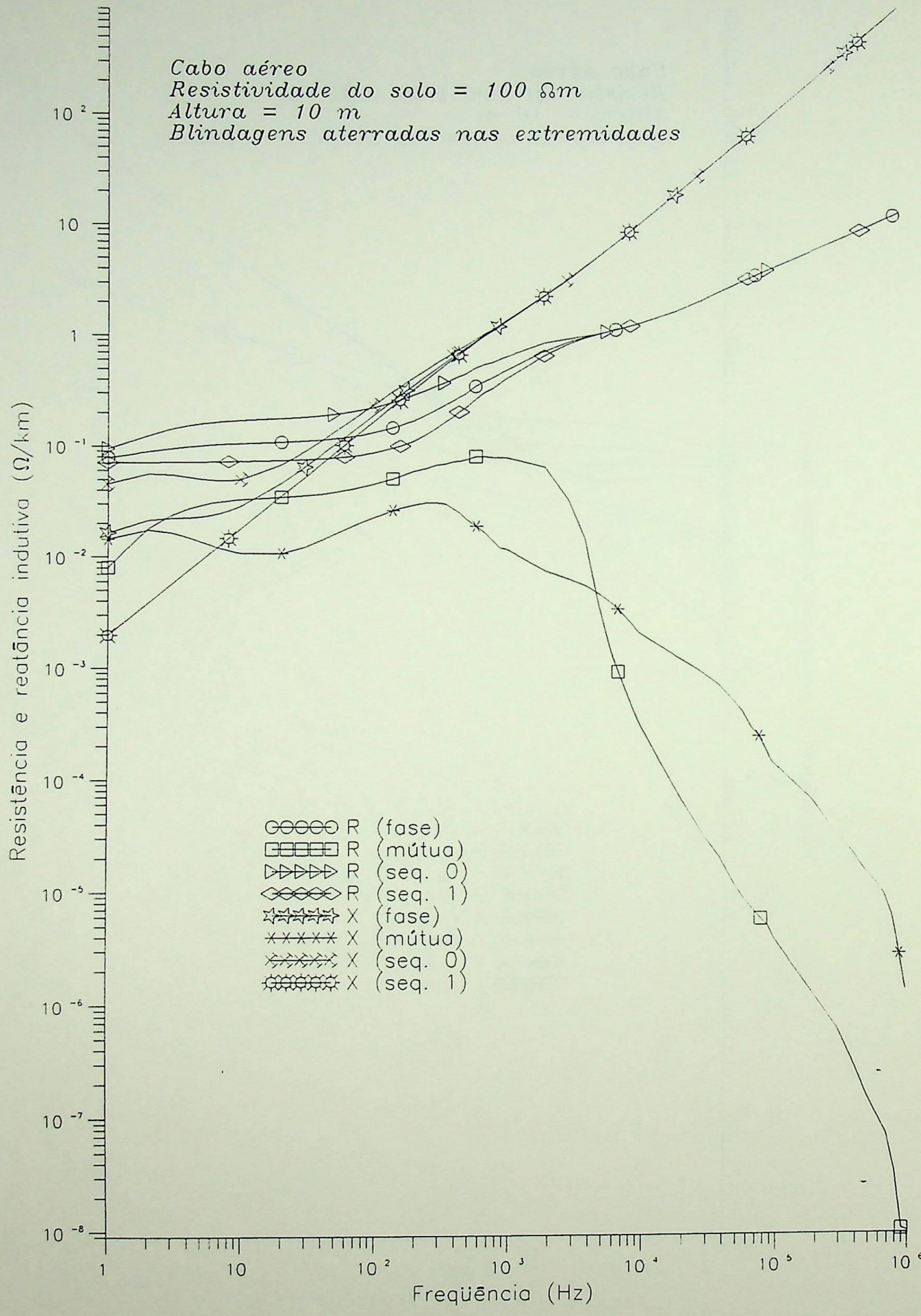



*Figura 8.49 - Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

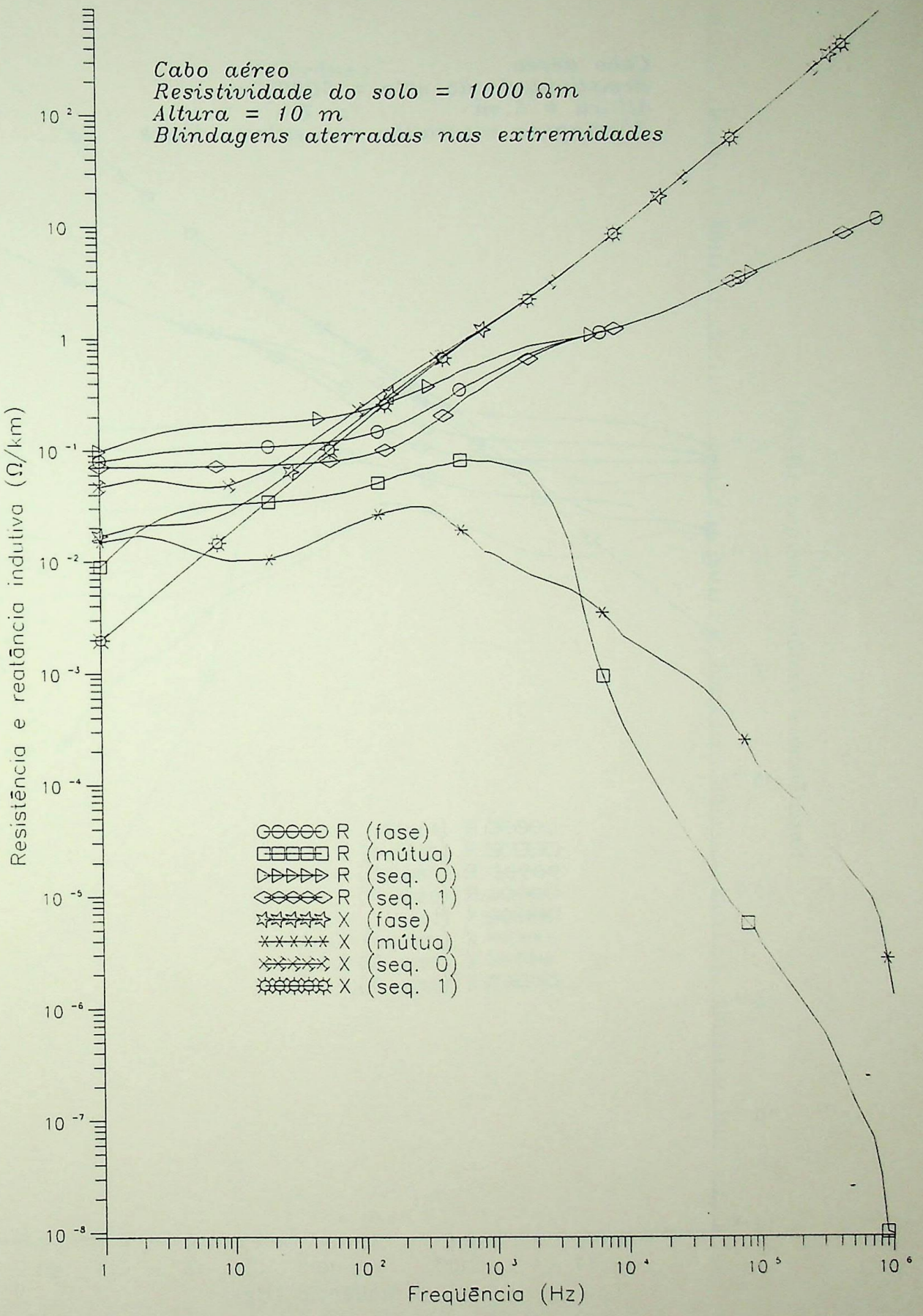



*Figura 8.50* - *Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

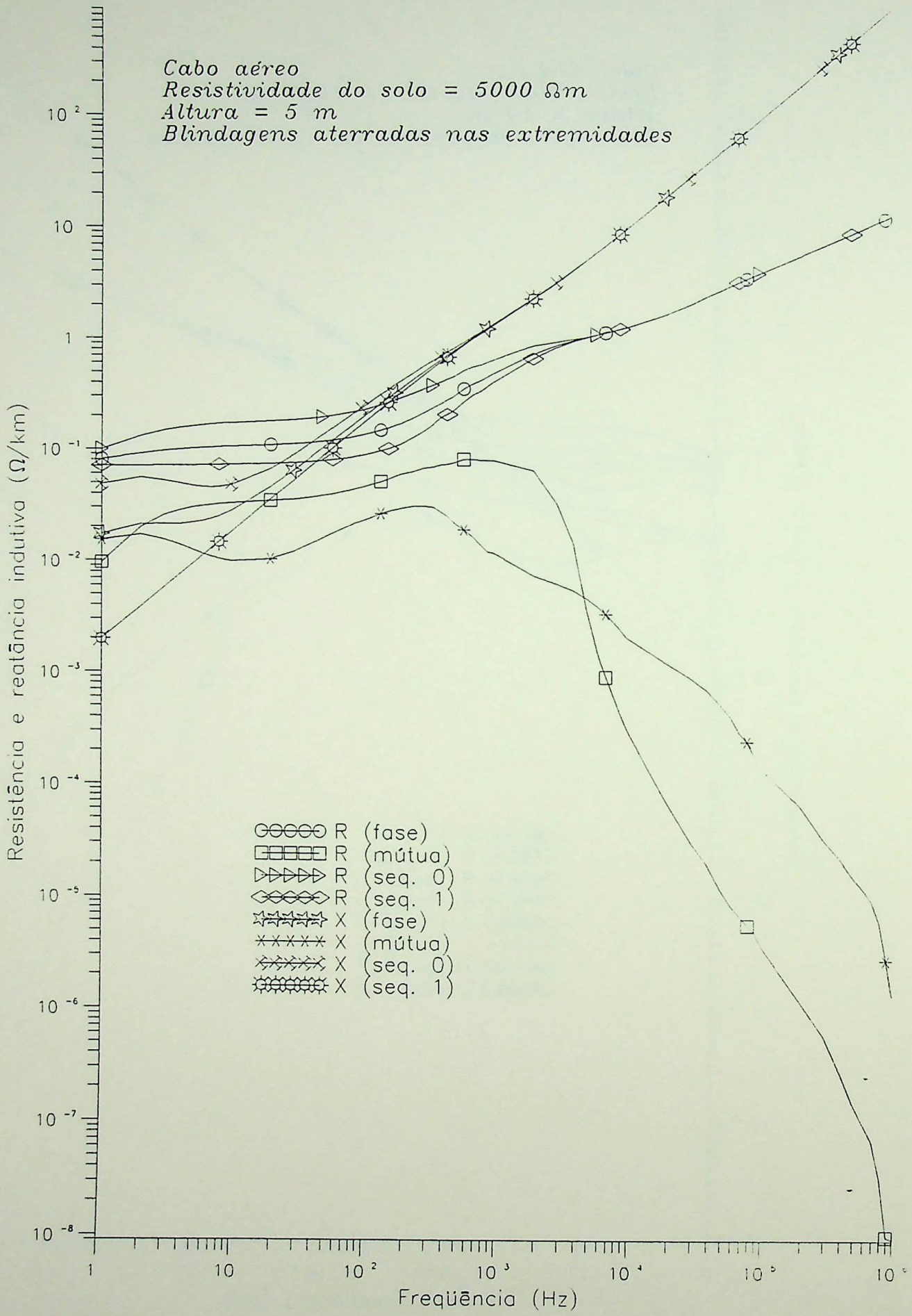



*Figura 8.51* - *Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

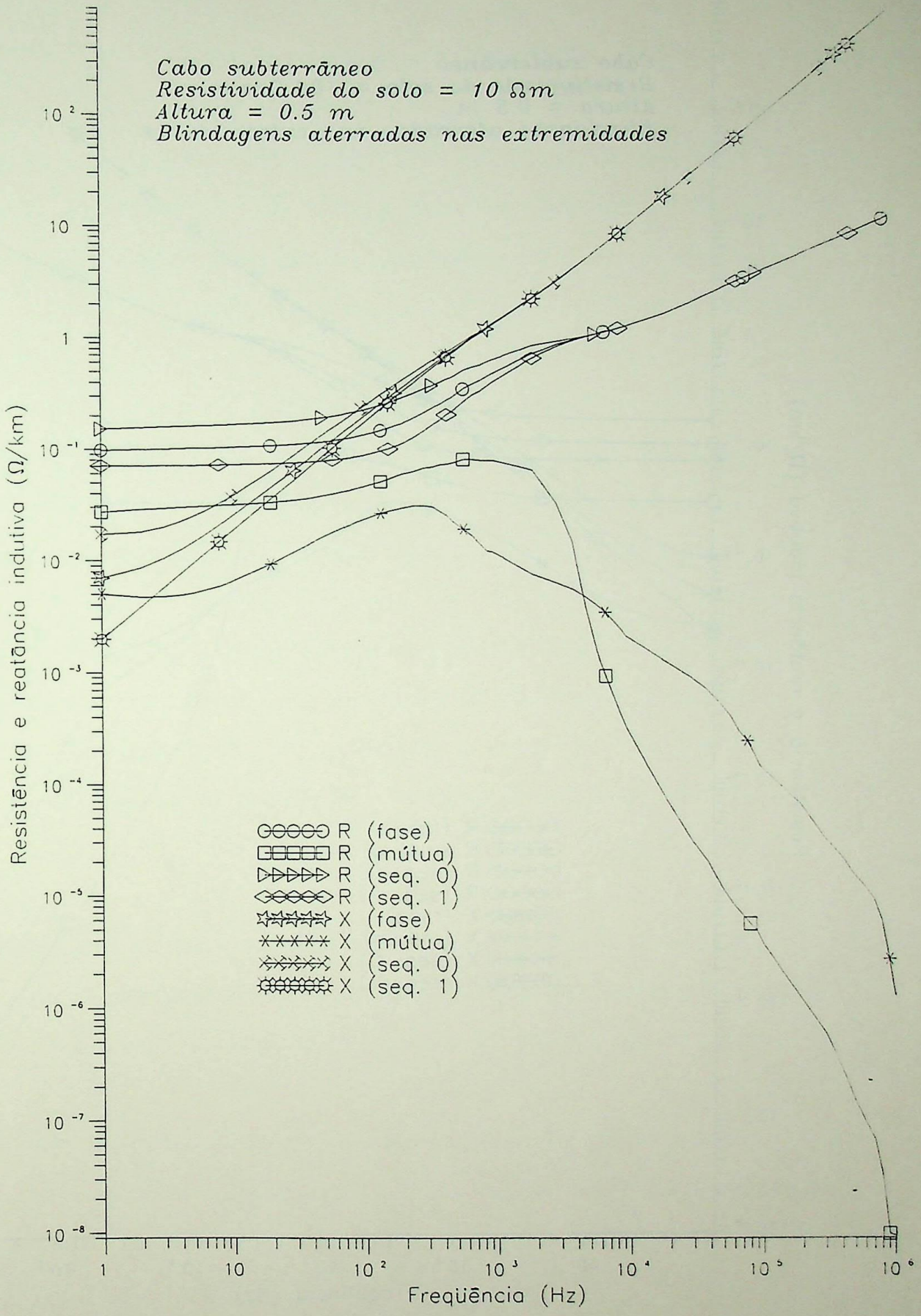



*Figura 8.52* - *Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

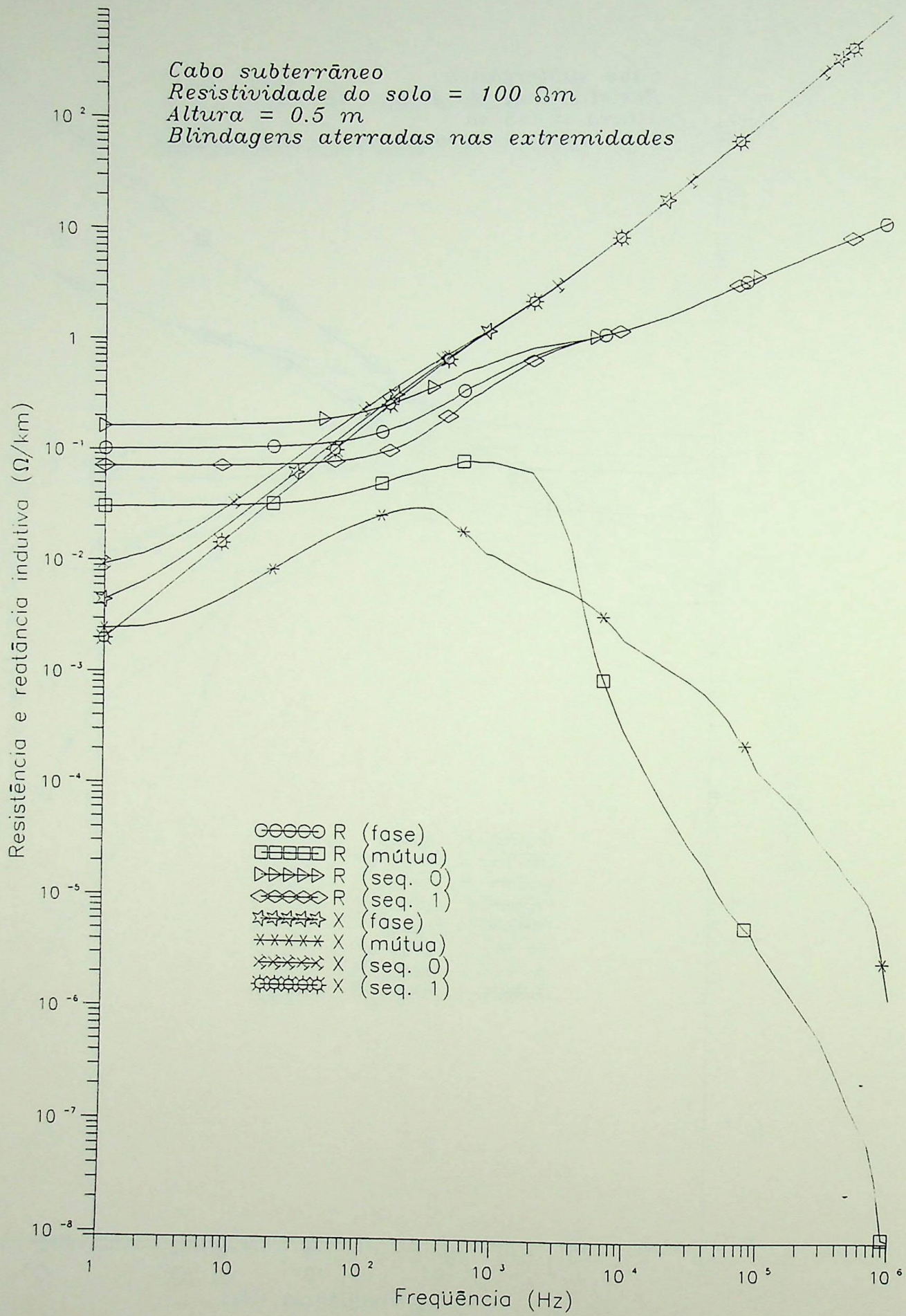



*Figura 8.53* - *Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

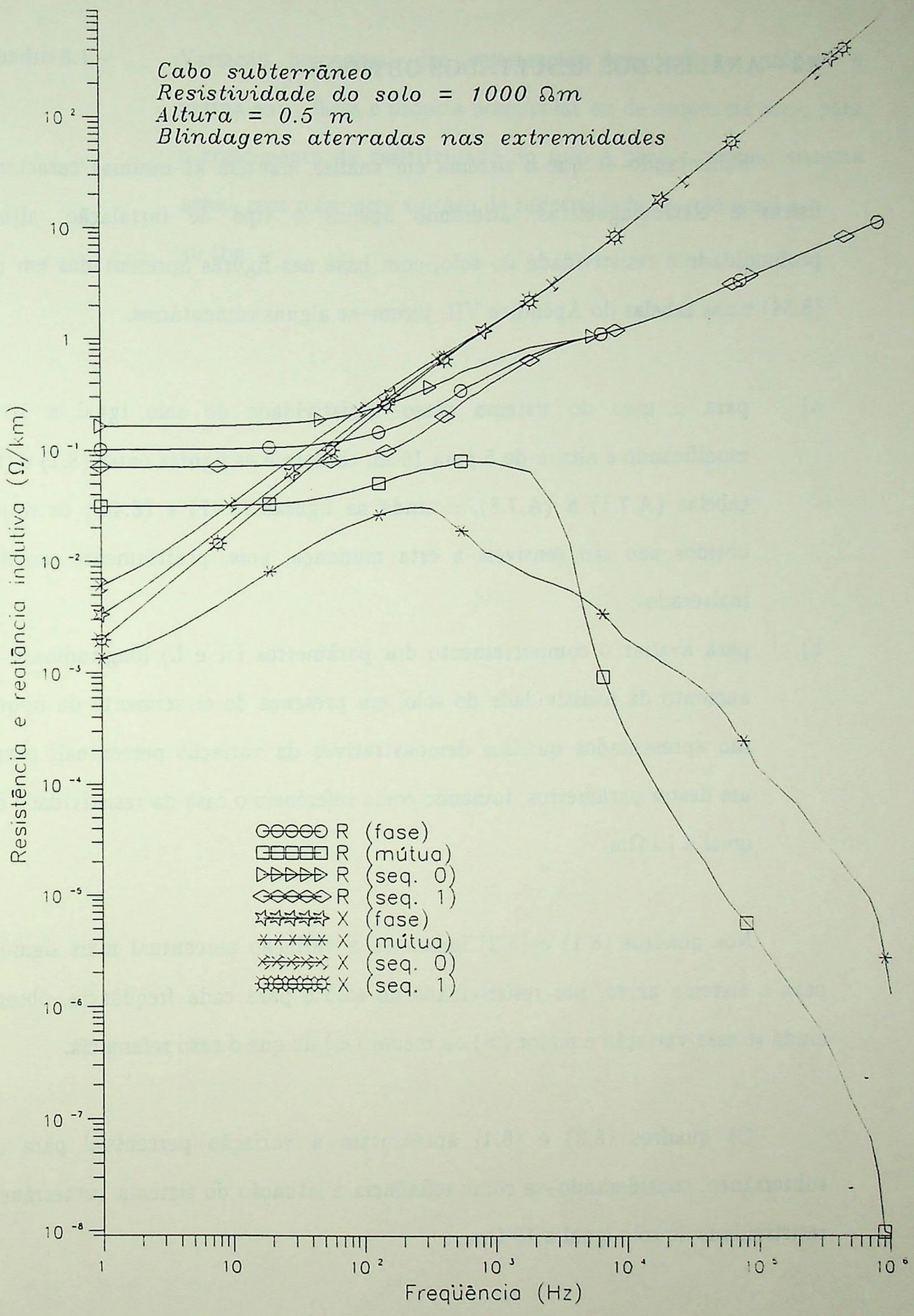



*Figura 8.54* - *Comportamento da resistência e da reatância indutiva com a freqüência*

## 8.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Salientando–se que o sistema em análise mantém as mesmas características físicas e eletromagnéticas, alterando apenas o tipo de instalação, altura ou profundidade e resistividade do solo, com base nas figuras apresentadas em (8.1) a (8.54) e nas tabelas do Apêndice VII, tecem–se alguns comentários:

a) para o caso do sistema aéreo, resistividade do solo igual a 10 Ωm e modificando a altura de 5 para 10 m, conforme as figuras entre (8.1) e (8.12) e tabelas (A.7.1) a (A.7.8), e ainda as figuras (8.47) e (8.48), os resultados obtidos não são sensíveis a esta mudança, pois, praticamente, mantêm–se inalterados;

b) para avaliar o comportamento dos parâmetros (R e L) longitudinais, com o aumento da resistividade do solo, em presença do crescimento da freqüência, são apresentados quadros demonstrativos da variação percentual, para cada um destes parâmetros, tomando como referência o caso da resistividade do solo igual a 10 Ωm.

Nos quadros (8.1) e (8.2) indica–se a variação percentual mais significativa para o sistema aéreo, por resistividade do solo e para cada freqüência, observando ainda se essa variação é maior (>) ou menor (<) do que o caso referência.

Os quadros (8.3) e (8.4) apresentam a variação percentual para o caso subterrâneo, considerando–se como referência a situação do sistema subterrâneo com resistividade do solo igual a 10 Ωm.

Os comentários explicativos para os quadros 8.1 e 8.2 são extensivos aos quadros 8.3 e 8.4.

Quadro 8.1 – Variação percentual das resistências longitudinais própria e mútua entre fases e própria homopolar ou de seqüência zero, para o crescimento da resistividade do solo e para o mesmo sistema aéreo, com referência ao caso de resistividade do solo igual a 10 Ωm

VARIAÇÃO (%), > OU < DO QUE O CASO COM RESISTIVIDADE DO SOLO = 10 Ωm

| freq. | R (própria) | | | R (mútua) | | | R (seq. zero) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | resistividade do solo (Ωm) | | | | | | | | |
| (Hz) | 100 | 1000 | 5000 | 100 | 1000 | 5000 | 100 | 1000 | 5000 |
| 1.0 | 1.15> | 2.31> | 3.12> | 12.48> | 25.07> | 33.87> | 2.91> | 5.85> | 7.90> |
| 2.0 | 1.52> | 2.92> | 3.82> | 8.03> | 15.40> | 20.16> | 3.31> | 6.35> | 8.31> |
| 3.0 | 1.22> | 2.27> | 2.91> | 5.03> | 9.38> | 12.04> | 2.46> | 4.58> | 5.89> |
| 4.0 | .88> | 1.62> | 2.05> | 3.28> | 6.00> | 7.62> | 1.72> | 3.15> | 4.01> |
| 5.0 | .63> | 1.14> | 1.44> | 2.22> | 4.01> | 5.05> | 1.21> | 2.18> | 2.75> |
| 6.0 | .45> | .81> | 1.02> | 1.54> | 2.76> | 3.45> | .85> | 1.53> | 1.91> |
| 7.0 | .33> | .58> | .72> | 1.08> | 1.92> | 2.39> | .61> | 1.08> | 1.35> |
| 8.0 | .23> | .40> | .50> | .76> | 1.34> | 1.65> | .43> | .76> | .94> |
| 9.0 | .16> | .28> | .34> | .53> | .92> | 1.12> | .30> | .52> | .64> |
| 10.0 | .11> | .19> | .23> | .35> | .60> | .72> | .20> | .35> | .42> |
| 20.0 | .08< | .16< | .21< | .26< | .49< | .64< | .15< | .28< | .37< |
| 30.0 | .11< | .21< | .26< | .34< | .63< | .82< | .20< | .37< | .48< |
| 40.0 | .10< | .19< | .24< | .32< | .59< | .75< | .18< | .34< | .44< |
| 50.0 | .08< | .16< | .20< | .26< | .49< | .62< | .15< | .29< | .37< |
| 60.0 | .07< | .12< | .16< | .21< | .38< | .49< | .12< | .22< | .29< |
| 70.0 | .05< | .09< | .12< | .15< | .28< | .36< | .09< | .17< | .22< |
| 80.0 | .04< | .07< | .09< | .11< | .20< | .25< | .07< | .12< | .15< |
| 90.0 | .03< | .05< | .06< | .07< | .13< | .17< | .05< | .08< | .10< |
| 100.0 | .02< | .03< | .04< | .05< | .08< | .11< | .03< | .05< | .07< |
| 120.0 | .00< | .01< | .01< | .01< | .03< | .03< | .01< | .02< | .02< |
| 140.0 | .00< | .00< | .00< | .00< | .00> | .00> | .00< | .00< | .00< |
| 160.0 | .01> | .01> | .01> | .01> | .01> | .02> | .00> | .01> | .01> |
| 180.0 | .00< | .01> | .01> | .01> | .02> | .02> | .01> | .01> | .01> |
| 200.0 | .01> | .01> | .01> | .01> | .01> | .02> | .00> | .01> | .01> |
| 250.0 | .00< | .00< | .01> | .00> | .01> | .01> | .00> | .00> | .01> |
| 300.0 | .00< | .00> | .00> | .00> | .00> | .00> | .00< | .00> | .00> |

Como se verifica pelas tabelas e pelo quadro 8.1 (pelas figuras não são facilmente detectados), os resultados obtidos nos três casos simulados (resistividade do solo: 100, 1000 e 5000 Ωm) apresentam variação percentual maior do que o caso referência, para a variação de freqüência de 1 para 2 Hz, com exceção para a resistência mútua. Em seguida, comporta–se com uma taxa decrescente, na faixa de freqüência de 2 à 10 Hz, mas ligeiramente maior do que a referência ($< 1\%$); continuando com uma taxa decrescente até aproximadamente 140 Hz, porém menor do que a referência e levemente oscilatória entre 20 e 30 Hz. A variação percentual é praticamente nula em 140 Hz, voltando a ficar maior do que a referência com uma taxa praticamente imperceptível; quando, por volta dos 300 Hz, os valores das resistências próprias, para todas as resistividades do solo exploradas, tendem para o mesmo valor, levando a taxa referencial de variação tornar–se desprezível. De forma análoga ocorre com as resistências mútuas entre fases.

Ainda para o quadro 8.1, cumpre observar que, para as freqüências mais baixas ($< 10$ Hz), a taxa percentual de variação, quanto ao caso de resistividade do solo igual a 10 Ωm, cresce levemente para as resistências próprias de fase e cresce moderamente para as resistências mútuas, comparando com o aumento da resistividade do solo.

**Quadro 8.2 –** Taxa percentual de variação das indutâncias longitudinais própria e mútua entre fases e própria homopolar ou de seqüência zero, para o mesmo sistema aéreo, com referência ao caso de resistividade do solo igual a 10 Ωm

VARIAÇÃO (%), > OU < DO QUE O CASO COM RESISTIVIDADE DO SOLO = 10 Ωm

| freq. | L (própria) | | | L (mútua) | | | L (seq. zero) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | resistividade do solo (Ωm) | | | | | | | | |
| (Hz) | 100 | 1000 | 5000 | 100 | 1000 | 5000 | 100 | 1000 | 5000 |
| 1.0 | 3.82> | 7.15> | 9.19> | 4.37> | 8.18> | 10.51> | 4.16> | 7.80> | 10.03> |
| 2.0 | .18< | .81< | 1.47< | .22< | .99< | 1.80< | .20< | .92< | 1.68< |
| 3.0 | 2.29< | 4.80< | 6.64< | 3.09< | 6.52< | 9.10< | 2.76< | 5.82< | 8.10< |
| 4.0 | 3.09< | 6.21< | 8.39< | 4.65< | 9.49< | 12.96< | 3.98< | 8.07< | 10.97< |
| 5.0 | 3.22< | 6.35< | 8.47< | 5.43< | 10.92< | 14.78< | 4.42< | 8.81< | 11.83< |
| 6.0 | 3.06< | 5.95< | 7.87< | 5.75< | 11.47< | 15.43< | 4.45< | 8.76< | 11.69< |
| 7.0 | 2.79< | 5.37< | 7.06< | 5.81< | 11.51< | 15.41< | 4.27< | 8.33< | 11.04< |
| 8.0 | 2.49< | 4.77< | 6.23< | 5.71< | 11.25< | 14.99< | 3.99< | 7.74< | 10.21< |
| 9.0 | 2.21< | 4.20< | 5.47< | 5.52< | 10.81< | 14.36< | 3.68< | 7.09< | 9.31< |
| 10.0 | 1.95< | 3.69< | 4.79< | 5.27< | 10.27< | 13.60< | 3.37< | 6.45< | 8.44< |
| 20.0 | .63< | 1.16< | 1.49< | 2.70< | 5.09< | 6.59< | 1.29< | 2.40< | 3.08< |
| 30.0 | .24< | .45< | .57< | 1.27< | 2.36< | 3.03< | .53< | .98< | 1.24< |
| 40.0 | .10< | .18< | .23< | .57< | 1.04< | 1.32< | .22< | .40< | .50< |
| 50.0 | .03< | .06< | .07< | .20< | .37< | .47< | .07< | .13< | .17< |
| 60.0 | .00< | .00< | .00< | .02< | .03< | .04< | .01< | .01< | .01< |
| 70.0 | .01> | .02> | .02> | .07> | .13> | .17> | .02> | .04> | .05> |
| 80.0 | .01> | .03> | .03> | .11> | .20> | .25> | .03> | .06> | .08> |
| 90.0 | .01> | .03> | .03> | .12> | .22> | .27> | .04> | .07> | .08> |
| 100.0 | .01> | .03> | .03> | .11> | .21> | .26> | .03> | .06> | .08> |
| 120.0 | .01> | .02> | .02> | .09> | .16> | .20> | .02> | .04> | .05> |
| 140.0 | .01> | .01> | .02> | .06> | .11> | .14> | .01> | .03> | .03> |
| 160.0 | .00> | .01> | .01> | .04> | .07> | .09> | .01> | .02> | .02> |
| 180.0 | .00> | .00> | .01> | .02> | .04> | .05> | .01> | .01> | .01> |
| 200.0 | .00< | .00> | .00> | .01> | .02> | .03> | .00> | .01> | .01> |
| 250.0 | .00< | .00< | .00< | .00< | .00< | .00< | .00< | .00< | .00< |
| 300.0 | .00< | .00< | .00< | .00< | .01< | .01< | .00< | .00< | .00< |

Neste caso, obtêm–se as maiores variações percentuais na freqüência de 1 Hz, comparando com o caso base, para todas as indutâncias, nas três simulações (resistividade do solo: 100, 1000 e 5000 Ωm).

Há um decrescimento expressivo da taxa de variação, de 1 para 2 Hz, para todas as indutâncias.

De 2 à 6 Hz, a taxa percentual de variação é crescente, porém menor do que o caso referência.

De 7 à 60 Hz, a variação percentual decresce, mantendo–se menor do que o caso referência.

De 70 à 300 Hz, aproximadamente, ainda para todas as indutâncias, a variação percentual é levemente notada (menor do que 1%), neste caso, maior do que a situação de referência (resistividade do solo igual a 10 Ωm).

Partindo–se deste ponto, os valores das indutâncias próprias, com o crescimento da freqüência, tendem para os mesmos valores, para todos os casos simulados e discriminados no quadro 8.2, tornando–se desprezível a taxa de variação percentual. As indutâncias mútuas também tendem para um valor comum.

**Quadro 8.3 –** Variação percentual das resistências longitudinais própria e mútua entre fases e própria homopolar ou de seqüência zero, para sistema subterrâneo, com referência ao caso de resistividade do solo igual a 10 Ωm (também subterrâneo)

VARIAÇÃO (%), > OU < DO QUE O CASO COM RESISTIVIDADE DO SOLO = 10 Ωm

| freq. (Hz) | R (própria) resistividade do solo (Ωm) 100 | R (própria) resistividade do solo (Ωm) 1000 | R (mútua) resistividade do solo (Ωm) 100 | R (mútua) resistividade do solo (Ωm) 1000 | R (seq. zero) resistividade do solo (Ωm) 100 | R (seq. zero) resistividade do solo (Ωm) 1000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 3.20> | 4.31> | 11.51> | 15.55> | 6.15> | 8.33> |
| 2.0 | 2.06> | 2.79> | 7.14> | 9.69> | 3.92> | 5.32> |
| 3.0 | 1.53> | 2.08> | 5.21> | 7.12> | 2.89> | 3.95> |
| 4.0 | 1.20> | 1.65> | 4.06> | 5.58> | 2.26> | 3.11> |
| 5.0 | .97> | 1.34> | 3.26> | 4.52> | 1.83> | 2.53> |
| 6.0 | .80> | 1.12> | 2.66> | 3.73> | 1.50> | 2.09> |
| 7.0 | .67> | .94> | 2.20> | 3.10> | 1.24> | 1.75> |
| 8.0 | .55> | .78> | 1.82> | 2.59> | 1.02> | 1.46> |
| 9.0 | .46> | .66> | 1.50> | 2.16> | .84> | 1.22> |
| 10.0 | .37> | .55> | 1.23> | 1.80> | .70> | 1.02> |
| 20.0 | .06< | .06< | .22< | .20< | .13< | .11< |
| 30.0 | .23< | .29< | .72< | .93< | .42< | .53< |
| 40.0 | .26< | .36< | .84< | 1.13< | .49< | .66< |
| 50.0 | .26< | .35< | .78< | 1.09< | .46< | .64< |
| 60.0 | .21< | .30< | .65< | .92< | .39< | .55< |
| 70.0 | .17< | .24< | .50< | .73< | .30< | .44< |
| 80.0 | .13< | .19< | .37< | .55< | .23< | .33< |
| 90.0 | .08< | .13< | .26< | .40< | .16< | .24< |
| 100.0 | .06< | .09< | .18< | .27< | .11< | .16< |
| 120.0 | .02< | .04< | .06< | .11< | .04< | .06< |
| 140.0 | .00< | .01< | .01< | .02< | .00< | .01< |
| 160.0 | .01> | .01> | .02> | .02> | .01> | .01> |
| 180.0 | .01> | .01> | .03> | .03> | .02> | .02> |
| 200.0 | .01> | .01> | .02> | .03> | .01> | .02> |
| 250.0 | .01> | .01> | .02> | .03> | .01> | .02> |
| 300.0 | .00< | .00< | .01> | .01> | .00> | .00> |

Para o sistema subterrâneo há dois casos simulados (resistividade do solo: 100 e 1000 Ωm).

Observa–se no quadro 8.3 que a taxa de variação percentual é decrescente, porém maior do que o caso referência, entre 1 e 10 Hz, para os dois casos simulados.

De 20 à 50 Hz, aproximadamente, a variação percentual é menor do que o caso referência, apresentando um leve crescimento.

De 60 à 140 Hz, a taxa de variação mantém–se menor do que a referência, no entanto, decrescente.

A partir de 140 Hz até 300 Hz, aproximadamente, a taxa de variação é imperceptivelmente maior do que a referência e quase estacionária ($\leq$ 0.03%); tornando–se, com o crescimento da freqüência, desconsiderável, uma vez que, como em todos os casos simulados, os valores das resistências próprias tendem para o mesmo valor comum, independente da resistividade do solo, referente à distribuição de corrente na periferia do cabo.

**Quadro 8.4 –** Identificação percentual da taxa de variação das indutâncias longitudinais própria e mútua entre fases e própria homopolar ou de seqüência zero, para o caso de sistema subterrâneo, com referência ao caso subterrâneo com resistividade do solo igual a 10 Ωm

VARIAÇAO (%), > OU < DO QUE O CASO COM RESISTIVIDADE DO SOLO = 10 Ωm

| freq. (Hz) | L (própria) | | L (mútua) | | L (seq. zero) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | resistividade do solo (Ωm) | | | | | |
| | 100 | 1000 | 100 | 1000 | 100 | 1000 |
| 1.0 | 58.35< | 109.58< | 105.81< | 269.71< | 83.24< | 181.36< |
| 2.0 | 33.19< | 52.64< | 83.39< | 169.73< | 55.44< | 97.46< |
| 3.0 | 21.94< | 32.77< | 65.98< | 119.93< | 39.53< | 63.56< |
| 4.0 | 15.91< | 23.10< | 53.63< | 91.21< | 29.96< | 46.00< |
| 5.0 | 12.25< | 17.49< | 44.69< | 72.81< | 23.74< | 35.45< |
| 6.0 | 9.82< | 13.89< | 37.96< | 60.07< | 19.41< | 28.49< |
| 7.0 | 8.10< | 11.38< | 32.78< | 50.78< | 16.26< | 23.58< |
| 8.0 | 6.83< | 9.56< | 28.66< | 43.71< | 13.87< | 19.95< |
| 9.0 | 5.85< | 8.17< | 25.33< | 38.17< | 12.00< | 17.16< |
| 10.0 | 5.08< | 7.09< | 22.56< | 33.70< | 10.51< | 14.97< |
| 20.0 | 1.78< | 2.51< | 9.19< | 13.35< | 3.86< | 5.48< |
| 30.0 | .80< | 1.15< | 4.46< | 6.54< | 1.76< | 2.55< |
| 40.0 | .36< | .54< | 2.18< | 3.28< | .82< | 1.22< |
| 50.0 | .15< | .23< | .95< | 1.51< | .34< | .54< |
| 60.0 | .04< | .08< | .28< | .53< | .10< | .18< |
| 70.0 | .01> | .00> | .07> | .01> | .02> | .00> |
| 80.0 | .04> | .04> | .25> | .29> | .08> | .09> |
| 90.0 | .04> | .05> | .32> | .41> | .10> | .12> |
| 100.0 | .04> | .06> | .33> | .45> | .10> | .13> |
| 120.0 | .03> | .04> | .28> | .40> | .07> | .11> |
| 140.0 | .02> | .03> | .20> | .29> | .05> | .08> |
| 160.0 | .01> | .02> | .13> | .20> | .03> | .05> |
| 180.0 | .01> | .01> | .08> | .13> | .02> | .03> |
| 200.0 | .00> | .01> | .05> | .08> | .01> | .02> |
| 250.0 | .00< | .00< | .00< | .01> | .00< | .00< |
| 300.0 | .00< | .00< | .01< | .01< | .00< | .00< |

Como se vê neste quadro, na faixa de freqüência entre 1 e 30 Hz, as indutâncias, discriminadas anteriormente, diminuem sensivelmente com o aumento da resistividade do solo e esta variação decresce com o aumento da freqüência, com referência ao caso de resistividade do solo igual a 10 Ωm.

A taxa de variação percentual continua decrescendo de forma moderada, com valores reduzidos e se mantendo menor do que a referência, até aproximadamente 60 Hz.

De 60 à 200 Hz, a variação percentual é levemente maior do que a referência (com valores menores do que 1%).

De 200 à 300 Hz, a variação percentual é praticamente nula, na ordem de 0.01%, menor do que o caso referência; a partir de então, torna–se desprezível;

c) observa–se, ainda, que o fato de todos os casos simulados terem considerado blindagens e armação aterradas nas extremidades, para que tenham o efeito de solidamente aterradas, com o cabo "continuamente blindado", é necessário que o comprimento do cabo não ultrapasse um quarto do comprimento de onda, até o limite das freqüências investigadas.

Constata–se que, em todos os casos simulados para sistema aéreo e subterrâneo, independente da variação da resistividade do solo, as resistências próprias não homopolares se mantêm praticamente constantes até, aproximadamente, 1 kHz, crescendo de forma mais expressiva com o aumento da freqüência. Já as indutâncias próprias não homopolares conportam–se praticamente constantes com o crescimento da freqüência;

d) também verifica–se que, com o crescimento da freqüência, o fenômeno do efeito pelicular (distribuição da corrente não uniforme, na seção transversal do cabo, concentrando–se na periferia do mesmo) aumenta de intensidade, provocando o crescimento do elemento resistivo da impedância própria e a correspondente redução do elemento indutivo;

e) salienta–se, que o fato de todos os casos simulados terem considerado apenas blindagens solidamente aterradas (em virtude do tempo de CPU envolvido), limitou–se bastante o efeito do solo. Se os cabos fossem isolados, a influência do solo seria muito maior;

f) pelo fato de assumir o cabo "continuamente blindado", com o aumento da freqüência, toda a corrente de cada fase tende a retornar pelas blindagens e armação do cabo, reduzindo o retorno pelo solo. Como conseqüência, as resistências homopolar, não homopolares e em coordenada de fase se aproximam uma da outra, tendo a mesma interpretação física. De forma análoga, as indutâncias próprias homopolares, não homopolares e de coordenada de fase tendem para o mesmo valor. Em decorrência, as mútuas entre fases para as resistências e para as indutâncias tornam–se desprezíveis.

## 8.4– ANÁLISE ASSINTÓTICA DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS R E L COM A FREQÜÊNCIA

As investigações quanto ao comportamento assintótico dos parâmetros longitudinais do cabo, quer para as freqüências reduzidas, quer para as freqüências elevadas, permitem que sejam feitas algumas observações.

De acordo com a metodologia exposta no contexto deste trabalho, a

impedância resulta das contribuições da "impedância interna" do cabo (composição de todas as camadas metálicas) e uma parcela associada ao campo eletromagnético externo ao cabo, correspondente ao retorno pelo solo.

Para as freqüências reduzidas, a parcela predominante na resistência de coordenada de fase corresponde à "resistência interna do cabo"; por conseguinte, devida à distribuição uniforme da corrente, trata–se da resistência de corrente contínua ($R_{dc}$). O efeito do solo, neste caso, para as baixíssimas freqüências, é pequeno, da ordem de $\omega$.

Para as freqüências elevadas, a resistência de coordenada de fase (já feitas as inclusões quanto ao aterramento das blindagens e armação) é da ordem de $\sqrt{\omega}$.

