

TESE DE DOUTORADO Nº 160

**DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS
PARÂMETROS DO SOLO: EFEITO NO
COMPORTAMENTO IMPULSIVO DE
ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**

Rafael Silva Alipio

DATA DA DEFESA: 30/07/2013

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO
SOLO: EFEITO NO COMPORTAMENTO IMPULSIVO DE
ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**

Rafael Silva Alipio

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

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte - MG

Julho de 2013

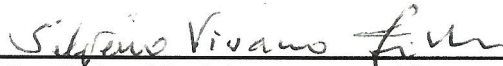
"Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos"

Rafael Silva Alípio

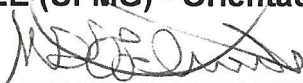
Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 30 de julho de 2013.

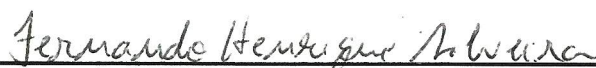
Por:



Prof. Dr. Silvério Visacro Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Marco Aurélio O. Schroeder
Eng. Elétrica (UFSJ) - Co-Orientador



Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Adroaldo Raizer
Eng. Elétrica (UFSC)



Prof. Dr. Tarcísio Antônio Santos de Oliveira
Eng. Elétrica (CEFET - MG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

- ao Prof. Silvério pela orientação segura, entusiasmada, criativa e pela oportunidade de trabalhar com um tema tão interessante, que me permitiu crescer tanto científica e profissionalmente. Obrigado por responder às minhas inúmeras e ávidas perguntas sobre eletromagnetismo, aterramentos elétricos, descargas atmosféricas e diversas outras questões da engenharia elétrica. Definitivamente, você foi responsável por uma contribuição expressiva para minha formação técnica, acadêmica e profissional. Obrigado, também, pelas várias conversas pacíficas que transpunham os limites da engenharia: guardá-las-ei para vida.
- ao Prof. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, responsável pelos meus primeiros passos no tema desta tese e por uma parcela considerável de minha formação técnica. Obrigado pelas muitas oportunidades profissionais que você me proporcionou, as quais foram de “fundamental importância” para minha formação e para que eu pudesse chegar nesta etapa relevante de minha vida acadêmica.
- aos professores Fernando Silveira e Alberto De Conti, pela disponibilidade irrestrita para discussões técnicas, conselhos acadêmicos/profissionais, lamentações futebolísticas e elucubrações artísticas/musicais/literárias. Obrigado a ambos pela contribuição essencial para minha formação técnica e pessoal.
- aos dois amigos de LATER: Listz Araújo e Miguel Guimarães. Obrigado pela ajuda “sem limites” nas mais diversas ocasiões e pelo auxílio prestado em inúmeras medições realizadas neste trabalho. Sinto-me privilegiado por ter tido a oportunidade de conviver com pessoas como vocês.
- a toda a equipe do LRC, pelo incessante entusiasmo em transmitir conhecimento, em particular aos professores Clever Pereira e Maria Helena Murta Vale e às doutoras Rosilene Dias e Cláudia Mesquita. Também agradeço ao doutorando Breno Dias, grande companheiro, sobretudo na parte inicial de desenvolvimento deste trabalho.
- ao CEFET-MG, responsável por minha base científica e profissional. Espero honrar o nome dessa instituição por onde eu passar. Em especial, agradeço a todos os professores do Departamento de Eng. Elétrica. Especificamente, agradeço ao Prof. Tarcísio Antônio Santos de Oliveira pelas contribuições para minha formação técnica e por me ajudar muito pessoalmente, desde a época do mestrado; professor, fica registrada de forma sincera a minha gratidão.
- ao meu amigo, compadre e *brother* Gilberto Silveira (Gilbert), que sempre vibrou de forma sincera com as minhas conquistas. Obrigado por ser o meu amigo.
- à amiga Adriana Pedrosa, pela agradável companhia em almoços e cafés, pelo incentivo e pelos sonhos compartilhados.
- aos meus amigos de ELT-E, a turma mais lendária que já passou pelo CEFET-MG. Obrigado por sempre me apoiarem e por me fazerem acreditar que eu seria capaz de realizações maiores do que pensava.