Nas freqüências baixas, a parcela da reatância em coordenada de fase correspondente à "reatância interna", devida à distribuição uniforme da corrente nos condutores internos do cabo, é da ordem de $\omega$. Ao diminuir mais ainda a freqüência, a parcela da indutância que considera o efeito do solo (para próprias e mútuas) pode ser muito grande, tendendo para infinito quando a freqüência tende para zero, sendo da ordem de $\ell n\ \omega$ para $\omega$ muito pequeno.

Quando a freqüência aumenta, a parcela da indutância referente ao solo tende para zero e a contribuição equivalente aos campos no interior do cabo diminue sensivelmente.

Para as componentes não homopolares (de seqüências positiva e negativa), admitem–se as aproximações seguintes, de forma generalizada:

$$R_1 = R_{d0} + a_1 \sqrt{\omega}$$

$$L_1 = L_{d0} + \frac{a_1}{b_1 + \sqrt{\omega}} \tag{8.1}$$

sendo

$$\frac{a_1}{b_1} = L_{dc} \tag{8.2}$$

$R_{d0}$– resistência, por unidade de comprimento, dos condutores por fase ou por cabo (coordenada de fase);

$L_{d0}$– indutância equivalente, por unidade de comprimento, correspondente ao campo eletromagnético externo ao cabo;

$L_{dc}$– indutância equivalente em corrente contínua, por unidade de comprimento, correspondente ao campo eletromagnético no interior do cabo.

Para freqüências pequenas, $R_1$ e $L_1$ são aproximadamente constantes, tendendo para valores definidos e não nulos. Quando $\omega$ tende para zero, observa–se que:

– $R_1$ tende para $R_{d0}$;
– $L_1$ tende para $L_{d0} + L_{dc}$.

Para as altas freqüências, observa–se que:

– $R_1$ se aproxima de $a_1 \sqrt{\omega}$;

- $L_1$ tende, assintoticamente, para $L_{d0} + \frac{a_1}{\sqrt{\omega}}$.

Na análise das componentes homopolares, verifica–se que:

- ao fazer a freqüência tender para zero, $R_h$ tende para um limite finito e não nulo;

- ao reduzir a freqüência, $L_h$ tende para um valor grande, da "ordem" de $\ell n\ \omega$;

- com o aumento da freqüência, $R_h$ tende, assintoticamente, para $a_0 \sqrt{\omega}$ e $L_h$, também de forma assintótica, tende para $L_{h0} + \frac{a_0}{\sqrt{\omega}}$.

# CAPÍTULO IX

## CONCLUSÕES E SUGESTÃO

A solução e metodologia para o cálculo dos parâmetros elétricos (impedâncias longitudinais e admitâncias transversais) por unidade de comprimento, em função da freqüência, para um sistema elétrico de cabos, foram abordadas neste trabalho, descritas pela formulação clássica analítica.

Com base nas pesquisas teóricas, foi possível desenvolver um programa para cálculo computacional dos parâmetros elétricos de um sistema de cabos, envolvendo cabos SC, cabos PT, sistema aéreo, sistema subterrâneo e sistema submarino, utilizando–se as séries completas, as assintóticas e as aproximações polinomiais para as funções modificadas de Bessel. Quanto ao retorno pelo solo incluído na metodologia, foram empregadas as formulações clássicas de Carson para cabos aéreos, de Pollaczek para cabos subterrâneos e de Bianchi para cabos submarinos.

No tocante a influência da freqüência nos parâmetros elétricos do sistema de cabos, o comportamento dos mesmos pode ser observado nas curvas plotadas nas figuras (8.1) a (8.54).

Destaca–se que, com o uso cada vez mais freqüente de sistemas de cabos em circuitos mais longos e operando em níveis mais altos de tensão, torna–se fundamental conhecer os parâmetros dos cabos em dependência com a freqüência; de extrema necessidade para estudos de transitórios de chaveamento ou mesmo de falhas de isolantes. Este trabalho traz esta contribuição no sentido de oferecer um programa computacional capaz de obter tais parâmetros, com toda a metodologia e hipóteses assumidas, evidenciadas no escopo do trabalho.

Finalmente, ressalta–se que a metodologia aqui apresentada envolve configurações coaxiais ou configurações de simetria axial formando polígonos regulares no interior do tubo envolvente do cabo PT.

Fica como sugestão, aproveitar este trabalho como ferramenta básica para estudos de transitórios envolvendo sobretensões em blindagens dos cabos e outros efeitos de indução transitória.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ 1] ABRAMOWITZ, M. and STEGUN, I. A. – **Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**, New York, Dover Publications: 355–389, (1967).

[ 2] ALVARADO, F. L. and BETANCOURT, R. – "An Accurate Closed–Form Approximation for Ground Return Impedance Calculations", Proc. **IEEE**, Vol. 71, n$^0$. 2: 279–280, (Feb. 1983).

[ 3] AMETANI, A. – "Wave Propagation Characteristics of Cables", **IEEE Trans. on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–99, n$^0$. 2: 499–505, (March/April 1980).

[ 4] AMETANI, A. – "A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables", **IEEE Trans. on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–99, n$^0$. 3: 902–910, (May/June 1980).

[ 5] ARIZON, P. de and DOMMEL, H. W. – "Computation of Cable Impedances Based on Subdivision of Conductors", **IEEE Trans.on Power Deliv.**, Vol. PWRD–2, n$^0$. 1: 21–27, (1987).

[ 6] BIANCHI, G. and LUONI, G. – "Induced Currents and Losses in Single–Core Submarine Cables", **IEEE Trans. on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–95, n$^0$. 1: 49–58, (Jan./Feb. 1976).

[ 7] BROWN, G. W. and ROCAMORA, R. G. – "Surge Propagation in Three–Plase Pipe–Type Cables. Part I – Unsaturated Pipe", **IEEE Trans.**

**on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–95, n$^0$. 1: 89–95, (1976).

[ 8] CARSON, J. R. and GILBERT, J. J. – "Transmission Characteristics of the Submarine Cable", **Bell Syst. Technical Journal**: 88–115, (1922).

[ 9] CARSON, J. R. – "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return", **Bell System Technical Journal**, Vol. 5: 539–554, (1926).

[10] CARSON, J. R. – "Ground Return Impedance: Underground Wire with Earth Return", **Bell System Technical Journal**, Vol. 8, n$^0$. 1: 94–98, (1929).

[11] DERI, A. and TEVAN, G. and SEMLYEN, A. and CASTANHEIRA, A. – "The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi–Layer Earth Return", **IEEE Trans. on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–100, n$^0$. 8: 3686–3693, (1981).

[12] DUGAN, R. C., ROCAMORA, R. G. and BROWN, G. W. – "Surge Propagation in Three–Phase Pipe–Type Cables. Part II – Duplication of Field Tests Including the Effects of Neutral Wires and Pipe Saturation", **IEEE Trans. on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–96, n$^0$. 3: 826–833, (May/June 1977).

[13] EDELMANN, H. – "**Théorie et Calcul des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique**, DUNOD, Paris: 163–192, (1966).

[14] EFTHYMIADIS, A. E. and WEDEPOHL – "Propagation Characteristics of Infinitely–Long Single–Conductor Lines by the Complete Field Solution

Method", **Proc. IEE**, Vol. 125, n$^0$. 6: 511–516, (June 1978).

[15] FARIA, J. A. B. – "Overhead Three–Phase Transmission Lines – Non–Diagonalizable Situations", **IEEE Trans. on Power Deliv.**, Vol. 3, n$^0$. 4: 1348–1355, (October 1988).

[16] FICAP/ELECAB – Fios e Cabos Plásticos do Brasil S. A., "Características Construtivas", Divisão de Cabos de Energia, Publicação Técnica.

[17] HOYT, R. S. and MEAD, S. P. – "Mutual Impedances of Parallel Wires", **Bell System Technical Journal**, Vol. 14, n$^0$. 3: 509–533, (1935).

[18] HUNTER, R. N. and BOOTH, R. P. – "Cable Crosstalk–Effect of Non–Uniform Current Distribution in the Wires", **Bell System Technical Journal**, Vol. 14, n$^0$. 2: 179–194, (1935).

[19] INBRAC S. A. – "Cabos Elétricos", Informações Técnicas, Divisão de Cabos.

[20] JOHNSON, W. C. – **Transmition Lines and Networks**, New York, International Student Edition, McGraw–Hill Book Company, (1950).

[21] JÚDICE, N. e JÚDICE, L. F. – "Como Elaborar uma Dissertação de Mestrado – Orientação Básica", **Arq. Bras. Med., 63(4)**: 293–298, (1989).

[22] KRAUS, J. D. e CARVER, K. R. – **Eletromagnetismo**, Editora Guanabara, 2$^a$. Edição, Rio de Janeiro, (1978).

[23] MACHADO, V. M. and SILVA, J. F. B. – "Series–Impedance of

Underground Cable Systems", **IEEE Trans. on Power Deliv.**, Vol. 3, n$^0$. 4: 1334–1340, (Oct. 1988).

[24] MURPHY, E. J. and MORDGAN, S. O. – "The Dielectric Properties of Insulating Materials", **Bell System Technical Journal**, Vol. 16, n$^0$. 4: 493–512, (1937).

[25] NISHIMURA, F. – "Cálculo de Parâmetros Elétricos de Cabos Subterrâneos", **Tese de Mestrado**, USP, (1981).

[26] NOUALY, J. P. and ROY, G. Le – "Wave–Propagation Modes on High–Voltage Cables", **IEEE Trans. on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–96, n$^0$. 1: 158–165, (1977).

[27] PIRELLI – Cabos Elétricos, Introdução ao Catálogo Geral – Cabos de Energia.

[28] PIRELLI – Cabos Voltalene em Alumínio, **Informativo Técnico, n$^0$. 24**, (abril, 1973).

[29] PIERONI, C. A. and MUNN, P. S. – "The Manufacture, Instalation and Calculated Transmission Performance of a 34.5 kV Submarine Cable", IEEE/PES Trans. and Distrib. Conference and Exposition, 7$^{th}$: 347–353, (April 1979).

[30] POLLACZEK, F. – "Sur le Champ Produit par un Conducteur Simple Infiniment Long Parcouru par un Courant Alternatif", **Revue Générale de L'Électricité**, Vol. 29: 851–867, (1931).

[31]PORTELA, C. M. J. C. M. – "Regimes Transitórios, **Apostila, Vol. II**, COPPE/UFRJ, (1983).

[32] RAISBECK, G. and MANLEY, J. M. – "Transmission Characteristics of a Three–Conductor Coaxial Transmission Line With Transpositions", **Bell System Technical Journal**, Vol. 37, n$^0$. 4: 835–876, (1958).

[33] SCHELKUNOFF, S. A. – "The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields", **Bell System Technical Journal**, Vol. 13, n$^0$. 4: 532–579, (1934).

[34] SCHELKUNOFF, S. A. – "Conversion of Maxwell's Equations into Generalized Telegraphist's Equations", **Bell System Technical Journal**, Vol. 34, n$^0$. 5: 995–1043, (1955).

[35] SEMLYEN, A. – "Ground Return Parameters of Transmission Lines an Asymptotic Analysis for Very High Frequencies", **IEEE Trans. on Power App. and Syst.**, Vol. PAS–100, n$^0$. 3: 1031–1038, (1981).

[36] TANAKA, T., GREENWOOD, A. – **Advanced Power Cable Technology**, Basic Concepts and Testing CRC Press, Vol. I, Inc. Boca Raton, Florida, (1983).

[37] WEDEPOHL, L. M. and EFTHYMIADIS, A. E. – "Wave Propagation in Transmission Lines over Lossy Ground: A New Complete Field Solution", **Proc. IEE**, Vol. 125, n$^0$. 6: 505–510, (June 1978).

[38] WEDEPHOL, L. M. and WILCOX, D. J. – "Transient Analysis of Underground Power–Transmission Systems", **Proc. IEE**, Vol. 120, n$^0$. 2: 253–260, (Feb. 1973).

[39] WISE, W. H. – "Potential Coefficients for Ground Return Circuits", **Bell Syst. Technical Journal**, Vol. 27: 365–371, (1948).

[40] WISE, W. H. – "Effect of Ground Permeability on Ground Return Circuits", Vol. 10, n$^0$. 3: 472–484, (1931).

# APÊNDICE I

## DEFINIÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS, VARIÁVEIS E FUNÇÕES

### A.1.1 – PARÂMETROS

$\gamma$ – constante de Euler;

$$\gamma = \lim_{n \to \infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \ldots + \frac{1}{n} - \ell n\ n\right) \qquad (A.1.1)$$

$$\gamma = 0.577\ 215\ 566\ 490\ 153\ 286 \ldots$$

$\mu_0$ – permeabilidade magnética do vácuo ($Hm^{-1}$);

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ Hm^{-1}$$

$$\pi = 3.141\ 592\ 653\ 589\ 793\ 238\ 46 \ldots$$

$\epsilon_0$ – permissividade elétrica do vácuo ($Fm^{-1}$);

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0\ c^2} \qquad (A.1.2)$$

onde:

c – velocidade da luz;

$c \approx 299.792\ 5\ Mms^{-1}$

Substituindo os valores de c e de $\mu_0$ na expressão (A.1.2), obtém:

$\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12}\ Fm^{-1}$

## A.1.2 – VARIÁVEIS

f – freqüência do sistema ($s^{-1}$) ou ($H_z$);

$\omega$ – pulsação angular (rad $s^{-1}$);

$$\omega = 2\pi f \qquad (A.1.3)$$

## A.1.3 – FUNÇÕES

$I_0(X)$ – função de Bessel modificada de primeira espécie, de ordem zero;

$I_0(X) = ber_0(x) + j\ bei_0(x)$

$I_1(X)$ – função de Bessel modificada de primeira espécie, de primeira ordem;

$I_1(X) = bei_1(x) - j\ ber_1(x)$

$K_0(X)$ – função de Bessel modificada de segunda espécie, de ordem zero;

$K_0(X) = ker_0(x) + j\ kei_0(x)$

$K_1(X)$ – função de Bessel modificada de segunda espécie, de primeira ordem;

$$K_1(X) = -\,\mathrm{kei}_1(x) + j\,\mathrm{ker}_1(x)$$

sendo:

X – argumento das funções de Bessel ($I_n$ e $K_n$);

$$X = x\, e^{j\pi/4} \tag{A.1.4}$$

x – argumento das funções parciais de Bessel ($\mathrm{ber}_n$, $\mathrm{bei}_n$, $\mathrm{ker}_n$, $\mathrm{kei}_n$);

$\ell n$ – função logarítmica neperiana ou natural;

e – base natural da função logarítmica;

$$e = \lim_{n \to \infty} (1 + \frac{1}{n})^n \tag{A.1.5}$$

e = 2.718 281 828 459 045 235 360 287 ...

### A.1.3.1 – Expansão Binomial em (–1)

$$(a+x)^{-1} = a^{-1} - 1\, a^{-2}\, x + \frac{-1(-2)}{2!}\, a^{-3}\, x^2 + \ldots$$

$$= \frac{1}{a} - \frac{1}{a^2}\, x + \frac{1}{a^3}\, x^2 + \ldots \tag{A.1.6}$$

### A.1.3.2 – Expansão de Funções Trigonométricas

$$\cos(ax) = 1 - \frac{(ax)^2}{2!} + \frac{(ax)^4}{4!} - \ldots \tag{A.1.7}$$

$$\text{sen}(ax) = ax - \frac{(ax)^3}{3!} + \ldots \tag{A.1.8}$$

### A.1.3.3 – Função "Gamma"

Também conhecida[1] como função fatorial ($\Gamma(z)$)

Por definição, para $z > 0$, tem–se:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1}\, e^{-t}\, dt$$

$$\Gamma(z+1) = 2!$$

$$\Gamma(n+z) = (n-1+z)! \tag{A.1.9}$$

Sendo n e $z > 0$

### A.1.3.4 – Função "PSI" (Digamma)

$\psi(z)$

$\psi(1) = -\gamma$

$$\psi(n) = -\gamma + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k} \qquad \text{para } n \geq 2 \tag{A.1.10}$$

## A.1.4 – PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

A profundidade de penetração é um assunto de interesse considerável. A Figura A.1.1 auxiliará nos cálculos eletromagnéticos.

Uma onda eletromagnética é rapidamente atenuada em um meio condutor (quando $\sigma \gg \omega\epsilon$).

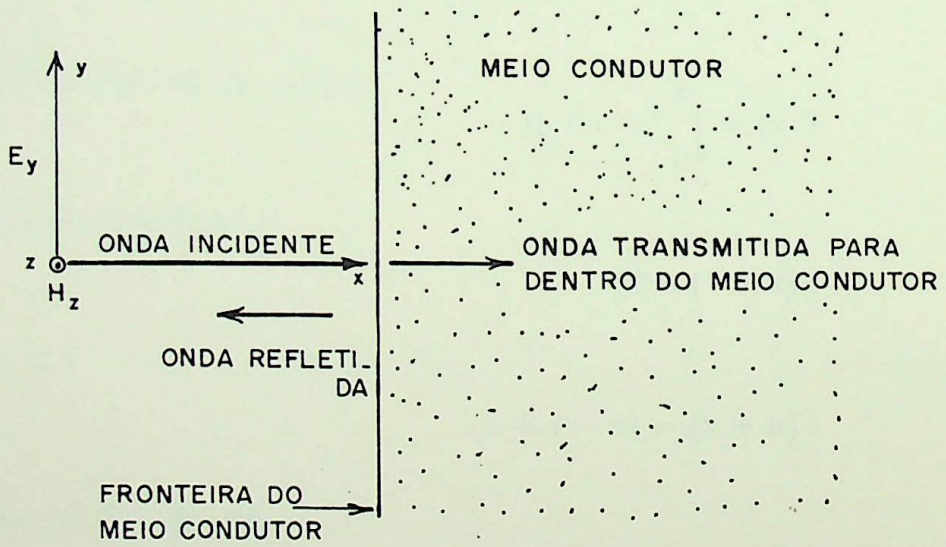



Fig. A.1.1 – Onda plana entrando num meio condutor com incidência normal[22]

As equações em rotacional de Maxwell permitem, para uma onda polarizada linearmente viajando na direção x, com E na direção y, escrever:

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma E_y + \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \tag{A.1.11}$$

e

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \qquad \text{(A.1.12)}$$

Derivando (A.1.11) em relação a t e (A.1.12) em relação a x, obtêm–se:

$$\frac{\partial}{\partial t}\frac{\partial H_z}{\partial x} = -\sigma \frac{\partial E_y}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \qquad \text{(A.1.13)}$$

e

$$-\frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\frac{\partial H_z}{\partial t} \qquad \text{(A.1.14)}$$

Dado que não há diferenças entre posições nas equações, o lado esquerdo de (A.1.13) é igual ao lado direito de (A.1.14), levando a:

$$\frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial E_y}{\partial t} = 0 \qquad \text{(A.1.15)}$$

A equação (A.1.15) é a equação de onda em $E_y$ para uma onda plana num meio condutor.

Considerando a variação harmônica de $E_y$ em relação a t, vem:

$$E_y = E_0\, e^{j\omega t} \qquad \text{(A.1.16)}$$

Encontrando a primeira e a segunda derivadas de (A.1.16) em relação a t e substituindo estes valores em (A.1.15), obtém–se:

$$\frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \omega^2 \in E_y - j\,\omega\,\sigma\,E_y = 0 \qquad (A.1.17)$$

Reagrupando os termos em $E_y$ na equação (A.1.17), torna–se:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - (j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\in)\,E_y = 0 \qquad (A.1.18)$$

Fazendo:

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\in \qquad (A.1.19)$$

Substituindo–se (A.1.19) em (A.1.18), tem–se:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \gamma^2 E_y = 0 \qquad (A.1.20)$$

onde:

$\gamma$ – termo conhecido como constante de propagação.

Admitindo uma onda se propagando na direção positiva x (seja $x = 0$ na fronteira do meio condutor; desta forma x aumenta positivamente para dentro do condutor), uma solução para a equação (A.1.20) pode ser:

$$E_y = E_0\,e^{-\gamma x} \qquad (A.1.21)$$

Como nos condutores $\sigma \gg \omega\in$, na equação (A.1.19) o segundo termo pode ser desprezado em presença do primeiro termo. Portanto, a equação (A.1.19) reduz–se a:

$$\gamma^2 \approx j\omega\mu\sigma \tag{A.1.22}$$

Sendo:

$$\gamma \approx \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \tag{A.1.23}$$

Fazendo

$$\gamma = \alpha + j\beta \tag{A.1.24}$$

onde:

$\alpha$ – parte real de $\gamma$, está associada à atenuação do campo;

$\beta$ – parte imaginária de $\gamma$, está associada à fase;

$\omega$ – freqüência angular (com definição no Apêndice I);

$\mu$ – permeabilidade magnética do meio ($Hm^{-1}$);

$\sigma$ – condutividade elétrica do meio ($Sm^{-1}$);

x – distância (m);

j – operador complexo[22] (adimensional).

$$\sqrt{j} = \sqrt{\frac{2j}{2}} = \sqrt{\frac{1+2j-1}{2}} = \sqrt{\frac{(1+j)^2}{2}} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} = 1\underline{|45^0} \tag{A.1.25}$$

O campo atenua exponencialmente e é retardado linearmente à medida que x aumenta[22].

Reescrevendo (A.1.21), vem:

$$E_y = E_0\, e^{-x/\delta}\, e^{-j(x/\delta)} \qquad (A.1.26)$$

sendo,

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma} \qquad (A.1.27)$$

Em $x = 0$, $E_y = E_0$. Este é o valor da amplitude do campo na superfície do meio condutor. Observa–se em (A.1.26) que $\delta$ tem a dimensão de distância. A uma distância $x = \delta$, a amplitude do campo será:

$$|E_y| = E_0\, e^{-1} = E_0\, \frac{1}{e} \qquad (A.1.28)$$

Portanto, $E_y$ diminui para 1/e (36,8%) do seu valor inicial, enquanto a onda penetra a uma distância $\delta$. Em face desta propriedade, $\delta$ é chamada de profundidade de penetração 1/e ou profundidade nominal de penetração.

Como $\omega = 2\pi f$, a profundidade 1/e de (A.1.27) torna–se:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f\mu}} \qquad (A.1.29)$$

sendo $\rho$ a resistividade elétrica do material condutor ($\Omega$m).

Considerando como exemplo o cobre:

$\mu_r = 1$;

$\mu \approx 1.26\ \mu Hm^{-1}$;

$\sigma \approx 58\ MSm^{-1}$. Levando estes valores em (A.1.29), obtém–se:

$$\delta_{cobre} \approx \frac{6.6\ x\ 10^{-2}}{\sqrt{f}} \qquad (A.1.30)$$

onde:

$\delta_{cobre}$ – profundidade de penetração 1/e do cobre (m);
f – freqüência (Hz)

Considerando as freqüências seguintes, têm–se:

Em 60 Hz: $\delta = 8.5 \times 10^{-3}$ m

Em 1 MHz: $\delta = 6.6 \times 10^{-5}$ m

Em 30 GHz: $\delta = 3.8 \times 10^{-7}$ m

Em resumo[20,22], quando uma corrente alternada flui em um condutor, o fluxo magnético alternado dentro do condutor induz uma fem. Esta fem causa à densidade de corrente o decrescimento no interior do meio condutor e o crescimento para a superfície externa do mesmo. Portanto, o que resulta deste fenômeno é conhecido como efeito pelicular ou superficial, que cresce com destaque com o aumento da freqüência.

Observa–se, entretanto, que a penetração diminui em proporção inversa à raiz quadrada da freqüência.

Salienta–se que, quando são usados condutores de materiais ferromagnéticos, o efeito pode ser apreciável[20] em freqüências industriais, mediante as características não lineares destes materiais.

Análises mostram[20,22] que uma onda eletromagnética ao penetrar um condutor, em alta freqüência, sofre uma atenuação mais rápida do que se estivesse em baixa freqüência.

O comprimento de onda no condutor pode ser obtido através da equação que segue:

$$\lambda_c = 2\pi\delta \qquad \text{(A.1.31)}$$

sendo:

$\lambda_c$ – comprimento de onda no condutor. Tem a mesma dimensão de $\delta$.

# APÊNDICE II

## CABOS ELÉTRICOS: CARACTERÍSTICAS GERAIS

### A.2.1 – MATERIAIS DIELÉTRICOS

Na teoria clássica[22,24], a condição essencial para um material dielétrico ser um bom isolante é que os elétrons e outras partículas carregadas das quais é composto, sejam mantidos em posição de equilíbrio pelas características das forças constituintes da estrutura do material. Quando um campo elétrico é aplicado, não há migração de cargas.

Na realidade ocorre um ligeiro deslocamento dos elétrons em relação aos seus núcleos; cessando a influência do campo elétrico, as cargas voltam às condições originais. Nas considerações do comportamento dos dielétricos, este modelo será suficiente.

Uma das propriedades mais importantes dos materiais dielétricos é a sua permissividade ou constante dielétrica.

#### A.2.1.1 – Permissividade ou Constante Dielétrica

De forma prática, a permissividade pode ser obtida[22] por:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \qquad \text{(A.2.1)}$$

sendo:

$\epsilon$ – permissividade do material dielétrico ($Fm^{-1}$);

$\epsilon_0$ – permissividade do vácuo (vista no Apêndice I);

$\epsilon_r$ – permissividade relativa do material dielétrico (adimensional).

Os valores das permissividades relativas dos materiais dielétricos são normalmente encontrados em tabelas e referem–se a campos elétricos estáticos (ou em baixas freqüências) e são aproximados, exceto para o vácuo ou o ar.

Efetivamente, a constante dielétrica decresce com o aumento da freqüência e varia com a temperatura. Na prática, estas variações não são consideradas, sendo extremamente difícil obtê–las; levando, em geral, a erros aceitáveis até a faixa de freqüência de alguns MHz.

Tabela A.2.1 – Permissividades relativas usuais de alguns materiais isolantes[27]

| MATERIAL ISOLANTE | $\epsilon_r$ |
|---|---|
| PVC | 5.0 a 7.0 |
| PET | 2.3 |
| XLPE | 2.3 a 2.6 |
| EPR | 2.6 a 3.0 |
| Papel impregnado com massa | 3.7 |
| Papel impregnado com óleo fluido | 3.3<br>3.5 |
| AR | 1.0 |

Sem mudança essencial no modelo do dielétrico, ilustrando a variação da permissividade com a freqüência, será discutido um modelo baseado na teoria quântica[24]: quando um dielétrico é colocado sob a influência de um campo elétrico, cargas positivas e negativas nos átomos e moléculas são deslocadas em direções opostas. O dielétrico encontra–se, então, em condições polarizadas; sendo que o movimento das cargas de sinais opostos em direções opostas constituem uma corrente elétrica. Esta corrente é chamada corrente de polarização fluindo enquanto as condições polarizadas se mantêm.

Para o caso de um campo elétrico estático, a corrente de polarização flui no dielétrico por mais um certo tempo, após a aplicação do campo elétrico.

Se o material não é um dielétrico ideal, mas contém alguns íons livres, a corrente devida ao campo elétrico estático não tenderá para zero, mas para um valor constante determinado pela condutividade devida aos íons livres.

O comportamento do dielétrico de materiais diferentes sobre diferentes condições é refletido nas características das correntes de polarização, dependendo da tensão aplicada e das dimensões da camada isolante (dielétrico).

Vários tipos de polarização podem ser induzidos nos dielétricos[24] como delineados a seguir:

a) polarização eletrônica

Esta polarização ocorre devido ao deslocamento de elétrons com referência ao núcleo positivo dentro do átomo.

b) polarização atômica

A polarização atômica se distingue da polarização eletrônica sendo a parte da polarização de uma molécula, que pode ser atribuída ao movimento relativo dos átomos que a compõem. É, geralmente, desprezível para materiais orgânicos.

c) polarização dipolar

Esta polarização baseia–se no efeito do campo aplicado nas orientações moleculares com momentos dipolares permanentes.

d) polarização interfacial

A polarização interfacial pode existir em materiais dielétricos feitos com dois ou mais componentes tendo diferentes constantes dielétricas e condutividades, exceto para o caso particular onde $\epsilon_1 \sigma_2 = \epsilon_2 \sigma_1$, sendo $\sigma$ a condutividade a.c. (depende da freqüência) e os subscritos referem–se aos dois componentes. Também conhecida como polarização iônica por ser causada pelo acúmulo dos íons livres na interface entre os materiais.

Cada tipo de polarização pode contribuir para a variação da constante dielétrica ao longo da variação da freqüência, levando a um comportamento complexo do dielétrico.

Nas baixas freqüências, a constante dielétrica do material tem altos valores; é usualmente chamada de constante dielétrica de freqüência – zero ou estática. Com o crescimento da freqüência, a constante dielétrica começa a decrescer com tendências

para um valor constante e menor. Quando a freqüência tende para um valor considerado infinito, a constante dielétrica do material tende para $\epsilon_0$.

A Figura A.2.1, para um material hipotético, mostra as várias contribuições das polarizações para a constante dielétrica e para as perdas no dielétrico, com a freqüência, considerando:

– Freqüências Elétricas

. Faixa de potência: interesse até alguns MHz;
. Faixa de áudio: até, aproximadamente, 20 kHz;
. Faixa de rádio: incluindo microondas, até $10^{11}$ Hz;

– Freqüências Óticas

. Faixa infravermelho: de $10^{11}$ à $10^{14}$ Hz;
. Faixa de luz visível: (incluindo raios ultravioleta) de $10^{14}$ à $10^{16}$ Hz.

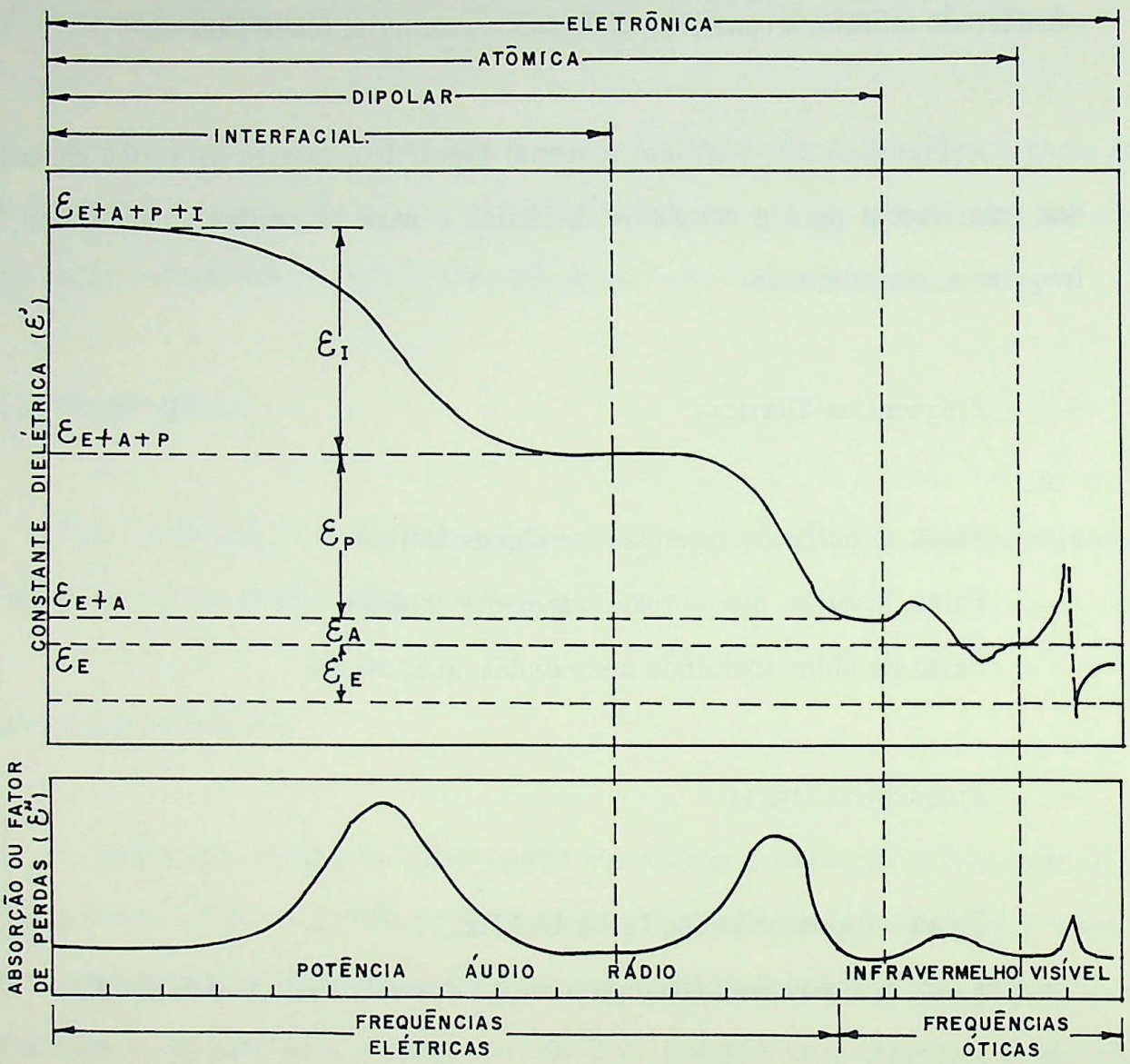



Fig. A.2.1 – Diagrama esquemático da variação da constante dielétrica e absorção do dielétrico com a freqüência, para um material hipotético[24]

## A.2.2 – CLASSES DE TENSÃO[16,19,27]

Quanto à tensão de isolamento, os cabos de energia podem ser classificados e caracterizados por suas tensões ($V_0|V$) como:

baixa tensão: cabos até 0.6/1 kV;

média tensão: cabos de 1.8/3 kV até 27/35 kV;

alta tensão: cabos de 36 kV até 150 kV;

altíssima tensão: cabos acima de 150 kV.

Sendo:

$V_0$ – valor eficaz da tensão entre o condutor e a terra;

V – valor eficaz da tensão entre condutores isolados.

Normalmente, distingue–se um cabo de baixa tensão de um cabo de média ou de alta tensão pelo fato dos dois últimos serem construídos, em geral, com blindagens sobre o condutor e sobre o isolamento.

## A.2.3 – TEMPERATURAS ADMISSÍVEIS DOS MATERIAIS ISOLANTES

A temperatura admissível de um determinado material isolante é uma importante propriedade física, pois é responsável pelo fator limitante da capacidade de corrente do cabo construído com tal material isolante.

**Tabela A.2.2** – Temperaturas admissíveis de alguns materiais isolantes mais usados[27]

| MATERIAL ISOLANTE | REGIME DE OPERAÇÃO CONTÍNUO | DE SOBRECARGA | DE CURTO–CIRCUITO |
|---|---|---|---|
| PVC | 70°C | 100°C | 160°C |
| PET | 75°C | 90°C | 150°C |
| XLPE | 90°C | 130°C | 250°C |
| EPR | 90°C | 130°C | 250°C |
| Papel impreg–nado c/massa | 80°C<br>95°C | 100°C<br>115°C | 200°C |
| Papel impreg–nado com óleo fluido | 85°C | 105°C | 250°C |

## A.2.4 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CONDUTORES

A resistividade elétrica de um material condutor ($\rho$) é característica do material.

Por definição, a resistividade de um material é numericamente igual à resistência de um cubo unitário homogêneo do material[22], com uma distribuição uniforme de corrente.

Em unidades do SI, a resistividade ($\rho$) é expressa em ($\Omega$m).

A resistividade é função da temperatura. Nos condutores metálicos[22], a resistividade tem variação quase linear com a temperatura absoluta.

Para uma faixa considerável de temperatura, partindo de uma temperatura de referência ($T_0$), a resistividade do material pode ser obtida por:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \qquad (A.2.2)$$

sendo:

$T$ – temperatura de operação do material ($^0C$);

$T_0$ – temperatura de referência (geralmente $20^0C$);

$\rho_0$ – resistividade à temperatura $T_0$ ($\Omega m$);

$\alpha$ – coeficiente de temperatura da resistividade ($^0C^{-1}$).

**Tabela A.2.3–** Resistividade ($\rho_0$) e coeficiente de temperatura ($\alpha_0$) à 20$^0$C., para alguns materiais condutores

| MATERIAL CONDUTOR | | $\rho_0$ ($\Omega$m) | ($\alpha_0$) ($^0C^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| Cobre | (padrão IACS) | 0.017 241x10$^{-6}$ | 0.003 93 |
| | (duro) | 0.017 7x10$^{-6}$ | 0.003 8 |
| Alumínio | | 1.77x10$^{-8}$ | 0.004 03 |
| | (duro) | 0.028 2x10$^{-6}$ | 0.004 0 |
| Aço galvanizado | | 0.171 x 10$^{-6}$ | 0.004 5 |
| Chumbo (99+) | | 0.206 5x10$^{-6}$ | 0.004 |
| Liga de alumínio A$\ell$CuMg (mole) | | 0.035 714x10$^{-6}$ | 0.003 5 |

## A.2.5 – PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

É dependente do comportamento magnético[22] dos materiais. Os mesmos podem ser classificados como:

a) materiais diamagnéticos

Nestes materiais, a magnetização é oposta ao campo magnético aplicado.

b) materiais paramagnéticos

A magnetização, neste caso, ocorre no mesmo sentido do campo magnético.

c) materiais ferromagnéticos

Neste grupo de materiais, a magnetização também ocorre no mesmo sentido do campo magnético; porém, é uma magnetização forte.

A permeabilidade magnética de um material ($\mu$) pode ser encontrada através de:

$$\mu = \mu_r \, \mu_0 \qquad \text{(A.2.3)}$$

Com:

$\mu$ – permeabilidade magnética do material ($Hm^{-1}$)

$\mu_r$ – permeabilidade magnética relativa (adimensional);

$\mu_0$ – permeabilidade magnética do vácuo (vista no Apêndice I).

A permeabilidade relativa do vácuo ou espaço livre é definida sendo unitária.

A permeabilidade relativa dos materiais diamagnéticos é ligeiramente menor do que 1; nos materiais paramagnéticos, a permeabilidade relativa é ligeiramente maior do que 1. Porém, nos materiais ferromagnéticos, a permeabilidade relativa é muito maior do que 1.

Para os materiais diamagnéticos e paramagnéticos, a permeabilidade relativa é praticamente constante[22] e independente do campo magnético aplicado. Já nos materiais ferromagméticos, a permeabilidade relativa varia dentro de uma faixa

ampla de valores para diferentes campos magnéticos aplicados de forma não linear. Entretanto, nestes materiais, a permeabilidade relativa máxima é uma quantidade usualmente definida.

**Tabela A.2.4** – Permeabilidade magnética relativa de alguns materiais

| MATERIAL MAGNÉTICO | PERMEABILIDADE RELATIVA |
|---|---|
| Chumbo | 0.999 983 |
| Cobre | 0.999 991 |
| Aço galvanizado (dentro da faixa linear) | 20 a 1000 |
| Aço doce (dentro da faixa linear) | 2000 |
| Prata | 0.999 98 |
| Alumínio | 1.000 02 |
| Ferro (0.2 de impureza) | 5 000 |

# APÊNDICE III

## DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DA IMPEDÂNCIA SUPERFICIAL DE UM CONDUTOR TUBULAR

Considera–se um condutor tubular com seção transversal em forma de coroa circular de raios da superfície interna $R_0$ e da superfície externa $R_1$ conforme mostra a Figura (A.3.1), distante de outros condutores. Esta hipótese permite assumir simetria cilíndrica na distribuição dos campos eletromagnéticos.

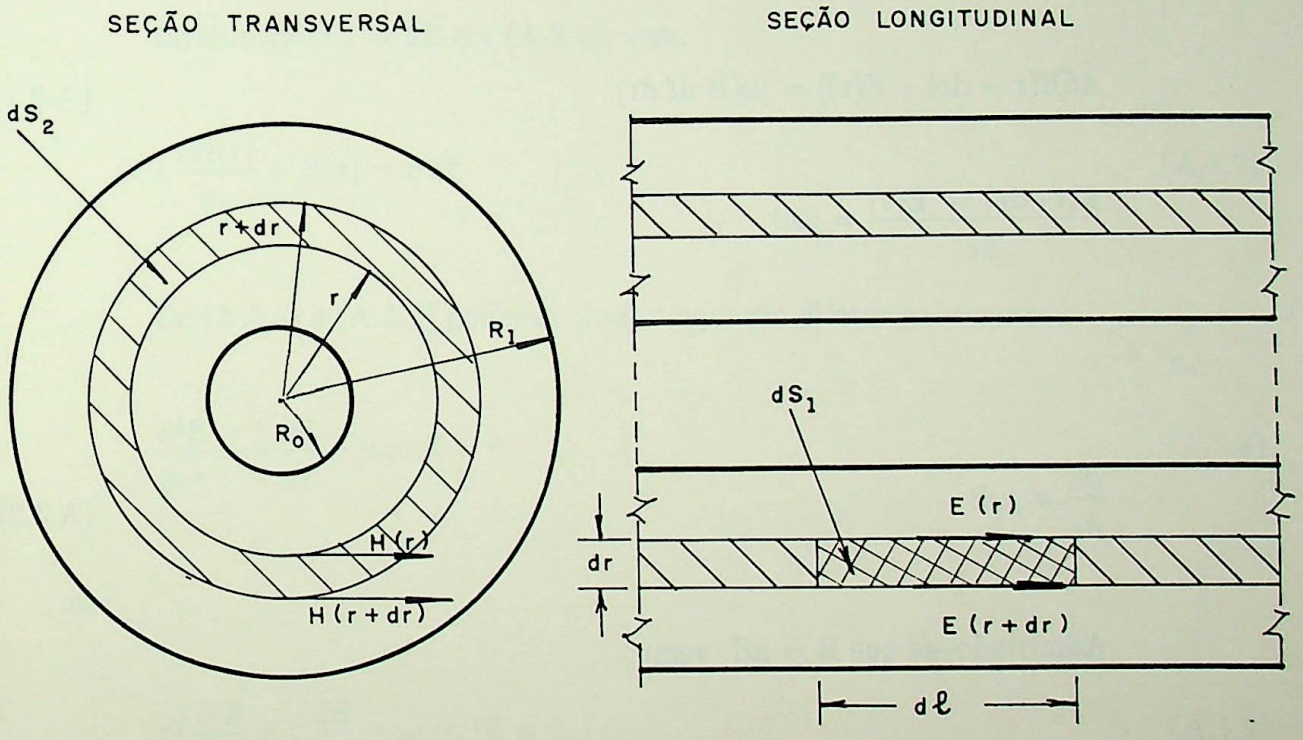



Fig. A.3.1 – Corte transversal e longitudinal do condutor tubular em análise

Quanto ao campo elétrico no interior do condutor, só é considerada a componente longitudinal E, desprezando–se as componentes radial e tangencial. No que concerne o campo magnético, admite–se apenas, a componente tangencial,

desconsiderando–se as outras duas.

Supõe–se[31] que as grandezas são alternadas, senoidais, com freqüência angular $\omega$ e, que o comprimento de onda é muito superior às dimensões transversais do condutor.

Da equação de Maxwell, incluindo–se as suposições feitas anteriormente quanto aos campos eletromagnéticos, na forma integral, aplicada a $dS_1$, tem–se:

$$\oint_L \bar{E}\, d\ell = -j\omega \int_S \bar{B}\, ds$$

$$d\ell[E(r + dr) - E(r)] = j\omega(B\, d\ell\, dr) \qquad (A.3.1)$$

$$\frac{E(r+dr) - E(r)}{dr} = j\omega B$$

ou

$$\frac{\partial E}{\partial r} = j\omega B \qquad (A.3.2)$$

Admitindo–se que $B = \mu H$, vem:

$$\frac{\partial E}{\partial r} = j\omega\mu H \qquad (A.3.3)$$

Desprezando–se a corrente de deslocamento no interior do condutor, em presença da corrente de condução, da equação de Maxwell na forma integral permite–se,

$$\oint_L \bar{H}\, d\ell = \int_S \bar{J}\, ds \qquad (A.3.4)$$

aplicando–se à superfície $ds_2$, obtém–se:

$$2\pi(r + dr)\, H(r + dr) - 2\pi r H(r) = J2\pi r\, dr \qquad (A.3.5)$$

donde

$$\frac{\partial}{\partial r}[rH(r)] = Jr \qquad (A.3.6)$$

Introduzindo $J = \sigma E$ em (A.3.6), vem:

$$r\frac{\partial H(r)}{\partial r} + H(r) = \sigma E r \qquad (A.3.7)$$

De (A.3.3) e (A.3.7) pode–se obter a equação diferencial seguinte:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial E}{\partial r} - j\omega\mu\sigma E = 0 \qquad (A.3.8)$$

ou

$$r^2\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + r\frac{\partial E}{\partial r} - j\omega\mu\sigma r^2 E = 0 \qquad (A.3.9)$$

Adotando–se a hipótese do amortecimento longitudinal ser desprezível em relação ao amortecimento transversal, como conseqüência E é somente função de r, permitindo–se reescrever a equação (A.3.9) como segue:

$$r^2 \frac{d^2E}{dr^2} + r \frac{dE}{dr} - j\omega\mu\sigma r^2 E = 0 \qquad (A.3.10)$$

Assumindo–se o parâmetro adimensional $X = r\sqrt{j\omega\mu\sigma}$ e o introduzindo na equação diferencial (A.3.10), tem–se:

$$X^2 \frac{d^2E}{dX_2} + X \frac{dE}{dX} - X^2 E = 0 \qquad (A.3.11)$$

A solução desta equação diferencial é da forma:

$$E = C_1 I_0(X) + C_2 K_0(X) \qquad (A.3.12)$$

sendo:

$C_1$ e $C_2$ – constantes (determinadas pelas condições aos limites);

$I_0$ e $K_0$ – respectivamente, são as funções modificadas de Bessel de primeiro e segundo tipo e de ordem zero.

Como $E = E(r)$, de (A.3.3) resulta:

$$H = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{dE}{dr} \qquad (A.3.13)$$

Por conseguinte,

$$H = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{d}{dr} [C_1 I_0(X) + C_2 K_0(X)] \qquad (A.3.14)$$

Das propriedades das funções de Bessel, tem–se:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dX} I_0(X) = I_1(X) \\ \dfrac{d}{dX} K_0(X) = - K_1(X) \end{cases} \tag{A.3.15}$$

Levando–se (A.3.15) em (A.3.14), vem:

$$H = \frac{1}{j\omega\mu} [C_1 I_1(X) - C_2 K_1(X)] \frac{dX}{dr} \tag{A.3.16}$$

donde:

$$H = \sqrt{\frac{\sigma}{j\omega\mu}} [C_1 I_1(X) - C_2 K_1(X)] \tag{A.3.17}$$

Para determinar os coeficientes $C_1$ e $C_2$, adotam–se as seguintes condições de contorno:

a) dentro das hipóteses assumidas, o campo magnético é nulo para $r = R_0$. Portanto, segue–se:

$$H = 0 = \sqrt{\frac{\sigma}{j\omega\mu}} [C_1 I_1(X_0) - C_2 K_1(X_0)]$$

permitindo–se a relação:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{K_1(X_0)}{I_1(X_0)} \tag{A.3.18}$$

com,

$$X_0 = R_0 \sqrt{j\omega\mu\sigma} \tag{A.3.19}$$

b) obedecendo–se as suposições feitas, as correntes são nulas para $r < R_0$. A corrente total, i, fluindo longitudinalmente no condutor é dada por:

$$i = \int_S \bar{J}\, ds = \int_S \sigma E\, ds = \int_{R_0}^{R_1} \sigma E 2\pi r\, dr$$

$$= 2\pi\sigma \int_{R_0}^{R_1} rE\, dr \tag{A.3.20}$$

De $X = r\sqrt{j\omega\mu\sigma}$, resulta:

$$\begin{cases} r = \dfrac{X}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} \\ \dfrac{dr}{dX} = \dfrac{1}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} \end{cases} \tag{A.3.21}$$

Substituindo–se (A.3.21) em (A.3.20), obtém–se:

$$i = 2\pi\sigma \int_{X_0}^{X_1} \frac{X}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} E \frac{dX}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}}$$

$$= \frac{2\pi}{j\omega\mu} \int_{X_0}^{X_1} XE\, dX \tag{A.3.22}$$

Introduzindo–se (A.3.12) em (A.3.22), vem:

$$i = \frac{2\pi}{j\omega\mu} \int_{X_0}^{X_1} X[C_1 I_0(X) + C_2 K_0(X)]\, dX \tag{A.3.23}$$

Das funções modificadas de Bessel, tem–se:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dX}[X\ I_1(X)] = X\ I_0(X) \\ \dfrac{d}{dX}\ [X\ K_1(X)] = -X\ K_0(X) \end{cases} \tag{A.3.24}$$

Levando–se (A.3.24) em (A.3.23), tem–se:

$$i = \frac{2\pi}{j\omega\mu}[C_1 X_1 I_1(X_1) - C_1 X_0 I_1(X_0) -$$

$$C_2 X_1 K_1(X_1) + C_2 X_0 K_1(X_0)] \tag{A.3.25}$$

Considerando–se a relação (A.3.18), a equação (A.3.25) pode ser reescrita como segue:

$$i = \frac{2\pi}{j\omega\mu} C_1[X_1 I_1(X_1) - X_0 I_1(X_0) -$$

$$X_1 I_1(X_0) \frac{K_1(X_1)}{K_1(X_0)} + X_0 I_1(X_0)]$$

Portanto:

$$i = \frac{2\pi X_1}{j\omega\mu} C_1\left[I_1(X_1) - I_1(X_0) \frac{K_1(X_1)}{K_1(X_0)}\right] \tag{A.3.26}$$

Em decorrência de (A.3.26) e (A.3.18), vêm:

$$C_1 = \frac{j\omega\mu}{2\pi X_1 I_1(X_1)\ K_1(X_0) - I_1(X_0)\ K_1(X_1)}\ i \tag{A.3.27}$$

e

$$C_2 = \frac{j\omega\mu}{2\pi X_1 I_1(X_1)\ K_1(X_0) - I_1(X_0)\ K_1(X_1)} \frac{I_1(X_0)}{i} \qquad (A.3.28)$$

Define–se como a impedância interna do condutor por unidade de comprimento, a relação entre o campo elétrico longitudinal na superfície externa do condutor e a corrente i. Desta forma, segue–se:

$$Z_i = \frac{C_1\ I_0(X_1) + C_2\ K_0(X_1)}{i} \qquad (A.3.29)$$

Fazendo–se as devidas substituições para $C_1$, $C_2$ e i, tem–se:

$$Z_i = \frac{j\omega\mu}{2\pi X_1 I_1(X_1)\ K_1(X_0) - I_1(X_0)\ K_1(X_1)} \frac{I_0(X_1)\ K_1(X_0) + K_0(X_1)\ I_1(X_0)}{} \qquad (A.3.30)$$

Sendo:

$I_0$, $I_1$, $K_0$ e $K_1$ – funções modificadas de Bessel, definidas no Capítulo VI.

$$\begin{cases} X_0 = R_0 \sqrt{j\omega\mu\sigma} = R_0 \sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}}\, e^{j\frac{\pi}{4}} \\ X_1 = R_1 \sqrt{j\omega\mu\sigma} = R_1 \sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}}\, e^{j\frac{\pi}{4}} \end{cases} \qquad (A.3.31)$$

$\mu$ – permeabilidade magnética do condutor ($= \mu_0\ \mu_r$);

$\sigma$ – condutividade do condutor;

$\rho$ – resistividade elétrica do condutor.

# APÊNDICE IV

## MÉTODOS DE CÁLCULO DA INTEGRAL E MANIPULAÇÕES MATEMÁTICAS USADAS NA OBTENÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS DE RETORNO PELO SOLO PARA CABOS SUBTERRÂNEOS

Calcular as impedâncias próprias e mútuas com o envolvimento do retorno pelo solo, partindo–se das suas definições (3.94) e (3.101), significa resolver as integrais. Não é uma tarefa simples.

Várias tentativas foram feitas para evitar a ocorrência de "underflow" e por vezes de "overflow". Por fim, foi adotada uma composição dos métodos de cálculos trapezoidal e analítico incluindo–se algumas manipulações matemáticas.

A função integrando, excluindo $e^{j\alpha x}$, tem o mesmo comportamento para $(+\alpha)$ e $(-\alpha)$.

Portanto,

$$F(+\alpha) = F(-\alpha) \qquad (A.4.1)$$

Desta forma, substituindo–se na equação (3.94), tem–se:

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha)\, e^{j\alpha x} d\alpha = \int_{-\infty}^{0} F(-\alpha)\, e^{j(-\alpha)x}\, d\alpha +$$

$$\int_{0}^{\infty} F(+\alpha)\, e^{j(+\alpha)}\, d\alpha =$$

$$\int_0^{\infty} \{F(+\alpha)\,[e^{j(+\alpha)x} + e^{j(-\alpha)x}]\}\,d\alpha \qquad (A.4.2)$$

Sendo:

$$e^{j\alpha x} + e^{-j\alpha x} = 2\cos(\alpha x) \qquad (A.4.3)$$

Introduzindo–se (A.4.3) em (A.4.2), vem:

$$\int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha)\,e^{j\alpha x}\,d\alpha = \int_0^{\infty} F(\alpha)\,2\cos(\alpha x)\,d\alpha$$

Portanto, a formulação para a impedância mútua pode ser reescrita; sendo extensiva à impedância própria. Segue–se:

$$Z_{0_{ij}} = \frac{\rho_m}{2\pi}\int_0^{\infty} \{e^{\{-|h+y|\sqrt{\alpha^2+m^2}\}}$$

$$\left[\frac{1}{|\alpha| + \sqrt{\alpha^2+m^2}} - \frac{1}{2\sqrt{\alpha^2+m^2}}\right] +$$

$$\frac{e^{\{-|y-h|\sqrt{\alpha^2+m^2}\}}}{2\sqrt{\alpha^2+m^2}}\} \; 2\cos(\alpha x)\,d\alpha \qquad (A.4.3)$$

## A.4.1 – COMPOSIÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DA INTEGRAL

O cálculo computacional da integral (A.4.3) é feito através da composição dos métodos da seguinte forma: utiliza–se o método trapezoidal até atingir a condição $|\alpha| \gg |m^2|$. Através de testes do programa, adotou–se $|\alpha| \geq 1000|m^2|$. Partindo–se

deste ponto, o cálculo é feito pelo método analítico (após linearizar a função integrando) por, no máximo, cinqüenta e cinco (valor obtido pelos testes) intervalos de integração superpostos na mesma iteração, testando–se a convergência. A Figura (A.4.1) mostra o processo de cálculo.

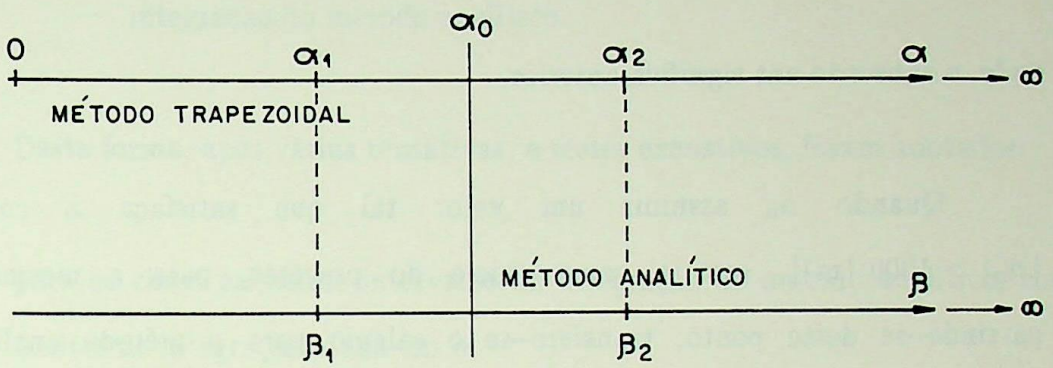



Fig. A.4.1 – Configuração do cálculo da integral

A implementação computacional destes métodos obedece o seguinte: aplica–se o método trapezoidal (para cada iteração) até atingir a condição limite descrita anteriormente ou a convergência do processo; considerando–se na primeira iteração:

$$\begin{cases} \alpha_0 = 0 \\ \Delta\alpha = 0.5 \\ n = 2 \\ \alpha_n = 1 \end{cases} \qquad (A.4.4)$$

Sendo:

$\alpha_0$ – limite inferior da integral;

$\Delta\alpha$ – intervalo de integração;

n – número de intervalos de integração por iteração;

$\alpha_n$ – limite superior da integral.

Em seguida, admitem–se:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = 0.9\ \Delta_{ant} \\ n = 2\ n_{ant} \\ \alpha_n = n\Delta\alpha \end{cases} \qquad (A.4.5)$$

onde, o subscrito ant significa anterior.

Quando $\alpha_n$ assumir um valor tal que satisfaça à condição de $|\alpha_n| > 1000\ |m^2|$, sem a convergência do processo, para a mesma iteração, partindo–se deste ponto, transfere–se o cálculo para o método analítico numa "pseudonova" variável ($\beta$), com a função integrando linearizada; este processo tem a convergência limitada em cinqüenta e cinco intervalos de integração, obedecendo:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \beta \\ \alpha_0 = \frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}, \quad \text{constante} \\ \beta \ll \alpha_0 \end{cases} \qquad (A.4.6)$$

onde:

$\alpha_1 = \alpha_n -$ (ponto de fusão: fim do método trapezoidal e início do método analítico);

$\alpha_2 -$ ponto que determina o fim do intervalo para o método analítico. É definido por uma progressão geométrica.

$$\alpha_2 = r\ \alpha_1$$

$r -$ razão da progressão geométrica; (arbitrou–se $r = 1.1$);

$$\begin{cases} \beta_{max} \simeq \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \\ \beta_1 = \alpha_1 - \alpha_0 \\ \beta_2 = \alpha_2 - \alpha_0 \end{cases} \qquad (A.4.7)$$

$\beta_1$ e $\beta_2$ – limites inferior e superior, respectivamente, para cada intervalo de integração do método analítico.

Desta forma, após várias tentativas, e testes exaustivos, foram adotados:

– para os cinco primeiros intervalos de integração do método analítico, com os limites de integração ainda em $\alpha$,

$$r = 1.1 \qquad (A.4.8)$$

– para os intervalos de integração seguintes,

$$r = r_{ant} - (r_{ant} - 1)/2 \qquad (A.4.9)$$

## A.4.2 – MÉTODO TRAPEZOIDAL PARA O CÁLCULO DA INTEGRAL

Este método consiste em usar interpolação linear em cada par de valores de f(x). Seja um destes intervalos mostrado na Figura (A.4.2).

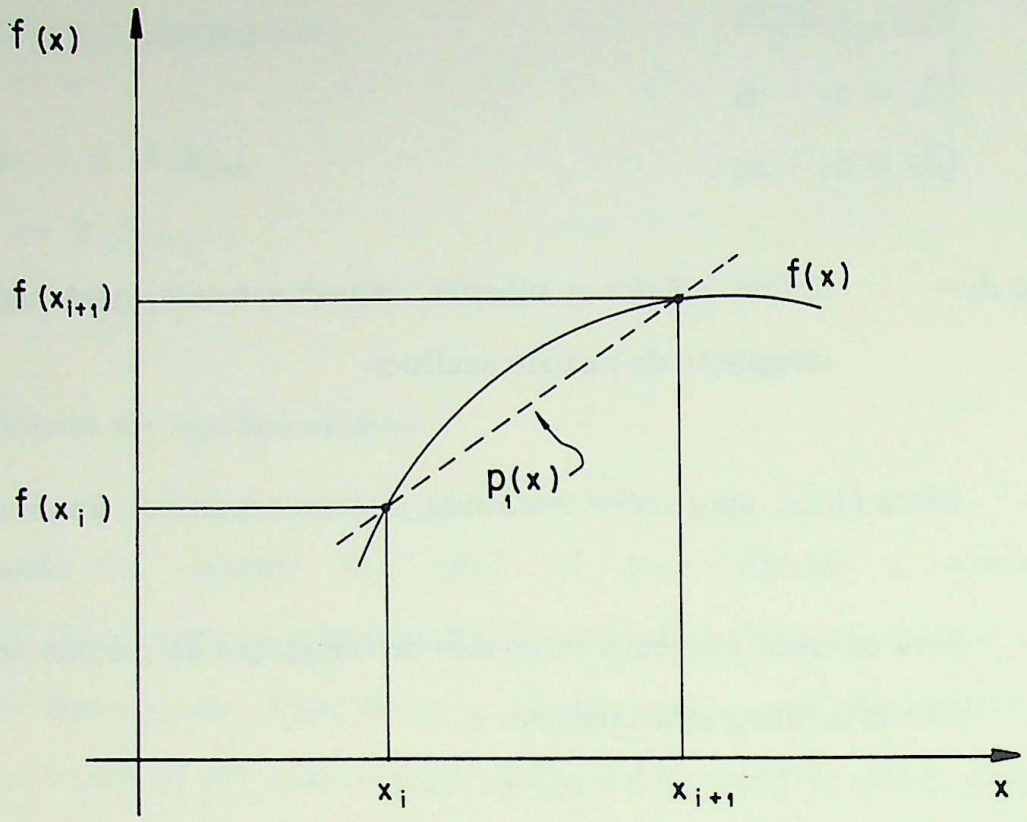



Fig. A.4.2 – Método dos trapézios – um intervalo de integração

Desta forma, a equação da reta aproximante ($p_1(x)$) é dada na expressão (A.4.10).

$$p_1(x) = f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i}(x - x_i) \qquad \text{(A.4.10)}$$

Sendo:

$$f(x) \simeq p_1(x)$$

A integral de f(x) no intervalo mostrado na Figura (A.4.2) é obtida da seguinte forma:

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)\,dx$$

$$\simeq \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left[ f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i) \right] dx$$

$$= \frac{x_{i+1} - x_i}{2} [f(x_{i+1}) + f(x_i)] \qquad (A.4.11)$$

Levando–se em consideração todo um trecho da função, conforme mostrado na Figura (A.4.3), a integral total será a soma das integrais de cada intervalo.

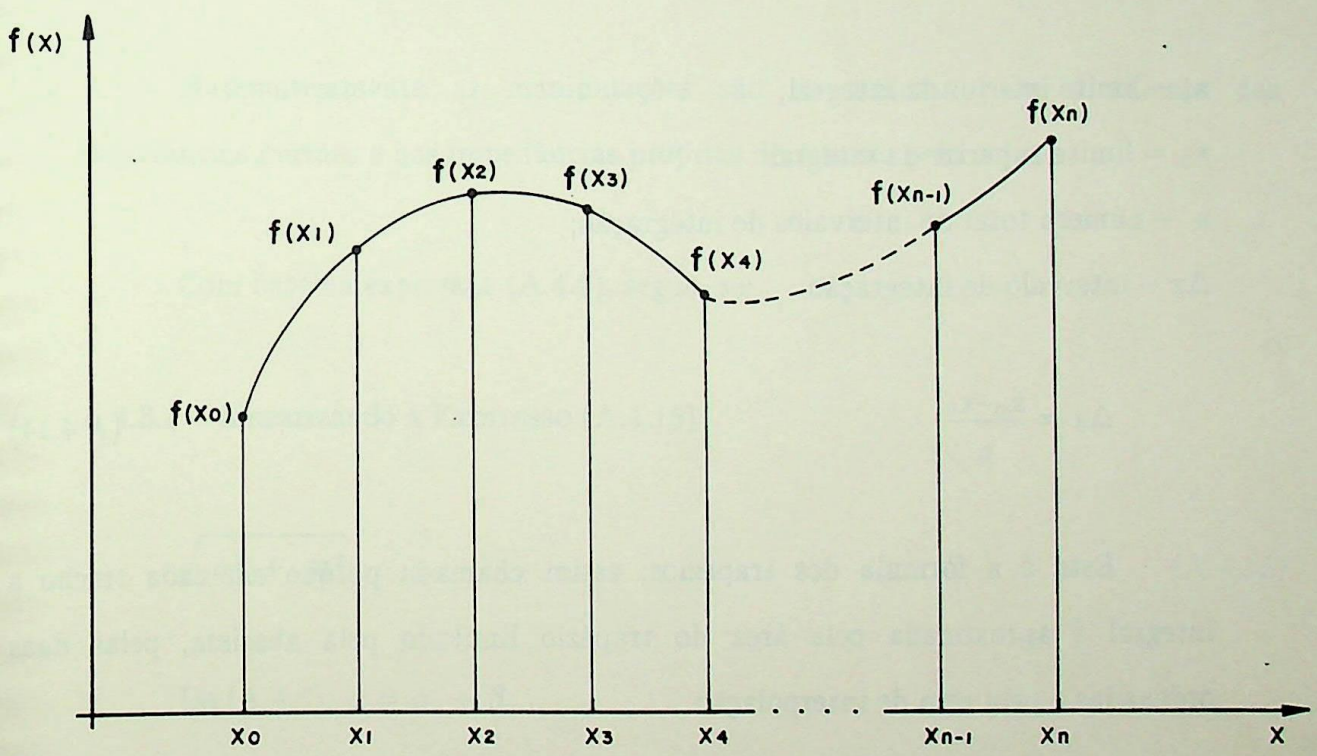



Fig. A.4.3 – Método dos trapézios – n intervalos de integração

$$I_T \simeq \frac{x_1 - x_0}{2} [f(x_1) + f(x_0)] + \frac{x_2 - x_1}{2} [f(x_2) + f(x_1)] +$$

$$\frac{x_3-x_2}{2}[f(x_3)+f(x_2)]+\frac{x_4-x_3}{2}[f(x_4)+f(x_3)]+$$

$$\ldots+\frac{x_n-x_{n-1}}{2}[f(x_n)+f(x_{n-1})] \qquad (A.4.12)$$

Generalizando para n intervalos de integração igualmente espaçados, a integral total será calculada através da fórmula apresentada na expressão seguinte:

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x)\,dx=\frac{\Delta x}{2}\left\{f(x_0)+2\sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)+f(x_n)\right\} \qquad (A.4.13)$$

Sendo:

$x_0$ – limite inferior da integral;

$x_n$ = limite superior da integral;

n – número total de intervalos de integração;

$\Delta x$ – intervalo de integração.

$$\Delta x=\frac{x_n-x_0}{n} \qquad (A.4.14)$$

Esta é a fórmula dos trapézios; assim chamada porque em cada trecho a integral é aproximada pela área do trapézio limitado pela abscissa, pelas duas ordenadas e pela reta de interpolação.

## A.4.3 – MÉTODO ANALÍTICO PARA O CÁLCULO DA INTEGRAL DA DEFINIÇÃO DE IMPEDÂNCIAS MÚTUAS E IMPEDÂNCIAS PRÓPRIAS DE RETORNO PELO SOLO PARA CABOS SUBTERRÂNEOS

Como foi visto no item (A.4.1) o método analítico é usado após uma "pseudomudança" da variável e linearização da função integrando.

A linearização consiste em expandir o máximo possível de séries binomiais, desprezando–se os termos de potência maior ou igual a dois em $\beta$; ou seja, apenas os termos dominantes serão considerados.

Matematicamente as manipulações são as mesmas para o cálculo das impedâncias mútuas e das impedâncias próprias de retorno pelo solo.

Com base na expressão (A.4.2), segue–se:

### A.4.3.1 – Linearizando a Expressão (A.4.15)

$$\sqrt{\alpha^2 + m^2} \qquad \text{(A.4.15)}$$

De (A.4.6), $\alpha = \alpha_0 + \beta$,

$\alpha_0$ – termo constante;

$\beta$ – nova variável.

Então, a expressão (A.4.15) pode ser reescrita:

$$= \sqrt{(\alpha_0 + \beta)^2 + m^2}$$

$$= \sqrt{(\alpha_0^2 + m^2)\left(1 + \frac{2\alpha_0\,\beta}{\alpha_0^2 + m^2} + \frac{\beta^2}{\alpha_0^2 + m^2}\right)}$$

$$\simeq \sqrt{\alpha_0^2 + m^2}\left(1 + \frac{\alpha_0}{\alpha_0^2 + m^2}\beta\right)$$

$$\simeq \sqrt{\alpha_0^2 + m^2} + \alpha_0\,\beta\,(\alpha_0^2 + m^2)^{-1/2}$$

Portanto, tem–se:

$$\sqrt{\alpha^2 + m^2} \simeq \sqrt{\alpha_0^2 + m^2} + \frac{\alpha_0}{\alpha_0^2 + m^2}\beta \qquad \text{(A.4.16)}$$

Linearizando $\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}$ para $m \ll \alpha_0$, obtém–se:

$$\sqrt{\alpha_0^2 + m^2} = \sqrt{\alpha_0^2\left(1 + \frac{m^2}{\alpha_0^2}\right)} = |\alpha_0|\sqrt{1 + \frac{m^2}{\alpha_0^2}} \qquad \text{(A.4.17)}$$

Sendo:

$$\left(1 + \frac{m^2}{\alpha_0^2}\right) \simeq \left(1 + \frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0^2}\right)^2 \qquad \text{(A.4.18)}$$

Substituindo–se a expressão (A.4.18) na expressão (A.4.17), vem:

$$\sqrt{\alpha_0^2 + m^2} \simeq |\alpha_0| \left(1 + \frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0^2}\right)$$

ou

$$\sqrt{\alpha_0^2 + m^2} \simeq |\alpha_0| + \frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0} \qquad \text{(A.4.19)}$$

### A.4.3.2 – Linearizando a Expressão (A.4.20)

$$\frac{1}{|\alpha| + \sqrt{\alpha^2 + m^2}} - \frac{1}{2\sqrt{\alpha^2 + m^2}} \qquad \text{(A.4.20)}$$

$$\frac{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2} + \dfrac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}}\beta - |\alpha_0| - \beta}{(|\alpha_0| + \sqrt{\alpha_0^2 + m^2})\ 2\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}} \qquad \text{(A.4.21)}$$

Introduzindo–se a linearização da expressão (A.4.19) no numerador da expressão (A.4.21), segue–se:

$$\frac{\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0} + \alpha_0 \left(|\alpha_0| + \frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0}\right)^{-1} \beta - \beta}{(|\alpha_0| + \sqrt{\alpha_0^2 + m^2})\ 2\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}} \qquad \text{(A.4.22)}$$

Aplicando–se a expansão binomial do Apêndice I, na expressão em $(-1)$, tem–se:

$$\left(|\alpha_0| + \frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0}\right)^{-1} \simeq \frac{1}{|\alpha_0|} - \frac{1}{|\alpha_0|^2}\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0} \qquad \text{(A.4.23)}$$

Levando–se (A.4.23) em (A.4.22), fazendo–se as devidas simplificações, permite–se obter a expressão seguinte como aproximação linearizada da expressão (A.4.20)

$$\frac{\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0} - \frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0^2}\beta}{(|\alpha_0| + \sqrt{\alpha_0^2 + m^2})\ 2\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}} \qquad \text{(A.4.24)}$$

### A.4.3.3 – Linearizando a Função cos(αx)

$$\cos(\alpha x) \simeq \cos(\alpha_0 x + \beta x)$$

Usando as expansões das funções trigonométricas do Apêndice I, obtém–se para a expressão anterior:

$$\cos(\alpha_0 x + \beta x) \simeq \cos(\alpha_0 x) - \text{sen}(\alpha_0 x)\ \beta x \qquad \text{(A.4.25)}$$

### A.4.3.4 – Linearizando a Função Integrando

Através da "pseudomudança" de variável $\alpha \rightarrow \alpha_0 + \beta$, a função integrando sofrerá uma aproximação linear, usando as expressões já linearizadas (A.4.16), (A.4.24) e (A.4.25), como segue:

$$F(\alpha) \simeq F(\beta) \simeq e^{\left\{-|h+y|\ (\sqrt{\alpha_0^2 + m^2} + \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}}\beta)\right\}}$$

$$\frac{\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0^2} - \frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0^2}\beta}{(|\alpha_0| + \sqrt{\alpha_0^2 + m^2})\ 2\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}} 2\{\cos(\alpha_0 x) - \operatorname{sen}(\alpha_0 x)\ \beta\ x\} +$$

$$e^{\left\{-|y-h|\ (\sqrt{\alpha_0^2 + m^2} + \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}}\beta)\right\}}$$

$$\frac{\cos(\alpha_0 x) - \operatorname{sen}(\alpha_0 x)\ \beta\ x}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}\ (1 + \frac{\alpha_0}{\alpha_0^2 + m^2}\beta)} \qquad \text{(A.4.26)}$$

Separando–se os termos, empregando as propriedades das funções exponenciais e linearizando a expressão $(1 - \frac{\alpha_0}{\alpha_0^2 + m^2}\beta)^{-1}$ na função integrando (A.4.26), vem:

$$F(\beta) \simeq e^{(-|h+y|\sqrt{\alpha_0^2 + m^2})}\ e^{\{(-|h+y|\ \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}})\beta\}}$$

$$\left\{\frac{\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0}}{(|\alpha_0| + \sqrt{\alpha_0^2 + m^2})\ 2\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}} - \right.$$

$$\left.\frac{\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0^2}\beta}{(|\alpha_0| + \sqrt{\alpha_0^2 + m^2})\ 2\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}}\right\}$$

$$2\{\cos(\alpha_0 x) - \operatorname{sen}(\alpha_0 x)\ x\ \beta\} +$$

$$e^{(-|y-h|(\sqrt{\alpha_0^2 + m^2})}\ e^{\{(-|y+h|\ \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}})\beta\}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\alpha_0^2+m^2}}\left(1-\frac{\alpha_0}{\alpha_0^2+m^2}\beta\right)\{\cos(\alpha_0 x)-\operatorname{sen}(\alpha_0 x)\ x\ \beta\} \qquad (A.4.27)$$

Substituindo–se cada termo ou parcela envolvendo constantes, da expressão (A.4.27), por uma letra, pela seqüência crescente da ordem alfabética, a função integrando torna–se:

$$F(\beta) \simeq A\ e^{B\beta}\ (C-D\beta)\ (2E-2F\beta) + G\ e^{H\beta}(I-IJ\beta)\ (E-F\beta) \qquad (A.4.28)$$

Sendo:

$$A = e^{\{-|h+y|(\sqrt{\alpha_0^2\ +\ m^2}\}} \qquad (A.4.29)$$

$$B = -\ |h+y|\ \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2\ +\ m^2}} \qquad (A.4.30)$$

$$C = \frac{\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0}}{(|\alpha_0|\ +\ \sqrt{\alpha_0^2\ +\ m^2})\ 2\ \sqrt{\alpha_0^2\ +\ m^2}} \qquad (A.4.31)$$

$$D = \frac{\frac{1}{2}\frac{m^2}{\alpha_0^2}}{(|\alpha_0|\ +\ \sqrt{\alpha_0^2\ +\ m^2})\ 2\ \sqrt{\alpha_0^2\ +\ m^2}} \qquad (A.4.32)$$

$$E = \cos(\alpha_0 x) \qquad (A.4.33)$$

$$F = \operatorname{sen}(\alpha_0 x)\ x \qquad (A.4.34)$$

$$G = e^{(-|y-h|\sqrt{\alpha_0^2 + m^2})} \tag{A.4.35}$$

$$H = -|y-h| \frac{\alpha_0}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}} \tag{A.4.36}$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{\alpha_0^2 + m^2}} \tag{A.4.37}$$

$$J = \frac{\alpha_0}{\alpha_0^2 + m^2} \tag{A.4.38}$$

No tocante à expressão (A.4.28), fazendo–se as devidas manipulações matemáticas e desprezando–se os temos em $(\beta^2)$, a função integrando $F(\beta)$ torna–se, mais uma vez:

$$F(\beta) \simeq -2A(CF + DE)\,\beta\, e^{B\beta} - GI(F + JE)\,\beta\, e^{H\beta} + 2ACE\, e^{B\beta} + GI\, E\, e^{H\beta} \tag{A.4.39}$$

Resolvendo a integral analiticamente, tem–se:

$$\int_{\beta_1}^{\beta_2} F(\beta)\, d\beta$$

$$\simeq -2A(CF + DE)\frac{1}{B} e^{B\beta}\left(\beta - \frac{1}{B}\right) -$$

$$GI(F + JE)\frac{1}{H} e^{H\beta}\left(\beta - \frac{1}{H}\right) + 2ACE\frac{e^{B\beta}}{\beta} +$$

$$\text{GIE}\ \frac{e^{H\beta}}{H}\Bigg|_{\beta_1}^{\beta_2} \tag{A.4.36}$$

# APÊNDICE V

## TRATAMENTO MATEMÁTICO DAS FUNÇÕES MODIFICADAS DE BESSEL

### A.5.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Face às dificuldades de transformar diretamente as funções modificadas de Bessel em módulos computacionais, julgou–se oportuno se fazer a apresentação das mesmas com algumas manipulações e devidas deduções matemáticas, de grande interesse prático, mantendo as relações primitivas expressas no Capítulo VI.

Estes recursos matemáticos facilitam o desenvolvimento e a implementação computacional dos módulos de cálculos das funções modificadas de Bessel de ordem inteira, ou funções de Kelvin. Evitam ainda, a ocorrência de "overflow" ou "underflow" e reduzem a propagação de erros numéricos na execução do programa.

### A.5.2 – APLICAÇÕES NA FORMULAÇÃO DA SÉRIE ASCENDENTE DE $ber_n(x)$ PARA A EXPRESSÃO (6.26)

Retirando–se do somatório a parcela equivalente a $k = 0$, a série de $ber_n(x)$ para $n > 0$, torna–se:

$$ber_n(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \frac{\cos\left(\frac{3}{4}\pi\ n\right)}{n!} + \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos\left[\left(\frac{3}{4}n\ +\ \frac{1}{2}\ k\right)\pi\right]}{k!\ \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x^2}{4}\right)^k \tag{A.5.1}$$

Para $n = 0$, $ber_0(x)$ pode ser obtida através de:

$$ber_o(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos(\frac{1}{2} k\pi)}{(k!)^2} (\frac{x^2}{4})^k \qquad (A.5.2)$$

Reescrevendo–se a série da expressão (A.5.2), para agrupar os pares de termos, vem:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \cos(\frac{k\pi}{2}) \left[\frac{(\frac{x}{2})^k}{k!}\right]^2 \qquad (A.5.3)$$

Dado que a série é alternada, os recursos seguintes podem ser aplicados tentando minimizar os erros no processo de convergência da mesma, considerando–se:

$$\begin{cases} k = 2m & \begin{cases} m = 0 \rightarrow \text{inicialização da variável m;} \\ m = m+2 \rightarrow \text{no começo do "loop"} \end{cases} \\ k = 2m+2 \end{cases}$$

– A inicialização da variável que acumula o valor do somatório iteração a iteração será feita por:

$(1 - (\frac{x^2}{8})^2)$, equivalente à superposição dos valores iniciais para $k = 0$ e $k = 2$.

– O somatório expresso em (A.5.3), admitindo–se o agrupamento de termos, fazendo–se a devida mudança da variável de iteração (k para m), apresenta–se como $\sum_{m=0}^{\infty} A_m$, sendo:

$$A_m = \left[\frac{(\frac{x}{2})^{2m}}{(2m)!}\right]^2 - \left[\frac{(\frac{x}{2})^{2m+2}}{(2m+2)!}\right]^2 \qquad (A.5.4)$$

– Colocando–se o menor termo em evidência, vem:

$$A_m = \left[\frac{(\frac{x}{2})^{2m}}{(2m)!}\right]^2 \left\{1 - \left[\frac{(\frac{x}{2})^2}{(2m+2)(2m+1)}\right]^2\right\} \qquad (A.5.5)$$

Desta forma, aplicando–se esse recurso do agrupamento de pares de termos, a série estará preparada para ser codificada.

## A.5.3 – MANIPILAÇÕES MATEMÁTICAS NA FORMULAÇÃO DE $bei_n(x)$ PARA A SÉRIE ASCENDENTE DA EXPRESSÃO (6.27)

a) Para $n > 0$

Retirando–se $k = 0$ de dentro do somatório, obtém:

$$bei_n(x) = (\frac{x}{2})^n \frac{\operatorname{sen}(\frac{3}{4}\, n\pi)}{n!} + (\frac{x}{2})^n \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sen}(\frac{3}{4}\, n\pi + \frac{\pi}{2}\, k)}{k!(n+k)!} (\frac{x^2}{4})^k \qquad (A.5.6)$$

b) Para $n = 0$

$$bei_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\operatorname{sen}(\frac{1}{2}\, k\pi)}{(k!)^2} (\frac{x^2}{4})^k \qquad (A.5.7)$$

Adotando procedimentos semelhantes aos empregados no item anterior, com o objetivo de minimizar os erros no teste de convergência do somatório infinito da

expressão (A.5.7), agrupam os termos em pares consecutivos.

$$\text{Admitindo-se} \begin{cases} k = 2m+1 & \begin{cases} m = 0 \rightarrow \text{inicialização de "loop";} \\ m = m+2 \rightarrow \text{fim do "loop"} \end{cases} \\ k = 2m+3 \end{cases}$$

Reescrevendo $bei_0(x)$, por conveniência, vem:

$$bei_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \text{sen}(k\pi/2) \left[ \frac{(\frac{x}{2})^k}{k!} \right]^2 \qquad (A.5.8)$$

Agrupando-se os pares de termos em $bei_0(x)$, considerando-se a mudança da variável de iteração (k para m), torna-se:

$$\sum_{m=0}^{\infty} A_m$$

Sendo:

$$A_m = \left[ \frac{(\frac{x}{2})^{2m+1}}{(2m+1)!} \right]^2 - \left[ \frac{(\frac{x}{2})^{2m+3}}{(2m+3)!} \right]^2 \qquad (A.5.9)$$

Partindo-se do menor termo em evidência, expressa-se $A_m$ por:

$$A_m = \left[ \frac{(\frac{x}{2})^{2m+1}}{(2m+1)!} \right]^2 \left\{ 1 - \left[ \frac{(\frac{x}{2})^2}{(2m+3)(2m+2)} \right]^2 \right\} \qquad (A.5.10)$$

Verifica-se, entretanto, que a série inicial de $bei_0(x)$, apresentada na relação

(A.5.7), foi transformada em outra série de pares de termos consecutivos, levando–se ao mesmo resultado final; apenas facilitando o processo de cálculo digital.

## A.5.4 – RECURSOS MATEMÁTICOS APLICADOS NA FORMULAÇÃO DE $\ker_n(x)$ PARA A SÉRIE ASCENDENTE DA EXPRESSÃO (6.28)

Considerando–se cada somatório da formulação da função $\ker_n(x)$ separadamente, vem:

a) Para $n > 0$

A parcela do somatório finito de $\ker_n(x)$ abrange:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}x\right)^{-n}\sum_{k=0}^{n-1}\cos\left[\left(\frac{3}{4}n+\frac{1}{2}k\right)\pi\right]\frac{(n-k-1)!}{k!}\left(\frac{x^2}{4}\right)^k \qquad (A.5.11)$$

Reescrevendo o somatório infinito, segue:

$$\sum_{k=0}^{\infty}\cos\left[\left(\frac{3}{4}n+\frac{1}{2}k\right)\pi\right]\frac{\psi(k+1)+\psi(n+k+1)}{k!(n+k)!}\left(\frac{x^2}{4}\right)^k \qquad (A.5.12)$$

onde $\psi$ é a função "PSI" definida no Apêndice I.

b) Para $n = 0$

A função ker de ordem zero é definida por:

$$\ker_0(x) = -\ln\left(\frac{x}{2}\right)\mathrm{ber}_0(x)+\frac{\pi}{4}\mathrm{bei}_0(x)+$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\psi(2k+1)}{[(2k)!]^2} \left(\frac{x^2}{4}\right)^{2k} \qquad (A.5.13)$$

Observa–se que o somatório infinito da expressão (A.5.13) também tem comportamento alternado, o que permite adotar recursos semelhantes aos aplicados em $ber_0(x)$ e $bei_0(x)$.

Em princípio, reescrevendo o somatório infinito de $ker_0(x)$, vem:

$$\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \psi(2k+1) \left[\frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{2k}}{(2k)!}\right]^2 \qquad (A.5.14)$$

Retirando–se o primeiro par de termos do somatório, observa–se que:

para $k = 0 \rightarrow -\gamma$

para $k = 1 \rightarrow -(-\gamma + 1.5)\left(\frac{x^2}{8}\right)^2$

Desta forma, torna–se possível inicializar a variável que acumula o valor do somatório por iteração, através de:

$$-\gamma - (1.5 - \gamma)\left(\frac{x^2}{8}\right)^2 \qquad (A.5.15)$$

Partindo–se das seguintes considerações:

$$\begin{cases} k = 2m & \begin{cases} m = 1 \rightarrow \text{inicialização da variável m;} \\ \\ m = m+1 \rightarrow \text{no começo do "loop"} \end{cases} \\ \\ k = 2m+1 & \end{cases}$$

juntando–se os pares de termos e reescrevendo o somatório da expressão (A.5.14), na variável m, obtém:

$$\sum_{m=0}^{\infty} A_m$$

Sendo:

$$A_m = \psi(4m+1)\left[\frac{(\frac{x}{2})^{4m}}{(4m)!}\right]^2 - \psi(4m+3)\left[\frac{(\frac{x}{2})^{4m+2}}{(4m+2)!}\right]^2 \qquad (A.5.16)$$

Com tratamento similar às expressões (A.5.5) e (A.5.10), colocando–se o menor termo em evidência, obtém:

$$A_m = \psi(4m+1)\left[\frac{(\frac{x}{2})^{4m}}{(4m)!}\right]^2 \left\{1 - \frac{\psi(4m+3)}{\psi(4m+1)}\left[\frac{(\frac{x}{2})^2}{(4m+2)(4m+1)}\right]^2\right\} \qquad (A.5.17)$$

Entretanto, a expressão (A.5.17) pode ainda ser simplificada como segue:

$$A_m = \psi(4m+1)\left[\frac{(\frac{x}{2})^{4m}}{(4m)!}\right]^2 \left\{1 - \left[(1 + \frac{\frac{1}{4m+2} + \frac{1}{4m+1}}{\psi(4m+1)})(\frac{(\frac{x}{2})^2}{(4m+2)(4m+1)})^2\right]\right\} \qquad (A.5.18)$$

tornando–se apta para a codificação.

## A.5.5 – CONSIDERAÇÕES MATEMÁTICAS NA FORMULAÇÃO DE $kei_n(x)$ PARA A SÉRIE ASCENDENTE DA EXPRESSÃO (6.32)

a) Para $n > 0$

Em se tratando do cálculo digital, torna–se importante criar módulos (funções externas) de cálculos, distintos para as séries finita e infinita da função $kei_n(x)$, aplicando–se o mesmo método para $ker_n(x)$, conforme apresentado no item (A.5.4).

Importando–se da expressão (6.32), vêm:

a.1) Somatório finito de $kei_n(x)$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}x\right)^{-n}\sum_{k=0}^{n-1}\operatorname{sen}\left[\left(\frac{3}{4}n+\frac{1}{2}k\right)\pi\right]\frac{(n-k-1)!}{k!}\left(\frac{x^2}{4}\right)^k \qquad (A.5.19)$$

a.2) Somatório infinito de $kei_n(x)$

$$\sum_{k=0}^{\infty}\operatorname{sen}\left[\left(\frac{3}{4}n+\frac{1}{2}k\right)\pi\right]\frac{\psi(k+1)+\psi(n+k+1)}{k!(n+k)!}\left(\frac{x^2}{4}\right)^k \qquad (A.5.20)$$

b) Para $n = 0$

Define–se a função $kei_0(x)$, como segue:

$$kei_0(x) = -\ell n\left(\frac{x}{2}\right)bei_0(x) - \frac{\pi}{4}ber_0(x) +$$

$$\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\frac{\psi(2k+2)}{[(2k+1)!]^2}\left(\frac{x^2}{4}\right)^{2k+1} \qquad (A.5.21)$$

Ressalta–se que a série infinita de $kei_0(x)$, na expressão (A.5.21), também tem comportamento alternado dos termos. Portanto, indica–se o agrupamento de pares de termos consecutivos, conforme adotado nos itens anteriores, através de:

– alteração inicial do somatório

$$\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \, \psi(2k+2) \left[ \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{2k+1}}{(2k+1)!} \right]^2 \qquad \text{(A.5.22)}$$

Considerando,

$$\begin{cases} k = 2m & \begin{cases} m = 1 \rightarrow \text{inicialização da variável m;} \\ m = m+1 \rightarrow \text{fim do "loop", em cada iteração} \end{cases} \\ k = 2m+1 \end{cases}$$

– agrupamento dos pares de termos

Após a reunião dos pares de termos consecutivos, surge um outro somatório infinito equivalente ao anterior; porém, melhorando a aceleração do processo de convergência. O novo somatório na variável de iteração dos termos, m, será:

$$\sum_{m=0}^{\infty} A_m$$

com

$$A_m = \psi(4m+2) \left[ \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{4m+1}}{(4m+1)!} \right]^2 - \psi(4m+4) \left[ \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{4m+3}}{(4m+3)!} \right]^2 \qquad \text{(A.5.23)}$$

De forma similar às outras funções parciais de Kelvin ($ber_0(x)$, $bei_0(x)$ e $ker_0(x)$), considera–se o recurso do menor termo da expressão (A.5.23) colocado em evidência; então,

$$A_m = \psi(4m+2)\left[\frac{(\frac{x}{2})^{4m+1}}{(4m+1)!}\right]^2 \left\{1 - \frac{\psi(4m+4)}{\psi(4m+2)}\left[\frac{(\frac{x}{2})^2}{(4m+3)(4m+2)}\right]^2\right\} \qquad (A.5.24)$$

Reduzindo–se a expressão (A.5.24), obtém:

$$A_m = \psi(4m+2)\left[\frac{(\frac{x}{2})^{4m+1}}{(4m+1)!}\right]^2 \left\{1 - \left[(1 + \frac{\frac{1}{4m+3} + \frac{1}{4m+2}}{\psi(4m+2)})(\frac{(\frac{x}{2})^2}{(4m+3)(4m+2)})^2\right]\right\} \qquad (A.5.25)$$

## A.5.6 – RECURSOS MATEMÁTICOS EMPREGADOS NAS EXPANSÕES ASSINTÓTICAS DAS FUNÇÕES MODIFICADAS DE BESSEL

Para facilitar os cálculos digitais das expansões assintóticas das funções parciais de Kelvin, torna–se importante o tratamento matemático aplicado às funções $f_n(\pm x)$ e $g_n(\pm x)$, partes integrantes destas expansões assintóticas.