- à minha esposa, amiga e companheira Sra. Mirelle Karoline Alves de Macêdo Alípio. Obrigado por suportar junto comigo, sem nenhuma reclamação e sempre com um sorriso sincero no rosto, todas as privações pelas quais passamos ao longo desses quatro anos. Obrigado por, naqueles momentos mais difíceis, dizer-me com tanto entusiasmo e com tanta certeza (de onde você tirava tanta?) que dias melhores iriam chegar. Obrigado por ter me acompanhado, valente como sempre, em diversas medições e tê-las tornado menos duras. Obrigado pela revisão atenta do texto. Obrigado por tudo: sem você essa caminhada teria sido penosa demais!
- à minha família: meu pai Cleides Alípio, minha mãe Maria Ilza Silva Alípio e minha irmã Ludmara Silva Alípio. Agradeço fortemente a eles pela confiança em mim depositada. Embora de origem humilde, meus pais nunca deixaram faltar nada para os meus estudos e realizaram todos os tipos de esforços para que eu pudesse prosseguir em minha incansável busca pelo saber. Em particular, obrigado mamãe por sempre vibrar com tanta intensidade por meu amor pelo conhecimento e pela vontade de transmiti-lo às outras pessoas.
- a todos aqueles que, com tanta boa vontade, abriram gentilmente as portas de suas propriedades para que eu pudesse realizar os meus experimentos de campo. Ao Eng. Alexandre Dias, pela disponibilidade em recepcionar-me várias vezes em Montes Claros. Ao CEFET-MG, pela gentileza na disponibilização de locais para medição. Ao Sr. Zizinho Luca, por ceder sua propriedade. À tia Eliete, pela extrema boa vontade em disponibilizar locais para que eu fizesse as medições; agradeço também aos seus vizinhos pela ajuda. À família Pedrosa: Sr. Moacir, Sra. Arlete e Srta. Adriana, obrigado por me receberem de forma tão acolhedora em sua casa; em particular, agradeço ao Sr. Moacir pela imensa ajuda nos trabalhos. À Universidade Federal de São João Del-Rei pelos locais cedidos e ao Prof. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder pelo auxílio na realização das medições. Ao Sr. João 30, por ceder sua propriedade. Ao Sr. Nelson Soares e à sua filha Aline, que permitiram a realização de várias medições em suas propriedades. Ao Sr. Edmar Souza, por disponibilizar seu terreno. Ao Sr. Adão Vieira e ao seu irmão Juscelino Lourêncio, por gentilmente cederem as suas propriedades e auxiliarem nos trabalhos de instalação das cubas. Ao Sr. Geraldo Divino, pela boa vontade e disponibilização de locais diversos para medição. Ao Sr. Elvécio Dias, por ceder sua propriedade e pela grande prestatividade. Ao Sr. Marcelo Silva, por disponibilizar o sítio de sua família e acompanhar-me nas medições. Ao Sr. Albenes e à Sra. Lourdes, pela disponibilização do terreno para medição e pela imensurável boa vontade. Ao Sr. Wilson José de Macêdo, pelo importante estabelecimento de contatos para realização de uma campanha de medições na região da zona da mata de Minas Gerais e, também, por me acompanhar e auxiliar pacientemente nos trabalhos de campo; adicionalmente, agradeço à Sra. Maria José Alves, pela recepção sempre alegre.
- à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento.

“Muitas vezes as pessoas
são egocêntricas, ilógicas e insensatas.
Perdoe-as assim mesmo.

Se você é gentil,
as pessoas podem acusá-lo de interesseiro.
Seja gentil assim mesmo.

Se você é um vencedor,
terá alguns falsos amigos e alguns inimigos verdadeiros.
Vença assim mesmo.

Se você é honesto e franco,
as pessoas podem enganá-lo.
Seja honesto e franco assim mesmo.

O que você levou anos para construir,
alguém pode destruir de uma hora para outra.
Construa assim mesmo.

Se você tem paz e é feliz,
as pessoas podem sentir inveja.
Seja feliz assim mesmo.

O bem que você faz hoje,
pode ser esquecido amanhã.
Faça o bem assim mesmo.

Dê ao mundo o melhor de você,
mas isso pode não ser o bastante.
Dê o melhor de você assim mesmo.

Veja você que, no final das contas,
é tudo entre você e Deus.
Nunca foi entre você e os outros.”

Madre Tereza de Calcutá

Dedico este trabalho:

Ao meu primo Márcio Alípio, por sempre ter me incentivado, por sua alegria verdadeira em minhas conquistas e por ser fonte de inspiração em minha vida.

À professora Marfiza Augusta, por ter me iniciado na arte de lecionar.

RESUMO

Esta tese é dedicada ao estudo da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo e à análise do impacto desse fenômeno na resposta de aterramentos frente a transitórios, notadamente aqueles associados à incidência de descargas atmosféricas. Propõe-se uma nova metodologia de medição, aplicável em condições de campo, para determinação da dependência da frequência da resistividade e da permissividade do solo na faixa de 100 Hz até 4 MHz, espectro de interesse na análise de transitórios associados às descargas atmosféricas. Essa metodologia é validada e demonstra-se experimentalmente a relevância do efeito da dependência da frequência no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos. A partir da aplicação sistemática da metodologia de medição a mais de 60 solos em condições naturais, caracteriza-se de forma geral a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo. Mostra-se que a resistividade diminui com o aumento da frequência e que tal diminuição é mais pronunciada para solos de maior resistividade em baixa frequência. Também, mostra-se que a permissividade diminui com o aumento da frequência e possui, na maior parte do espectro, valores mais elevados do que aqueles usualmente adotados na literatura. Com base nos resultados experimentais e nas tendências observadas, são desenvolvidas fórmulas para estimativa aproximada da dependência da frequência dos parâmetros do solo, em função da resistividade em baixa frequência. Utilizando-se essas fórmulas, analisa-se o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento transitório de aterramentos elétricos por meio de simulações computacionais. Mostra-se que o fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo é responsável pela redução dos níveis de elevação de potencial no aterramento, da impedância impulsiva e do coeficiente de impulso e, também, que tais reduções são mais significativas para solos de maior resistividade e para correntes de descargas subsequentes. Ainda, propõe-se um modelo físico original para caracterização da dependência da frequência dos parâmetros do solo, baseado nas relações de Kramers-Kronig e nas Equações de Maxwell.

ABSTRACT

This PhD dissertation is dedicated to the study of the frequency dependence of soil electrical parameters and to the analysis of the impact of such phenomenon on the grounding response to transients, namely those associated with lightning. A new methodology to determine the frequency dependence of soil parameters based on measurements in field conditions is proposed. The methodology is able to determine the frequency dependence of soil parameters in 100 Hz to 4 MHz range, which corresponds to the typical range of lightning current frequency components. The results provided by the developed methodology are validated and the relevance of the frequency dependence of soil parameters on the impulse grounding behavior is experimentally proved. The methodology is systematically applied to more than 60 soils in natural conditions in order to generally characterize the frequency dependence of soil parameters. It is shown that the soil resistivity decreases with increasing frequency and that such decrease is more significant for soils of higher low-frequency resistivity. It is shown that the permittivity decreases with increasing frequency and that it presents, in most part of spectrum, values that are much higher than those usually assumed in literature. Based on the experimental results, formulas to estimate the frequency dependence of soil parameters are developed. Using these formulas, the impact of the frequency dependence of soil on the transient response of grounding is assessed by means of computational simulations. It is shown that the frequency dependence of soil is responsible for decreasing the grounding potential rise of electrodes and, thus, their impulse impedance and their impulse coefficient. This effect is more pronounced with increasing low-frequency soil resistivity and for typical currents of subsequent strokes. Furthermore, an original physical model to characterize the frequency dependence of soil parameters, based on Kramers-Kronig relationships and Maxwell equations, is proposed.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações básicas	1
1.2 - Objetivos e estrutura de desenvolvimento da tese	1
1.3 - Organização do texto.....	2
2. DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO: HISTÓRICO.....	4
2.1 - Introdução	4
2.2 - Dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo: Histórico	5
2.2.1 - Introdução.....	5
2.2.2 - Estado da arte	6
2.3 - Considerações finais	14
3. NOVA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO E DEMONSTRAÇÃO DA RELEVÂNCIA DESSE EFEITO NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE ATERRAMENTOS.....	16
3.1 - Introdução	16
3.2 - Metodologia proposta	16
3.2.1 - Aspectos teóricos básicos	16
3.2.2 - Aspectos práticos	18
3.2.3 - Exemplo de aplicação da metodologia	19
3.3 - Validação da metodologia proposta e demonstração da relevância do efeito da dependência da frequência.....	23
3.3.1 - Medição da resposta impulsiva de um eletrodo horizontal de aterramento	23
3.3.2 - Medição da variação de ρ_r e ε_r com a frequência.....	24
3.3.3 - Simulação da resposta do eletrodo horizontal incluindo a dependência da frequência dos parâmetros do solo e comparação com resultados experimentais.....	25
3.4 - Considerações finais	26
4. CARACTERIZAÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DA RESISTIVIDADE E DA PERMISSIVIDADE DO SOLO: MEDIÇÕES E PROPOSTA DE FÓRMULA PREDITIVA	27
4.1 - Introdução	27
4.2 - Considerações básicas	27
4.3 - Resultados obtidos da aplicação sistemática da metodologia de medição	28
4.3.1. Resistividade elétrica	28
4.3.2. Permissividade elétrica	29
4.4 - Desenvolvimento de fórmulas para estimativa da dependência da frequência da resistividade e da permissividade do solo	30
4.4.1. Fórmula para dependência da frequência da resistividade do solo	30
4.4.2. Fórmula para dependência da frequência da permissividade do solo.....	32
4.5 - Avaliação da qualidade dos resultados obtidos pela aplicação das fórmulas propostas e comparação com outras formulações	32
4.6 - Considerações finais	34