### A.5.6.1 – Emprego em $f_n(x)$

No somatório infinito de $f_n(x)$ da expressão (6.38), tendo o objetivo de minimizar os erros no teste de convergência e acelerar este procedimento, foram agrupados os seis primeiros termos significativos do somatório, fechando o ciclo para o $\cos(k - \pi/4)$.

Admitindo–se:

$$\begin{cases} k = 2m+1 \\ k = 2m+3 \\ k = 2m+4 \\ k = 2m+5 \\ k = 2m+7 \\ k = 2m+8 \end{cases} \begin{cases} m = 0 \rightarrow \text{inicialização da variável m;} \\ \\ m = m+4 \rightarrow \text{fim do "loop"} \end{cases}$$

Introduzindo–se as alterações necessárias, considerando somente valores positivos para x na expressão (6.38), vem:

$$\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\prod_{i=1}^{k} [\mu - (2i-1)^2]}{k!(8x)^k} \cos\left(k \frac{\pi}{4}\right) \qquad \text{(A.5.26)}$$

onde, agrupando–se os seis primeiros termos significativos da série, obtém–se um novo somatório em m; como segue:

$$\sum_{m=0}^{\infty} A_m$$

Sendo:

$$A_m = -\frac{\prod_{i=1}^{2m+1}[\mu-(2i-1)^2]}{(2m+1)!(8x)^{2m+1}}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) - \frac{\prod_{i=1}^{2m+3}[\mu-(2i-1)^2]}{(2m+3)!(8x)^{2m+3}}\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) +$$

$$\frac{\prod_{i=1}^{2m+4}[\mu-(2i-1)^2]}{(2m+4)!(8x)^{2m+4}}(-1) - \frac{\prod_{i=1}^{2m+5}[\mu-(2i-1)^2]}{(2m+5)!(8x)^{2m+5}}\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) -$$

$$\frac{\prod_{i=1}^{2m+7}[\mu-(2i-1)^2]}{(2m+7)!(8x)^{2m+7}}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) + \frac{\prod_{i=1}^{2m+8}[\mu-(2i-1)^2]}{(2m+8)!(8x)^{2m+8}}(+1) \qquad \text{(A.5.27)}$$

Retirando–se os sinais algébricos de dentro das expressões, vem:

$$A_m = -A + B - C + D - E + F \qquad \text{(A.5.28)}$$

Colocando–se os termos em evidência, a partir do último termo, obtém:

$$A_m = -A + B - C + D + E\left(-1 + \frac{F}{E}\right)$$

$$A_m = -A + B - C + D\left(+1 + \frac{E}{D}\left(-1 + \frac{F}{E}\right)\right)$$

$$A_m = -A + B + C\left(-1 + \frac{D}{C}\left(+1 + \frac{E}{D}\left(-1 + \frac{F}{E}\right)\right)\right) \qquad \text{(A.5.29)}$$

$$A_m = -A + B\left(+1 + \frac{C}{B}\left(-1 + \frac{D}{C}\left(+1 + \frac{E}{D}\left(-1 + \frac{F}{E}\right)\right)\right)\right)$$

$$A_m = A\left(-1 + \frac{B}{A}\left(+1 + \frac{C}{B}\left(-1 + \frac{D}{C}\left(+1 + \frac{E}{D}\left(-1 + \frac{F}{E}\right)\right)\right)\right)\right)$$

Transcrevendo–se a última redução para as expressões, observa–se que:

$$A_m = \left\{ \frac{\prod_{i=1}^{2m+1} [\mu-(2i-1)^2]}{(2m+1)!\,(8x)^{2m+1}} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \right\}$$

$$\left\{ -1 + \frac{[\mu-(4m+5)^2]\;\;[\mu-(4m+3)^2]}{(2m+3)\;(2m+2)\;(8x)^2} \right.$$

$$\left\{ +1 + \frac{[\mu-(4m+7)^2]}{(2m+4)\;(8x)\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)} \right.$$

$$\left\{ -1 + \frac{[\mu-(4m+9)^2]}{(2m+5)\;(8x)} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \right.$$

$$\left\{ +1 + \frac{[\mu-(4m+13)^2]\;\;[\mu-(4m+11)^2]}{(2m+7)\;(2m+6)\;(8x)^2} \left\{ -1 + \frac{[\mu-(4m+15)^2]}{(2m+8)\;(8x)\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\}$$

(A.5.30)

### A.5.6.2 – Considerações para $f_n(-x)$

Adotando recursos análogos aos utilizados em $f_n(x)$, para a implementação digital do somatório de $f_n(-x)$, de maneira relativamente simples, resulta:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\prod_{i=1}^{k} [\mu-(2i-1)^2]}{k!\,(8\;\mathrm{ABS}(x)^k)} \cos\left(k\,\frac{\pi}{4}\right) \qquad \text{(A.5.31)}$$

onde, ABS(x) – é o valor absoluto de x.

Partindo–se do agrupamento dos seis primeiros termos significativos e consecutivos, da mesma forma que foi desenvolvida para o valor de x positivo, literalmente, a expressão é obtida através de:

$$A_m = A - B - C - D + E + F \qquad (A.5.32)$$

Continuando o processo de redução da expressão A.5.32 para uma melhor performance do cálculo digital, e evidenciando os termos em ordem decrescente dos mesmos, obtém–se:

$$A_m = A(1 + \frac{B}{A}(-1 + \frac{C}{B}(-1 + \frac{D}{C}(-1 + \frac{E}{D}(1 + \frac{F}{E}))))) \qquad (A.5.33)$$

Comparando a expressão (A.5.33) com a expressão (A.5.29), observam–se que apenas alguns sinais algébricos foram trocados na expressão final obtida para $A_m$.

### A.5.6.3 – Aplicação no Somatório Infinito de $g_n(x)$ da Expressão (6.39)

Para $g_n(x)$ adota–se procedimento semelhante ao empregado em $f_n(x)$ no item (A.5.6.1), partindo–se das seguintes considerações:

$$\begin{cases} k = 2m+1 \\ k = 2m+2 \\ k = 2m+3 \\ k = 2m+5 \\ k = 2m+6 \\ k = 2m+7 \end{cases} \begin{cases} m = 0 & \text{inicialização da variável m;} \\ m = m+4 & \text{fim do "loop"} \end{cases}$$

Reescrevendo o somatório para x positivo

$$\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\prod_{i=1}^{k} [\mu - (2i-2)^2]}{k!(8x)^k} \operatorname{sen}(k\,\frac{\pi}{4}) \qquad \text{(A.5.34)}$$

Agrupando–se os termos significativos e consecutivos que fecham o ciclo da função senoidal, vem:

$$\sum_{m=0}^{\infty} A_m$$

com

$$A_m = -\frac{\prod_{i=1}^{2m+1} [\mu - (2i-1)^2]}{(2m+1)!(8x)^{2m+1}} (\frac{\sqrt{2}}{2}) + \frac{\prod_{i=1}^{2m+2} [\mu - (2i-1)^2]}{(2m+2)!(8x)^{2m+2}} -$$

$$\frac{\prod_{i=1}^{2m+3} [\mu - (2i-1)^2]}{(2m+3)!(8x)^{2m+3}} (\frac{\sqrt{2}}{2}) - \frac{\prod_{i=1}^{2m+5} [\mu - (2i-1)^2]}{(2m+5)!(8x)^{2m+5}} (-\frac{\sqrt{2}}{2}) +$$

$$\frac{\prod_{i=1}^{2m+6} [\mu - (2i-1)^2]}{(2m+6)!(8x)^{2m+6}} (-1) - \frac{\prod_{i=1}^{2m+7} [\mu - (2i-1)^2]}{(2m+7)!(8x)^{2m+7}} (-\frac{\sqrt{2}}{2}) \qquad \text{(A.5.35)}$$

Retirando–se os sinais algébricos de dentro das expressões, segue:

$$A_m = -A + B - C + D - E + F \qquad \text{(A.5.36)}$$

Colocando–se os termos da expressão (A.5.36) em evidência, como visto em (A.5.29), obtém–se a expressão a seguir:

$$A_m = A(-1+\frac{B}{A}(+1+\frac{C}{B}(-1+\frac{D}{C}(+1+\frac{E}{D}(-1+\frac{F}{E})))))) \qquad (A.5.37)$$

E a expressão final torna–se:

$$A_m = \left\{\frac{\prod_{i=1}^{2m+1}[\mu-(2i-1)^2]}{(2m+1)!(8x)^{2m+1}}(\frac{\sqrt{2}}{2})\right\}\left\{-1+\frac{[\mu-(4m+3)^2]}{(2m+2)(8x)(\frac{\sqrt{2}}{2})}\right.$$

$$\left\{+1+\frac{[\mu-(4m+5)^2]}{(2m+3)(8x)}(\frac{\sqrt{2}}{2})\right\}\left\{-1+\frac{[\mu-(4m+9)^2][\mu-(4m+7)^2]}{(2m+5)(2m+4)(8x)^2}\right.$$

$$\left.\left.\left\{+1+\frac{[\mu-(4m+11)^2]}{(2m+6)(8x)(\frac{\sqrt{2}}{2})}\left\{-1+\frac{[\mu-(4m+13)^2]}{(2m+7)(8x)}(\frac{\sqrt{2}}{2})\right\}\right\}\right\}\right\} \qquad (A.5.38)$$

### A.5.6.4 – Alterações Propostas para $g_n(-x)$

Os critérios são os mesmos adotados em $g_n(x)$.

A expressão final para $A_m$ é a seguinte:

$$A_m = \left\{ \frac{\prod_{i=1}^{2m+1} [\mu - (2i-1)^2]}{(2m+1)!(8x)^{2m+1}} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \right\} \left\{ +1 + \frac{[\mu-(4m+3)^2]}{(2m+2)(8x)\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)} \right.$$

$$\left\{ +1 + \frac{[\mu-(4m+5)^2]}{(2m+3)(8x)} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \left\{ +1 + \frac{[\mu-(4m+9)^2][\mu-(4m+7)^2]}{(2m+5)(2m+4)(8x)^2} \right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left\{ -1 + \frac{[\mu-(4m+11)^2]}{(2m+6)(8x)\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)} \left\{ -1 - \frac{[\mu-(4m+13)^2]}{(2m+7)(8x)} \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \right\}\right\}\right\}\right\}\right\}$$

(A.5.39)

# APÊNDICE VI

## CÁLCULO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UM SISTEMA EXEMPLO

### A.6.1 – APRESENTAÇÃO DO SISTEMA EXEMPLO

Na aplicação do cálculo computacional dos parâmetros elétricos foi elaborado um sistema exemplo formado por um cabo trifásico (**cabo elétrico ótico 3** (300 $mm^2$ – 15/25 kV – Pirelli) com duas camadas metálicas e duas camadas isolantes por cabo SC de energia e um cabo SC de fibra ótica com três camadas metálicas e três camadas isolantes; com o tubo envolvente contendo duas camadas metálicas e três camadas isolantes e com as demais características físicas, elétricas e geométricas quantificadas nos arquivos de dados de entrada.

### A.6.2 – CASO DO SISTEMA AÉREO

Parâmetros elétricos do cabo descrito, na freqüência de 60 Hz, aéreo, 20 m acima da superfície do solo, com a resistividade do solo igual a 100 Ωm.

ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA:

Com o objetivo de visualizar melhor os dados de entreda, há uma identificação dos mesmos por linha.

Identificação do caso
→ 'CABO ELÉTRICO/ÓTICO – PIRELLI'
→ 'FORMAÇÃO → 3 (300 mm ** 2) – 15/25 kV – cabo aéreo

FREQ_SISTEM → 60.0E+00

RESISTIV_SOLO → 100.0E+00

TIPO_CABO → 1

N_CABOS → 1

Opção de impressão dos dados de entrada → 1

Controle de impressão das matrizes → 1

N_COMP_SIM → 2

H → 20.0E+00

Identificação do cabo nos cálculos → 0

Informações gerais → 3,2,2,1,3,3,2,3

DJ(1) → 2.829E–02

DJ(2) → 3.7986E–02

TETA_JK → 120.0E+00,0.0E+00,60.0E+00,180.0E+00,60.0E+00

RAIO_INT_COND → 0.0E+00,2.02E–02,2.45E–02

RAIO_EXT_COND → 1.03E–02,2.29E–02

MI_COND → 0.999991E+00,0.999983E+00

TEMP_REF_COND → 20.0E+00,20.0E+00

RESISTIV_Z_COND → 1.7241E–08,2.065E–07

ALFA_Z_COND → 3.93E–03,4.1E–03

TEMP_COND → 75.0E+00,60.0E+00

N_FIOS_COND → 0,0

AREA_MET_COND → 3.0E–04,0.0E+00

RAIO_INT_SOL → 1.16E–02,2.31E–02

RAIO_EXT_ISOL → 1.84E–02,2.45E–02

EPI_ISOL_COND → 2.6E+00,2.3E+00

RAIO_INT_FO → 0.0E+00,5.58E–03,8.3E–03,1.16E–02

RAIO_EXT_FO → 3.5E–04,6.4E–03,9.3E–03

MI_FO → 30.0E+00,0.999991E+00,30.0E+00

TEMP_REF_FO → 20.0E+00,20.0E+00,20.0E+00

RESISTIV_Z_FO → 1.71E–07,1.7241E–08,1.71E–07

ALFA_Z_FO → 4.5E–03,3.93E–03,4.5E–03

TEMP_FO → 55.0E+00,53.0E+00,50.0E+00

N_FIOS_FO → 0,0,47

AREA_MET_FO → 0.0E+00,0.0E+00,0.0E+00

R_INT_ISOL_FO → 3.5E–04,6.8E–03,1.01E–02

R_EXT_ISOL_FO → 5.54E–03,7.9E–03,1.16E–02

EPI_ISOL_FO → 3.5E+00,2.3E+00,2.3E+00

RAIO_INT_TE → 5.25E–02,5.845E–02,6.8E–02

RAIO_EXT_TE → 5.35E–02,6.45E–02

MI_TE → 0.999991E+00,30.0E+00

TEMP_REF_TE → 20.0E+00,20.0E+00

RESISTIV_Z_TE → 1.7241E–08,1.71E–07

ALFA_Z_TE → 3.93E–03,4.5E–03

TEMP_TE → 45.0E+00,40.0E+00

N_FIOS_TE → 0,59

AREA_MET_TE → 0.0E+00,0.0E+00

R_INT_ISOL_TE → 5.36E–02,5.6E–02,6.47E–02

R_EXT_ISOL_TE → 5.6E–02,5.845E–02,6.8E–02

EPI_ISOL_TE → 2.6E+00,2.3E+00,2.6E+00,2.6E+00

CASO_COMP_SIM → 2

N_CIRCUITOS → 1

TIP_CIRC_TOT → 0

TIPO_CIRCUITO → 3

POS_COND_CIRC → 1,3,5,2,4,6,7,8,9,10,11

INFO_ATERRAMENTO (1)

→ 0

INFO–ATERRAMENTO (2–N)

→ 0,0,2,2,2,2,2,2,2,2

CASO_COMP_SIM → 1

N_CIRCUITOS → 1

TIP_CIRC_TOT → 3

INFO_ATERRAMENTO (1)

→ 0

INFO_ATERRAMENTO (2–N)

→ 2,0,2,0,2,2,2,2,2,2

- ARQUIVO DE DADOS DE SAÍDA:

```
**********************************************************************

<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<  PROGRAMA  PARCAB  >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

**********************************************************************


CABO ELETRICO/OTICO - PIRELLI
FORMACAO -> 3 (300 mm ** 2) - 15/25 kV - cabo aereo


EXECUTADO EM 26-JUL-91 as 18:05:21


======================================================================

//////////////////////  DADOS DO SISTEMA  \\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\

======================================================================


Frequencia do sistema (FREQ_SISTEM)          (Hz) —>  0.60000E+02

Resistividade do solo (RESISTIV_SOLO) (ohm.metro) —>  0.10000E+03

Tipo do cabo: 1- aereo;
              2- subterraneo;
              3- submarino envolto pela agua.
TIPO_CABO                                      —>   1

Numero de cabos eletricos no sistema (N_CABOS)    —>   1
```

Vetor das alturas ou profundidades dos cabos, conforme os tipos aereos ou subterraneos, ou submarinos, medidas entre o eixo de cada cabo e a superficie do solo, ou ao nivel do mar:
—> (m)

H ( 1 ) —> 0.20000E+02

Numero de calculos das componentes simetricas para o mesmo sistema

N_COMP_SIM —> 2

==========

////////////////// DADOS DO CABO EM ESTUDO \\\\\\\\\\\\\\\\\\

==========

Numero do cabo pela ordem de entrada dos dados —> 1

Numero de condutores de energia —> 3

Numero de camadas isolantes por condutor de energia —> 2

Numero de camadas metalicas por condutor de energia —> 2

Numero de cabos de fibra otica —> 1

Numero de camadas isolantes por cabo de fibra otica —> 3

Numero de camadas metalicas por cabo de fibra otica —> 3

Numero de camadas metalicas no tubo envolvente —> 2

Numero de camadas isolantes no tubo envolvente —> 3

Distancia entre os centros do condutor de energia e do tubo envolvente:
—> (m)

DJ ( 1 ) —> 0.28290E-01

Distancia entre os centros do cabo de fibra otica e do tubo envolvente:
—> (m)

DJ ( 2 ) —> 0.37986E-01

Angulos entre condutores ( TETA_JK ):
—> (grau)

Entre condutores de energia —> 0.12000E+03
Entre cabos de fibra otica —> 0.00000E+00
Entre o condutor 1 e a fibra otica 1 —> 0.60000E+02
Entre o condutor 2 e a fibra otica 1 —> 0.18000E+03
Entre o condutor 3 e a fibra otica 1 —> 0.60000E+02

---

/// DADOS POR CABO SC, DE ENERGIA DO CABO ELETRICO EM ESTUDO \\\

---

Vetor dos raios internos das camadas metalicas:
—> (m)

RAIO_INT ( 1 ) —> 0.00000E+00
RAIO_INT ( 2 ) —> 0.20200E-01

Vetor dos raios externos das camadas metalicas:
—> (m)

RAIO_EXT ( 1 ) —> 0.10300E-01
RAIO_EXT ( 2 ) —> 0.22900E-01

Vetor das permeabilidades magneticas relativas, das camadas metalicas:
—> (adimensional)

MI ( 1 ) —> 0.999991E+00
MI ( 2 ) —> 0.999983E+00

Vetor das temperaturas de referencia das resistividades eletricas das camadas metalicas:
—> (grau Celsius)

TEMP_REF_COND ( 1 ) —> 0.20000E+02
TEMP_REF_COND ( 2 ) —> 0.20000E+02

Vetor das resistividades eletricas nas respectivas temperaturas de referencia:
—> (ohm.metro)

RESISTIV_Z_COND ( 1 ) —> 0.17241E-07
RESISTIV_Z_COND ( 2 ) —> 0.20650E-06

Vetor dos coeficientes de correcao das resistividades eletricas nas temperaturas de referencia:
—> (1/grau Celsius)

ALFA_Z_COND ( 1 ) —> 0.39300E-02
ALFA_Z_COND ( 2 ) —> 0.41000E-02

Vetor das temperaturas de operacao das camadas metalicas:
—> (grau Celsius)

TEMP_COND ( 1 ) —> 0.75000E+02
TEMP_COND ( 2 ) —> 0.60000E+02

Numero de fios das camadas metalicas formadas por uma unica camada de fios:

N_FIOS_COND ( 1 ) —> 0
N_FIOS_COND ( 2 ) —> 0

Area efetiva das camadas metalicas nao uniformes ou das formadas por mais de uma camada de fios:
—> (m**2)

AREA_MET_COND ( 1 ) —> 0.30000E-03
AREA_MET_COND ( 2 ) —> 0.00000E+00

Vetor dos raios internos das camadas isolantes:
—> (m)

RAIO_INT_ISOL ( 1 ) —> 0.11600E-01
RAIO_INT_ISOL ( 2 ) —> 0.23100E-01

Vetor dos raios externos das camadas isolantes:
—> (m)

RAIO_EXT_ISOL ( 1 ) —> 0.18400E-01
RAIO_EXT_ISOL ( 2 ) —> 0.24500E-01

Vetor das constantes dieletricas relativas das camadas isolantes:
—> (adimensional)

EPI_ISOL ( 1 ) —> 0.26000E+01
EPI_ISOL ( 2 ) —> 0.23000E+01

---

// DADOS POR CABO SC, DE FIBRA OTICA DO CABO ELETRICO EM ESTUDO \\

---

Vetor dos raios internos das camadas metalicas:
—> (m)

RAIO_INT_FO ( 1 ) —> 0.00000E+00
RAIO_INT_FO ( 2 ) —> 0.58000E-02
RAIO_INT_FO ( 3 ) —> 0.83000E-02

Vetor dos raios externos das camadas metalicas:
—> (m)

RAIO_EXT_FO ( 1 ) —> 0.35000E-03
RAIO_EXT_FO ( 2 ) —> 0.64000E-02
RAIO_EXT_FO ( 3 ) —> 0.93000E-02

Vetor das permeabilidades magneticas relativas, das camadas metalicas:
—> (adimensional)

MI_FO ( 1 ) —> 0.30000E+02
MI_FO ( 2 ) —> 0.999991E+00
MI_FO ( 3 ) —> 0.30000E+02

Vetor das temperaturas de referencia das resistividades eletricas das camadas metalicas:
—> (grau Celsius)

TEMP_REF_FO ( 1 ) —> 0.20000E+02
TEMP_REF_FO ( 2 ) —> 0.20000E+02
TEMP_REF_FO ( 3 ) —> 0.20000E+02

Vetor das resistividades eletricas nas respectivas temperaturas de referencia:
—> (ohm.metro)

RESISTIV_Z_FO ( 1 ) —> 0.17100E-06
RESISTIV_Z_FO ( 2 ) —> 0.17241E-07
RESISTIV_Z_FO ( 3 ) —> 0.17100E-06

Vetor dos coeficientes de correcao das resistividades eletricas nas temperaturas de referencia:
—> (1/grau Celsius)

ALFA_Z_FO ( 1 ) —> 0.45000E-02
ALFA_Z_FO ( 2 ) —> 0.39300E-02
ALFA_Z_FO ( 3 ) —> 0.45000E-02

Vetor das temperaturas de operacao das camadas metalicas:
—> (grau Celsius)

TEMP_FO ( 1 ) —> 0.55000E+02
TEMP_FO ( 2 ) —> 0.53000E+02
TEMP_FO ( 3 ) —> 0.50000E+02

Numero de fios das camadas metalicas formadas por uma unica camada de fios:

N_FIOS_FO ( 1 ) —> 0
N_FIOS_FO ( 2 ) —> 0
N_FIOS_FO ( 3 ) —> 47

Area efetiva das camadas metalicas nao uniformes ou das formadas por mais de uma camada de fios:
—> (m**2)

AREA_MET_FO ( 1 ) —> 0.00000E+00
AREA_MET_FO ( 2 ) —> 0.00000E+00
AREA_MET_FO ( 3 ) —> 0.00000E+00

Vetor dos raios internos das camadas isolantes:
—> (m)

R_INT_ISOL_FO ( 1 ) —> 0.35000E-03
R_INT_ISOL_FO ( 2 ) —> 0.68000E-02
R_INT_ISOL_FO ( 3 ) —> 0.10100E-01

Vetor dos raios externos das camadas isolantes:
—> (m)

R_EXT_ISOL_FO ( 1 ) —> 0.55400E-02
R_EXT_ISOL_FO ( 2 ) —> 0.79000E-02
R_EXT_ISOL_FO ( 3 ) —> 0.11600E-01

Vetor das constantes dieletricas relativas das camadas isolantes:
—> (adimensional)

EPI_ISOL_FO ( 1 ) —> 0.35000E+01
EPI_ISOL_FO ( 2 ) —> 0.23000E+01
EPI_ISOL_FO ( 3 ) —> 0.23000E+01

---

///// DADOS DO TUBO ENVOLVENTE DO CABO ELETRICO EM ESTUDO \\\\\

---

Vetor dos raios internos das camadas metalicas:
—> (m)

RAIO_INT_TE ( 1 ) —> 0.52500E-01
RAIO_INT_TE ( 2 ) —> 0.58450E-01

Vetor dos raios externos das camadas metalicas:
—> (m)

RAIO_EXT_TE ( 1 ) —> 0.53500E-01
RAIO_EXT_TE ( 2 ) —> 0.64500E-01

Vetor das permeabilidades magneticas relativas, das camadas metalicas:
—> (adimensional)

MI_TE ( 1 ) —> 0.999991E+00
MI_TE ( 2 ) —> 0.30000E+02

Vetor das temperaturas de referencia das resistividades eletricas das camadas metalicas:
—> (grau Celsius)

TEMP_REF_TE ( 1 ) —> 0.20000E+02
TEMP_REF_TE ( 2 ) —> 0.20000E+02

Vetor das resistividades eletricas nas respectivas temperaturas de referencia:
—> (ohm.metro)

RESISTIV_Z_TE ( 1 ) —> 0.17241E-07
RESISTIV_Z_TE ( 2 ) —> 0.17100E-06

Vetor dos coeficientes de correcao das resistividades eletricas nas temperaturas de referencia:
—> (1/grau Celsius)

ALFA_Z_TE ( 1 ) —> 0.39300E-02
ALFA_Z_TE ( 2 ) —> 0.45000E-02

Vetor das temperaturas de operacao das camadas metalicas:
—> (grau Celsius)

TEMP_TE ( 1 ) —> 0.45000E+02
TEMP_TE ( 2 ) —> 0.40000E+02

Numero de fios das camadas metalicas formadas por uma unica camada de fios:

N_FIOS_TE ( 1 ) —> 0
N_FIOS_TE ( 2 ) —> 59

Area efetiva das camadas metalicas nao uniformes ou das formadas por mais de uma camada de fios:
—> (m**2)

AREA_MET_TE ( 1 ) —> 0.00000E+00
AREA_MET_TE ( 2 ) —> 0.00000E+00

Vetor dos raios internos das camadas isolantes:
—> (m)

R_INT_ISOL_TE ( 1 ) —> 0.53600E-01
R_INT_ISOL_TE ( 2 ) —> 0.56000E-01
R_INT_ISOL_TE ( 3 ) —> 0.64700E-01

Vetor dos raios externos das camadas isolantes:
—> (m)

R_EXT_ISOL_TE ( 1 ) —> 0.56000E-01
R_EXT_ISOL_TE ( 2 ) —> 0.58450E-01
R_EXT_ISOL_TE ( 3 ) —> 0.68000E-01

Vetor das constantes dieletricas relativas das camadas isolantes:
—> (adimensional)

EPI_ISOL_TE ( 1 ) —> 0.26000E+01
EPI_ISOL_TE ( 2 ) —> 0.23000E+01
EPI_ISOL_TE ( 3 ) —> 0.26000E+01
EPI_ISOL_TE ( 4 ) —> 0.26000E+01

==========

////////// PARAMETROS ELETRICOS DO CABO NUMERO —> 1 \\\\\\\\\\
////////// ( Pela ordem de entrada dos dados ) \\\\\\\\\\

==========

---

////////// MATRIZES PARCIAIS DE IMPEDANCIAS PROPRIAS \\\\\\\\\\
////////// LONGITUDINAIS PARA O CABO NUMERO —> 1 \\\\\\\\\\

---

—> (ohm/metro)
==> Zi

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 1 ) | 0.715655E-04 | 0.839573E-04 j |
| Elemento ( 1 , 2 ) | 0.546191E-08 | 0.962328E-05 j |
| Elemento ( 1 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 2 , 1 ) | 0.546191E–08 | 0.962328E–05 j |
| Elemento ( 2 , 2 ) | 0.657482E–03 | 0.805034E–05 j |
| Elemento ( 2 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 3 ) | 0.715655E–04 | 0.839573E–04 j |
| Elemento ( 3 , 4 ) | 0.546191E–08 | 0.962328E–05 j |
| Elemento ( 3 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 3 ) | 0.546191E–08 | 0.962328E–05 j |
| Elemento ( 4 , 4 ) | 0.657482E–03 | 0.805034E–05 j |
| Elemento ( 4 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 5 , 5 ) | 0.715655E–04 | 0.839573E–04 j |
| Elemento ( 5 , 6 ) | 0.546191E–08 | 0.962328E–05 j |
| Elemento ( 5 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 5 ) | 0.546191E–08 | 0.962328E–05 j |
| Elemento ( 6 , 6 ) | 0.657482E–03 | 0.805034E–05 j |
| Elemento ( 6 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 7 ) | 0.514319E+00 | 0.107818E–02 j |
| Elemento ( 7 , 8 ) | 0.104936E–05 | 0.297163E–03 j |
| Elemento ( 7 , 9 ) | 0.507511E–06 | 0.140444E–03 j |
| Elemento ( 7 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 7 ) | 0.104936E–05 | 0.297163E–03 j |
| Elemento ( 8 , 8 ) | 0.848004E–03 | 0.295928E–03 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 8 , 9 ) | 0.507511E–06 | 0.140444E–03 j |
| Elemento ( 8 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 7 ) | 0.507511E–06 | 0.140444E–03 j |
| Elemento ( 9 , 8 ) | 0.507511E–06 | 0.140444E–03 j |
| Elemento ( 9 , 9 ) | 0.525807E–02 | 0.976327E–04 j |
| Elemento ( 9 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |

---

—> (ohm/metro)
==> Zc

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 1 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 2 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 3 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 4 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 5 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 6 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 7 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 8 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 9 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 1 , 10 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 1 , 11 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 2 , 1 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 2 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 3 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 4 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 5 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 6 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 7 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 8 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 9 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 2 , 10 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 2 , 11 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 3 , 1 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 2 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 3 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 4 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 5 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 6 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 7 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 8 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 9 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 3 , 10 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 3 , 11 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 4 , 1 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 2 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 3 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 4 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 5 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 6 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 7 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 8 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 9 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 4 , 10 ) | 0.360722E–04 | 0.226853E–03 j |
| Elemento ( 4 , 11 ) | 0.175609E–04 | 0.108166E–03 j |
| Elemento ( 5 , 1 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 2 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 3 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 4 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 5 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 6 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 7 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 8 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 9 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 5 , 10 ) | 0.360722E–04 | 0.226853E–03 j |
| Elemento ( 5 , 11 ) | 0.175609E–04 | 0.108166E–03 j |
| Elemento ( 6 , 1 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 2 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 3 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 4 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 5 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 6 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 7 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 8 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 9 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 6 , 10 ) | 0.360722E–04 | 0.226853E–03 j |
| Elemento ( 6 , 11 ) | 0.175609E–04 | 0.108166E–03 j |
| Elemento ( 7 , 1 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 7 , 2 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 7 , 3 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |
| Elemento ( 7 , 4 ) | 0.360737E–04 | 0.227569E–03 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 7 , 5 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 7 , 6 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 7 , 7 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 7 , 8 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 7 , 9 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 7 , 10 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 7 , 11 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 8 , 1 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 2 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 3 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 4 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 5 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 6 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 7 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 8 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 9 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 8 , 10 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 8 , 11 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 9 , 1 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 2 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 3 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 4 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 5 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 6 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 7 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 8 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 9 ) | 0.360737E-04 | 0.227569E-03 j |
| Elemento ( 9 , 10 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 9 , 11 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 10 , 1 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 2 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 3 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 4 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 5 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 6 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 7 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 8 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 10 , 9 ) | 0.360722E-04 | 0.226853E-03 j |
| Elemento ( 10 , 10 ) | 0.929317E-04 | 0.226616E-03 j |
| Elemento ( 10 , 11 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 1 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 2 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 3 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 4 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 5 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 6 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 7 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 8 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 9 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 10 ) | 0.175609E-04 | 0.108166E-03 j |
| Elemento ( 11 , 11 ) | 0.119067E-03 | 0.728755E-04 j |

---

—> (ohm/metro)

==> Zp

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 1 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 1 , 2 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 1 , 3 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 1 , 4 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 1 , 5 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 1 , 6 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 1 , 7 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 1 , 8 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 1 , 9 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 1 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 1 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 2 , 2 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 2 , 3 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 2 , 4 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 2 , 5 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 2 , 6 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 2 , 7 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 2 , 8 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 2 , 9 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 2 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 1 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 3 , 2 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 3 , 3 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 3 , 4 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 3 , 5 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 3 , 6 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 3 , 7 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 3 , 8 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 3 , 9 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 3 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 1 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 4 , 2 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 4 , 3 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 4 , 4 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 4 , 5 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 4 , 6 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 4 , 7 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 4 , 8 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 4 , 9 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 4 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 1 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 5 , 2 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 5 , 3 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 5 , 4 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 5 , 5 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 5 , 6 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 5 , 7 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 5 , 8 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 5 , 9 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 5 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 6 , 1 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 6 , 2 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 6 , 3 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 6 , 4 ) | 0.160197E-05 | 0.235893E-04 j |
| Elemento ( 6 , 5 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 6 , 6 ) | 0.968665E-05 | 0.430553E-04 j |
| Elemento ( 6 , 7 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 6 , 8 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 6 , 9 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 6 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 1 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 7 , 2 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 7 , 3 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 7 , 4 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 7 , 5 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 7 , 6 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 7 , 7 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 7 , 8 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 7 , 9 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 7 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 1 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 8 , 2 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 8 , 3 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 8 , 4 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 8 , 5 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 8 , 6 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 8 , 7 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 8 , 8 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 8 , 9 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 8 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 1 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 9 , 2 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 9 , 3 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |
| Elemento ( 9 , 4 ) | -0.129879E-05 | 0.136442E-04 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 9 , 5 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 9 , 6 ) | 0.725785E-05 | 0.284966E-04 j |
| Elemento ( 9 , 7 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 9 , 8 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 9 , 9 ) | 0.149759E-04 | 0.775386E-04 j |
| Elemento ( 9 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |

---

////////////// IMPEDANCIA PROPRIA DE RETORNO PELO \\\\\\\\\\\\\\
////////////// SOLO PARA O CABO NUMERO —> 1 \\\\\\\\\\\\\\

---

—> (ohm/metro)
==> Z0_JJ = ( 0.563967E-04 , 0.714361E-03 j )

==========

////////// MATRIZES TOTAIS PARA O SISTEMA DE CABOS \\\\\\\\\\
////////// OBEDECENDO A ORDEM DA ENTRADA DE DADOS \\\\\\\\\\

==========

---

////////////// MATRIZ DE ADMITANCIAS TRANSVERSAIS \\\\\\\\\\\\\\

---

—> (siemens/metro)
==> [ Matriz Y ]

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.118034E-06 j |
| Elemento ( 1 , 2 ) | 0.000000E+00 | -0.118034E-06 j |
| Elemento ( 1 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 1 ) | 0.000000E+00 | -0.118034E-06 j |
| Elemento ( 2 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.298618E-06 j |
| Elemento ( 2 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 4 ) | 0.000000E+00 | -0.622075E-07 j |
| Elemento ( 2 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 6 ) | 0.000000E+00 | -0.308567E-07 j |
| Elemento ( 2 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.130599E-14 j |
| Elemento ( 2 , 8 ) | 0.000000E+00 | -0.130603E-14 j |
| Elemento ( 2 , 9 ) | 0.000000E+00 | -0.409877E-07 j |
| Elemento ( 2 , 10 ) | 0.000000E+00 | -0.465325E-07 j |
| Elemento ( 2 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.118034E-06 j |
| Elemento ( 3 , 4 ) | 0.000000E+00 | -0.118034E-06 j |
| Elemento ( 3 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 2 ) | 0.000000E+00 | -0.622075E-07 j |
| Elemento ( 4 , 3 ) | 0.000000E+00 | -0.118034E-06 j |
| Elemento ( 4 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.284210E-06 j |
| Elemento ( 4 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 6 ) | 0.000000E+00 | -0.622075E-07 j |
| Elemento ( 4 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 4 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.221512E-07 j |
| Elemento ( 4 , 10 ) | 0.000000E+00 | -0.639129E-07 j |
| Elemento ( 4 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 5 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.118034E-06 j |
| Elemento ( 5 , 6 ) | 0.000000E+00 | -0.118034E-06 j |
| Elemento ( 5 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 5 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 2 ) | 0.000000E+00 | -0.308567E-07 j |
| Elemento ( 6 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 6 , 4 ) | 0.000000E+00 | -0.622075E-07 j |
| Elemento ( 6 , 5 ) | 0.000000E+00 | -0.118034E-06 j |
| Elemento ( 6 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.298618E-06 j |
| Elemento ( 6 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.130599E-14 j |
| Elemento ( 6 , 8 ) | 0.000000E+00 | -0.130602E-14 j |
| Elemento ( 6 , 9 ) | 0.000000E+00 | -0.409877E-07 j |
| Elemento ( 6 , 10 ) | 0.000000E+00 | -0.465325E-07 j |
| Elemento ( 6 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.149700E-14 j |
| Elemento ( 7 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 7 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.149700E-14 j |
| Elemento ( 7 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.265419E-07 j |
| Elemento ( 7 , 8 ) | 0.000000E+00 | -0.265419E-07 j |
| Elemento ( 7 , 9 ) | 0.000000E+00 | -0.102590E-14 j |
| Elemento ( 7 , 10 ) | 0.000000E+00 | -0.267426E-14 j |
| Elemento ( 7 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 2 ) | 0.000000E+00 | -0.150301E-14 j |
| Elemento ( 8 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 8 , 6 ) | 0.000000E+00 | -0.150301E-14 j |
| Elemento ( 8 , 7 ) | 0.000000E+00 | -0.265419E-07 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 8 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.347811E-06 j |
| Elemento ( 8 , 9 ) | 0.000000E+00 | -0.321269E-06 j |
| Elemento ( 8 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.267092E-14 j |
| Elemento ( 8 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 2 ) | 0.000000E+00 | -0.409877E-07 j |
| Elemento ( 9 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.221512E-07 j |
| Elemento ( 9 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 6 ) | 0.000000E+00 | -0.409877E-07 j |
| Elemento ( 9 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 9 , 8 ) | 0.000000E+00 | -0.321269E-06 j |
| Elemento ( 9 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.403816E-06 j |
| Elemento ( 9 , 10 ) | 0.000000E+00 | -0.227230E-07 j |
| Elemento ( 9 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 2 ) | 0.000000E+00 | -0.465325E-07 j |
| Elemento ( 10 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 4 ) | 0.000000E+00 | -0.639129E-07 j |
| Elemento ( 10 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 10 , 6 ) | 0.000000E+00 | -0.465325E-07 j |
| Elemento ( 10 , 7 ) | 0.000000E+00 | -0.239331E-14 j |
| Elemento ( 10 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.239338E-14 j |
| Elemento ( 10 , 9 ) | 0.000000E+00 | -0.227230E-07 j |
| Elemento ( 10 , 10 ) | 0.000000E+00 | 0.199905E-06 j |
| Elemento ( 10 , 11 ) | 0.000000E+00 | -0.202037E-07 j |
| Elemento ( 11 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 4 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 5 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 6 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 7 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 8 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 9 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 11 , 10 ) | 0.000000E+00 | -0.202037E-07 j |
| Elemento ( 11 , 11 ) | 0.000000E+00 | 0.234781E-07 j |

---

////////////  MATRIZ DE IMPEDANCIAS LONGITUDINAIS  \\\\\\\\\\\\

---

—> (ohm/metro)

==> [ Matriz Z ]

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 1 ) | 0.173723E-03 | 0.106894E-02 j |
| Elemento ( 1 , 2 ) | 0.102163E-03 | 0.994608E-03 j |
| Elemento ( 1 , 3 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 1 , 4 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 1 , 5 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 1 , 6 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 1 , 7 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 1 , 8 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 1 , 9 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 1 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 1 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 2 , 1 ) | 0.102163E-03 | 0.994608E-03 j |
| Elemento ( 2 , 2 ) | 0.759639E-03 | 0.993035E-03 j |
| Elemento ( 2 , 3 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 2 , 4 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 2 , 5 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 2 , 6 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 2 , 7 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 2 , 8 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 2 , 9 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 2 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 2 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 3 , 1 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 3 , 2 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 3 , 3 ) | 0.173723E-03 | 0.106894E-02 j |
| Elemento ( 3 , 4 ) | 0.102163E-03 | 0.994608E-03 j |
| Elemento ( 3 , 5 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 3 , 6 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 3 , 7 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 3 , 8 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 3 , 9 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 3 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 3 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 4 , 1 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 4 , 2 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 4 , 3 ) | 0.102163E-03 | 0.994608E-03 j |
| Elemento ( 4 , 4 ) | 0.759639E-03 | 0.993035E-03 j |
| Elemento ( 4 , 5 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 4 , 6 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 4 , 7 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 4 , 8 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 4 , 9 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 4 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 4 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 5 , 1 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 5 , 2 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 5 , 3 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 5 , 4 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 5 , 5 ) | 0.173723E-03 | 0.106894E-02 j |
| Elemento ( 5 , 6 ) | 0.102163E-03 | 0.994608E-03 j |
| Elemento ( 5 , 7 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 5 , 8 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 5 , 9 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 5 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 5 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 6 , 1 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 6 , 2 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 6 , 3 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 6 , 4 ) | 0.940724E-04 | 0.965519E-03 j |
| Elemento ( 6 , 5 ) | 0.102163E-03 | 0.994608E-03 j |
| Elemento ( 6 , 6 ) | 0.759639E-03 | 0.993035E-03 j |
| Elemento ( 6 , 7 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 6 , 8 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 6 , 9 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 6 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 6 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 7 , 1 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 7 , 2 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 7 , 3 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 7 , 4 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 7 , 5 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 7 , 6 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 7 , 7 ) | 0.514426E+00 | 0.209764E-02 j |
| Elemento ( 7 , 8 ) | 0.108496E-03 | 0.131663E-02 j |
| Elemento ( 7 , 9 ) | 0.107954E-03 | 0.115991E-02 j |
| Elemento ( 7 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 7 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 8 , 1 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 8 , 2 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 8 , 3 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 8 , 4 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 8 , 5 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 8 , 6 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 8 , 7 ) | 0.108496E-03 | 0.131663E-02 j |
| Elemento ( 8 , 8 ) | 0.955450E-03 | 0.131540E-02 j |
| Elemento ( 8 , 9 ) | 0.107954E-03 | 0.115991E-02 j |
| Elemento ( 8 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 8 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 9 , 1 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 9 , 2 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 9 , 3 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 9 , 4 ) | 0.911716E-04 | 0.955574E-03 j |
| Elemento ( 9 , 5 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 9 , 6 ) | 0.997283E-04 | 0.970426E-03 j |
| Elemento ( 9 , 7 ) | 0.107954E-03 | 0.115991E-02 j |
| Elemento ( 9 , 8 ) | 0.107954E-03 | 0.115991E-02 j |
| Elemento ( 9 , 9 ) | 0.536551E-02 | 0.111710E-02 j |
| Elemento ( 9 , 10 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 9 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 10 , 1 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 2 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 3 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 10 , 4 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 5 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 6 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 7 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 8 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 9 ) | 0.924689E-04 | 0.941214E-03 j |
| Elemento ( 10 , 10 ) | 0.149328E-03 | 0.940977E-03 j |
| Elemento ( 10 , 11 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 1 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 2 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 3 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 4 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 5 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 6 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 7 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 8 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 9 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 10 ) | 0.739576E-04 | 0.822527E-03 j |
| Elemento ( 11 , 11 ) | 0.175464E-03 | 0.787236E-03 j |

==========

///// DADOS USADOS NOS CALCULOS DAS COMPONENTES SIMETRICAS \\\\\

==========

CASO_COMP_SIM —> 2

N_CIRCUITOS —> 1

TIP_CIRC_TOT —> 3

0(s) circuito(s) do sistema de cabos e(sao) —> trifasicos

POS_COND_CIRC —> fornecera a ordem dos elementos metalicos por circuito. Esta ordem devera ser a mesma da entrada de dados por cabo, ou a imposta pelo usuario.