5. ANÁLISE DO EFEITO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO NA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS.....	35
5.1 - Introdução	35
5.2 - Desenvolvimentos	35
5.2.1. <i>Simulação da resposta do aterramento.....</i>	35
5.2.2. <i>Comportamento dos parâmetros do solo</i>	36
5.3 – Resultados.....	39
5.3.1. <i>Impedância harmônica.....</i>	39
5.3.2. <i>Elevação de potencial no aterramento.....</i>	40
5.3.3. <i>Impedância impulsiva e comprimento efetivo</i>	42
5.3.4. <i>Coeficiente de impulso</i>	45
5.4 – Conclusões e considerações sobre o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo na resposta transitória de outros arranjos de aterramento	47
6. MODELO FÍSICO ORIGINAL PARA DESCRIÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO	49
6.1 - Introdução	49
6.2 - Considerações físicas básicas sobre a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo	49
6.3 - Causalidade dos resultados de medição	53
6.4 - Modelo semi-teórico original para caracterização da dependência da frequência da condutividade e da permissividade.....	55
6.4.1. <i>Fundamentos do modelo</i>	55
6.4.2. <i>Aplicação do modelo a resultados de medição</i>	58
6.5 - Aspectos estatísticos da dependência da frequência dos parâmetros do solo.....	59
6.5.1. <i>Fundamentos de um modelo estatístico para descrição da dependência da frequência dos parâmetros do solo.....</i>	59
6.5.2. <i>Limitações da descrição estatística da dependência da frequência dos parâmetros do solo</i>	63
6.6 - Uma abordagem de engenharia para se ter em conta a dispersão estatística da dependência da frequência dos parâmetros do solo	65
6.6.1. <i>Fundamentos de uma abordagem de engenharia para consideração da dispersão estatística da dependência da frequência do solo</i>	65
6.6.2. <i>Exemplo de aplicação</i>	66
6.7 - Considerações finais	69
7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	70
REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações básicas

Quando solicitado por correntes impulsivas, advindas da incidência de descargas atmosféricas, o aterramento apresenta comportamento singular e, na maior parte das situações, bastante distinto daquele observado frente a correntes de baixa frequência [1].

Especificamente no que concerne à resposta dos aterramentos frente a correntes de descargas atmosféricas, identificam-se alguns desafios científicos relevantes. Considera-se que a literatura recente já dispõe de modelos baseados em técnicas numéricas precisas e robustas, como os modelos eletromagnéticos descritos em [2]-[7], para cálculo da resposta transitória do aterramento. No entanto, persistem ainda os desafios relativos à caracterização do comportamento do solo nas condições a que fica submetido durante o fluxo de correntes de descargas atmosféricas, em particular os fenômenos de ionização do solo e da dependência da frequência dos parâmetros. *Este trabalho se concentra no fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo.*