INFO_ATERRAMENTO —> Contera o tipo de aterramento por camada metalica dos condutores de energia, cabos de fibra otica e tubo envolvente de todos os cabos do sistema em estudo:

0 - nucleo do condutor de energia ou camada metalica importante para o estudo;

1 - isolado (sem ligacao para a terra);

2 - solidamente aterrado ou aterrado nas extremidades;

10- este valor sera atribuido apenas a primeira posicao do vetor, caso nao haja eliminacao de camadas metalicas.

////////////  POS_COND_CIRC  INFO_ATERRAMENTO  \\\\\\\\\\\\

| | | |
|---|---|---|
| 1 | —> | 0 |
| 3 | —> | 0 |
| 5 | —> | 0 |
| 2 | —> | 2 |
| 4 | —> | 2 |
| 6 | —> | 2 |
| 7 | —> | 2 |
| 8 | —> | 2 |
| 9 | —> | 2 |
| 10 | —> | 2 |
| 11 | —> | 2 |

```
================================================================

//////////////  MATRIZES DO SISTEMA REDUZIDAS  PELAS  \\\\\\\\\\\\\
//////////////  CONDICOES DE ATERRAMENTO, OBEDECENDO  \\\\\\\\\\\\\
//////////////  A ORDEM  DO  VETOR  INFO_ATERRAMENTO  \\\\\\\\\\\\\

================================================================


Matriz de impedancia longitudinal reduzida:
—> (ohm/metro)
==> Zred

Elemento (  1 ,  1 )      0.118327E-03      0.118691E-03 j
Elemento (  1 ,  2 )      0.379981E-04      0.169267E-04 j
Elemento (  1 ,  3 )      0.375345E-04      0.160226E-04 j
Elemento (  2 ,  1 )      0.379981E-04      0.169267E-04 j
Elemento (  2 ,  2 )      0.119267E-03      0.120164E-03 j
Elemento (  2 ,  3 )      0.379981E-04      0.169267E-04 j
Elemento (  3 ,  1 )      0.375345E-04      0.160226E-04 j
Elemento (  3 ,  2 )      0.379981E-04      0.169267E-04 j
Elemento (  3 ,  3 )      0.118327E-03      0.118691E-03 j

Matriz de admitancia transversal reduzida:
—> (siemens/metro)
==> Yred

Elemento (  1 ,  1 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j
Elemento (  1 ,  2 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  1 ,  3 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  2 ,  1 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  2 ,  2 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j
Elemento (  2 ,  3 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  1 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  2 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  3 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j
```

==========

////////////// MATRIZES DE COMPONENTES SIMETRICAS \\\\\\\\\\\\\

==========

---

//////////////// Entre os circuitos —> 1 e 1 \\\\\\\\\\\\\\\\

---

Ordem das sequencias: - homopolar;
- direta e
- inversa ou
- (0,1,2).

Matriz de componentes simetricas de impedancia longitudinal:
—> (ohm/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.194327E-03 | 0.0000000+00 | 0.000000E+00 |
| 0.152433E-03 j | 0.0000000+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.807965E-04 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.102557E-03 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.807965E-04 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.102557E-03 j |

Matriz de componentes simetricas de admitancia transversal:
—> (siemens/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j |

CASO_COMP_SIM —> 1

N_CIRCUITOS —> 1

TIP_CIRC_TOT —> 3

0(s) circuito(s) do sistema de cabos e(sao) —> trifasicos

POS_COND_CIRC —> fornecera a ordem dos elementos metalicos por circuito. Esta ordem devera ser a mesma da entrada de dados por cabo, ou a imposta pelo usuario.

INFO_ATERRAMENTO —> Contera o tipo de aterramento por camada metalica dos condutores de energia, cabos de fibra otica e tubo envolvente de todos os cabos do sistema em estudo:

0 - nucleo do condutor de energia ou camada metalica importante para o estudo;

1 - isolado (sem ligacao para a terra);

2 - solidamente aterrado ou aterrado nas extremidades;

10- este valor sera atribuido apenas a primeira posicao do vetor, caso nao haja eliminacao de camadas metalicas.

////////////  POS_COND_CIRC  INFO_ATERRAMENTO  \\\\\\\\\\\\

| | | |
|---|---|---|
| 1 | ——> | 0 |
| 2 | ——> | 2 |
| 3 | ——> | 0 |
| 4 | ——> | 2 |
| 5 | ——> | 0 |
| 6 | ——> | 2 |
| 7 | ——> | 2 |
| 8 | ——> | 2 |
| 9 | ——> | 2 |
| 10 | ——> | 2 |
| 11 | ——> | 2 |

==========

////////////  MATRIZES DO SISTEMA REDUZIDAS PELAS  \\\\\\\\\\\\
////////////  CONDICOES DE ATERRAMENTO, OBEDECENDO  \\\\\\\\\\\\
////////////  A ORDEM DO VETOR INFO_ATERRAMENTO  \\\\\\\\\\\\

==========

Matriz de impedancia longitudinal reduzida:
—> (ohm/metro)
==> Zred

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 1 ) | 0.118327E-03 | 0.118691E-03 j |
| Elemento ( 1 , 2 ) | 0.379981E-04 | 0.169267E-04 j |
| Elemento ( 1 , 3 ) | 0.375345E-04 | 0.160226E-04 j |
| Elemento ( 2 , 1 ) | 0.379981E-04 | 0.169267E-04 j |
| Elemento ( 2 , 2 ) | 0.119267E-03 | 0.120164E-03 j |

```
Elemento (  2 ,  3 )      0.379981E-04      0.169267E-04 j
Elemento (  3 ,  1 )      0.375345E-04      0.160226E-04 j
Elemento (  3 ,  2 )      0.379981E-04      0.169267E-04 j
Elemento (  3 ,  3 )      0.118327E-03      0.118691E-03 j

Matriz de admitancia transversal reduzida:
--> (siemens/metro)
==> Yred

Elemento (  1 ,  1 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j
Elemento (  1 ,  2 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  1 ,  3 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  2 ,  1 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  2 ,  2 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j
Elemento (  2 ,  3 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  1 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  2 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  3 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j

================================================================

//////////////  MATRIZES DE COMPONENTES SIMETRICAS  \\\\\\\\\\\\\\

================================================================


----------------------------------------------------------------

///////////////  Entre os circuitos -->  1 e  1  \\\\\\\\\\\\\\\\

----------------------------------------------------------------

Ordem das sequencias: - homopolar;
                      - direta e
                      - inversa ou
                      - (0,1,2).
```

Matriz de componentes simetricas de impedancia longitudinal:
—> (ohm/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.194327E-03 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.152433E-03 j | 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.807965E-04 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.102557E-03 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.807965E-04 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.102557E-03 j |

Matriz de componentes simetricas de admitancia transversal:
—> (siemens/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j |

### A.6.3- CASO DO SISTEMA SUBTERRÂNEO

Considerando para o mesmo sistema, a freqüência de 60 Hz, subterrâneo, colocado 1 m abaixo da superfície do solo, com a resistividade do solo igual a 100 Ωm, tem-se:

**- ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA:**

```
Identificação do caso
-> 'CABO ELETRICO/OTICO - PIRELLI'
-> 'FORMACAO -> 3 ( 300 mm ** 2 ) - 15/25 kV - cabo subterraneo'
FREQ_SISTEM      -> 60.0E+00
RESISTIV_SOLO    -> 100.0E+00
TIPO_CABO        -> 2
N_CABOS          -> 1
Opção de impressão dos
dados de entrada -> 0
Controle  de impressão
das matrizes     -> 3
N_COMP_SIM       -> 1
H                -> 1.0E+00
Identificação do  cabo
nos cálculos     -> 0
informações gerais
                 -> 3,2,2,1,3,3,2,3
DJ (1)           -> 2.829E-02
DJ (2)           -> 3.7986E-02
TETA_JK          -> 120.0E+00,0.0E+00,60.0E+00,180.0E+00,60.0E+00
RAIO_INT_COND    -> 0.0E+00,2.02E-02,2.45E-02
RAIO_EXT_COND    -> 1.03E-02,2.29E-02
MI_COND          -> 0.999991E+00,0.999983E+00
TEMP_REF_COND    -> 20.0E+00,20.0E+00
RESISTIV_Z_COND  -> 1.7241E-08,2.065E-07
ALFA_Z_COND      -> 3.93E-03,4.1E-03
TEMP_COND        -> 75.0E+00,60.0E+00
N_FIOS_COND      -> 0,0
AREA_MET_COND    -> 3.0E-04,0.0E+00
RAIO_INT_ISOL    -> 1.16E-02,2.31E-02
RAIO_EXT_ISOL    -> 1.84E-02,2.45E-02
EPI_ISOL_COND    -> 2.6E+00,2.3E+00
RAIO_INT_FO      -> 0.0E+00,5.58E-03,8.3E-03,1.16E-02
RAIO_EXT_FO      -> 3.5E-04,6.4E-03,9.3E-03
MI_FO            -> 30.0E+00,0.999991E+00,30.0E+00
```

```
TEMP_REF_FO      -> 20.0E+00,20.0E+00,20.0E+00
RESISTIV_Z_FO    -> 1.71E-07,1.7241E-08,1.71E-07
ALFA_Z_FO        -> 4.5E-03,3.93E-03,4.5E-03
TEMP_FO          -> 55.0E+00,53.0E+00,50.0E+00
N_FIOS_FO        -> 0,0,47
AREA_MET_FO      -> 0.0E+00,0.0E+00,0.0E+00
R_INT_ISOL_FO    -> 3.5E-04,6.8E-03,1.01E-02
R_EXT_ISOL_FO    -> 5.54E-03,7.9E-03,1.16E-02
EPI_ISOL_FO      -> 3.5E+00,2.3E+00,2.3E+00
RAIO_INT_TE      -> 5.25E-02,5.845E-02,6.8E-02
RAIO_EXT_TE      -> 5.35E-02,6.45E-02
MI_TE            -> 0.999991E+00,30.0E+00
TEMP_REF_TE      -> 20.0E+00,20.0E+00
RESISTIV_Z_TE    -> 1.7241E-08,1.71E-07
ALFA_Z_TE        -> 3.93E-03,4.5E-03
TEMP_TE          -> 45.0E+00,40.0E+00
N_FIOS_TE        -> 0,59
AREA_MET_TE      -> 0.0E+00,0.0E+00
R_INT_ISOL_TE    -> 5.36E-02,5.6E-02,6.47E-02
R_EXT_ISOL_TE    -> 5.6E-02,5.845E-02,6.8E-02
EPI_ISOL_TE      -> 2.6E+00,2.3E+00,2.6E+00,2.6E+00
CASO_COMP_SIM    -> 1
N_CIRCUITOS      -> 1
TIP_CIRC_TOT     -> 3
INFO_ATERRAMENTO (1)
                 -> 0
INFO_ATERRAMENTO (2-N)
                 -> 2,0,2,0,2,1,1,1,2,2
```

**- ARQUIVO DE DADOS DE SAÍDA:**

```
**********************************************************************

<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<  PROGRAMA  PARCAB  >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

**********************************************************************


CABO ELETRICO/OTICO - PIRELLI
FORMACAO -> 3 ( 300 mm ** 2 ) - 15/25 kV - cabo subterraneo

EXECUTADO EM 26-JUL-91 as 17:11:06


======================================================================

//////////////  MATRIZES DO SISTEMA REDUZIDAS  PELAS  \\\\\\\\\\\\\\
//////////////  CONDICOES DE ATERRAMENTO, OBEDECENDO  \\\\\\\\\\\\\\
//////////////  A ORDEM  DO  VETOR  INFO_ATERRAMENTO  \\\\\\\\\\\\\\

======================================================================


Matriz de impedancia longitudinal reduzida:
--> (ohm/metro)
==> Zred

Elemento (  1 ,  1 )      0.120297E-03      0.120541E-03 j
Elemento (  1 ,  2 )      0.395045E-04      0.178724E-04 j
Elemento (  1 ,  3 )      0.395045E-04      0.178724E-04 j
Elemento (  2 ,  1 )      0.395045E-04      0.178724E-04 j
Elemento (  2 ,  2 )      0.120297E-03      0.120541E-03 j
Elemento (  2 ,  3 )      0.395045E-04      0.178724E-04 j
Elemento (  3 ,  1 )      0.395045E-04      0.178724E-04 j
Elemento (  3 ,  2 )      0.395045E-04      0.178724E-04 j
Elemento (  3 ,  3 )      0.120297E-03      0.120541E-03 j
```

Matriz de admitancia transversal reduzida:
—> (siemens/metro)
==> Yred

| | | |
|---|---|---|
| Elemento ( 1 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.118034E-06 j |
| Elemento ( 1 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 1 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 2 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.118034E-06 j |
| Elemento ( 2 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 1 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 2 ) | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 j |
| Elemento ( 3 , 3 ) | 0.000000E+00 | 0.118034E-06 j |

==========

////////////// MATRIZES DE COMPONENTES SIMETRICAS \\\\\\\\\\\\\

==========

---

//////////////// Entre os circuitos —> 1 e 1 \\\\\\\\\\\\\\\\

---

Ordem das sequencias: - homopolar;
- direta e
- inversa ou
- (0,1,2).

Matriz de componentes simetricas de impedancia longitudinal:
—> (ohm/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.199306E-03 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.156286E-03 j | 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.807920E-04 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.102669E-03 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.807920E-04 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.102669E-03 j |

Matriz de componentes simetricas de admitancia transversal:
—> (siemens/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j |

## A.6.4- CÁLCULO PARA UM SISTEMA SUBMARINO

Para o mesmo cabo descrito em A.6.1, na freqüência de 60 Hz, submarino, 20 m abaixo do nível do mar, com resistividade da água do mar igual a 0.3 Ωm, tem-se:

- ARQUIVO DE DADOS DE ENTRADA:

```
Identificação do caso
-> 'CABO ELETRICO/OTICO - PIRELLI'
-> 'FORMACAO -> 3 ( 300 mm ** 2 ) - 15/25 kV - cabo submarino'
FREQ_SISTEM      -> 60.0E+00
RESISTIV_SOLO    -> 0.3E+00
TIPO_CABO        -> 3
N_CABOS          -> 1
Opção de impressão dos
dados de entrada -> 0
Controle de impressão
das matrizes     -> 3
N_COMP_SIM       -> 1
H                -> 20.0E+00
Identificação do cabo
nos cálculos     -> 0
Informações gerais
                 -> 3,2,2,1,3,3,2,3
DJ (1)           -> 2.829E-02
DJ (2)           -> 3.7986Q-02
TETA_JK          -> 120.0E+00,0.0E+00,60.0E+00,180.0E+00,60.0E+00
RAIO_INT_COND    -> 0.0E+00,2.02E-02,2.45E-02
RAIO_EXT_COND    -> 1.03E-02,2.29E-02
MI_COND          -> 0.999991E+00,0.999983E+00
TEMP_REF_COND    -> 20.0E+00,20.0E+00
RESISTIV_Z_COND  -> 1.7241E-08,2.065E-07
ALFA_Z_COND      -> 3.93E-03,4.1E-03
TEMP_COND        -> 75.0E+00,60.0E+00
N_FIOS_COND      -> 0,0
AREA_MET_COND    -> 3.0E-04,0.0E+00
RAIO_INT_ISOL    -> 1.16E-02,2.31E-02
RAIO_EXT_ISOL    -> 1.84E-02,2.45E-02
EPI_ISOL_COND    -> 2.6E+00,2.3E+00
RAIO_INT_FO      -> 0.0E+00,5.58E-03,8.3E-03,1.16E-02
RAIO_EXT_FO      -> 3.5E-04,6.4E-03,9.3E-03
MI_FO            -> 30.0E+00,0.999991E+00,30.0E+00
```

```
TEMP_REF_FO       -> 20.0E+00,20.0E+00,20.0E+00
RESISTIV_Z_FO     -> 1.71E-07,1.7241E-08,1.71E-07
ALFA_Z_FO         -> 4.5E-03,3.93E-03,4.5E-03
TEMP_FO           -> 55.0E+00,53.0E+00,50.0E+00
N_FIOS_FO         -> 0,0,47
AREA_MET_FO       -> 0.0E+00,0.0E+00,0.0E+00
R_INT_ISOL_FO     -> 3.5E-04,6.8E-03,1.01E-02
R_EXT_ISOL_FO     -> 5.54E-03,7.9E-03,1.16E-02
EPI_ISOL_FO       -> 3.5E+00,2.3E+00,2.3E+00
RAIO_INT_TE       -> 5.25E-02,5.845E-02,6.8E-02
RAIO_EXT_TE       -> 5.35E-02,6.45E-02
MI_TE             -> 0.999991E+00,30.0E+00
TEMP_REF_TE       -> 20.0E+00,20.0E+00
RESISTIV_Z_TE     -> 1.7241E-08,1.71E-07
ALFA_Z_TE         -> 3.93E-03,4.5E-03
TEMP_TE           -> 45.0E+00,40.0E+00
N_FIOS_TE         -> 0,59
AREA_MET_TE       -> 0.0E+00,0.0E+00
R_INT_ISOL_TE     -> 5.36E-02,5.6E-02,6.47E-02
R_EXT_ISOL_TE     -> 5.6E-02,5.845E-02,6.8E-02
EPI_ISOL_TE       -> 2.6E+00,2.3E+00,2.6E+00,2.6E+00
CASO_COMP_SIM     -> 1
N_CIRCUITOS       -> 1
TIP_CIRC_TOT      -> 3
INFO_ATERRAMENTO (1)
                  -> 0
INFO_ATERRAMENTO (2-N)
                  -> 2,0,2,0,2,1,1,1,2,2
```

- ARQUIVO DE DADOS DE SAÍDA:

```
**********************************************************************

<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<<  PROGRAMA  PARCAB  >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

**********************************************************************


CABO ELETRICO/OTICO - PIRELLI
FORMACAO -> 3 ( 300 mm ** 2 ) - 15/25 kV - cabo submarino


EXECUTADO EM 11-JUL-91 as 19:05:20


======================================================================

//////////////  MATRIZES DO SISTEMA REDUZIDAS  PELAS  \\\\\\\\\\\\\\
//////////////  CONDICOES DE ATERRAMENTO, OBEDECENDO  \\\\\\\\\\\\\\
//////////////  A ORDEM  DO  VETOR  INFO_ATERRAMENTO  \\\\\\\\\\\\\\

======================================================================


Matriz de impedancia longitudinal reduzida:
—> (ohm/m)
==> Zred

Elemento (  1 ,  1 )      0.121212E-03      0.120430E-03 j
Elemento (  1 ,  2 )      0.404197E-04      0.177613E-04 j
Elemento (  1 ,  3 )      0.404197E-04      0.177613E-04 j
Elemento (  2 ,  1 )      0.404197E-04      0.177613E-04 j
Elemento (  2 ,  2 )      0.121212E-03      0.120430E-03 j
Elemento (  2 ,  3 )      0.404197E-04      0.177613E-04 j
Elemento (  3 ,  1 )      0.404197E-04      0.177613E-04 j
Elemento (  3 ,  2 )      0.404197E-04      0.177613E-04 j
```

```
Elemento (  3 ,  3 )      0.121212E-03      0.120430E-03 j
Matriz de admitancia transversal reduzida:
--> (siemens/metro)
==> Yred

Elemento (  1 ,  1 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j
Elemento (  1 ,  2 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  1 ,  3 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  2 ,  1 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  2 ,  2 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j
Elemento (  2 ,  3 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  1 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  2 )      0.000000E+00      0.000000E+00 j
Elemento (  3 ,  3 )      0.000000E+00      0.118034E-06 j

================================================================

//////////////  MATRIZES DE COMPONENTES SIMETRICAS  \\\\\\\\\\\\\\

================================================================


________________________________________________________________

///////////////  Entre os circuitos -->  1 e  1  \\\\\\\\\\\\\\\\

________________________________________________________________

Ordem das sequencias: - homopolar;
                      - direta e
                      - inversa ou
                      - (0,1,2).
```

Matriz de componentes simetricas de impedancia longitudinal:
—> (ohm/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.202051E-03 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.155953E-03 j | 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.807920E-04 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.102669E-03 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.807920E-04 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.102669E-03 j |

Matriz de componentes simetricas de admitancia transversal:
—> (siemens/metro)

| 0 | 1 | 2 |
|---|---|---|
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j | 0.000000E+00 j |
| 0.000000E+00 | 0.000000E+00 | 0.000000E+00 |
| 0.000000E+00 j | 0.000000E+00 j | 0.118034E-06 j |

# APÊNDICE VII

## TABELAS DO SISTEMA EXEMPLO DO CAPÍTULO VIII

### A.7.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para os gráficos apresentados no Capítulo VIII, do sistema exemplo descrito no item 8.2, foram desenvolvidas as tabelas dos parâmetros elétricos em dependência com a freqüência; adotando–se, para os casos que envolvem todas as camadas metálicas por cabo, as nomenclaturas seguintes:

$R_c$, $L_c$ e $C_c$ – respectivamente, significam a resistência, a indutância e a capacitância própria por unidade de comprimento da primeira camada metálica ou condutor do cabo SC, interno, de energia;

$R_{b_1}$, $L_{b_1}$ e $C_{b_1}$ – representam, respectivamente, a resistência, a indutância e a capacitância própria por unidade de comprimento da segunda camada metálica ou blindagem do cabo SC, interno, de energia;

$R_{b_2}$, $L_{b_2}$ e $C_{b_2}$ – nesta ordem, representam a resistência, a indutância e a capacitância por unidade de comprimento da primeira camada metálica ou blindagem do tubo envolvente do cabo;

$R_a$, $L_a$ e $C_a$ – representam, respectivamente, a resistência, a indutância e a capacitância por unidade de comprimento da segunda camada metálica ou armação do tubo envolvente;

Sendo os subscritos definidos por:

c – condutor;

$b_1$ – blindagem do condutor;

$b_2$ – blindagem do tubo envolvente;

a – armação do tubo envolvente.

Têm–se:

$R_{cb_1}$, $R_{cb_2}$, $R_{ca}$, $R_{b_1b_2}$, $R_{b_1a}$, $R_{b_2a}$, $L_{cb_1}$, $L_{cb_2}$, $L_{ca}$, $L_{b_1b_2}$, $L_{b_1a}$, $L_{b_2a}$, $C_{cb_1}$, $C_{cb_2}$, $C_{ca}$, $C_{cb_1}$, $C_{cb_2}$, $C_{ca}$, $C_{b_1b_2}$, $C_{b_1a}$, $C_{b_2a}$ – determinam, nesta seqüência, resistências mútuas, indutâncias mútuas e capacitâncias mútuas por unidade de comprimento, entre as camadas metálicas discriminadas na definição dos subscritos.

Tabela A.7.1 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> 5.00

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .77750E-01 | .71556E-02 | .92061E-01 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .87511E-01 | .16584E-01 | .12068E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .93927E-01 | .22714E-01 | .13936E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .97822E-01 | .26352E-01 | .15053E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10029E+00 | .28585E-01 | .15746E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10197E+00 | .30036E-01 | .16204E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10318E+00 | .31034E-01 | .16525E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10411E+00 | .31756E-01 | .16762E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10485E+00 | .32300E-01 | .16945E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10547E+00 | .32728E-01 | .17092E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10927E+00 | .34821E-01 | .17891E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11214E+00 | .36119E-01 | .18438E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11498E+00 | .37412E-01 | .18980E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11792E+00 | .38770E-01 | .19546E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12097E+00 | .40182E-01 | .20134E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12413E+00 | .41625E-01 | .20738E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12739E+00 | .43080E-01 | .21355E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13073E+00 | .44534E-01 | .21980E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13415E+00 | .45981E-01 | .22611E+00 | .88167E-01 |
| .12E+03 | .14122E+00 | .48847E-01 | .23891E+00 | .92368E-01 |
| .14E+03 | .14869E+00 | .51419E-01 | .25153E+00 | .97276E-01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .16E+03 | .15622E+00 | .54479E–01 | .26518E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16413E+00 | .57272E–01 | .27867E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17227E+00 | .60047E–01 | .29237E+00 | .11223E+00 |
| .25E+03 | .19345E+00 | .63929E–01 | .32131E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21543E+00 | .68523E–01 | .35248E+00 | .14691E+00 |
| .35E+03 | .23838E+00 | .70096E–01 | .37857E+00 | .16828E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73893E–01 | .40718E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74459E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76708E–01 | .45401E+00 | .22388E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E–04 | .27142E+01 | .27142E+01 |
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E–05 | .29935E+01 | .29935E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E–05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E–05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E–05 | .36863E+01 | .36863E+01 |
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E–05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E–05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E–06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E–06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E–06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E–07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E–07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E–07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E–08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E–08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.2 – Comportamento da indutância com a frequência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> 5.00

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .25251E+01 | .22095E+01 | .69441E+01 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .16977E+01 | .13891E+01 | .44759E+01 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .12034E+01 | .89950E+00 | .30025E+01 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .92269E+00 | .62219E+00 | .21671E+01 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .75587E+00 | .45805E+00 | .16720E+01 | .29782E+00 |
| .60E+01 | .65061E+00 | .35498E+00 | .13606E+01 | .29563E+00 |
| .70E+01 | .58042E+00 | .28662E+00 | .11537E+01 | .29380E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .80E+01 | .53138E+00 | .23915E+00 | .10097E+01 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .49574E+00 | .20488E+00 | .90549E+00 | .29087E+00 |
| .10E+02 | .46899E+00 | .17933E+00 | .82764E+00 | .28966E+00 |
| .20E+02 | .37032E+00 | .88051E–01 | .54642E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .34500E+00 | .66613E–01 | .47823E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33285E+00 | .57023E–01 | .44689E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32509E+00 | .51195E–01 | .42748E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31934E+00 | .47004E–01 | .41335E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31470E+00 | .43696E–01 | .40209E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31077E+00 | .40942E–01 | .39265E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30733E+00 | .38579E–01 | .38448E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30425E+00 | .36509E–01 | .37727E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29889E+00 | .33024E–01 | .36494E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29432E+00 | .30295E–01 | .35491E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29018E+00 | .27762E–01 | .34570E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28643E+00 | .25669E–01 | .33777E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28295E+00 | .23815E–01 | .33058E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27505E+00 | .19867E–01 | .31478E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16592E–01 | .30113E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14031E–01 | .28952E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11017E–01 | .27754E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90039E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71436E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51123E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E–09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.3 - Comportamento das resistências por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> 5.00

| freq. (Hz) | Rc (Ω/km) | Rb1 (Ω/km) | Rb2 (Ω/km) | Ra (Ω/km) | Rcb1 (Ω/km) | Rcb2 (Ω/km) | Rca (Ω/km) | Rb1b2 (Ω/km) | Rb1a (Ω/km) | Rb2a (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .715E-01 | .659E+00 | .579E-01 | .111E+00 | .156E-02 | .992E-03 | .987E-03 | .992E-03 | .987E-03 | .987E- |
| .200E+01 | .729E-01 | .660E+00 | .589E-01 | .112E+00 | .298E-02 | .200E-02 | .198E-02 | .200E-02 | .198E-02 | .198E- |
| .300E+01 | .742E-01 | .662E+00 | .599E-01 | .113E+00 | .435E-02 | .303E-02 | .298E-02 | .303E-02 | .298E-02 | .298E- |
| .400E+01 | .756E-01 | .663E+00 | .609E-01 | .114E+00 | .571E-02 | .407E-02 | .399E-02 | .407E-02 | .399E-02 | .399E- |
| .500E+01 | .770E-01 | .665E+00 | .620E-01 | .115E+00 | .707E-02 | .514E-02 | .500E-02 | .514E-02 | .500E-02 | .500E- |
| .600E+01 | .783E-01 | .666E+00 | .631E-01 | .116E+00 | .842E-02 | .622E-02 | .603E-02 | .622E-02 | .603E-02 | .603E- |
| .700E+01 | .797E-01 | .667E+00 | .642E-01 | .117E+00 | .977E-02 | .733E-02 | .706E-02 | .733E-02 | .706E-02 | .706E- |
| .800E+01 | .811E-01 | .669E+00 | .653E-01 | .118E+00 | .111E-01 | .845E-02 | .811E-02 | .845E-02 | .811E-02 | .811E- |
| .900E+01 | .824E-01 | .670E+00 | .665E-01 | .119E+00 | .125E-01 | .959E-02 | .916E-02 | .959E-02 | .916E-02 | .916E- |
| .100E+02 | .838E-01 | .671E+00 | .676E-01 | .120E+00 | .139E-01 | .108E-01 | .102E-01 | .108E-01 | .102E-01 | .102E- |
| .200E+02 | .985E-01 | .686E+00 | .803E-01 | .130E+00 | .284E-01 | .234E-01 | .213E-01 | .234E-01 | .213E-01 | .213E- |
| .300E+02 | .115E+00 | .702E+00 | .949E-01 | .141E+00 | .445E-01 | .381E-01 | .333E-01 | .381E-01 | .333E-01 | .333E- |
| .400E+02 | .133E+00 | .720E+00 | .111E+00 | .152E+00 | .622E-01 | .546E-01 | .462E-01 | .546E-01 | .462E-01 | .462E- |
| .500E+02 | .153E+00 | .739E+00 | .130E+00 | .164E+00 | .817E-01 | .730E-01 | .600E-01 | .730E-01 | .600E-01 | .600E- |
| .600E+02 | .174E+00 | .760E+00 | .150E+00 | .176E+00 | .103E+00 | .930E-01 | .745E-01 | .930E-01 | .745E-01 | .745E- |
| .700E+02 | .197E+00 | .783E+00 | .172E+00 | .188E+00 | .125E+00 | .115E+00 | .898E-01 | .115E+00 | .898E-01 | .898E- |
| .800E+02 | .222E+00 | .807E+00 | .195E+00 | .201E+00 | .149E+00 | .138E+00 | .106E+00 | .138E+00 | .106E+00 | .106E- |
| .900E+02 | .248E+00 | .832E+00 | .219E+00 | .214E+00 | .174E+00 | .162E+00 | .122E+00 | .162E+00 | .122E+00 | .122E- |
| .100E+03 | .275E+00 | .858E+00 | .244E+00 | .228E+00 | .201E+00 | .187E+00 | .139E+00 | .187E+00 | .139E+00 | .139E- |
| .120E+03 | .332E+00 | .913E+00 | .298E+00 | .255E+00 | .256E+00 | .241E+00 | .175E+00 | .241E+00 | .175E+00 | .175E- |
| .140E+03 | .391E+00 | .971E+00 | .354E+00 | .283E+00 | .313E+00 | .297E+00 | .212E+00 | .297E+00 | .212E+00 | .212E- |
| .160E+03 | .452E+00 | .103E+01 | .412E+00 | .312E+00 | .372E+00 | .355E+00 | .249E+00 | .355E+00 | .249E+00 | .249E- |
| .180E+03 | .514E+00 | .109E+01 | .470E+00 | .340E+00 | .431E+00 | .413E+00 | .286E+00 | .413E+00 | .286E+00 | .286E- |
| .200E+03 | .575E+00 | .115E+01 | .527E+00 | .369E+00 | .490E+00 | .471E+00 | .324E+00 | .471E+00 | .324E+00 | .324E- |
| .250E+03 | .723E+00 | .129E+01 | .666E+00 | .439E+00 | .631E+00 | .609E+00 | .414E+00 | .609E+00 | .414E+00 | .414E- |
| .300E+03 | .860E+00 | .142E+01 | .794E+00 | .507E+00 | .761E+00 | .737E+00 | .498E+00 | .737E+00 | .498E+00 | .498E- |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .350E+03 | .984E+00 | .154E+01 | .909E+00 | .572E+00 | .879E+00 | .852E+00 | .576E+00 | .852E+00 | .576E+00 | .576E+ |
| .400E+03 | .110E+01 | .164E+01 | .101E+01 | .635E+00 | .984E+00 | .956E+00 | .649E+00 | .956E+00 | .649E+00 | .649E+ |
| .450E+03 | .120E+01 | .174E+01 | .111E+01 | .695E+00 | .108E+01 | .105E+01 | .716E+00 | .105E+01 | .716E+00 | .716E+ |
| .500E+03 | .129E+01 | .183E+01 | .119E+01 | .754E+00 | .117E+01 | .114E+01 | .780E+00 | .114E+01 | .780E+00 | .780E+ |
| .600E+03 | .146E+01 | .198E+01 | .135E+01 | .867E+00 | .133E+01 | .129E+01 | .898E+00 | .129E+01 | .898E+00 | .898E+ |
| .700E+03 | .161E+01 | .213E+01 | .149E+01 | .977E+00 | .147E+01 | .143E+01 | .101E+01 | .143E+01 | .101E+01 | .101E+ |
| .800E+03 | .175E+01 | .226E+01 | .162E+01 | .108E+01 | .160E+01 | .156E+01 | .111E+01 | .156E+01 | .111E+01 | .111E+ |
| .900E+03 | .189E+01 | .238E+01 | .174E+01 | .119E+01 | .173E+01 | .168E+01 | .121E+01 | .168E+01 | .121E+01 | .121E+ |
| .100E+04 | .202E+01 | .250E+01 | .186E+01 | .129E+01 | .185E+01 | .180E+01 | .131E+01 | .180E+01 | .131E+01 | .131E+ |
| .200E+04 | .321E+01 | .363E+01 | .295E+01 | .223E+01 | .297E+01 | .290E+01 | .223E+01 | .290E+01 | .223E+01 | .223E+ |
| .300E+04 | .430E+01 | .466E+01 | .396E+01 | .309E+01 | .401E+01 | .391E+01 | .309E+01 | .391E+01 | .309E+01 | .309E+ |
| .400E+04 | .531E+01 | .561E+01 | .490E+01 | .389E+01 | .497E+01 | .484E+01 | .389E+01 | .484E+01 | .389E+01 | .389E+ |
| .500E+04 | .626E+01 | .651E+01 | .577E+01 | .465E+01 | .587E+01 | .572E+01 | .465E+01 | .572E+01 | .465E+01 | .465E+ |
| .600E+04 | .717E+01 | .737E+01 | .660E+01 | .538E+01 | .674E+01 | .655E+01 | .538E+01 | .655E+01 | .538E+01 | .538E+ |
| .700E+04 | .805E+01 | .819E+01 | .740E+01 | .608E+01 | .757E+01 | .735E+01 | .608E+01 | .735E+01 | .608E+01 | .608E+ |
| .800E+04 | .891E+01 | .899E+01 | .817E+01 | .676E+01 | .837E+01 | .812E+01 | .676E+01 | .812E+01 | .676E+01 | .676E+ |
| .900E+04 | .974E+01 | .976E+01 | .891E+01 | .742E+01 | .916E+01 | .887E+01 | .742E+01 | .887E+01 | .742E+01 | .742E+ |
| .100E+05 | .106E+02 | .105E+02 | .963E+01 | .806E+01 | .992E+01 | .959E+01 | .806E+01 | .959E+01 | .806E+01 | .806E+ |
| .200E+05 | .180E+02 | .172E+02 | .160E+02 | .138E+02 | .168E+02 | .160E+02 | .138E+02 | .160E+02 | .138E+02 | .138E+ |
| .300E+05 | .245E+02 | .230E+02 | .214E+02 | .187E+02 | .227E+02 | .214E+02 | .187E+02 | .214E+02 | .187E+02 | .187E+ |
| .400E+05 | .303E+02 | .281E+02 | .263E+02 | .231E+02 | .280E+02 | .263E+02 | .231E+02 | .263E+02 | .231E+02 | .231E+ |
| .500E+05 | .356E+02 | .328E+02 | .307E+02 | .272E+02 | .328E+02 | .307E+02 | .272E+02 | .307E+02 | .272E+02 | .272E+ |
| .600E+05 | .403E+02 | .371E+02 | .348E+02 | .309E+02 | .372E+02 | .348E+02 | .309E+02 | .348E+02 | .309E+02 | .309E+ |
| .700E+05 | .447E+02 | .411E+02 | .387E+02 | .345E+02 | .413E+02 | .387E+02 | .345E+02 | .387E+02 | .345E+02 | .345E+ |
| .800E+05 | .488E+02 | .449E+02 | .423E+02 | .378E+02 | .451E+02 | .423E+02 | .378E+02 | .423E+02 | .378E+02 | .378E+ |
| .900E+05 | .526E+02 | .486E+02 | .458E+02 | .410E+02 | .487E+02 | .458E+02 | .410E+02 | .458E+02 | .410E+02 | .410E+ |
| .100E+06 | .563E+02 | .520E+02 | .491E+02 | .441E+02 | .522E+02 | .491E+02 | .441E+02 | .491E+02 | .441E+02 | .441E+ |
| .200E+06 | .865E+02 | .809E+02 | .768E+02 | .697E+02 | .809E+02 | .768E+02 | .697E+02 | .768E+02 | .697E+02 | .697E+ |
| .300E+06 | .110E+03 | .104E+03 | .987E+02 | .901E+02 | .104E+03 | .987E+02 | .901E+02 | .987E+02 | .901E+02 | .901E+ |
| .400E+06 | .131E+03 | .123E+03 | .118E+03 | .108E+03 | .123E+03 | .118E+03 | .108E+03 | .118E+03 | .108E+03 | .108E+ |
| .500E+06 | .149E+03 | .141E+03 | .134E+03 | .123E+03 | .141E+03 | .134E+03 | .123E+03 | .134E+03 | .123E+03 | .123E+ |
| .600E+06 | .166E+03 | .156E+03 | .149E+03 | .137E+03 | .156E+03 | .149E+03 | .137E+03 | .149E+03 | .137E+03 | .137E+ |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .700E+06 | .181E+03 | .171E+03 | .163E+03 | .150E+03 | .171E+03 | .163E+03 | .150E+03 | .163E+03 | .150E+03 | .150E |
| .800E+06 | .196E+03 | .185E+03 | .176E+03 | .162E+03 | .185E+03 | .176E+03 | .162E+03 | .176E+03 | .162E+03 | .162E |
| .900E+06 | .209E+03 | .197E+03 | .189E+03 | .174E+03 | .197E+03 | .189E+03 | .174E+03 | .189E+03 | .174E+03 | .174E |
| .100E+07 | .222E+03 | .209E+03 | .200E+03 | .184E+03 | .209E+03 | .200E+03 | .184E+03 | .200E+03 | .184E+03 | .184E |

Tabela A.7.4 - Comportamento das indutâncias por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (metro) -> 5.00

| freq. (Hz) | Lc (mH/km) | Lb1 (mH/km) | Lb2 (mH/km) | La (mH/km) | Lcb1 (mH/km) | Lcb2 (mH/km) | Lca (mH/km) | Lb1b2 (mH/km) | Lb1a (mH/km) | Lb2 (mH/ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .317E+01 | .297E+01 | .269E+01 | .226E+01 | .297E+01 | .269E+01 | .236E+01 | .269E+01 | .236E+01 | .236E |
| .200E+01 | .306E+01 | .286E+01 | .262E+01 | .220E+01 | .286E+01 | .262E+01 | .229E+01 | .262E+01 | .229E+01 | .229E |
| .300E+01 | .300E+01 | .280E+01 | .258E+01 | .216E+01 | .280E+01 | .258E+01 | .225E+01 | .258E+01 | .225E+01 | .225E |
| .400E+01 | .296E+01 | .276E+01 | .255E+01 | .213E+01 | .276E+01 | .255E+01 | .223E+01 | .255E+01 | .223E+01 | .223E |
| .500E+01 | .293E+01 | .273E+01 | .253E+01 | .210E+01 | .273E+01 | .253E+01 | .220E+01 | .253E+01 | .220E+01 | .220 |
| .600E+01 | .291E+01 | .270E+01 | .251E+01 | .209E+01 | .271E+01 | .251E+01 | .219E+01 | .251E+01 | .219E+01 | .219 |
| .700E+01 | .288E+01 | .268E+01 | .249E+01 | .207E+01 | .269E+01 | .249E+01 | .217E+01 | .249E+01 | .217E+01 | .217 |
| .800E+01 | .287E+01 | .267E+01 | .248E+01 | .206E+01 | .267E+01 | .248E+01 | .216E+01 | .248E+01 | .216E+01 | .216 |
| .900E+01 | .285E+01 | .265E+01 | .247E+01 | .205E+01 | .265E+01 | .247E+01 | .214E+01 | .247E+01 | .214E+01 | .214 |
| .100E+02 | .284E+01 | .264E+01 | .246E+01 | .204E+01 | .264E+01 | .246E+01 | .213E+01 | .246E+01 | .213E+01 | .213 |
| .200E+02 | .275E+01 | .255E+01 | .239E+01 | .197E+01 | .255E+01 | .239E+01 | .207E+01 | .239E+01 | .207E+01 | .207 |
| .300E+02 | .270E+01 | .250E+01 | .235E+01 | .193E+01 | .250E+01 | .235E+01 | .202E+01 | .235E+01 | .202E+01 | .202 |
| .400E+02 | .266E+01 | .246E+01 | .231E+01 | .190E+01 | .246E+01 | .231E+01 | .199E+01 | .231E+01 | .199E+01 | .199 |
| .500E+02 | .263E+01 | .243E+01 | .229E+01 | .188E+01 | .243E+01 | .229E+01 | .197E+01 | .229E+01 | .197E+01 | .197 |
| .600E+02 | .260E+01 | .240E+01 | .226E+01 | .186E+01 | .241E+01 | .226E+01 | .195E+01 | .226E+01 | .195E+01 | .195 |
| .700E+02 | .258E+01 | .238E+01 | .224E+01 | .184E+01 | .238E+01 | .224E+01 | .193E+01 | .224E+01 | .193E+01 | .193 |
| .800E+02 | .256E+01 | .236E+01 | .222E+01 | .183E+01 | .236E+01 | .222E+01 | .192E+01 | .222E+01 | .192E+01 | .192 |
| .900E+02 | .254E+01 | .234E+01 | .220E+01 | .181E+01 | .234E+01 | .220E+01 | .190E+01 | .220E+01 | .190E+01 | .190 |
| .100E+03 | .252E+01 | .232E+01 | .218E+01 | .180E+01 | .232E+01 | .218E+01 | .189E+01 | .218E+01 | .189E+01 | .189 |
| .120E+03 | .248E+01 | .228E+01 | .215E+01 | .178E+01 | .228E+01 | .215E+01 | .186E+01 | .215E+01 | .186E+01 | .186 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .140E+03 | .244E+01 | .224E+01 | .211E+01 | .176E+01 | .224E+01 | .211E+01 | .183E+01 | .211E+01 | .183E+01 | .183E |
| .160E+03 | .240E+01 | .221E+01 | .208E+01 | .174E+01 | .221E+01 | .208E+01 | .181E+01 | .208E+01 | .181E+01 | .181E |
| .180E+03 | .237E+01 | .217E+01 | .205E+01 | .172E+01 | .218E+01 | .205E+01 | .179E+01 | .205E+01 | .179E+01 | .179E |
| .200E+03 | .234E+01 | .214E+01 | .202E+01 | .171E+01 | .214E+01 | .202E+01 | .177E+01 | .202E+01 | .177E+01 | .177E |
| .250E+03 | .226E+01 | .207E+01 | .194E+01 | .168E+01 | .207E+01 | .195E+01 | .172E+01 | .195E+01 | .172E+01 | .172E |
| .300E+03 | .220E+01 | .201E+01 | .188E+01 | .165E+01 | .201E+01 | .188E+01 | .169E+01 | .188E+01 | .169E+01 | .169E |
| .350E+03 | .214E+01 | .195E+01 | .183E+01 | .162E+01 | .196E+01 | .183E+01 | .165E+01 | .183E+01 | .165E+01 | .165E |
| .400E+03 | .210E+01 | .191E+01 | .179E+01 | .160E+01 | .191E+01 | .179E+01 | .163E+01 | .179E+01 | .163E+01 | .163E |
| .450E+03 | .206E+01 | .187E+01 | .175E+01 | .159E+01 | .188E+01 | .176E+01 | .160E+01 | .176E+01 | .160E+01 | .160E |
| .500E+03 | .203E+01 | .184E+01 | .172E+01 | .157E+01 | .185E+01 | .172E+01 | .158E+01 | .172E+01 | .158E+01 | .158E |
| .600E+03 | .198E+01 | .179E+01 | .168E+01 | .155E+01 | .180E+01 | .168E+01 | .155E+01 | .168E+01 | .155E+01 | .155E |
| .700E+03 | .194E+01 | .176E+01 | .164E+01 | .152E+01 | .176E+01 | .164E+01 | .153E+01 | .164E+01 | .153E+01 | .153E |
| .800E+03 | .191E+01 | .173E+01 | .161E+01 | .151E+01 | .173E+01 | .161E+01 | .151E+01 | .161E+01 | .151E+01 | .151E |
| .900E+03 | .188E+01 | .171E+01 | .159E+01 | .149E+01 | .171E+01 | .159E+01 | .149E+01 | .159E+01 | .149E+01 | .149E |
| .100E+04 | .186E+01 | .169E+01 | .157E+01 | .148E+01 | .169E+01 | .157E+01 | .148E+01 | .157E+01 | .148E+01 | .148E |
| .200E+04 | .175E+01 | .158E+01 | .147E+01 | .140E+01 | .159E+01 | .147E+01 | .140E+01 | .147E+01 | .140E+01 | .140E |
| .300E+04 | .170E+01 | .153E+01 | .142E+01 | .136E+01 | .154E+01 | .142E+01 | .136E+01 | .142E+01 | .136E+01 | .136E |
| .400E+04 | .166E+01 | .150E+01 | .139E+01 | .133E+01 | .150E+01 | .139E+01 | .133E+01 | .139E+01 | .133E+01 | .133E |
| .500E+04 | .163E+01 | .147E+01 | .136E+01 | .131E+01 | .148E+01 | .136E+01 | .131E+01 | .136E+01 | .131E+01 | .131E |
| .600E+04 | .161E+01 | .145E+01 | .134E+01 | .129E+01 | .146E+01 | .134E+01 | .129E+01 | .134E+01 | .129E+01 | .129E |
| .700E+04 | .160E+01 | .144E+01 | .133E+01 | .128E+01 | .144E+01 | .133E+01 | .128E+01 | .133E+01 | .128E+01 | .128E |
| .800E+04 | .158E+01 | .142E+01 | .131E+01 | .127E+01 | .143E+01 | .131E+01 | .127E+01 | .131E+01 | .127E+01 | .127E |
| .900E+04 | .157E+01 | .141E+01 | .130E+01 | .126E+01 | .141E+01 | .130E+01 | .126E+01 | .130E+01 | .126E+01 | .126E |
| .100E+05 | .156E+01 | .140E+01 | .129E+01 | .125E+01 | .140E+01 | .129E+01 | .125E+01 | .129E+01 | .125E+01 | .125E |
| .200E+05 | .149E+01 | .134E+01 | .123E+01 | .120E+01 | .134E+01 | .123E+01 | .120E+01 | .123E+01 | .120E+01 | .120E |
| .300E+05 | .146E+01 | .131E+01 | .120E+01 | .117E+01 | .131E+01 | .120E+01 | .117E+01 | .120E+01 | .117E+01 | .117E |
| .400E+05 | .144E+01 | .129E+01 | .118E+01 | .115E+01 | .129E+01 | .118E+01 | .115E+01 | .118E+01 | .115E+01 | .115E |
| .500E+05 | .142E+01 | .127E+01 | .117E+01 | .114E+01 | .128E+01 | .117E+01 | .114E+01 | .117E+01 | .114E+01 | .114E |
| .600E+05 | .141E+01 | .126E+01 | .116E+01 | .113E+01 | .126E+01 | .116E+01 | .113E+01 | .116E+01 | .113E+01 | .113E |
| .700E+05 | .140E+01 | .125E+01 | .115E+01 | .112E+01 | .125E+01 | .115E+01 | .112E+01 | .115E+01 | .112E+01 | .112E |
| .800E+05 | .139E+01 | .125E+01 | .114E+01 | .112E+01 | .125E+01 | .114E+01 | .112E+01 | .114E+01 | .112E+01 | .112E |
| .900E+05 | .138E+01 | .124E+01 | .114E+01 | .111E+01 | .124E+01 | .114E+01 | .111E+01 | .114E+01 | .111E+01 | .111E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+06 | .138E+01 | .123E+01 | .113E+01 | .111E+01 | .124E+01 | .113E+01 | .111E+01 | .113E+01 | .111E+01 | .111E |
| .200E+06 | .134E+01 | .120E+01 | .110E+01 | .108E+01 | .120E+01 | .110E+01 | .108E+01 | .110E+01 | .108E+01 | .108E |
| .300E+06 | .133E+01 | .119E+01 | .109E+01 | .107E+01 | .119E+01 | .109E+01 | .107E+01 | .109E+01 | .107E+01 | .107E |
| .400E+06 | .132E+01 | .118E+01 | .108E+01 | .106E+01 | .118E+01 | .108E+01 | .106E+01 | .108E+01 | .106E+01 | .106E |
| .500E+06 | .131E+01 | .118E+01 | .108E+01 | .106E+01 | .118E+01 | .108E+01 | .106E+01 | .108E+01 | .106E+01 | .106E |
| .600E+06 | .131E+01 | .117E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .117E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .105E |
| .700E+06 | .131E+01 | .117E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .117E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .105E |
| .800E+06 | .130E+01 | .117E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .117E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .107E+01 | .105E+01 | .105E |
| .900E+06 | .130E+01 | .116E+01 | .106E+01 | .104E+01 | .116E+01 | .106E+01 | .104E+01 | .106E+01 | .104E+01 | .104E |
| .100E+07 | .130E+01 | .116E+01 | .106E+01 | .104E+01 | .116E+01 | .106E+01 | .104E+01 | .106E+01 | .104E+01 | .104E |

Tabela A.7.5 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .77751E-01 | .71565E-02 | .92064E-01 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .87518E-01 | .16591E-01 | .12070E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .93937E-01 | .22725E-01 | .13939E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .97834E-01 | .26364E-01 | .15056E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10031E+00 | .28596E-01 | .15750E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10198E+00 | .30047E-01 | .16208E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10319E+00 | .31045E-01 | .16528E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10412E+00 | .31765E-01 | .16765E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10486E+00 | .32309E-01 | .16948E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10547E+00 | .32736E-01 | .17095E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10928E+00 | .34824E-01 | .17892E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11214E+00 | .36120E-01 | .18438E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11498E+00 | .37411E-01 | .18980E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11792E+00 | .38768E-01 | .19545E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12097E+00 | .40180E-01 | .20133E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12413E+00 | .41622E-01 | .20738E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12739E+00 | .43078E-01 | .21354E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13073E+00 | .44532E-01 | .21979E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13415E+00 | .45979E-01 | .22611E+00 | .88167E-01 |
| .12E+03 | .14121E+00 | .48846E-01 | .23891E+00 | .92368E-01 |
| .14E+03 | .14869E+00 | .51418E-01 | .25153E+00 | .97276E-01 |
| .16E+03 | .15622E+00 | .54479E-01 | .26518E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16413E+00 | .57272E-01 | .27867E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17227E+00 | .60047E-01 | .29237E+00 | .11223E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .25E+03 | .19345E+00 | .63929E–01 | .32131E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21543E+00 | .68523E–01 | .35248E+00 | .14691E+00 |
| .35E+03 | .23838E+00 | .70096E–01 | .37857E+00 | .16828E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73893E–01 | .40718E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74459E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76708E–01 | .45401E+00 | .22388E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E–04 | .27142E+01 | .27142E+01 |
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E–05 | .29935E+01 | .29935E+01 |
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E–05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E–05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E–05 | .36863E+01 | .36863E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E-05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E-05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E-06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E-06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E-06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E-07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E-07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E-07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E-08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E-08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.6 - Comportamento da indutância com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .25260E+01 | .22103E+01 | .69467E+01 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .16983E+01 | .13897E+01 | .44776E+01 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .12037E+01 | .89974E+00 | .30032E+01 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .92276E+00 | .62225E+00 | .21673E+01 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .75585E+00 | .45803E+00 | .16719E+01 | .29782E+00 |
| .60E+01 | .65055E+00 | .35491E+00 | .13604E+01 | .29563E+00 |
| .70E+01 | .58034E+00 | .28654E+00 | .11534E+01 | .29380E+00 |
| .80E+01 | .53129E+00 | .23906E+00 | .10094E+01 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .49565E+00 | .20479E+00 | .90523E+00 | .29087E+00 |
| .10E+02 | .46890E+00 | .17924E+00 | .82738E+00 | .28966E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .20E+02 | .37026E+00 | .88000E–01 | .54626E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .34497E+00 | .66582E–01 | .47814E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33283E+00 | .57005E–01 | .44684E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32508E+00 | .51183E–01 | .42745E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31933E+00 | .46997E–01 | .41333E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31470E+00 | .43692E–01 | .40208E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31077E+00 | .40941E–01 | .39265E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30733E+00 | .38578E–01 | .38448E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30425E+00 | .36510E–01 | .37727E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29889E+00 | .33025E–01 | .36494E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29432E+00 | .30296E–01 | .35492E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29018E+00 | .27762E–01 | .34570E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28643E+00 | .25670E–01 | .33777E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28295E+00 | .23816E–01 | .33058E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27505E+00 | .19867E–01 | .31478E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16592E–01 | .30113E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14031E–01 | .28952E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11017E–01 | .27754E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90039E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71436E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51123E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E–09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.7 - Comportamento das resistências por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | Rc (Ω/km) | Rb1 (Ω/km) | Rb2 (Ω/km) | Ra (Ω/km) | Rcb1 (Ω/km) | Rcb2 (Ω/km) | Rca (Ω/km) | Rb1b2 (Ω/km) | Rb1a (Ω/km) | Rb2a (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .714E-01 | .659E+00 | .578E-01 | .111E+00 | .155E-02 | .987E-03 | .982E-03 | .987E-03 | .982E-03 | .982E- |
| .200E+01 | .729E-01 | .660E+00 | .588E-01 | .112E+00 | .296E-02 | .199E-02 | .197E-02 | .199E-02 | .197E-02 | .197E- |
| .300E+01 | .742E-01 | .662E+00 | .599E-01 | .113E+00 | .433E-02 | .300E-02 | .295E-02 | .300E-02 | .295E-02 | .295E- |
| .400E+01 | .756E-01 | .663E+00 | .609E-01 | .114E+00 | .567E-02 | .403E-02 | .395E-02 | .403E-02 | .395E-02 | .395E- |
| .500E+01 | .769E-01 | .664E+00 | .619E-01 | .115E+00 | .701E-02 | .508E-02 | .495E-02 | .508E-02 | .495E-02 | .495E- |
| .600E+01 | .783E-01 | .666E+00 | .630E-01 | .116E+00 | .835E-02 | .615E-02 | .596E-02 | .615E-02 | .596E-02 | .596E- |
| .700E+01 | .796E-01 | .667E+00 | .641E-01 | .117E+00 | .968E-02 | .724E-02 | .697E-02 | .724E-02 | .697E-02 | .697E- |
| .800E+01 | .809E-01 | .669E+00 | .652E-01 | .118E+00 | .110E-01 | .834E-02 | .800E-02 | .834E-02 | .800E-02 | .800E- |
| .900E+01 | .823E-01 | .670E+00 | .663E-01 | .119E+00 | .124E-01 | .946E-02 | .903E-02 | .946E-02 | .903E-02 | .903E- |
| .100E+02 | .837E-01 | .671E+00 | .675E-01 | .120E+00 | .137E-01 | .106E-01 | .101E-01 | .106E-01 | .101E-01 | .101E- |
| .200E+02 | .981E-01 | .685E+00 | .799E-01 | .130E+00 | .280E-01 | .230E-01 | .209E-01 | .230E-01 | .209E-01 | .209E- |
| .300E+02 | .114E+00 | .701E+00 | .942E-01 | .140E+00 | .437E-01 | .373E-01 | .326E-01 | .373E-01 | .326E-01 | .326E- |
| .400E+02 | .132E+00 | .719E+00 | .110E+00 | .151E+00 | .611E-01 | .535E-01 | .451E-01 | .535E-01 | .451E-01 | .451E- |
| .500E+02 | .151E+00 | .738E+00 | .128E+00 | .162E+00 | .801E-01 | .714E-01 | .584E-01 | .714E-01 | .584E-01 | .584E- |
| .600E+02 | .172E+00 | .758E+00 | .148E+00 | .174E+00 | .101E+00 | .910E-01 | .725E-01 | .910E-01 | .725E-01 | .725E- |
| .700E+02 | .195E+00 | .780E+00 | .169E+00 | .186E+00 | .123E+00 | .112E+00 | .873E-01 | .112E+00 | .873E-01 | .873E- |
| .800E+02 | .219E+00 | .804E+00 | .192E+00 | .198E+00 | .146E+00 | .135E+00 | .103E+00 | .135E+00 | .103E+00 | .103E- |
| .900E+02 | .244E+00 | .828E+00 | .215E+00 | .211E+00 | .171E+00 | .158E+00 | .119E+00 | .158E+00 | .119E+00 | .119E- |
| .100E+03 | .271E+00 | .854E+00 | .240E+00 | .224E+00 | .196E+00 | .183E+00 | .135E+00 | .183E+00 | .135E+00 | .135E- |
| .120E+03 | .326E+00 | .908E+00 | .293E+00 | .250E+00 | .250E+00 | .236E+00 | .170E+00 | .236E+00 | .170E+00 | .170E+ |
| .140E+03 | .385E+00 | .964E+00 | .347E+00 | .276E+00 | .306E+00 | .291E+00 | .205E+00 | .291E+00 | .205E+00 | .205E+ |
| .160E+03 | .444E+00 | .102E+01 | .404E+00 | .303E+00 | .364E+00 | .347E+00 | .241E+00 | .347E+00 | .241E+00 | .241E+ |
| .180E+03 | .505E+00 | .108E+01 | .460E+00 | .331E+00 | .422E+00 | .403E+00 | .277E+00 | .403E+00 | .277E+00 | .277E+ |
| .200E+03 | .564E+00 | .114E+01 | .516E+00 | .358E+00 | .479E+00 | .460E+00 | .313E+00 | .460E+00 | .313E+00 | .313E+ |
| .250E+03 | .708E+00 | .127E+01 | .651E+00 | .424E+00 | .616E+00 | .594E+00 | .399E+00 | .594E+00 | .399E+00 | .399E+ |
| .300E+03 | .841E+00 | .140E+01 | .775E+00 | .488E+00 | .742E+00 | .718E+00 | .479E+00 | .718E+00 | .479E+00 | .479E+ |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .350E+03 | .960E+00 | .151E+01 | .885E+00 | .548E+00 | .855E+00 | .828E+00 | .553E+00 | .828E+00 | .553E+00 | .553E+ |
| .400E+03 | .107E+01 | .161E+01 | .984E+00 | .606E+00 | .956E+00 | .928E+00 | .620E+00 | .928E+00 | .620E+00 | .620E+ |
| .450E+03 | .117E+01 | .170E+01 | .107E+01 | .662E+00 | .105E+01 | .102E+01 | .683E+00 | .102E+01 | .683E+00 | .683E+ |
| .500E+03 | .125E+01 | .179E+01 | .115E+01 | .715E+00 | .113E+01 | .110E+01 | .741E+00 | .110E+01 | .741E+00 | .741E+ |
| .600E+03 | .141E+01 | .193E+01 | .130E+01 | .818E+00 | .128E+01 | .124E+01 | .848E+00 | .124E+01 | .848E+00 | .848E+ |
| .700E+03 | .155E+01 | .206E+01 | .143E+01 | .916E+00 | .141E+01 | .137E+01 | .947E+00 | .137E+01 | .947E+00 | .947E+ |
| .800E+03 | .168E+01 | .219E+01 | .154E+01 | .101E+01 | .153E+01 | .149E+01 | .104E+01 | .149E+01 | .104E+01 | .104E+ |
| .900E+03 | .180E+01 | .230E+01 | .165E+01 | .110E+01 | .164E+01 | .160E+01 | .113E+01 | .160E+01 | .113E+01 | .113E+ |
| .100E+04 | .192E+01 | .241E+01 | .176E+01 | .119E+01 | .175E+01 | .170E+01 | .121E+01 | .170E+01 | .121E+01 | .121E+ |
| .200E+04 | .297E+01 | .339E+01 | .272E+01 | .200E+01 | .274E+01 | .266E+01 | .200E+01 | .266E+01 | .200E+01 | .200E+ |
| .300E+04 | .390E+01 | .427E+01 | .357E+01 | .270E+01 | .362E+01 | .352E+01 | .270E+01 | .352E+01 | .270E+01 | .270E+ |
| .400E+04 | .475E+01 | .506E+01 | .434E+01 | .334E+01 | .441E+01 | .429E+01 | .334E+01 | .429E+01 | .334E+01 | .334E+ |
| .500E+04 | .554E+01 | .579E+01 | .505E+01 | .393E+01 | .515E+01 | .500E+01 | .393E+01 | .500E+01 | .393E+01 | .393E+ |
| .600E+04 | .628E+01 | .647E+01 | .571E+01 | .449E+01 | .584E+01 | .566E+01 | .449E+01 | .566E+01 | .449E+01 | .449E+ |
| .700E+04 | .699E+01 | .712E+01 | .633E+01 | .501E+01 | .650E+01 | .628E+01 | .501E+01 | .628E+01 | .501E+01 | .501E+ |
| .800E+04 | .766E+01 | .774E+01 | .692E+01 | .552E+01 | .713E+01 | .688E+01 | .552E+01 | .688E+01 | .552E+01 | .552E+ |
| .900E+04 | .832E+01 | .833E+01 | .749E+01 | .600E+01 | .773E+01 | .745E+01 | .600E+01 | .745E+01 | .600E+01 | .600E+ |
| .100E+05 | .896E+01 | .891E+01 | .803E+01 | .646E+01 | .832E+01 | .799E+01 | .646E+01 | .799E+01 | .646E+01 | .646E+ |
| .200E+05 | .146E+02 | .139E+02 | .127E+02 | .104E+02 | .134E+02 | .126E+02 | .104E+02 | .126E+02 | .104E+02 | .104E+ |
| .300E+05 | .195E+02 | .179E+02 | .164E+02 | .136E+02 | .177E+02 | .164E+02 | .136E+02 | .164E+02 | .136E+02 | .136E+ |
| .400E+05 | .237E+02 | .214E+02 | .196E+02 | .164E+02 | .214E+02 | .196E+02 | .164E+02 | .196E+02 | .164E+02 | .164E+ |
| .500E+05 | .274E+02 | .246E+02 | .225E+02 | .190E+02 | .246E+02 | .225E+02 | .190E+02 | .225E+02 | .190E+02 | .190E+ |
| .600E+05 | .306E+02 | .274E+02 | .251E+02 | .212E+02 | .275E+02 | .251E+02 | .212E+02 | .251E+02 | .212E+02 | .212E+ |
| .700E+05 | .336E+02 | .300E+02 | .276E+02 | .234E+02 | .302E+02 | .276E+02 | .234E+02 | .276E+02 | .234E+02 | .234E+ |
| .800E+05 | .364E+02 | .326E+02 | .299E+02 | .254E+02 | .327E+02 | .299E+02 | .254E+02 | .299E+02 | .254E+02 | .254E+ |
| .900E+05 | .389E+02 | .348E+02 | .320E+02 | .273E+02 | .350E+02 | .321E+02 | .273E+02 | .321E+02 | .273E+02 | .273E+ |
| .100E+06 | .413E+02 | .370E+02 | .341E+02 | .291E+02 | .372E+02 | .341E+02 | .291E+02 | .341E+02 | .291E+02 | .291E+ |
| .200E+06 | .603E+02 | .548E+02 | .507E+02 | .436E+02 | .548E+02 | .507E+02 | .436E+02 | .507E+02 | .436E+02 | .436E+ |
| .300E+06 | .753E+02 | .686E+02 | .635E+02 | .549E+02 | .685E+02 | .635E+02 | .549E+02 | .635E+02 | .549E+02 | .549E+ |
| .400E+06 | .880E+02 | .802E+02 | .744E+02 | .644E+02 | .802E+02 | .744E+02 | .644E+02 | .744E+02 | .644E+02 | .644E+ |
| .500E+06 | .992E+02 | .905E+02 | .840E+02 | .728E+02 | .905E+02 | .840E+02 | .728E+02 | .840E+02 | .728E+02 | .728E+ |
| .600E+06 | .109E+03 | .998E+02 | .927E+02 | .805E+02 | .998E+02 | .927E+02 | .805E+02 | .927E+02 | .805E+02 | .805E+ |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .700E+06 | .119E+03 | .108E+03 | .101E+03 | .875E+02 | .108E+03 | .101E+03 | .875E+02 | .101E+03 | .875E+02 | .875E- |
| .800E+06 | .127E+03 | .116E+03 | .108E+03 | .940E+02 | .116E+03 | .108E+03 | .940E+02 | .108E+03 | .940E+02 | .940E- |
| .900E+06 | .136E+03 | .124E+03 | .115E+03 | .100E+03 | .124E+03 | .115E+03 | .100E+03 | .115E+03 | .100E+03 | .100E- |
| .100E+07 | .143E+03 | .131E+03 | .122E+03 | .106E+03 | .131E+03 | .122E+03 | .106E+03 | .122E+03 | .106E+03 | .106E- |

Tabela A.7.8 - Comportamento das indutâncias por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | Lc (mH/km) | Lb1 (mH/km) | Lb2 (mH/km) | La (mH/km) | Lcb1 (mH/km) | Lcb2 (mH/km) | Lca (mH/km) | Lb1b2 (mH/km) | Lb1a (mH/km) | Lb2a (mH/k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .317E+01 | .297E+01 | .269E+01 | .227E+01 | .297E+01 | .269E+01 | .236E+01 | .269E+01 | .236E+01 | .236E+ |
| .200E+01 | .306E+01 | .286E+01 | .262E+01 | .220E+01 | .287E+01 | .262E+01 | .230E+01 | .262E+01 | .230E+01 | .230E+ |
| .300E+01 | .300E+01 | .280E+01 | .258E+01 | .216E+01 | .281E+01 | .258E+01 | .226E+01 | .258E+01 | .226E+01 | .226E+ |
| .400E+01 | .296E+01 | .276E+01 | .255E+01 | .213E+01 | .277E+01 | .255E+01 | .223E+01 | .255E+01 | .223E+01 | .223E+ |
| .500E+01 | .293E+01 | .273E+01 | .253E+01 | .211E+01 | .273E+01 | .253E+01 | .221E+01 | .253E+01 | .221E+01 | .221E+ |
| .600E+01 | .291E+01 | .271E+01 | .251E+01 | .209E+01 | .271E+01 | .251E+01 | .219E+01 | .251E+01 | .219E+01 | .219E+ |
| .700E+01 | .289E+01 | .269E+01 | .250E+01 | .207E+01 | .269E+01 | .250E+01 | .217E+01 | .250E+01 | .217E+01 | .217E+ |
| .800E+01 | .287E+01 | .267E+01 | .248E+01 | .206E+01 | .267E+01 | .248E+01 | .216E+01 | .248E+01 | .216E+01 | .216E+ |
| .900E+01 | .285E+01 | .265E+01 | .247E+01 | .205E+01 | .266E+01 | .247E+01 | .215E+01 | .247E+01 | .215E+01 | .215E+ |
| .100E+02 | .284E+01 | .264E+01 | .246E+01 | .204E+01 | .264E+01 | .246E+01 | .214E+01 | .246E+01 | .214E+01 | .214E+ |
| .200E+02 | .275E+01 | .255E+01 | .239E+01 | .197E+01 | .256E+01 | .239E+01 | .207E+01 | .239E+01 | .207E+01 | .207E+ |
| .300E+02 | .270E+01 | .250E+01 | .235E+01 | .193E+01 | .250E+01 | .235E+01 | .203E+01 | .235E+01 | .203E+01 | .203E+ |
| .400E+02 | .267E+01 | .246E+01 | .232E+01 | .190E+01 | .247E+01 | .232E+01 | .200E+01 | .232E+01 | .200E+01 | .200E+ |
| .500E+02 | .264E+01 | .243E+01 | .229E+01 | .188E+01 | .244E+01 | .229E+01 | .198E+01 | .229E+01 | .198E+01 | .198E+ |
| .600E+02 | .261E+01 | .241E+01 | .227E+01 | .186E+01 | .241E+01 | .227E+01 | .196E+01 | .227E+01 | .196E+01 | .196E+ |
| .700E+02 | .259E+01 | .239E+01 | .225E+01 | .185E+01 | .239E+01 | .225E+01 | .194E+01 | .225E+01 | .194E+01 | .194E+ |
| .800E+02 | .256E+01 | .236E+01 | .223E+01 | .183E+01 | .237E+01 | .223E+01 | .192E+01 | .223E+01 | .192E+01 | .192E+ |
| .900E+02 | .254E+01 | .234E+01 | .221E+01 | .182E+01 | .235E+01 | .221E+01 | .191E+01 | .221E+01 | .191E+01 | .191E+ |
| .100E+03 | .252E+01 | .232E+01 | .219E+01 | .181E+01 | .233E+01 | .219E+01 | .189E+01 | .219E+01 | .189E+01 | .189E+ |
| .120E+03 | .249E+01 | .229E+01 | .216E+01 | .179E+01 | .229E+01 | .216E+01 | .187E+01 | .216E+01 | .187E+01 | .187E+ |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .140E+03 | .245E+01 | .225E+01 | .212E+01 | .177E+01 | .225E+01 | .212E+01 | .184E+01 | .212E+01 | .184E+01 | .184E |
| .160E+03 | .241E+01 | .222E+01 | .209E+01 | .175E+01 | .222E+01 | .209E+01 | .182E+01 | .209E+01 | .182E+01 | .182E |
| .180E+03 | .238E+01 | .218E+01 | .206E+01 | .173E+01 | .219E+01 | .206E+01 | .180E+01 | .206E+01 | .180E+01 | .180E |
| .200E+03 | .235E+01 | .215E+01 | .203E+01 | .172E+01 | .216E+01 | .203E+01 | .178E+01 | .203E+01 | .178E+01 | .178E |
| .250E+03 | .227E+01 | .208E+01 | .196E+01 | .169E+01 | .208E+01 | .196E+01 | .174E+01 | .196E+01 | .174E+01 | .174E |
| .300E+03 | .221E+01 | .202E+01 | .190E+01 | .166E+01 | .202E+01 | .190E+01 | .170E+01 | .190E+01 | .170E+01 | .170E |
| .350E+03 | .216E+01 | .197E+01 | .185E+01 | .164E+01 | .197E+01 | .185E+01 | .167E+01 | .185E+01 | .167E+01 | .167E |
| .400E+03 | .211E+01 | .193E+01 | .181E+01 | .162E+01 | .193E+01 | .181E+01 | .164E+01 | .181E+01 | .164E+01 | .164E |
| .450E+03 | .208E+01 | .189E+01 | .177E+01 | .160E+01 | .189E+01 | .177E+01 | .162E+01 | .177E+01 | .162E+01 | .162E |
| .500E+03 | .204E+01 | .186E+01 | .174E+01 | .159E+01 | .186E+01 | .174E+01 | .160E+01 | .174E+01 | .160E+01 | .160E |
| .600E+03 | .199E+01 | .181E+01 | .169E+01 | .156E+01 | .182E+01 | .170E+01 | .157E+01 | .170E+01 | .157E+01 | .157E |
| .700E+03 | .196E+01 | .178E+01 | .166E+01 | .154E+01 | .178E+01 | .166E+01 | .155E+01 | .166E+01 | .155E+01 | .155E |
| .800E+03 | .193E+01 | .175E+01 | .163E+01 | .153E+01 | .175E+01 | .163E+01 | .153E+01 | .163E+01 | .153E+01 | .153E |
| .900E+03 | .190E+01 | .173E+01 | .161E+01 | .151E+01 | .173E+01 | .161E+01 | .151E+01 | .161E+01 | .151E+01 | .151E |
| .100E+04 | .189E+01 | .171E+01 | .160E+01 | .150E+01 | .171E+01 | .160E+01 | .150E+01 | .160E+01 | .150E+01 | .150E |
| .200E+04 | .178E+01 | .161E+01 | .150E+01 | .143E+01 | .162E+01 | .150E+01 | .143E+01 | .150E+01 | .143E+01 | .143E |
| .300E+04 | .173E+01 | .157E+01 | .146E+01 | .139E+01 | .157E+01 | .146E+01 | .139E+01 | .146E+01 | .139E+01 | .139E |
| .400E+04 | .170E+01 | .154E+01 | .143E+01 | .137E+01 | .154E+01 | .143E+01 | .137E+01 | .143E+01 | .137E+01 | .137E |
| .500E+04 | .168E+01 | .151E+01 | .140E+01 | .135E+01 | .152E+01 | .140E+01 | .135E+01 | .140E+01 | .135E+01 | .135E |
| .600E+04 | .166E+01 | .150E+01 | .139E+01 | .134E+01 | .150E+01 | .139E+01 | .134E+01 | .139E+01 | .134E+01 | .134E |
| .700E+04 | .164E+01 | .148E+01 | .137E+01 | .133E+01 | .149E+01 | .137E+01 | .133E+01 | .137E+01 | .133E+01 | .133E |
| .800E+04 | .163E+01 | .147E+01 | .136E+01 | .132E+01 | .148E+01 | .136E+01 | .132E+01 | .136E+01 | .132E+01 | .132E |
| .900E+04 | .162E+01 | .146E+01 | .135E+01 | .131E+01 | .147E+01 | .135E+01 | .131E+01 | .135E+01 | .131E+01 | .131E |
| .100E+05 | .161E+01 | .145E+01 | .135E+01 | .130E+01 | .146E+01 | .135E+01 | .130E+01 | .135E+01 | .130E+01 | .130E |
| .200E+05 | .156E+01 | .141E+01 | .130E+01 | .126E+01 | .141E+01 | .130E+01 | .126E+01 | .130E+01 | .126E+01 | .126E |
| .300E+05 | .153E+01 | .138E+01 | .128E+01 | .124E+01 | .139E+01 | .128E+01 | .124E+01 | .128E+01 | .124E+01 | .124E |
| .400E+05 | .152E+01 | .137E+01 | .126E+01 | .123E+01 | .137E+01 | .126E+01 | .123E+01 | .126E+01 | .123E+01 | .123E |
| .500E+05 | .150E+01 | .136E+01 | .125E+01 | .122E+01 | .136E+01 | .125E+01 | .122E+01 | .125E+01 | .122E+01 | .122E |
| .600E+05 | .149E+01 | .135E+01 | .125E+01 | .122E+01 | .135E+01 | .125E+01 | .122E+01 | .125E+01 | .122E+01 | .122E |
| .700E+05 | .149E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .121E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .121E+01 | .124E+01 | .121E+01 | .121E |
| .800E+05 | .148E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .121E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .121E+01 | .124E+01 | .121E+01 | .121E |
| .900E+05 | .148E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .121E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+06 | .147E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .120E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .120E+01 | .123E+01 | .120E+01 | .120E+ |
| .200E+06 | .145E+01 | .131E+01 | .121E+01 | .119E+01 | .131E+01 | .121E+01 | .119E+01 | .121E+01 | .119E+01 | .119E+ |
| .300E+06 | .144E+01 | .130E+01 | .120E+01 | .118E+01 | .130E+01 | .120E+01 | .118E+01 | .120E+01 | .118E+01 | .118E+ |
| .400E+06 | .143E+01 | .130E+01 | .120E+01 | .118E+01 | .130E+01 | .120E+01 | .118E+01 | .120E+01 | .118E+01 | .118E+ |
| .500E+06 | .143E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .117E+ |
| .600E+06 | .143E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .117E+ |
| .700E+06 | .143E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .117E+ |
| .800E+06 | .142E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .117E+ |
| .900E+06 | .142E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .129E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .117E+ |
| .100E+07 | .142E+01 | .128E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .128E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .119E+01 | .117E+01 | .117E+ |

Tabela A.7.9 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 100.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .78644E-01 | .80498E-02 | .94744E-01 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .88850E-01 | .17923E-01 | .12470E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .95081E-01 | .23869E-01 | .14282E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .98698E-01 | .27228E-01 | .15315E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10094E+00 | .29230E-01 | .15940E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10244E+00 | .30509E-01 | .16346E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10353E+00 | .31380E-01 | .16629E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10436E+00 | .32007E-01 | .16837E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10503E+00 | .32480E-01 | .16999E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10559E+00 | .32851E-01 | .17129E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10919E+00 | .34735E-01 | .17866E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11202E+00 | .35998E-01 | .18401E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11486E+00 | .37293E-01 | .18945E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11782E+00 | .38666E-01 | .19515E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12089E+00 | .40097E-01 | .20108E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12407E+00 | .41559E-01 | .20719E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12734E+00 | .43031E-01 | .21340E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13069E+00 | .44500E-01 | .21969E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13412E+00 | .45958E-01 | .22604E+00 | .88167E-01 |
| .12E+03 | .14121E+00 | .48839E-01 | .23889E+00 | .92368E-01 |
| .14E+03 | .14869E+00 | .51418E-01 | .25153E+00 | .97276E-01 |
| .16E+03 | .15623E+00 | .54483E-01 | .26519E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16413E+00 | .57277E-01 | .27869E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17228E+00 | .60052E-01 | .29238E+00 | .11223E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .25E+03 | .19345E+00 | .63932E–01 | .32132E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21543E+00 | .68524E–01 | .35248E+00 | .14691E+00 |
| .35E+03 | .23838E+00 | .70096E–01 | .37857E+00 | .16829E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73893E–01 | .40718E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74459E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76708E–01 | .45401E+00 | .22388E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E–04 | .27142E+01 | .27142E+01 |
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E–05 | .29935E+01 | .29935E+01 |
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E–05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E–05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E–05 | .36863E+01 | .36863E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E-05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E-05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E-06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E-06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E-06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E-07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E-07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E-07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E-08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E-08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.10 - Comportamento da indutância com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 100.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .26225E+01 | .23068E+01 | .72360E+01 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .16953E+01 | .13867E+01 | .44688E+01 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .11767E+01 | .87281E+00 | .29224E+01 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .89512E+00 | .59461E+00 | .20843E+01 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .73227E+00 | .43445E+00 | .16012E+01 | .29782E+00 |
| .60E+01 | .63124E+00 | .33560E+00 | .13024E+01 | .29563E+00 |
| .70E+01 | .56460E+00 | .27080E+00 | .11062E+01 | .29380E+00 |
| .80E+01 | .51837E+00 | .22614E+00 | .97064E+00 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .48494E+00 | .19407E+00 | .87307E+00 | .29087E+00 |
| .10E+02 | .45992E+00 | .17026E+00 | .80043E+00 | .28966E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .20E+02 | .36795E+00 | .85685E–01 | .53932E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .34414E+00 | .65744E–01 | .47563E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33251E+00 | .56684E–01 | .44588E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32498E+00 | .51079E–01 | .42713E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31933E+00 | .46988E–01 | .41330E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31473E+00 | .43722E–01 | .40217E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31081E+00 | .40984E–01 | .39278E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30737E+00 | .38623E–01 | .38462E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30429E+00 | .36550E–01 | .37739E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29892E+00 | .33054E–01 | .36503E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29434E+00 | .30314E–01 | .35497E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29019E+00 | .27773E–01 | .34573E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28644E+00 | .25676E–01 | .33779E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28295E+00 | .23819E–01 | .33059E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27505E+00 | .19867E–01 | .31478E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16592E–01 | .30113E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14030E–01 | .28952E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11017E–01 | .27754E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90038E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71435E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51123E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E–09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.11 - Comportamento das resistências por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 100.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | Rc (Ω/km) | Rb1 (Ω/km) | Rb2 (Ω/km) | Ra (Ω/km) | Rcb1 (Ω/km) | Rcb2 (Ω/km) | Rca (Ω/km) | Rb1b2 (Ω/km) | Rb1a (Ω/km) | Rb2a (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .715E-01 | .659E+00 | .579E-01 | .111E+00 | .156E-02 | .994E-03 | .989E-03 | .994E-03 | .989E-03 | .989E- |
| .200E+01 | .729E-01 | .660E+00 | .589E-01 | .112E+00 | .298E-02 | .201E-02 | .198E-02 | .201E-02 | .198E-02 | .198E- |
| .300E+01 | .743E-01 | .662E+00 | .599E-01 | .113E+00 | .436E-02 | .304E-02 | .299E-02 | .304E-02 | .299E-02 | .299E- |
| .400E+01 | .756E-01 | .663E+00 | .609E-01 | .114E+00 | .573E-02 | .409E-02 | .400E-02 | .409E-02 | .400E-02 | .400E- |
| .500E+01 | .770E-01 | .665E+00 | .620E-01 | .115E+00 | .709E-02 | .516E-02 | .503E-02 | .516E-02 | .503E-02 | .503E- |
| .600E+01 | .784E-01 | .666E+00 | .631E-01 | .116E+00 | .844E-02 | .625E-02 | .606E-02 | .625E-02 | .606E-02 | .606E- |
| .700E+01 | .797E-01 | .667E+00 | .642E-01 | .117E+00 | .981E-02 | .736E-02 | .710E-02 | .736E-02 | .710E-02 | .710E- |
| .800E+01 | .811E-01 | .669E+00 | .653E-01 | .118E+00 | .112E-01 | .849E-02 | .815E-02 | .849E-02 | .815E-02 | .815E- |
| .900E+01 | .825E-01 | .670E+00 | .665E-01 | .119E+00 | .126E-01 | .964E-02 | .921E-02 | .964E-02 | .921E-02 | .921E- |
| .100E+02 | .839E-01 | .671E+00 | .677E-01 | .120E+00 | .139E-01 | .108E-01 | .103E-01 | .108E-01 | .103E-01 | .103E- |
| .200E+02 | .986E-01 | .686E+00 | .805E-01 | .130E+00 | .285E-01 | .236E-01 | .215E-01 | .236E-01 | .215E-01 | .215E- |
| .300E+02 | .115E+00 | .702E+00 | .952E-01 | .141E+00 | .448E-01 | .384E-01 | .336E-01 | .384E-01 | .336E-01 | .336E |
| .400E+02 | .133E+00 | .720E+00 | .112E+00 | .153E+00 | .627E-01 | .551E-01 | .467E-01 | .551E-01 | .467E-01 | .467E |
| .500E+02 | .153E+00 | .740E+00 | .130E+00 | .165E+00 | .823E-01 | .736E-01 | .606E-01 | .736E-01 | .606E-01 | .606E |
| .600E+02 | .175E+00 | .761E+00 | .151E+00 | .177E+00 | .104E+00 | .938E-01 | .753E-01 | .938E-01 | .753E-01 | .753E |
| .700E+02 | .198E+00 | .784E+00 | .173E+00 | .189E+00 | .126E+00 | .116E+00 | .908E-01 | .116E+00 | .908E-01 | .908E |
| .800E+02 | .223E+00 | .808E+00 | .196E+00 | .202E+00 | .150E+00 | .139E+00 | .107E+00 | .139E+00 | .107E+00 | .107E |
| .900E+02 | .249E+00 | .833E+00 | .220E+00 | .216E+00 | .176E+00 | .163E+00 | .124E+00 | .163E+00 | .124E+00 | .124E |
| .100E+03 | .277E+00 | .860E+00 | .246E+00 | .229E+00 | .202E+00 | .189E+00 | .141E+00 | .189E+00 | .141E+00 | .141E |
| .120E+03 | .334E+00 | .915E+00 | .300E+00 | .257E+00 | .258E+00 | .243E+00 | .177E+00 | .243E+00 | .177E+00 | .177E |
| .140E+03 | .394E+00 | .973E+00 | .357E+00 | .286E+00 | .316E+00 | .300E+00 | .214E+00 | .300E+00 | .214E+00 | .214E |
| .160E+03 | .456E+00 | .103E+01 | .415E+00 | .315E+00 | .375E+00 | .358E+00 | .252E+00 | .358E+00 | .252E+00 | .252E |
| .180E+03 | .518E+00 | .109E+01 | .474E+00 | .344E+00 | .435E+00 | .417E+00 | .290E+00 | .417E+00 | .290E+00 | .290E |
| .200E+03 | .580E+00 | .115E+01 | .532E+00 | .373E+00 | .494E+00 | .475E+00 | .328E+00 | .475E+00 | .328E+00 | .328E |
| .250E+03 | .730E+00 | .129E+01 | .672E+00 | .445E+00 | .637E+00 | .616E+00 | .420E+00 | .616E+00 | .420E+00 | .420E |
| .300E+03 | .868E+00 | .143E+01 | .802E+00 | .515E+00 | .769E+00 | .745E+00 | .506E+00 | .745E+00 | .506E+00 | .506E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .350E+03 | .994E+00 | .155E+01 | .919E+00 | .582E+00 | .889E+00 | .862E+00 | .586E+00 | .862E+00 | .586E+00 | .586E |
| .400E+03 | .111E+01 | .165E+01 | .103E+01 | .647E+00 | .996E+00 | .968E+00 | .661E+00 | .968E+00 | .661E+00 | .661E |
| .450E+03 | .121E+01 | .175E+01 | .112E+01 | .710E+00 | .109E+01 | .106E+01 | .731E+00 | .106E+01 | .731E+00 | .731E |
| .500E+03 | .131E+01 | .184E+01 | .121E+01 | .771E+00 | .119E+01 | .115E+01 | .796E+00 | .115E+01 | .796E+00 | .796E |
| .600E+03 | .148E+01 | .200E+01 | .137E+01 | .889E+00 | .135E+01 | .131E+01 | .919E+00 | .131E+01 | .919E+00 | .919E |
| .700E+03 | .164E+01 | .215E+01 | .151E+01 | .100E+01 | .149E+01 | .146E+01 | .103E+01 | .146E+01 | .103E+01 | .103E |
| .800E+03 | .179E+01 | .229E+01 | .165E+01 | .112E+01 | .163E+01 | .159E+01 | .114E+01 | .159E+01 | .114E+01 | .114E |
| .900E+03 | .192E+01 | .242E+01 | .178E+01 | .122E+01 | .176E+01 | .172E+01 | .125E+01 | .172E+01 | .125E+01 | .125E |
| .100E+04 | .206E+01 | .255E+01 | .190E+01 | .133E+01 | .189E+01 | .184E+01 | .135E+01 | .184E+01 | .135E+01 | .135E |
| .200E+04 | .332E+01 | .374E+01 | .307E+01 | .235E+01 | .308E+01 | .301E+01 | .234E+01 | .301E+01 | .234E+01 | .234E |
| .300E+04 | .448E+01 | .485E+01 | .415E+01 | .328E+01 | .420E+01 | .410E+01 | .328E+01 | .410E+01 | .328E+01 | .328E |
| .400E+04 | .558E+01 | .589E+01 | .517E+01 | .417E+01 | .524E+01 | .512E+01 | .417E+01 | .512E+01 | .417E+01 | .417E |
| .500E+04 | .663E+01 | .688E+01 | .614E+01 | .502E+01 | .624E+01 | .609E+01 | .502E+01 | .609E+01 | .502E+01 | .502E |
| .600E+04 | .764E+01 | .783E+01 | .707E+01 | .584E+01 | .720E+01 | .702E+01 | .584E+01 | .702E+01 | .584E+01 | .584E |
| .700E+04 | .862E+01 | .875E+01 | .796E+01 | .665E+01 | .813E+01 | .791E+01 | .665E+01 | .791E+01 | .665E+01 | .665E |
| .800E+04 | .957E+01 | .965E+01 | .883E+01 | .743E+01 | .904E+01 | .879E+01 | .743E+01 | .879E+01 | .743E+01 | .743E |
| .900E+04 | .105E+02 | .105E+02 | .968E+01 | .819E+01 | .992E+01 | .964E+01 | .819E+01 | .964E+01 | .819E+01 | .819E |
| .100E+05 | .114E+02 | .114E+02 | .105E+02 | .894E+01 | .108E+02 | .105E+02 | .894E+01 | .105E+02 | .894E+01 | .894E |
| .200E+05 | .200E+02 | .192E+02 | .180E+02 | .158E+02 | .188E+02 | .180E+02 | .158E+02 | .180E+02 | .158E+02 | .158E |
| .300E+05 | .277E+02 | .261E+02 | .246E+02 | .219E+02 | .259E+02 | .246E+02 | .219E+02 | .246E+02 | .219E+02 | .219E |
| .400E+05 | .347E+02 | .325E+02 | .306E+02 | .275E+02 | .324E+02 | .306E+02 | .275E+02 | .306E+02 | .275E+02 | .275E |
| .500E+05 | .411E+02 | .383E+02 | .362E+02 | .327E+02 | .383E+02 | .362E+02 | .327E+02 | .362E+02 | .327E+02 | .327E |
| .600E+05 | .470E+02 | .438E+02 | .415E+02 | .376E+02 | .439E+02 | .415E+02 | .376E+02 | .415E+02 | .376E+02 | .376E |
| .700E+05 | .525E+02 | .490E+02 | .465E+02 | .423E+02 | .491E+02 | .465E+02 | .423E+02 | .465E+02 | .423E+02 | .423E |
| .800E+05 | .577E+02 | .539E+02 | .513E+02 | .468E+02 | .541E+02 | .513E+02 | .468E+02 | .513E+02 | .468E+02 | .468E |
| .900E+05 | .627E+02 | .586E+02 | .559E+02 | .511E+02 | .588E+02 | .559E+02 | .511E+02 | .559E+02 | .511E+02 | .511E |
| .100E+06 | .675E+02 | .632E+02 | .603E+02 | .553E+02 | .634E+02 | .603E+02 | .553E+02 | .603E+02 | .553E+02 | .553E |
| .200E+06 | .108E+03 | .102E+03 | .981E+02 | .910E+02 | .102E+03 | .981E+02 | .910E+02 | .981E+02 | .910E+02 | .910E |
| .300E+06 | .141E+03 | .134E+03 | .129E+03 | .120E+03 | .134E+03 | .129E+03 | .120E+03 | .129E+03 | .120E+03 | .120E |
| .400E+06 | .169E+03 | .162E+03 | .156E+03 | .146E+03 | .162E+03 | .156E+03 | .146E+03 | .156E+03 | .146E+03 | .146E |
| .500E+06 | .195E+03 | .186E+03 | .180E+03 | .169E+03 | .186E+03 | .180E+03 | .169E+03 | .180E+03 | .169E+03 | .169E |
| .600E+06 | .219E+03 | .209E+03 | .202E+03 | .190E+03 | .209E+03 | .202E+03 | .190E+03 | .202E+03 | .190E+03 | .190E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .700E+06 | .240E+03 | .230E+03 | .222E+03 | .209E+03 | .230E+03 | .222E+03 | .209E+03 | .222E+03 | .209E+03 | .209E |
| .800E+06 | .261E+03 | .250E+03 | .242E+03 | .228E+03 | .250E+03 | .242E+03 | .228E+03 | .242E+03 | .228E+03 | .228E |
| .900E+06 | .280E+03 | .269E+03 | .260E+03 | .245E+03 | .269E+03 | .260E+03 | .245E+03 | .260E+03 | .245E+03 | .245E |
| .100E+07 | .299E+03 | .286E+03 | .277E+03 | .261E+03 | .286E+03 | .277E+03 | .261E+03 | .277E+03 | .261E+03 | .261E |

Tabela A.7.12 - Comportamento das indutâncias por camada metálica, com a frêqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 100.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | Lc (mH/km) | Lb1 (mH/km) | Lb2 (mH/km) | La (mH/km) | Lcb1 (mH/km) | Lcb2 (mH/km) | Lca (mH/km) | Lb1b2 (mH/km) | Lb1a (mH/km) | Lb2 (mH/ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .340E+01 | .320E+01 | .292E+01 | .249E+01 | .320E+01 | .292E+01 | .259E+01 | .292E+01 | .259E+01 | .259E |
| .200E+01 | .329E+01 | .309E+01 | .285E+01 | .243E+01 | .309E+01 | .285E+01 | .252E+01 | .285E+01 | .252E+01 | .252E |
| .300E+01 | .323E+01 | .303E+01 | .281E+01 | .239E+01 | .303E+01 | .281E+01 | .248E+01 | .281E+01 | .248E+01 | .248E |
| .400E+01 | .319E+01 | .299E+01 | .278E+01 | .236E+01 | .299E+01 | .278E+01 | .246E+01 | .278E+01 | .246E+01 | .246E |
| .500E+01 | .316E+01 | .296E+01 | .276E+01 | .233E+01 | .296E+01 | .276E+01 | .243E+01 | .276E+01 | .243E+01 | .243E |
| .600E+01 | .314E+01 | .293E+01 | .274E+01 | .232E+01 | .294E+01 | .274E+01 | .241E+01 | .274E+01 | .241E+01 | .241E |
| .700E+01 | .311E+01 | .291E+01 | .272E+01 | .230E+01 | .292E+01 | .272E+01 | .240E+01 | .272E+01 | .240E+01 | .240E |
| .800E+01 | .310E+01 | .289E+01 | .271E+01 | .229E+01 | .290E+01 | .271E+01 | .239E+01 | .271E+01 | .239E+01 | .239E |
| .900E+01 | .308E+01 | .288E+01 | .270E+01 | .228E+01 | .288E+01 | .270E+01 | .237E+01 | .270E+01 | .237E+01 | .237E |
| .100E+02 | .307E+01 | .287E+01 | .269E+01 | .227E+01 | .287E+01 | .269E+01 | .236E+01 | .269E+01 | .236E+01 | .236E |
| .200E+02 | .298E+01 | .278E+01 | .262E+01 | .220E+01 | .278E+01 | .262E+01 | .229E+01 | .262E+01 | .229E+01 | .229E |
| .300E+02 | .293E+01 | .272E+01 | .257E+01 | .216E+01 | .273E+01 | .258E+01 | .225E+01 | .258E+01 | .225E+01 | .225E |
| .400E+02 | .289E+01 | .269E+01 | .254E+01 | .213E+01 | .269E+01 | .254E+01 | .222E+01 | .254E+01 | .222E+01 | .222E |
| .500E+02 | .286E+01 | .266E+01 | .252E+01 | .210E+01 | .266E+01 | .252E+01 | .220E+01 | .252E+01 | .220E+01 | .220E |
| .600E+02 | .283E+01 | .263E+01 | .249E+01 | .208E+01 | .263E+01 | .249E+01 | .218E+01 | .249E+01 | .218E+01 | .218E |
| .700E+02 | .281E+01 | .261E+01 | .247E+01 | .207E+01 | .261E+01 | .247E+01 | .216E+01 | .247E+01 | .216E+01 | .216E |
| .800E+02 | .278E+01 | .258E+01 | .245E+01 | .205E+01 | .259E+01 | .245E+01 | .214E+01 | .245E+01 | .214E+01 | .214E |
| .900E+02 | .276E+01 | .256E+01 | .243E+01 | .204E+01 | .257E+01 | .243E+01 | .213E+01 | .243E+01 | .213E+01 | .213E |
| .100E+03 | .274E+01 | .254E+01 | .241E+01 | .203E+01 | .255E+01 | .241E+01 | .211E+01 | .241E+01 | .211E+01 | .211E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .120E+03 | .270E+01 | .250E+01 | .237E+01 | .200E+01 | .251E+01 | .238E+01 | .209E+01 | .238E+01 | .209E+01 | .209E |
| .140E+03 | .267E+01 | .247E+01 | .234E+01 | .198E+01 | .247E+01 | .234E+01 | .206E+01 | .234E+01 | .206E+01 | .206E |
| .160E+03 | .263E+01 | .243E+01 | .231E+01 | .197E+01 | .244E+01 | .231E+01 | .204E+01 | .231E+01 | .204E+01 | .204E |
| .180E+03 | .260E+01 | .240E+01 | .227E+01 | .195E+01 | .240E+01 | .227E+01 | .202E+01 | .227E+01 | .202E+01 | .202E |
| .200E+03 | .256E+01 | .237E+01 | .224E+01 | .193E+01 | .237E+01 | .224E+01 | .200E+01 | .224E+01 | .200E+01 | .200E |
| .250E+03 | .249E+01 | .229E+01 | .217E+01 | .190E+01 | .230E+01 | .217E+01 | .195E+01 | .217E+01 | .195E+01 | .195E |
| .300E+03 | .242E+01 | .223E+01 | .211E+01 | .187E+01 | .223E+01 | .211E+01 | .191E+01 | .211E+01 | .191E+01 | .191E |
| .350E+03 | .237E+01 | .218E+01 | .206E+01 | .185E+01 | .218E+01 | .206E+01 | .188E+01 | .206E+01 | .188E+01 | .188E |
| .400E+03 | .232E+01 | .213E+01 | .201E+01 | .183E+01 | .214E+01 | .202E+01 | .185E+01 | .202E+01 | .185E+01 | .185E |
| .450E+03 | .228E+01 | .210E+01 | .198E+01 | .181E+01 | .210E+01 | .198E+01 | .183E+01 | .198E+01 | .183E+01 | .183E |
| .500E+03 | .225E+01 | .207E+01 | .195E+01 | .179E+01 | .207E+01 | .195E+01 | .181E+01 | .195E+01 | .181E+01 | .181E |
| .600E+03 | .220E+01 | .202E+01 | .190E+01 | .177E+01 | .202E+01 | .190E+01 | .178E+01 | .190E+01 | .178E+01 | .178E |
| .700E+03 | .216E+01 | .198E+01 | .186E+01 | .175E+01 | .199E+01 | .186E+01 | .175E+01 | .186E+01 | .175E+01 | .175E |
| .800E+03 | .213E+01 | .195E+01 | .184E+01 | .173E+01 | .196E+01 | .184E+01 | .173E+01 | .184E+01 | .173E+01 | .173E |
| .900E+03 | .211E+01 | .193E+01 | .181E+01 | .171E+01 | .193E+01 | .181E+01 | .171E+01 | .181E+01 | .171E+01 | .171E |
| .100E+04 | .208E+01 | .191E+01 | .179E+01 | .170E+01 | .191E+01 | .179E+01 | .170E+01 | .179E+01 | .170E+01 | .170E |
| .200E+04 | .197E+01 | .180E+01 | .169E+01 | .162E+01 | .181E+01 | .169E+01 | .162E+01 | .169E+01 | .162E+01 | .162E |
| .300E+04 | .191E+01 | .175E+01 | .164E+01 | .157E+01 | .175E+01 | .164E+01 | .157E+01 | .164E+01 | .157E+01 | .157E |
| .400E+04 | .187E+01 | .171E+01 | .160E+01 | .154E+01 | .172E+01 | .160E+01 | .154E+01 | .160E+01 | .154E+01 | .154E |
| .500E+04 | .185E+01 | .168E+01 | .157E+01 | .152E+01 | .169E+01 | .157E+01 | .152E+01 | .157E+01 | .152E+01 | .152E |
| .600E+04 | .182E+01 | .166E+01 | .155E+01 | .150E+01 | .167E+01 | .155E+01 | .150E+01 | .155E+01 | .150E+01 | .150E |
| .700E+04 | .181E+01 | .165E+01 | .154E+01 | .149E+01 | .165E+01 | .154E+01 | .149E+01 | .154E+01 | .149E+01 | .149E |
| .800E+04 | .179E+01 | .163E+01 | .152E+01 | .148E+01 | .163E+01 | .152E+01 | .148E+01 | .152E+01 | .148E+01 | .148E |
| .900E+04 | .178E+01 | .162E+01 | .151E+01 | .146E+01 | .162E+01 | .151E+01 | .146E+01 | .151E+01 | .146E+01 | .146E |
| .100E+05 | .177E+01 | .161E+01 | .150E+01 | .146E+01 | .161E+01 | .150E+01 | .146E+01 | .150E+01 | .146E+01 | .146E |
| .200E+05 | .169E+01 | .154E+01 | .143E+01 | .140E+01 | .154E+01 | .143E+01 | .140E+01 | .143E+01 | .140E+01 | .140E |
| .300E+05 | .165E+01 | .150E+01 | .140E+01 | .137E+01 | .151E+01 | .140E+01 | .137E+01 | .140E+01 | .137E+01 | .137E |
| .400E+05 | .163E+01 | .148E+01 | .138E+01 | .135E+01 | .148E+01 | .138E+01 | .135E+01 | .138E+01 | .135E+01 | .135E |
| .500E+05 | .161E+01 | .146E+01 | .136E+01 | .133E+01 | .146E+01 | .136E+01 | .133E+01 | .136E+01 | .133E+01 | .133E |
| .600E+05 | .159E+01 | .145E+01 | .135E+01 | .132E+01 | .145E+01 | .135E+01 | .132E+01 | .135E+01 | .132E+01 | .132E |
| .700E+05 | .158E+01 | .144E+01 | .134E+01 | .131E+01 | .144E+01 | .134E+01 | .131E+01 | .134E+01 | .131E+01 | .131E |
| .800E+05 | .157E+01 | .143E+01 | .133E+01 | .130E+01 | .143E+01 | .133E+01 | .130E+01 | .133E+01 | .130E+01 | .130E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .900E+05 | .156E+01 | .142E+01 | .132E+01 | .129E+01 | .142E+01 | .132E+01 | .129E+01 | .132E+01 | .129E+01 | .129E |
| .100E+06 | .156E+01 | .142E+01 | .131E+01 | .129E+01 | .142E+01 | .131E+01 | .129E+01 | .131E+01 | .129E+01 | .129E |
| .200E+06 | .152E+01 | .138E+01 | .128E+01 | .125E+01 | .138E+01 | .128E+01 | .125E+01 | .128E+01 | .125E+01 | .125E |
| .300E+06 | .150E+01 | .136E+01 | .126E+01 | .124E+01 | .136E+01 | .126E+01 | .124E+01 | .126E+01 | .124E+01 | .124E |
| .400E+06 | .148E+01 | .135E+01 | .125E+01 | .123E+01 | .135E+01 | .125E+01 | .123E+01 | .125E+01 | .123E+01 | .123E |
| .500E+06 | .148E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .122E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .122E+01 | .124E+01 | .122E+01 | .122E |
| .600E+06 | .147E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .121E |
| .700E+06 | .146E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .133E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .123E+01 | .121E+01 | .121E |
| .800E+06 | .146E+01 | .132E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .132E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .120E |
| .900E+06 | .146E+01 | .132E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .132E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .120E |
| .100E+07 | .145E+01 | .132E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .132E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .122E+01 | .120E+01 | .120E |

Tabela A.7.13 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .79545E-01 | .89507E-02 | .97446E-01 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .90073E-01 | .19146E-01 | .12836E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .96069E-01 | .24856E-01 | .14578E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .99415E-01 | .27945E-01 | .15531E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10145E+00 | .29742E-01 | .16094E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10281E+00 | .30875E-01 | .16456E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10379E+00 | .31641E-01 | .16707E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10454E+00 | .32190E-01 | .16892E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10515E+00 | .32605E-01 | .17036E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10567E+00 | .32932E-01 | .17154E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10911E+00 | .34655E-01 | .17842E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11191E+00 | .35893E-01 | .18370E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11476E+00 | .37193E-01 | .18915E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11773E+00 | .38580E-01 | .19489E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12082E+00 | .40028E-01 | .20088E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12402E+00 | .41506E-01 | .20703E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12730E+00 | .42992E-01 | .21328E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13067E+00 | .44472E-01 | .21961E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13411E+00 | .45940E-01 | .22599E+00 | .88167E-01 |
| .12E+03 | .14120E+00 | .48833E-01 | .23887E+00 | .92368E-01 |
| .14E+03 | .14869E+00 | .51419E-01 | .25153E+00 | .97276E-01 |
| .16E+03 | .15623E+00 | .54486E-01 | .26520E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16414E+00 | .57281E-01 | .27870E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17228E+00 | .60056E-01 | .29239E+00 | .11223E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .25E+03 | .19345E+00 | .63935E–01 | .32132E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21544E+00 | .68525E–01 | .35249E+00 | .14691E+00 |
| .35E+03 | .23838E+00 | .70096E–01 | .37857E+00 | .16828E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73893E–01 | .40718E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74459E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76708E–01 | .45401E+00 | .22388E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E–04 | .27142E+01 | .27142E+01 |
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E–05 | .29935E+01 | .29935E+01 |
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E–05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E–05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E–05 | .36863E+01 | .36863E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E–05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E–05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E–06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E–06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E–06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E–07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E–07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E–07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E–08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E–08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.14 - Comportamento da indutância com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .27066E+01 | .23910E+01 | .74886E+01 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .16847E+01 | .13761E+01 | .44370E+01 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .11486E+01 | .84464E+00 | .28379E+01 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .86881E+00 | .56831E+00 | .20054E+01 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .71074E+00 | .41292E+00 | .15366E+01 | .29782E+00 |
| .60E+01 | .61401E+00 | .31838E+00 | .12508E+01 | .29563E+00 |
| .70E+01 | .55076E+00 | .25696E+00 | .10647E+01 | .29380E+00 |
| .80E+01 | .50712E+00 | .21489E+00 | .93689E+00 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .47567E+00 | .18481E+00 | .84529E+00 | .29087E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+02 | .45220E+00 | .16254E+00 | .77727E+00 | .28966E+00 |
| .20E+02 | .36600E+00 | .83736E–01 | .53347E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .34344E+00 | .65044E–01 | .47352E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33224E+00 | .56418E–01 | .44508E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32489E+00 | .50994E–01 | .42688E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31932E+00 | .46981E–01 | .41328E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31476E+00 | .43748E–01 | .40225E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31085E+00 | .41021E–01 | .39289E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30741E+00 | .38661E–01 | .38473E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30433E+00 | .36585E–01 | .37750E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29895E+00 | .33077E–01 | .36510E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29436E+00 | .30329E–01 | .35501E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29020E+00 | .27782E–01 | .34576E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28644E+00 | .25680E–01 | .33780E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28296E+00 | .23821E–01 | .33060E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27505E+00 | .19867E–01 | .31478E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16591E–01 | .30112E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14030E–01 | .28952E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11017E–01 | .27754E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90037E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71435E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51123E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E–09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.15 - Comportamento da capacitância com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | C(própria) (fase) (μF/km) | C(mútua) (fase) (μF/km) | Co (seq zero) (μF/km) | C1 (seq pos.) (μF/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .12E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .14E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .16E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .18E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .25E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .35E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .45E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .70E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+07 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |

Tabela A.7.16 - Comportamento das resistências por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | Rc (Ω/km) | Rb1 (Ω/km) | Rb2 (Ω/km) | Ra (Ω/km) | Rcb1 (Ω/km) | Rcb2 (Ω/km) | Rca (Ω/km) | Rb1b2 (Ω/km) | Rb1a (Ω/km) | Rb2 (Ω/k |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .715E-01 | .659E+00 | .579E-01 | .111E+00 | .156E-02 | .996E-03 | .991E-03 | .996E-03 | .991E-03 | .991E |
| .200E+01 | .729E-01 | .660E+00 | .589E-01 | .112E+00 | .299E-02 | .201E-02 | .199E-02 | .201E-02 | .199E-02 | .199E |
| .300E+01 | .743E-01 | .662E+00 | .599E-01 | .113E+00 | .437E-02 | .305E-02 | .300E-02 | .305E-02 | .300E-02 | .300E |
| .400E+01 | .756E-01 | .663E+00 | .610E-01 | .114E+00 | .575E-02 | .411E-02 | .402E-02 | .411E-02 | .402E-02 | .402E |
| .500E+01 | .770E-01 | .665E+00 | .620E-01 | .115E+00 | .711E-02 | .518E-02 | .505E-02 | .518E-02 | .505E-02 | .505E |
| .600E+01 | .784E-01 | .666E+00 | .631E-01 | .116E+00 | .848E-02 | .628E-02 | .609E-02 | .628E-02 | .609E-02 | .609E |
| .700E+01 | .798E-01 | .667E+00 | .643E-01 | .117E+00 | .985E-02 | .740E-02 | .714E-02 | .740E-02 | .714E-02 | .714E |
| .800E+01 | .811E-01 | .669E+00 | .654E-01 | .118E+00 | .112E-01 | .854E-02 | .820E-02 | .854E-02 | .820E-02 | .820E |
| .900E+01 | .825E-01 | .670E+00 | .666E-01 | .119E+00 | .126E-01 | .970E-02 | .927E-02 | .970E-02 | .927E-02 | .927E |
| .100E+02 | .839E-01 | .671E+00 | .677E-01 | .120E+00 | .140E-01 | .109E-01 | .103E-01 | .109E-01 | .103E-01 | .103E |
| .200E+02 | .988E-01 | .686E+00 | .807E-01 | .131E+00 | .287E-01 | .238E-01 | .217E-01 | .238E-01 | .217E-01 | .217E |
| .300E+02 | .115E+00 | .703E+00 | .956E-01 | .142E+00 | .451E-01 | .387E-01 | .340E-01 | .387E-01 | .340E-01 | .340E |
| .400E+02 | .134E+00 | .721E+00 | .112E+00 | .153E+00 | .632E-01 | .556E-01 | .472E-01 | .556E-01 | .472E-01 | .472E |
| .500E+02 | .154E+00 | .741E+00 | .131E+00 | .165E+00 | .830E-01 | .743E-01 | .613E-01 | .743E-01 | .613E-01 | .613E |
| .600E+02 | .176E+00 | .762E+00 | .152E+00 | .178E+00 | .105E+00 | .948E-01 | .763E-01 | .948E-01 | .763E-01 | .763E |
| .700E+02 | .200E+00 | .785E+00 | .174E+00 | .191E+00 | .127E+00 | .117E+00 | .920E-01 | .117E+00 | .920E-01 | .920E |
| .800E+02 | .225E+00 | .809E+00 | .197E+00 | .204E+00 | .152E+00 | .140E+00 | .109E+00 | .140E+00 | .109E+00 | .109E |
| .900E+02 | .251E+00 | .835E+00 | .222E+00 | .218E+00 | .178E+00 | .165E+00 | .126E+00 | .165E+00 | .126E+00 | .126E |
| .100E+03 | .279E+00 | .862E+00 | .248E+00 | .231E+00 | .204E+00 | .191E+00 | .143E+00 | .191E+00 | .143E+00 | .143E |
| .120E+03 | .337E+00 | .918E+00 | .303E+00 | .260E+00 | .260E+00 | .246E+00 | .180E+00 | .246E+00 | .180E+00 | .180E |
| .140E+03 | .398E+00 | .977E+00 | .360E+00 | .289E+00 | .319E+00 | .303E+00 | .218E+00 | .303E+00 | .218E+00 | .218E |
| .160E+03 | .460E+00 | .104E+01 | .419E+00 | .319E+00 | .379E+00 | .362E+00 | .256E+00 | .362E+00 | .256E+00 | .256E |
| .180E+03 | .523E+00 | .110E+01 | .479E+00 | .349E+00 | .440E+00 | .422E+00 | .295E+00 | .422E+00 | .295E+00 | .295E |
| .200E+03 | .586E+00 | .116E+01 | .538E+00 | .379E+00 | .500E+00 | .481E+00 | .334E+00 | .481E+00 | .334E+00 | .334E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .250E+03 | .738E+00 | .130E+01 | .680E+00 | .453E+00 | .645E+00 | .624E+00 | .428E+00 | .624E+00 | .428E+00 | .428E |
| .300E+03 | .879E+00 | .144E+01 | .812E+00 | .525E+00 | .780E+00 | .755E+00 | .517E+00 | .755E+00 | .517E+00 | .517E |
| .350E+03 | .101E+01 | .156E+01 | .932E+00 | .595E+00 | .902E+00 | .875E+00 | .599E+00 | .875E+00 | .599E+00 | .599E |
| .400E+03 | .112E+01 | .167E+01 | .104E+01 | .663E+00 | .101E+01 | .984E+00 | .677E+00 | .984E+00 | .677E+00 | .677E |
| .450E+03 | .123E+01 | .177E+01 | .114E+01 | .728E+00 | .111E+01 | .108E+01 | .749E+00 | .108E+01 | .749E+00 | .749E |
| .500E+03 | .133E+01 | .186E+01 | .123E+01 | .792E+00 | .121E+01 | .117E+01 | .818E+00 | .117E+01 | .818E+00 | .818E |
| .600E+03 | .151E+01 | .203E+01 | .140E+01 | .917E+00 | .138E+01 | .134E+01 | .947E+00 | .134E+01 | .947E+00 | .947E |
| .700E+03 | .167E+01 | .219E+01 | .155E+01 | .104E+01 | .153E+01 | .149E+01 | .107E+01 | .149E+01 | .107E+01 | .107E |
| .800E+03 | .183E+01 | .233E+01 | .169E+01 | .116E+01 | .168E+01 | .163E+01 | .119E+01 | .163E+01 | .119E+01 | .119E |
| .900E+03 | .198E+01 | .247E+01 | .183E+01 | .128E+01 | .181E+01 | .177E+01 | .130E+01 | .177E+01 | .130E+01 | .130E |
| .100E+04 | .212E+01 | .261E+01 | .196E+01 | .139E+01 | .195E+01 | .190E+01 | .141E+01 | .190E+01 | .141E+01 | .141E |
| .200E+04 | .347E+01 | .389E+01 | .322E+01 | .250E+01 | .324E+01 | .316E+01 | .250E+01 | .316E+01 | .250E+01 | .250E |
| .300E+04 | .476E+01 | .512E+01 | .443E+01 | .355E+01 | .447E+01 | .437E+01 | .355E+01 | .437E+01 | .355E+01 | .355E |
| .400E+04 | .599E+01 | .629E+01 | .558E+01 | .458E+01 | .565E+01 | .553E+01 | .458E+01 | .553E+01 | .458E+01 | .458E |
| .500E+04 | .718E+01 | .743E+01 | .669E+01 | .557E+01 | .679E+01 | .664E+01 | .557E+01 | .664E+01 | .557E+01 | .557E |
| .600E+04 | .834E+01 | .854E+01 | .777E+01 | .655E+01 | .791E+01 | .772E+01 | .655E+01 | .772E+01 | .655E+01 | .655E |
| .700E+04 | .949E+01 | .962E+01 | .883E+01 | .752E+01 | .900E+01 | .879E+01 | .752E+01 | .879E+01 | .752E+01 | .752E |
| .800E+04 | .106E+02 | .107E+02 | .987E+01 | .847E+01 | .101E+02 | .983E+01 | .847E+01 | .983E+01 | .847E+01 | .847E |
| .900E+04 | .117E+02 | .117E+02 | .109E+02 | .941E+01 | .111E+02 | .109E+02 | .941E+01 | .109E+02 | .941E+01 | .941E |
| .100E+05 | .128E+02 | .128E+02 | .119E+02 | .103E+02 | .122E+02 | .119E+02 | .103E+02 | .119E+02 | .103E+02 | .103E |
| .200E+05 | .235E+02 | .227E+02 | .215E+02 | .192E+02 | .223E+02 | .215E+02 | .192E+02 | .215E+02 | .192E+02 | .192E |
| .300E+05 | .335E+02 | .320E+02 | .304E+02 | .277E+02 | .317E+02 | .304E+02 | .277E+02 | .304E+02 | .277E+02 | .277 |
| .400E+05 | .430E+02 | .408E+02 | .389E+02 | .358E+02 | .407E+02 | .389E+02 | .358E+02 | .389E+02 | .358E+02 | .358 |
| .500E+05 | .520E+02 | .492E+02 | .471E+02 | .436E+02 | .492E+02 | .471E+02 | .436E+02 | .471E+02 | .436E+02 | .436 |
| .600E+05 | .606E+02 | .574E+02 | .551E+02 | .512E+02 | .575E+02 | .551E+02 | .512E+02 | .551E+02 | .512E+02 | .512 |
| .700E+05 | .688E+02 | .653E+02 | .628E+02 | .586E+02 | .654E+02 | .628E+02 | .586E+02 | .628E+02 | .586E+02 | .586 |
| .800E+05 | .768E+02 | .730E+02 | .704E+02 | .659E+02 | .732E+02 | .704E+02 | .659E+02 | .704E+02 | .659E+02 | .659 |
| .900E+05 | .846E+02 | .805E+02 | .778E+02 | .730E+02 | .807E+02 | .778E+02 | .730E+02 | .778E+02 | .730E+02 | .730 |
| .100E+06 | .922E+02 | .879E+02 | .850E+02 | .800E+02 | .881E+02 | .850E+02 | .800E+02 | .850E+02 | .800E+02 | .800 |
| .200E+06 | .161E+03 | .156E+03 | .152E+03 | .145E+03 | .156E+03 | .152E+03 | .145E+03 | .152E+03 | .145E+03 | .145 |
| .300E+06 | .223E+03 | .216E+03 | .211E+03 | .203E+03 | .216E+03 | .211E+03 | .203E+03 | .211E+03 | .203E+03 | .203 |
| .400E+06 | .280E+03 | .272E+03 | .266E+03 | .256E+03 | .272E+03 | .266E+03 | .256E+03 | .266E+03 | .256E+03 | .256 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .500E+06 | .332E+03 | .324E+03 | .317E+03 | .306E+03 | .324E+03 | .317E+03 | .306E+03 | .317E+03 | .306E+03 | .306E |
| .600E+06 | .382E+03 | .373E+03 | .366E+03 | .353E+03 | .373E+03 | .366E+03 | .353E+03 | .366E+03 | .353E+03 | .353E |
| .700E+06 | .430E+03 | .419E+03 | .412E+03 | .398E+03 | .419E+03 | .412E+03 | .398E+03 | .412E+03 | .398E+03 | .398E |
| .800E+06 | .475E+03 | .464E+03 | .456E+03 | .442E+03 | .464E+03 | .456E+03 | .442E+03 | .456E+03 | .442E+03 | .442E |
| .900E+06 | .519E+03 | .507E+03 | .498E+03 | .483E+03 | .507E+03 | .498E+03 | .483E+03 | .498E+03 | .483E+03 | .483E |
| .100E+07 | .561E+03 | .548E+03 | .539E+03 | .523E+03 | .548E+03 | .539E+03 | .523E+03 | .539E+03 | .523E+03 | .523E |

Tabela A.7.17 - Comportamento das indutâncias por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | Lc (mH/km) | Lb1 (mH/km) | Lb2 (mH/km) | La (mH/km) | Lcb1 (mH/km) | Lcb2 (mH/km) | Lca (mH/km) | Lb1b2 (mH/km) | Lb1a (mH/km) | Lb2 (mH/ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .363E+01 | .343E+01 | .315E+01 | .272E+01 | .343E+01 | .315E+01 | .282E+01 | .315E+01 | .282E+01 | .282E |
| .200E+01 | .352E+01 | .332E+01 | .308E+01 | .266E+01 | .332E+01 | .308E+01 | .275E+01 | .308E+01 | .275E+01 | .275E |
| .300E+01 | .346E+01 | .326E+01 | .304E+01 | .261E+01 | .326E+01 | .304E+01 | .271E+01 | .304E+01 | .271E+01 | .271E |
| .400E+01 | .342E+01 | .322E+01 | .301E+01 | .259E+01 | .322E+01 | .301E+01 | .268E+01 | .301E+01 | .268E+01 | .268E |
| .500E+01 | .339E+01 | .319E+01 | .299E+01 | .256E+01 | .319E+01 | .299E+01 | .266E+01 | .299E+01 | .266E+01 | .266E |
| .600E+01 | .336E+01 | .316E+01 | .297E+01 | .255E+01 | .317E+01 | .297E+01 | .264E+01 | .297E+01 | .264E+01 | .264E |
| .700E+01 | .334E+01 | .314E+01 | .295E+01 | .253E+01 | .315E+01 | .295E+01 | .263E+01 | .295E+01 | .263E+01 | .263E |
| .800E+01 | .333E+01 | .312E+01 | .294E+01 | .252E+01 | .313E+01 | .294E+01 | .262E+01 | .294E+01 | .262E+01 | .262E |
| .900E+01 | .331E+01 | .311E+01 | .293E+01 | .251E+01 | .311E+01 | .293E+01 | .260E+01 | .293E+01 | .260E+01 | .260E |
| .100E+02 | .330E+01 | .309E+01 | .292E+01 | .249E+01 | .310E+01 | .292E+01 | .259E+01 | .292E+01 | .259E+01 | .259E |
| .200E+02 | .321E+01 | .300E+01 | .285E+01 | .243E+01 | .301E+01 | .285E+01 | .252E+01 | .285E+01 | .252E+01 | .252E |
| .300E+02 | .315E+01 | .295E+01 | .280E+01 | .238E+01 | .296E+01 | .280E+01 | .248E+01 | .280E+01 | .248E+01 | .248E |
| .400E+02 | .312E+01 | .291E+01 | .277E+01 | .235E+01 | .292E+01 | .277E+01 | .245E+01 | .277E+01 | .245E+01 | .245E |
| .500E+02 | .309E+01 | .288E+01 | .274E+01 | .233E+01 | .289E+01 | .274E+01 | .243E+01 | .274E+01 | .243E+01 | .243E |
| .600E+02 | .306E+01 | .286E+01 | .272E+01 | .231E+01 | .286E+01 | .272E+01 | .241E+01 | .272E+01 | .241E+01 | .241E |
| .700E+02 | .303E+01 | .283E+01 | .270E+01 | .229E+01 | .284E+01 | .270E+01 | .239E+01 | .270E+01 | .239E+01 | .239E |
| .800E+02 | .301E+01 | .281E+01 | .268E+01 | .228E+01 | .282E+01 | .268E+01 | .237E+01 | .268E+01 | .237E+01 | .237E |
| .900E+02 | .299E+01 | .279E+01 | .266E+01 | .227E+01 | .279E+01 | .266E+01 | .235E+01 | .266E+01 | .235E+01 | .235E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+03 | .297E+01 | .277E+01 | .264E+01 | .225E+01 | .277E+01 | .264E+01 | .234E+01 | .264E+01 | .234E+01 | .234E |
| .120E+03 | .293E+01 | .273E+01 | .260E+01 | .223E+01 | .273E+01 | .260E+01 | .231E+01 | .260E+01 | .231E+01 | .231E |
| .140E+03 | .289E+01 | .269E+01 | .257E+01 | .221E+01 | .270E+01 | .257E+01 | .229E+01 | .257E+01 | .229E+01 | .229E |
| .160E+03 | .286E+01 | .266E+01 | .253E+01 | .219E+01 | .266E+01 | .253E+01 | .226E+01 | .253E+01 | .226E+01 | .226E |
| .180E+03 | .282E+01 | .262E+01 | .250E+01 | .218E+01 | .263E+01 | .250E+01 | .224E+01 | .250E+01 | .224E+01 | .224E |
| .200E+03 | .279E+01 | .259E+01 | .247E+01 | .216E+01 | .260E+01 | .247E+01 | .222E+01 | .247E+01 | .222E+01 | .222E |
| .250E+03 | .271E+01 | .252E+01 | .239E+01 | .213E+01 | .252E+01 | .240E+01 | .217E+01 | .240E+01 | .217E+01 | .217E |
| .300E+03 | .265E+01 | .245E+01 | .233E+01 | .210E+01 | .246E+01 | .233E+01 | .214E+01 | .233E+01 | .214E+01 | .214E |
| .350E+03 | .259E+01 | .240E+01 | .228E+01 | .207E+01 | .241E+01 | .228E+01 | .210E+01 | .228E+01 | .210E+01 | .210E |
| .400E+03 | .255E+01 | .236E+01 | .224E+01 | .205E+01 | .236E+01 | .224E+01 | .207E+01 | .224E+01 | .207E+01 | .207E |
| .450E+03 | .251E+01 | .232E+01 | .220E+01 | .203E+01 | .232E+01 | .220E+01 | .205E+01 | .220E+01 | .205E+01 | .205E |
| .500E+03 | .247E+01 | .229E+01 | .217E+01 | .202E+01 | .229E+01 | .217E+01 | .203E+01 | .217E+01 | .203E+01 | .203E |
| .600E+03 | .242E+01 | .224E+01 | .212E+01 | .199E+01 | .224E+01 | .212E+01 | .200E+01 | .212E+01 | .200E+01 | .200E |
| .700E+03 | .238E+01 | .220E+01 | .208E+01 | .197E+01 | .221E+01 | .209E+01 | .197E+01 | .209E+01 | .197E+01 | .197E |
| .800E+03 | .235E+01 | .217E+01 | .206E+01 | .195E+01 | .218E+01 | .206E+01 | .195E+01 | .206E+01 | .195E+01 | .195E |
| .900E+03 | .232E+01 | .215E+01 | .203E+01 | .193E+01 | .215E+01 | .203E+01 | .193E+01 | .203E+01 | .193E+01 | .193E |
| .100E+04 | .230E+01 | .213E+01 | .201E+01 | .192E+01 | .213E+01 | .201E+01 | .192E+01 | .201E+01 | .192E+01 | .192E |
| .200E+04 | .219E+01 | .202E+01 | .190E+01 | .183E+01 | .202E+01 | .190E+01 | .183E+01 | .190E+01 | .183E+01 | .183E |
| .300E+04 | .213E+01 | .196E+01 | .185E+01 | .179E+01 | .196E+01 | .185E+01 | .179E+01 | .185E+01 | .179E+01 | .179E |
| .400E+04 | .208E+01 | .192E+01 | .181E+01 | .175E+01 | .192E+01 | .181E+01 | .175E+01 | .181E+01 | .175E+01 | .175E |
| .500E+04 | .205E+01 | .189E+01 | .178E+01 | .173E+01 | .190E+01 | .178E+01 | .173E+01 | .178E+01 | .173E+01 | .173E |
| .600E+04 | .203E+01 | .187E+01 | .176E+01 | .171E+01 | .187E+01 | .176E+01 | .171E+01 | .176E+01 | .171E+01 | .171E |
| .700E+04 | .201E+01 | .185E+01 | .174E+01 | .169E+01 | .185E+01 | .174E+01 | .169E+01 | .174E+01 | .169E+01 | .169E |
| .800E+04 | .199E+01 | .183E+01 | .172E+01 | .168E+01 | .184E+01 | .172E+01 | .168E+01 | .172E+01 | .168E+01 | .168E |
| .900E+04 | .198E+01 | .182E+01 | .171E+01 | .166E+01 | .182E+01 | .171E+01 | .166E+01 | .171E+01 | .166E+01 | .166E |
| .100E+05 | .196E+01 | .181E+01 | .170E+01 | .165E+01 | .181E+01 | .170E+01 | .165E+01 | .170E+01 | .165E+01 | .165E |
| .200E+05 | .188E+01 | .173E+01 | .162E+01 | .158E+01 | .173E+01 | .162E+01 | .158E+01 | .162E+01 | .158E+01 | .158E |
| .300E+05 | .184E+01 | .168E+01 | .158E+01 | .155E+01 | .169E+01 | .158E+01 | .155E+01 | .158E+01 | .155E+01 | .155E |
| .400E+05 | .180E+01 | .165E+01 | .155E+01 | .152E+01 | .166E+01 | .155E+01 | .152E+01 | .155E+01 | .152E+01 | .152E |
| .500E+05 | .178E+01 | .163E+01 | .153E+01 | .150E+01 | .163E+01 | .153E+01 | .150E+01 | .153E+01 | .150E+01 | .150E |
| .600E+05 | .176E+01 | .161E+01 | .151E+01 | .148E+01 | .162E+01 | .151E+01 | .148E+01 | .151E+01 | .148E+01 | .148E |
| .700E+05 | .174E+01 | .160E+01 | .150E+01 | .147E+01 | .160E+01 | .150E+01 | .147E+01 | .150E+01 | .147E+01 | .147E |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .800E+05 | .173E+01 | .159E+01 | .149E+01 | .146E+01 | .159E+01 | .149E+01 | .146E+01 | .149E+01 | .146E+01 | .146 |
| .900E+05 | .172E+01 | .158E+01 | .148E+01 | .145E+01 | .158E+01 | .148E+01 | .145E+01 | .148E+01 | .145E+01 | .145 |
| .100E+06 | .171E+01 | .157E+01 | .147E+01 | .144E+01 | .157E+01 | .147E+01 | .144E+01 | .147E+01 | .144E+01 | .144 |
| .200E+06 | .165E+01 | .151E+01 | .141E+01 | .139E+01 | .151E+01 | .141E+01 | .139E+01 | .141E+01 | .139E+01 | .139 |
| .300E+06 | .162E+01 | .148E+01 | .138E+01 | .136E+01 | .148E+01 | .138E+01 | .136E+01 | .138E+01 | .136E+01 | .136 |
| .400E+06 | .160E+01 | .146E+01 | .136E+01 | .134E+01 | .146E+01 | .136E+01 | .134E+01 | .136E+01 | .134E+01 | .134 |
| .500E+06 | .158E+01 | .144E+01 | .134E+01 | .132E+01 | .144E+01 | .134E+01 | .132E+01 | .134E+01 | .132E+01 | .132 |
| .600E+06 | .157E+01 | .143E+01 | .133E+01 | .131E+01 | .143E+01 | .133E+01 | .131E+01 | .133E+01 | .131E+01 | .131 |
| .700E+06 | .156E+01 | .142E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .142E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .130 |
| .800E+06 | .155E+01 | .141E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .141E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .130 |
| .900E+06 | .154E+01 | .141E+01 | .131E+01 | .129E+01 | .141E+01 | .131E+01 | .129E+01 | .131E+01 | .129E+01 | .129 |
| .100E+07 | .154E+01 | .140E+01 | .130E+01 | .128E+01 | .140E+01 | .130E+01 | .128E+01 | .130E+01 | .128E+01 | .128 |

Tabela A.7.18 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 5000.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .80175E-01 | .95802E-02 | .99335E-01 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .90862E-01 | .19935E-01 | .13073E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .96675E-01 | .25462E-01 | .14760E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .99842E-01 | .28372E-01 | .15659E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10175E+00 | .30040E-01 | .16183E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10302E+00 | .31084E-01 | .16518E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10393E+00 | .31786E-01 | .16751E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10464E+00 | .32290E-01 | .16922E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10522E+00 | .32671E-01 | .17056E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10571E+00 | .32973E-01 | .17166E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10905E+00 | .34603E-01 | .17826E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11185E+00 | .35828E-01 | .18350E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11470E+00 | .37131E-01 | .18896E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11768E+00 | .38528E-01 | .19473E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12078E+00 | .39986E-01 | .20075E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12398E+00 | .41474E-01 | .20693E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12728E+00 | .42969E-01 | .21322E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13065E+00 | .44456E-01 | .21956E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13410E+00 | .45929E-01 | .22595E+00 | .88167E-01 |
| .12E+03 | .14120E+00 | .48830E-01 | .23886E+00 | .92368E-01 |
| .14E+03 | .14869E+00 | .51419E-01 | .25153E+00 | .97276E-01 |
| .16E+03 | .15623E+00 | .54488E-01 | .26521E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16414E+00 | .57284E-01 | .27871E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17228E+00 | .60059E-01 | .29240E+00 | .11223E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .25E+03 | .19346E+00 | .63936E–01 | .32133E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21544E+00 | .68526E–01 | .35249E+00 | .14691E+00 |
| .35E+03 | .23838E+00 | .70098E–01 | .37858E+00 | .16828E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73893E–01 | .40718E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74459E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76708E–01 | .45401E+00 | .22388E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E–04 | .27142E+01 | .27142E+01 |
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E–05 | .29935E+01 | .29935E+01 |
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E–05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E–05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E–05 | .36863E+01 | .36863E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E–05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E–05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E–06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E–06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E–06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E–07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E–07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E–07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E–08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E–08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.19 – Comportamento da indutância com a freqüência

Cabo -> aéreo

Resistividade do solo (Ωm) -> 5000.00

Altura ou profundidade (m) -> 10.00

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .27582E+01 | .24426E+01 | .76433E+01 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .16737E+01 | .13651E+01 | .44038E+01 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .11287E+01 | .82472E+00 | .27781E+01 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .85136E+00 | .55085E+00 | .19531E+01 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .69686E+00 | .39904E+00 | .14950E+01 | .29782E+00 |
| .60E+01 | .60310E+00 | .30746E+00 | .12180E+01 | .29563E+00 |
| .70E+01 | .54209E+00 | .24829E+00 | .10387E+01 | .29380E+00 |
| .80E+01 | .50012E+00 | .20789E+00 | .91591E+00 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .46995E+00 | .17908E+00 | .82811E+00 | .29087E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+02 | .44745E+00 | .15778E+00 | .76301E+00 | .28966E+00 |
| .20E+02 | .36482E+00 | .82559E–01 | .52994E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .34302E+00 | .64625E–01 | .47227E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33208E+00 | .56262E–01 | .44461E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32484E+00 | .50945E–01 | .42673E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31932E+00 | .46979E–01 | .41328E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31477E+00 | .43765E–01 | .40230E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31087E+00 | .41044E–01 | .39296E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30743E+00 | .38684E–01 | .38480E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30435E+00 | .36606E–01 | .37756E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29896E+00 | .33092E–01 | .36514E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29437E+00 | .30337E–01 | .35504E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29020E+00 | .27787E–01 | .34578E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28645E+00 | .25683E–01 | .33781E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28296E+00 | .23822E–01 | .33060E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27505E+00 | .19867E–01 | .31478E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16591E–01 | .30112E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14030E–01 | .28952E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11017E–01 | .27754E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90036E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71435E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51123E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E–09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.20 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ω.m) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .97698E-01 | .27104E-01 | .15191E+00 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .99676E-01 | .28749E-01 | .15717E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .10077E+00 | .29555E-01 | .15988E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .10155E+00 | .30079E-01 | .16171E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10218E+00 | .30468E-01 | .16311E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10271E+00 | .30782E-01 | .16428E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10319E+00 | .31048E-01 | .16529E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10363E+00 | .31283E-01 | .16620E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10404E+00 | .31496E-01 | .16704E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10443E+00 | .31693E-01 | .16782E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10780E+00 | .33349E-01 | .17450E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11093E+00 | .34911E-01 | .18075E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11408E+00 | .36512E-01 | .18710E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11729E+00 | .38138E-01 | .19356E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12055E+00 | .39760E-01 | .20007E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12387E+00 | .41360E-01 | .20659E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12724E+00 | .42927E-01 | .21309E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13065E+00 | .44458E-01 | .21957E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13412E+00 | .45956E-01 | .22603E+00 | .88167E-01 |
| .12E+03 | .14124E+00 | .48872E-01 | .23898E+00 | .92368E-01 |
| .14E+03 | .14873E+00 | .51457E-01 | .25165E+00 | .97276E-01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .16E+03 | .15626E+00 | .54516E–01 | .26529E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16416E+00 | .57302E–01 | .27876E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17230E+00 | .60070E–01 | .29244E+00 | .11223E+00 |
| .25E+03 | .19346E+00 | .63937E–01 | .32133E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21544E+00 | .68524E–01 | .35249E+00 | .14692E+00 |
| .35E+03 | .23838E+00 | .70096E–01 | .37857E+00 | .16828E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73892E–01 | .40717E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74458E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76707E–01 | .45400E+00 | .22388E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E–04 | .27142E+01 | .27142E+01 |
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E–05 | .29935E+01 | .29935E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E-05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E-05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E-05 | .36863E+01 | .36863E+01 |
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E-05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E-05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E-06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E-06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E-06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E-07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E-07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E-07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E-08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E-08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.21 - Comportamento da indutância com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 10.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .11142E+01 | .79851E+00 | .27112E+01 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .68280E+00 | .37420E+00 | .14312E+01 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .55523E+00 | .25129E+00 | .10578E+01 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .49530E+00 | .19479E+00 | .88489E+00 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .46058E+00 | .16276E+00 | .78611E+00 | .29782E+00 |
| .60E+01 | .43788E+00 | .14224E+00 | .72236E+00 | .29563E+00 |
| .70E+01 | .42180E+00 | .12800E+00 | .67780E+00 | .29380E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .80E+01 | .40976E+00 | .11753E+00 | .64483E+00 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .40037E+00 | .10951E+00 | .61938E+00 | .29087E+00 |
| .10E+02 | .39281E+00 | .10314E+00 | .59909E+00 | .28966E+00 |
| .20E+02 | .35652E+00 | .74260E–01 | .50504E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .34164E+00 | .63245E–01 | .46813E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33232E+00 | .56498E–01 | .44532E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32542E+00 | .51526E–01 | .42847E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31988E+00 | .47542E–01 | .41496E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31522E+00 | .44216E–01 | .40366E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31120E+00 | .41377E–01 | .39396E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30767E+00 | .38918E–01 | .38550E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30450E+00 | .36763E–01 | .37803E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29903E+00 | .33156E–01 | .36534E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29439E+00 | .30358E–01 | .35510E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29020E+00 | .27788E–01 | .34578E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28644E+00 | .25678E–01 | .33780E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28295E+00 | .23816E–01 | .33058E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27504E+00 | .19863E–01 | .31477E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16589E–01 | .30112E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14030E–01 | .28952E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11016E–01 | .27753E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90037E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71436E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51122E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E–09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.22 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 100.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .10082E+00 | .30223E-01 | .16126E+00 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .10173E+00 | .30801E-01 | .16333E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .10231E+00 | .31095E-01 | .16450E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .10277E+00 | .31299E-01 | .16537E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10317E+00 | .31461E-01 | .16609E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10353E+00 | .31602E-01 | .16674E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10388E+00 | .31730E-01 | .16734E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10420E+00 | .31851E-01 | .16790E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10452E+00 | .31967E-01 | .16845E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10482E+00 | .32082E-01 | .16899E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10773E+00 | .33275E-01 | .17428E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11068E+00 | .34662E-01 | .18000E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11378E+00 | .36209E-01 | .18619E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11699E+00 | .37843E-01 | .19268E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12030E+00 | .39504E-01 | .19930E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12366E+00 | .41153E-01 | .20597E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12708E+00 | .42768E-01 | .21261E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13054E+00 | .44342E-01 | .21922E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13404E+00 | .45875E-01 | .22579E+00 | .88167E-01 |
| .12E+03 | .14121E+00 | .48841E-01 | .23889E+00 | .92368E-01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .14E+03 | .14873E+00 | .51454E–01 | .25164E+00 | .97276E–01 |
| .16E+03 | .15627E+00 | .54526E–01 | .26532E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16417E+00 | .57317E–01 | .27881E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17231E+00 | .60085E–01 | .29248E+00 | .11223E+00 |
| .25E+03 | .19347E+00 | .63948E–01 | .32137E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21544E+00 | .68529E–01 | .35250E+00 | .14691E+00 |
| .35E+03 | .23838E+00 | .70098E–01 | .37858E+00 | .16828E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73892E–01 | .40717E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74458E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76707E–01 | .45400E+00 | .22388E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E–04 | .27142E+01 | .27142E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E-05 | .29935E+01 | .29935E+01 |
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E-05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E-05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E-05 | .36863E+01 | .36863E+01 |
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E-05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E-05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E-06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E-06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E-06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E-07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E-07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E-07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E-08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E-08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.23 - Comportamento da indutância com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 100.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .70364E+00 | .38798E+00 | .14796E+01 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .51265E+00 | .20405E+00 | .92075E+00 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .45534E+00 | .15140E+00 | .75814E+00 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .42730E+00 | .12679E+00 | .68087E+00 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .41032E+00 | .11249E+00 | .63530E+00 | .29782E+00 |
| .60E+01 | .39873E+00 | .10310E+00 | .60492E+00 | .29563E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .70E+01 | .39020E+00 | .96401E–01 | .58300E+00 | .29380E+00 |
| .80E+01 | .38358E+00 | .91351E–01 | .56628E+00 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .37825E+00 | .87380E–01 | .55301E+00 | .29087E+00 |
| .10E+02 | .37382E+00 | .84155E–01 | .54213E+00 | .28966E+00 |
| .20E+02 | .35027E+00 | .68008E–01 | .48629E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .33894E+00 | .60544E–01 | .46002E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33112E+00 | .55294E–01 | .44171E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32494E+00 | .51039E–01 | .42701E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31974E+00 | .47407E–01 | .41456E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31525E+00 | .44248E–01 | .40375E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31131E+00 | .41479E–01 | .39426E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30779E+00 | .39041E–01 | .38587E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30463E+00 | .36884E–01 | .37839E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29912E+00 | .33248E–01 | .36561E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29445E+00 | .30418E–01 | .35528E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29024E+00 | .27825E–01 | .34589E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28646E+00 | .25699E–01 | .33786E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28296E+00 | .23827E–01 | .33062E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27504E+00 | .19863E–01 | .31477E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16588E–01 | .30111E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14028E–01 | .28951E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11016E–01 | .27753E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90037E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71434E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51122E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E–09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.24 - Comportamento da resistência com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | R(própria) (fase) (Ω/km) | R(mútua) (fase) (Ω/km) | Ro (seq. zero) (Ω/km) | R1 (seq. pos.) (Ω/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .10191E+00 | .31320E-01 | .16456E+00 | .70594E-01 |
| .20E+01 | .10246E+00 | .31534E-01 | .16553E+00 | .70927E-01 |
| .30E+01 | .10287E+00 | .31659E-01 | .16619E+00 | .71212E-01 |
| .40E+01 | .10323E+00 | .31757E-01 | .16674E+00 | .71470E-01 |
| .50E+01 | .10355E+00 | .31845E-01 | .16724E+00 | .71709E-01 |
| .60E+01 | .10386E+00 | .31929E-01 | .16772E+00 | .71933E-01 |
| .70E+01 | .10416E+00 | .32011E-01 | .16818E+00 | .72147E-01 |
| .80E+01 | .10444E+00 | .32093E-01 | .16863E+00 | .72351E-01 |
| .90E+01 | .10473E+00 | .32177E-01 | .16908E+00 | .72548E-01 |
| .10E+02 | .10500E+00 | .32263E-01 | .16953E+00 | .72739E-01 |
| .20E+02 | .10774E+00 | .33284E-01 | .17430E+00 | .74452E-01 |
| .30E+02 | .11061E+00 | .34591E-01 | .17979E+00 | .76018E-01 |
| .40E+02 | .11367E+00 | .36103E-01 | .18587E+00 | .77567E-01 |
| .50E+02 | .11688E+00 | .37728E-01 | .19233E+00 | .79149E-01 |
| .60E+02 | .12019E+00 | .39396E-01 | .19898E+00 | .80792E-01 |
| .70E+02 | .12357E+00 | .41059E-01 | .20569E+00 | .82509E-01 |
| .80E+02 | .12700E+00 | .42692E-01 | .21238E+00 | .84308E-01 |
| .90E+02 | .13048E+00 | .44282E-01 | .21904E+00 | .86194E-01 |
| .10E+03 | .13400E+00 | .45830E-01 | .22566E+00 | .88167E-01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .12E+03 | .14119E+00 | .48819E–01 | .23883E+00 | .92368E–01 |
| .14E+03 | .14872E+00 | .51447E–01 | .25162E+00 | .97276E–01 |
| .16E+03 | .15627E+00 | .54527E–01 | .26532E+00 | .10174E+00 |
| .18E+03 | .16418E+00 | .57322E–01 | .27882E+00 | .10685E+00 |
| .20E+03 | .17232E+00 | .60091E–01 | .29250E+00 | .11223E+00 |
| .25E+03 | .19347E+00 | .63953E–01 | .32138E+00 | .12952E+00 |
| .30E+03 | .21544E+00 | .68532E–01 | .35250E+00 | .14691E+00 |
| .35E+03 | .23839E+00 | .70099E–01 | .37859E+00 | .16829E+00 |
| .40E+03 | .25939E+00 | .73893E–01 | .40718E+00 | .18550E+00 |
| .45E+03 | .28201E+00 | .74458E–01 | .43093E+00 | .20755E+00 |
| .50E+03 | .30059E+00 | .76706E–01 | .45400E+00 | .22389E+00 |
| .60E+03 | .35344E+00 | .82432E–01 | .51830E+00 | .27101E+00 |
| .70E+03 | .39230E+00 | .82006E–01 | .55631E+00 | .31029E+00 |
| .80E+03 | .41872E+00 | .80841E–01 | .58040E+00 | .33788E+00 |
| .90E+03 | .45327E+00 | .80740E–01 | .61475E+00 | .37253E+00 |
| .10E+04 | .48596E+00 | .80692E–01 | .64734E+00 | .40527E+00 |
| .20E+04 | .73061E+00 | .66107E–01 | .86282E+00 | .66450E+00 |
| .30E+04 | .87415E+00 | .33327E–01 | .94081E+00 | .84082E+00 |
| .40E+04 | .96761E+00 | .14649E–01 | .99691E+00 | .95296E+00 |
| .50E+04 | .10367E+01 | .38964E–02 | .10445E+01 | .10329E+01 |
| .60E+04 | .10933E+01 | .15856E–02 | .10965E+01 | .10917E+01 |
| .70E+04 | .11428E+01 | .93463E–03 | .11615E+01 | .11335E+01 |
| .80E+04 | .11883E+01 | .62474E–03 | .11895E+01 | .11877E+01 |
| .90E+04 | .12312E+01 | .42918E–03 | .12321E+01 | .12308E+01 |
| .10E+05 | .12726E+01 | .31965E–03 | .12732E+01 | .12723E+01 |
| .20E+05 | .16655E+01 | .70426E–04 | .16656E+01 | .16654E+01 |
| .30E+05 | .20470E+01 | .31249E–04 | .20471E+01 | .20470E+01 |
| .40E+05 | .23996E+01 | .19940E–04 | .23996E+01 | .23996E+01 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .50E+05 | .27142E+01 | .11784E-04 | .27142E+01 | .27142E+01 |
| .60E+05 | .29935E+01 | .85071E-05 | .29935E+01 | .29935E+01 |
| .70E+05 | .32445E+01 | .68278E-05 | .32445E+01 | .32445E+01 |
| .80E+05 | .34737E+01 | .56546E-05 | .34737E+01 | .34737E+01 |
| .90E+05 | .36863E+01 | .49113E-05 | .36863E+01 | .36863E+01 |
| .10E+06 | .38860E+01 | .37943E-05 | .38860E+01 | .38860E+01 |
| .20E+06 | .54983E+01 | .11627E-05 | .54983E+01 | .54983E+01 |
| .30E+06 | .67410E+01 | .58747E-06 | .67410E+01 | .67410E+01 |
| .40E+06 | .77882E+01 | .27636E-06 | .77882E+01 | .77882E+01 |
| .50E+06 | .87109E+01 | .14499E-06 | .87109E+01 | .87109E+01 |
| .60E+06 | .95450E+01 | .96644E-07 | .95450E+01 | .95450E+01 |
| .70E+06 | .10312E+02 | .68052E-07 | .10312E+02 | .10312E+02 |
| .80E+06 | .11026E+02 | .33154E-07 | .11026E+02 | .11026E+02 |
| .90E+06 | .11697E+02 | .97655E-08 | .11697E+02 | .11697E+02 |
| .10E+07 | .12331E+02 | .93466E-08 | .12331E+02 | .12331E+02 |

Tabela A.7.25 - Comportamento da indutância com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | L(própria) (fase) (mH/km) | L(mútua) (fase) (mH/km) | Lo (seq. zero) (mH/km) | L1 (seq. pos.) (mH/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .53164E+00 | .21598E+00 | .96360E+00 | .31567E+00 |
| .20E+01 | .44734E+00 | .13873E+00 | .72479E+00 | .30861E+00 |
| .30E+01 | .41820E+00 | .11426E+00 | .64673E+00 | .30394E+00 |
| .40E+01 | .40237E+00 | .10187E+00 | .60610E+00 | .30051E+00 |
| .50E+01 | .39201E+00 | .94184E-01 | .58037E+00 | .29782E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .60E+01 | .38449E+00 | .88859E–01 | .56221E+00 | .29563E+00 |
| .70E+01 | .37869E+00 | .84891E–01 | .54847E+00 | .29380E+00 |
| .80E+01 | .37401E+00 | .81783E–01 | .53758E+00 | .29223E+00 |
| .90E+01 | .37012E+00 | .79257E–01 | .52864E+00 | .29087E+00 |
| .10E+02 | .36681E+00 | .77145E–01 | .52110E+00 | .28966E+00 |
| .20E+02 | .34778E+00 | .65514E–01 | .47881E+00 | .28226E+00 |
| .30E+02 | .33775E+00 | .59361E–01 | .45648E+00 | .27839E+00 |
| .40E+02 | .33053E+00 | .54706E–01 | .43994E+00 | .27582E+00 |
| .50E+02 | .32466E+00 | .50759E–01 | .42617E+00 | .27390E+00 |
| .60E+02 | .31963E+00 | .47293E–01 | .41422E+00 | .27234E+00 |
| .70E+02 | .31523E+00 | .44222E–01 | .40367E+00 | .27101E+00 |
| .80E+02 | .31132E+00 | .41497E–01 | .39432E+00 | .26983E+00 |
| .90E+02 | .30783E+00 | .39078E–01 | .38598E+00 | .26875E+00 |
| .10E+03 | .30467E+00 | .36928E–01 | .37853E+00 | .26774E+00 |
| .12E+03 | .29916E+00 | .33287E–01 | .36573E+00 | .26587E+00 |
| .14E+03 | .29448E+00 | .30447E–01 | .35537E+00 | .26403E+00 |
| .16E+03 | .29026E+00 | .27844E–01 | .34595E+00 | .26242E+00 |
| .18E+03 | .28647E+00 | .25711E–01 | .33789E+00 | .26076E+00 |
| .20E+03 | .28297E+00 | .23834E–01 | .33064E+00 | .25914E+00 |
| .25E+03 | .27504E+00 | .19865E–01 | .31477E+00 | .25518E+00 |
| .30E+03 | .26794E+00 | .16588E–01 | .30111E+00 | .25135E+00 |
| .35E+03 | .26146E+00 | .14028E–01 | .28951E+00 | .24743E+00 |
| .40E+03 | .25550E+00 | .11016E–01 | .27753E+00 | .24449E+00 |
| .45E+03 | .25000E+00 | .90037E–02 | .26800E+00 | .24099E+00 |
| .50E+03 | .24516E+00 | .71433E–02 | .25945E+00 | .23802E+00 |
| .60E+03 | .23674E+00 | .51123E–02 | .24696E+00 | .23163E+00 |
| .70E+03 | .23099E+00 | .38284E–02 | .23865E+00 | .22716E+00 |
| .80E+03 | .22206E+00 | .28147E–02 | .22769E+00 | .21925E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .90E+03 | .21641E+00 | .21659E–02 | .22074E+00 | .21424E+00 |
| .10E+04 | .21145E+00 | .19135E–02 | .21528E+00 | .20954E+00 |
| .20E+04 | .18224E+00 | .60428E–03 | .18345E+00 | .18164E+00 |
| .30E+04 | .16953E+00 | .33905E–03 | .17021E+00 | .16919E+00 |
| .40E+04 | .16294E+00 | .22335E–03 | .16339E+00 | .16272E+00 |
| .50E+04 | .15909E+00 | .15236E–03 | .15939E+00 | .15894E+00 |
| .60E+04 | .15660E+00 | .10775E–03 | .15682E+00 | .15649E+00 |
| .70E+04 | .15486E+00 | .78491E–04 | .15502E+00 | .15478E+00 |
| .80E+04 | .15359E+00 | .58483E–04 | .15371E+00 | .15353E+00 |
| .90E+04 | .15260E+00 | .44314E–04 | .15269E+00 | .15256E+00 |
| .10E+05 | .15181E+00 | .33983E–04 | .15188E+00 | .15178E+00 |
| .20E+05 | .14787E+00 | .98919E–05 | .14789E+00 | .14786E+00 |
| .30E+05 | .14594E+00 | .48784E–05 | .14595E+00 | .14594E+00 |
| .40E+05 | .14459E+00 | .28702E–05 | .14460E+00 | .14459E+00 |
| .50E+05 | .14358E+00 | .17113E–05 | .14358E+00 | .14358E+00 |
| .60E+05 | .14279E+00 | .10914E–05 | .14279E+00 | .14279E+00 |
| .70E+05 | .14218E+00 | .67067E–06 | .14218E+00 | .14218E+00 |
| .80E+05 | .14168E+00 | .49452E–06 | .14168E+00 | .14168E+00 |
| .90E+05 | .14127E+00 | .32955E–06 | .14127E+00 | .14127E+00 |
| .10E+06 | .14093E+00 | .23124E–06 | .14093E+00 | .14093E+00 |
| .20E+06 | .13911E+00 | .52802E–07 | .13911E+00 | .13911E+00 |
| .30E+06 | .13830E+00 | .17678E–07 | .13830E+00 | .13830E+00 |
| .40E+06 | .13782E+00 | .90817E–08 | .13782E+00 | .13782E+00 |
| .50E+06 | .13749E+00 | .49347E–08 | .13749E+00 | .13749E+00 |
| .60E+06 | .13725E+00 | .32142E–08 | .13725E+00 | .13725E+00 |
| .70E+06 | .13706E+00 | .21543E–08 | .13706E+00 | .13706E+00 |
| .80E+06 | .13691E+00 | .11989E–08 | .13691E+00 | .13691E+00 |
| .90E+06 | .13678E+00 | .48820E–09 | .13678E+00 | .13678E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+07 | .13667E+00 | .20781E-09 | .13667E+00 | .13667E+00 |

Tabela A.7.26 - Comportamento da capacitância com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | C(própria) (fase) (μF/km) | C(mútua) (fase) (μF/km) | Co (seq zero) (μF/km) | C1 (seq pos.) (μF/km) |
|---|---|---|---|---|
| .10E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+01 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+02 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .10E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .12E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .14E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .16E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .18E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .25E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .35E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .45E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+03 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+04 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| .40E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+05 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .20E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .30E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .40E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .50E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .60E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .70E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .80E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .90E+06 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |
| .10E+07 | .31309E+00 | .00000E+00 | .31309E+00 | .31309E+00 |

Tabela A.7.27 - Comportamento das resistências por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | Rc (Ω/km) | Rb1 (Ω/km) | Rb2 (Ω/km) | Ra (Ω/km) | Rcb1 (Ω/km) | Rcb2 (Ω/km) | Rca (Ω/km) | Rb1b2 (Ω/km) | Rb1a (Ω/km) | Rb (Ω/ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .997E+00 | .158E+01 | .983E+00 | .104E+01 | .927E+00 | .927E+00 | .927E+00 | .927E+00 | .927E+00 | .927 |
| .200E+01 | .138E+01 | .197E+01 | .137E+01 | .142E+01 | .131E+01 | .131E+01 | .131E+01 | .131E+01 | .131E+01 | .131 |
| .300E+01 | .168E+01 | .226E+01 | .166E+01 | .171E+01 | .161E+01 | .160E+01 | .160E+01 | .160E+01 | .160E+01 | .160 |
| .400E+01 | .192E+01 | .251E+01 | .191E+01 | .196E+01 | .185E+01 | .185E+01 | .185E+01 | .185E+01 | .185E+01 | .185 |
| .500E+01 | .214E+01 | .273E+01 | .213E+01 | .218E+01 | .207E+01 | .207E+01 | .207E+01 | .207E+01 | .207E+01 | .207 |
| .600E+01 | .234E+01 | .293E+01 | .233E+01 | .238E+01 | .227E+01 | .227E+01 | .227E+01 | .227E+01 | .227E+01 | .227 |
| .700E+01 | .252E+01 | .311E+01 | .251E+01 | .256E+01 | .245E+01 | .245E+01 | .245E+01 | .245E+01 | .245E+01 | .245 |
| .800E+01 | .269E+01 | .328E+01 | .268E+01 | .273E+01 | .262E+01 | .262E+01 | .262E+01 | .262E+01 | .262E+01 | .262 |
| .900E+01 | .285E+01 | .344E+01 | .284E+01 | .289E+01 | .278E+01 | .278E+01 | .278E+01 | .278E+01 | .278E+01 | .278 |
| .100E+02 | .300E+01 | .359E+01 | .299E+01 | .304E+01 | .293E+01 | .293E+01 | .293E+01 | .293E+01 | .293E+01 | .293 |
| .200E+02 | .422E+01 | .481E+01 | .420E+01 | .425E+01 | .415E+01 | .415E+01 | .415E+01 | .415E+01 | .415E+01 | .415 |
| .300E+02 | .516E+01 | .575E+01 | .514E+01 | .519E+01 | .509E+01 | .508E+01 | .508E+01 | .508E+01 | .508E+01 | .508 |
| .400E+02 | .595E+01 | .654E+01 | .593E+01 | .597E+01 | .588E+01 | .588E+01 | .587E+01 | .588E+01 | .587E+01 | .587 |
| .500E+02 | .666E+01 | .724E+01 | .663E+01 | .667E+01 | .659E+01 | .658E+01 | .656E+01 | .658E+01 | .656E+01 | .656 |
| .600E+02 | .729E+01 | .788E+01 | .727E+01 | .730E+01 | .722E+01 | .721E+01 | .719E+01 | .721E+01 | .719E+01 | .719 |
| .700E+02 | .788E+01 | .847E+01 | .786E+01 | .787E+01 | .781E+01 | .780E+01 | .778E+01 | .780E+01 | .778E+01 | .778 |
| .800E+02 | .843E+01 | .902E+01 | .841E+01 | .841E+01 | .836E+01 | .835E+01 | .832E+01 | .835E+01 | .832E+01 | .832 |
| .900E+02 | .895E+01 | .954E+01 | .892E+01 | .892E+01 | .888E+01 | .887E+01 | .883E+01 | .887E+01 | .883E+01 | .883 |
| .100E+03 | .945E+01 | .100E+02 | .942E+01 | .940E+01 | .937E+01 | .936E+01 | .931E+01 | .936E+01 | .931E+01 | .931 |
| .120E+03 | .104E+02 | .110E+02 | .103E+02 | .103E+02 | .103E+02 | .103E+02 | .102E+02 | .103E+02 | .102E+02 | .102 |
| .140E+03 | .112E+02 | .118E+02 | .112E+02 | .111E+02 | .111E+02 | .111E+02 | .110E+02 | .111E+02 | .110E+02 | .110 |
| .160E+03 | .120E+02 | .126E+02 | .120E+02 | .119E+02 | .119E+02 | .119E+02 | .118E+02 | .119E+02 | .118E+02 | .118 |
| .180E+03 | .128E+02 | .134E+02 | .127E+02 | .126E+02 | .127E+02 | .127E+02 | .126E+02 | .127E+02 | .126E+02 | .126 |
| .200E+03 | .135E+02 | .141E+02 | .134E+02 | .133E+02 | .134E+02 | .134E+02 | .132E+02 | .134E+02 | .132E+02 | .132 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .250E+03 | .151E+02 | .157E+02 | .151E+02 | .149E+02 | .151E+02 | .150E+02 | .148E+02 | .150E+02 | .148E+02 | .148E+ |
| .300E+03 | .166E+02 | .172E+02 | .166E+02 | .163E+02 | .165E+02 | .165E+02 | .163E+02 | .165E+02 | .163E+02 | .163E+ |
| .350E+03 | .180E+02 | .186E+02 | .179E+02 | .176E+02 | .179E+02 | .179E+02 | .176E+02 | .179E+02 | .176E+02 | .176E+ |
| .400E+03 | .193E+02 | .198E+02 | .192E+02 | .188E+02 | .192E+02 | .191E+02 | .188E+02 | .191E+02 | .188E+02 | .188E+ |
| .450E+03 | .205E+02 | .210E+02 | .204E+02 | .199E+02 | .203E+02 | .203E+02 | .200E+02 | .203E+02 | .200E+02 | .200E+ |
| .500E+03 | .216E+02 | .221E+02 | .215E+02 | .210E+02 | .214E+02 | .214E+02 | .211E+02 | .214E+02 | .211E+02 | .211E+ |
| .600E+03 | .236E+02 | .242E+02 | .235E+02 | .230E+02 | .235E+02 | .235E+02 | .231E+02 | .235E+02 | .231E+02 | .231E+ |
| .700E+03 | .255E+02 | .260E+02 | .254E+02 | .249E+02 | .254E+02 | .253E+02 | .249E+02 | .253E+02 | .249E+02 | .249E+ |
| .800E+03 | .273E+02 | .278E+02 | .271E+02 | .266E+02 | .271E+02 | .271E+02 | .266E+02 | .271E+02 | .266E+02 | .266E+ |
| .900E+03 | .289E+02 | .294E+02 | .288E+02 | .282E+02 | .287E+02 | .287E+02 | .282E+02 | .287E+02 | .282E+02 | .282E+ |
| .100E+04 | .305E+02 | .309E+02 | .303E+02 | .297E+02 | .303E+02 | .302E+02 | .298E+02 | .302E+02 | .298E+02 | .298E+ |
| .200E+04 | .430E+02 | .434E+02 | .428E+02 | .420E+02 | .428E+02 | .427E+02 | .420E+02 | .427E+02 | .420E+02 | .420E+ |
| .300E+04 | .527E+02 | .531E+02 | .524E+02 | .515E+02 | .524E+02 | .523E+02 | .515E+02 | .523E+02 | .515E+02 | .515E+ |
| .400E+04 | .609E+02 | .612E+02 | .605E+02 | .595E+02 | .605E+02 | .604E+02 | .595E+02 | .604E+02 | .595E+02 | .595E+ |
| .500E+04 | .681E+02 | .683E+02 | .676E+02 | .665E+02 | .677E+02 | .676E+02 | .665E+02 | .676E+02 | .665E+02 | .665E+ |
| .600E+04 | .746E+02 | .748E+02 | .741E+02 | .728E+02 | .742E+02 | .740E+02 | .728E+02 | .740E+02 | .728E+02 | .728E+ |
| .700E+04 | .806E+02 | .808E+02 | .800E+02 | .787E+02 | .802E+02 | .799E+02 | .787E+02 | .799E+02 | .787E+02 | .787E+ |
| .800E+04 | .863E+02 | .863E+02 | .855E+02 | .841E+02 | .857E+02 | .855E+02 | .841E+02 | .855E+02 | .841E+02 | .841E+ |
| .900E+04 | .915E+02 | .916E+02 | .907E+02 | .892E+02 | .910E+02 | .907E+02 | .892E+02 | .907E+02 | .892E+02 | .892E+ |
| .100E+05 | .966E+02 | .965E+02 | .956E+02 | .941E+02 | .959E+02 | .956E+02 | .941E+02 | .956E+02 | .941E+02 | .941E+ |
| .200E+05 | .137E+03 | .137E+03 | .135E+03 | .133E+03 | .136E+03 | .135E+03 | .133E+03 | .135E+03 | .133E+03 | .133E+ |
| .300E+05 | .169E+03 | .167E+03 | .166E+03 | .163E+03 | .167E+03 | .166E+03 | .163E+03 | .166E+03 | .163E+03 | .163E+ |
| .400E+05 | .196E+03 | .194E+03 | .192E+03 | .189E+03 | .194E+03 | .192E+03 | .189E+03 | .192E+03 | .189E+03 | .189E+ |
| .500E+05 | .220E+03 | .217E+03 | .215E+03 | .211E+03 | .217E+03 | .215E+03 | .211E+03 | .215E+03 | .211E+03 | .211E+ |
| .600E+05 | .241E+03 | .238E+03 | .236E+03 | .232E+03 | .238E+03 | .236E+03 | .232E+03 | .236E+03 | .232E+03 | .232E+ |
| .700E+05 | .261E+03 | .257E+03 | .255E+03 | .251E+03 | .257E+03 | .255E+03 | .251E+03 | .255E+03 | .251E+03 | .251E+ |
| .800E+05 | .279E+03 | .275E+03 | .273E+03 | .268E+03 | .276E+03 | .273E+03 | .268E+03 | .273E+03 | .268E+03 | .268E+ |
| .900E+05 | .297E+03 | .293E+03 | .290E+03 | .285E+03 | .293E+03 | .290E+03 | .285E+03 | .290E+03 | .285E+03 | .285E+ |
| .100E+06 | .313E+03 | .309E+03 | .306E+03 | .301E+03 | .309E+03 | .306E+03 | .301E+03 | .306E+03 | .301E+03 | .301E+ |
| .200E+06 | .452E+03 | .447E+03 | .443E+03 | .436E+03 | .447E+03 | .443E+03 | .436E+03 | .443E+03 | .436E+03 | .436E+ |
| .300E+06 | .569E+03 | .562E+03 | .557E+03 | .549E+03 | .562E+03 | .557E+03 | .549E+03 | .557E+03 | .549E+03 | .549E+ |
| .400E+06 | .678E+03 | .670E+03 | .664E+03 | .654E+03 | .670E+03 | .664E+03 | .654E+03 | .664E+03 | .654E+03 | .654E+ |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .500E+06 | .782E+03 | .774E+03 | .767E+03 | .756E+03 | .774E+03 | .767E+03 | .756E+03 | .767E+03 | .756E+03 | .756 |
| .600E+06 | .886E+03 | .876E+03 | .869E+03 | .857E+03 | .876E+03 | .869E+03 | .857E+03 | .869E+03 | .857E+03 | .857 |
| .700E+06 | .989E+03 | .979E+03 | .971E+03 | .958E+03 | .979E+03 | .971E+03 | .958E+03 | .971E+03 | .958E+03 | .958 |
| .800E+06 | .109E+04 | .108E+04 | .107E+04 | .106E+04 | .108E+04 | .107E+04 | .106E+04 | .107E+04 | .106E+04 | .106 |
| .900E+06 | .120E+04 | .119E+04 | .118E+04 | .116E+04 | .119E+04 | .118E+04 | .116E+04 | .118E+04 | .116E+04 | .116 |
| .100E+07 | .130E+04 | .129E+04 | .128E+04 | .127E+04 | .129E+04 | .128E+04 | .127E+04 | .128E+04 | .127E+04 | .127 |

Tabela A.7.28 - Comportamento das indutâncias por camada metálica, com a freqüência

Cabo -> subterrâneo

Resistividade do solo (Ωm) -> 1000.00

Altura ou profundidade (m) -> .50

| freq. (Hz) | Lc (mH/km) | Lb1 (mH/km) | Lb2 (mH/km) | La (mH/km) | Lcb1 (mH/km) | Lcb2 (mH/km) | Lca (mH/km) | Lb1b2 (mH/km) | Lb1a (mH/km) | Lb (mH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+01 | .150E+03 | .149E+03 | .149E+03 | .149E+03 | .149E+03 | .149E+03 | .149E+03 | .149E+03 | .149E+03 | .149 |
| .200E+01 | .106E+03 | .106E+03 | .106E+03 | .106E+03 | .106E+03 | .106E+03 | .106E+03 | .106E+03 | .106E+03 | .106 |
| .300E+01 | .873E+02 | .871E+02 | .868E+02 | .864E+02 | .871E+02 | .868E+02 | .865E+02 | .868E+02 | .865E+02 | .865 |
| .400E+01 | .758E+02 | .756E+02 | .754E+02 | .750E+02 | .756E+02 | .754E+02 | .751E+02 | .754E+02 | .751E+02 | .751 |
| .500E+01 | .680E+02 | .678E+02 | .676E+02 | .672E+02 | .678E+02 | .676E+02 | .673E+02 | .676E+02 | .673E+02 | .673 |
| .600E+01 | .623E+02 | .621E+02 | .619E+02 | .615E+02 | .621E+02 | .619E+02 | .616E+02 | .619E+02 | .616E+02 | .616 |
| .700E+01 | .578E+02 | .576E+02 | .574E+02 | .570E+02 | .576E+02 | .574E+02 | .571E+02 | .574E+02 | .571E+02 | .571 |
| .800E+01 | .542E+02 | .540E+02 | .538E+02 | .534E+02 | .540E+02 | .538E+02 | .535E+02 | .538E+02 | .535E+02 | .535 |
| .900E+01 | .512E+02 | .510E+02 | .509E+02 | .504E+02 | .510E+02 | .509E+02 | .505E+02 | .509E+02 | .505E+02 | .505 |
| .100E+02 | .487E+02 | .485E+02 | .483E+02 | .479E+02 | .485E+02 | .483E+02 | .480E+02 | .483E+02 | .480E+02 | .480 |
| .200E+02 | .350E+02 | .348E+02 | .347E+02 | .342E+02 | .348E+02 | .347E+02 | .343E+02 | .347E+02 | .343E+02 | .343 |
| .300E+02 | .290E+02 | .288E+02 | .286E+02 | .282E+02 | .288E+02 | .286E+02 | .283E+02 | .286E+02 | .283E+02 | .283 |
| .400E+02 | .254E+02 | .252E+02 | .250E+02 | .246E+02 | .252E+02 | .250E+02 | .247E+02 | .250E+02 | .247E+02 | .247 |
| .500E+02 | .229E+02 | .227E+02 | .225E+02 | .221E+02 | .227E+02 | .225E+02 | .222E+02 | .225E+02 | .222E+02 | .222 |
| .600E+02 | .211E+02 | .209E+02 | .207E+02 | .203E+02 | .209E+02 | .207E+02 | .204E+02 | .207E+02 | .204E+02 | .204 |
| .700E+02 | .196E+02 | .194E+02 | .193E+02 | .189E+02 | .194E+02 | .193E+02 | .190E+02 | .193E+02 | .190E+02 | .190 |
| .800E+02 | .185E+02 | .183E+02 | .182E+02 | .178E+02 | .183E+02 | .182E+02 | .178E+02 | .182E+02 | .178E+02 | .178 |
| .900E+02 | .175E+02 | .173E+02 | .172E+02 | .168E+02 | .173E+02 | .172E+02 | .169E+02 | .172E+02 | .169E+02 | .169 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .100E+03 | .167E+02 | .165E+02 | .164E+02 | .160E+02 | .165E+02 | .164E+02 | .161E+02 | .164E+02 | .161E+02 | .161E+ |
| .120E+03 | .154E+02 | .152E+02 | .151E+02 | .147E+02 | .152E+02 | .151E+02 | .148E+02 | .151E+02 | .148E+02 | .148E+ |
| .140E+03 | .144E+02 | .142E+02 | .141E+02 | .137E+02 | .142E+02 | .141E+02 | .138E+02 | .141E+02 | .138E+02 | .138E+ |
| .160E+03 | .136E+02 | .134E+02 | .132E+02 | .129E+02 | .134E+02 | .132E+02 | .130E+02 | .132E+02 | .130E+02 | .130E+ |
| .180E+03 | .129E+02 | .127E+02 | .126E+02 | .122E+02 | .127E+02 | .126E+02 | .123E+02 | .126E+02 | .123E+02 | .123E+ |
| .200E+03 | .123E+02 | .121E+02 | .120E+02 | .117E+02 | .121E+02 | .120E+02 | .117E+02 | .120E+02 | .117E+02 | .117E+ |
| .250E+03 | .111E+02 | .109E+02 | .108E+02 | .106E+02 | .109E+02 | .108E+02 | .106E+02 | .108E+02 | .106E+02 | .106E+ |
| .300E+03 | .103E+02 | .101E+02 | .997E+01 | .973E+01 | .101E+02 | .997E+01 | .977E+01 | .997E+01 | .977E+01 | .977E+ |
| .350E+03 | .961E+01 | .942E+01 | .930E+01 | .909E+01 | .942E+01 | .930E+01 | .912E+01 | .930E+01 | .912E+01 | .912E+ |
| .400E+03 | .907E+01 | .888E+01 | .876E+01 | .857E+01 | .888E+01 | .876E+01 | .860E+01 | .876E+01 | .860E+01 | .860E+ |
| .450E+03 | .862E+01 | .843E+01 | .831E+01 | .814E+01 | .844E+01 | .831E+01 | .816E+01 | .831E+01 | .816E+01 | .816E+ |
| .500E+03 | .824E+01 | .805E+01 | .793E+01 | .778E+01 | .806E+01 | .794E+01 | .779E+01 | .794E+01 | .779E+01 | .779E+ |
| .600E+03 | .763E+01 | .745E+01 | .733E+01 | .720E+01 | .745E+01 | .733E+01 | .721E+01 | .733E+01 | .721E+01 | .721E+ |
| .700E+03 | .716E+01 | .698E+01 | .686E+01 | .674E+01 | .698E+01 | .686E+01 | .675E+01 | .686E+01 | .675E+01 | .675E+ |
| .800E+03 | .678E+01 | .660E+01 | .649E+01 | .638E+01 | .661E+01 | .649E+01 | .638E+01 | .649E+01 | .638E+01 | .638E+ |
| .900E+03 | .647E+01 | .629E+01 | .618E+01 | .608E+01 | .630E+01 | .618E+01 | .608E+01 | .618E+01 | .608E+01 | .608E+ |
| .100E+04 | .620E+01 | .603E+01 | .591E+01 | .582E+01 | .603E+01 | .591E+01 | .582E+01 | .591E+01 | .582E+01 | .582E+ |
| .200E+04 | .479E+01 | .462E+01 | .451E+01 | .443E+01 | .462E+01 | .451E+01 | .443E+01 | .451E+01 | .443E+01 | .443E+ |
| .300E+04 | .416E+01 | .400E+01 | .388E+01 | .382E+01 | .400E+01 | .388E+01 | .382E+01 | .388E+01 | .382E+01 | .382E+ |
| .400E+04 | .379E+01 | .362E+01 | .351E+01 | .345E+01 | .363E+01 | .351E+01 | .345E+01 | .351E+01 | .345E+01 | .345E+ |
| .500E+04 | .353E+01 | .337E+01 | .326E+01 | .321E+01 | .337E+01 | .326E+01 | .321E+01 | .326E+01 | .321E+01 | .321E+ |
| .600E+04 | .334E+01 | .318E+01 | .307E+01 | .302E+01 | .319E+01 | .307E+01 | .302E+01 | .307E+01 | .302E+01 | .302E+ |
| .700E+04 | .320E+01 | .304E+01 | .292E+01 | .288E+01 | .304E+01 | .293E+01 | .288E+01 | .293E+01 | .288E+01 | .288E+ |
| .800E+04 | .308E+01 | .292E+01 | .281E+01 | .276E+01 | .292E+01 | .281E+01 | .276E+01 | .281E+01 | .276E+01 | .276E+ |
| .900E+04 | .298E+01 | .282E+01 | .271E+01 | .267E+01 | .282E+01 | .271E+01 | .267E+01 | .271E+01 | .267E+01 | .267E+ |
| .100E+05 | .290E+01 | .274E+01 | .263E+01 | .259E+01 | .274E+01 | .263E+01 | .259E+01 | .263E+01 | .259E+01 | .259E+ |
| .200E+05 | .244E+01 | .229E+01 | .218E+01 | .215E+01 | .229E+01 | .218E+01 | .215E+01 | .218E+01 | .215E+01 | .215E+ |
| .300E+05 | .224E+01 | .209E+01 | .199E+01 | .195E+01 | .209E+01 | .199E+01 | .195E+01 | .199E+01 | .195E+01 | .195E+ |
| .400E+05 | .212E+01 | .197E+01 | .187E+01 | .184E+01 | .197E+01 | .187E+01 | .184E+01 | .187E+01 | .184E+01 | .184E+ |
| .500E+05 | .204E+01 | .189E+01 | .179E+01 | .176E+01 | .189E+01 | .179E+01 | .176E+01 | .179E+01 | .176E+01 | .176E+ |
| .600E+05 | .198E+01 | .183E+01 | .173E+01 | .170E+01 | .183E+01 | .173E+01 | .170E+01 | .173E+01 | .170E+01 | .170E+ |
| .700E+05 | .193E+01 | .178E+01 | .168E+01 | .165E+01 | .179E+01 | .168E+01 | .165E+01 | .168E+01 | .165E+01 | .165E+ |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .800E+05 | .189E+01 | .175E+01 | .164E+01 | .162E+01 | .175E+01 | .164E+01 | .162E+01 | .164E+01 | .162E+01 | .162E+ |
| .900E+05 | .186E+01 | .172E+01 | .161E+01 | .159E+01 | .172E+01 | .161E+01 | .159E+01 | .161E+01 | .159E+01 | .159E+ |
| .100E+06 | .183E+01 | .169E+01 | .159E+01 | .156E+01 | .169E+01 | .159E+01 | .156E+01 | .159E+01 | .156E+01 | .156E+ |
| .200E+06 | .169E+01 | .155E+01 | .145E+01 | .142E+01 | .155E+01 | .145E+01 | .142E+01 | .145E+01 | .142E+01 | .142E+ |
| .300E+06 | .162E+01 | .148E+01 | .138E+01 | .136E+01 | .148E+01 | .138E+01 | .136E+01 | .138E+01 | .136E+01 | .136E+ |
| .400E+06 | .158E+01 | .144E+01 | .134E+01 | .132E+01 | .144E+01 | .134E+01 | .132E+01 | .134E+01 | .132E+01 | .132E+ |
| .500E+06 | .155E+01 | .142E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .142E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .132E+01 | .130E+01 | .130E+ |
| .600E+06 | .153E+01 | .139E+01 | .130E+01 | .127E+01 | .139E+01 | .130E+01 | .127E+01 | .130E+01 | .127E+01 | .127E+ |
| .700E+06 | .151E+01 | .138E+01 | .128E+01 | .126E+01 | .138E+01 | .128E+01 | .126E+01 | .128E+01 | .126E+01 | .126E+ |
| .800E+06 | .150E+01 | .136E+01 | .126E+01 | .124E+01 | .136E+01 | .126E+01 | .124E+01 | .126E+01 | .124E+01 | .124E+ |
| .900E+06 | .149E+01 | .135E+01 | .125E+01 | .123E+01 | .135E+01 | .125E+01 | .123E+01 | .125E+01 | .123E+01 | .123E+ |
| .100E+07 | .148E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .122E+01 | .134E+01 | .124E+01 | .122E+01 | .124E+01 | .122E+01 | .122E+ |

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200704
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

DATA 03/03/1993
PROC.
FED. PPG
LIV.
CPS DOAÇÃO

EFEI
BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.