Até recentemente, era usual adotar-se valores constantes para os parâmetros elétricos do solo, resistividade e permissividade, nas avaliações do comportamento transitório de aterramentos elétricos (por exemplo, em [8], [9]). Normalmente, assumiam-se para resistividade o valor medido utilizando instrumentos convencionais que empregam sinais de baixa frequência e para permissividade relativa um valor entre 4 e 81, dependendo da umidade do solo [1]. No entanto, evidências experimentais de que a resistividade e a permissividade variam na faixa de frequências representativas das descargas atmosféricas estão reportadas na literatura desde o início do século passado [10]. Daí surge um questionamento de caráter técnico, porém com contornos filosóficos: por que esse efeito é desprezado na maior parte dos trabalhos que investigam o comportamento impulsivo do aterramento? Algumas hipóteses são:

- Ausência de evidências experimentais da relevância do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos.
- Carência de resultados de medição da dependência da frequência dos parâmetros do solo confiáveis e devidamente validados para as aplicações de interesse.
- Falta de uma formulação para se ter em conta a variação dos parâmetros do solo devidamente validada para as aplicações de interesse.

Tendo em conta esses comentários iniciais, entende-se que o tema *dependência da frequência dos parâmetros do solo* ainda necessita de contribuições adicionais no que se refere a sua caracterização geral e no que concerne a sua determinação experimental. Além disso, a influência de tal dependência no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos demanda elucidacões complementares. Nesse contexto, o presente trabalho pretende gerar uma contribuição consistente de caráter técnico e também nos aspectos de organização do tema aterramentos elétricos, com ênfase na avaliação experimental e teórica da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência e na análise do impacto desse fenômeno na resposta de aterramentos frente a transitórios, notadamente aqueles associados à incidência de descargas atmosféricas.

1.2 - Objetivos e estrutura de desenvolvimento da tese

Para cumprir as realizações citadas anteriormente, o trabalho está estruturado em um conjunto de etapas:

- Desenvolvimento e validação de uma nova metodologia de medição para determinação da dependência da frequência dos parâmetros do solo ao longo da faixa de frequências de interesse deste trabalho, que corresponde ao espectro representativo de descargas atmosféricas.
- Aplicação da metodologia desenvolvida em estudos experimentais de modo a demonstrar a relevância do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento transitório de arranjos típicos de aterramento.
- Aplicação sistemática da metodologia desenvolvida a um grande número de solos abrangendo diferentes tipos e resistividades com a finalidade de propor fórmulas para estimativa da dependência dos parâmetros do solo na faixa de frequências típica dos componentes das correntes de descargas atmosféricas.
- Análise do impacto da dependência da frequência do solo no cálculo de grandezas usualmente utilizadas na caracterização do comportamento transitório de aterramentos elétricos.
- Desenvolvimento de um modelo físico baseado em relações fundamentais do eletromagnetismo para caracterização da dependência da frequência dos parâmetros do solo com fins de aplicação em engenharia.

1.3 - Organização do texto

Este texto está estruturado em sete capítulos, incluindo este introdutório. Na organização desses capítulos adotou-se uma abordagem sob um ponto de vista do desenvolvimento cronológico das idéias ao longo dos quatro anos de doutorado.

O capítulo 2 apresenta uma descrição sucinta dos principais trabalhos que tratam da medição ou da caracterização por meio de formulações/modelos da dependência da frequência dos parâmetros do solo na faixa de frequências de interesse deste trabalho.

No capítulo 3, propõe-se uma nova metodologia para determinação da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, a partir de medições realizadas diretamente em condições de campo. Também, são apresentados resultados experimentais originais que, além de validarem a metodologia proposta, denotam a relevância da dependência da frequência dos parâmetros do solo na resposta transitória de aterramentos elétricos.

No capítulo 4, são apresentadas análises do comportamento da resistividade e da permissividade do solo na faixa de frequências entre 100 Hz e 4 MHz, baseadas em um conjunto de mais de 60 medições realizadas em condições de campo. Dessas análises, fórmulas são propostas para estimar a dependência dos parâmetros do solo na faixa de frequências típicas de componentes de correntes de descargas atmosféricas. Os resultados providos por essas fórmulas são aferidos pela comparação com resultados experimentais de resposta transitória de arranjos de aterramento.

No capítulo 5, apresenta-se uma análise sistemática do impacto da dependência da frequência dos parâmetros do solo, estimada pelas fórmulas propostas no capítulo 4, no cálculo dos principais parâmetros empregados na caracterização do comportamento transitório de aterramentos elétricos.

No capítulo 6, avalia-se o fenômeno da dependência da frequência do solo segundo uma abordagem física. É proposto um modelo para caracterização da dependência da frequência

dos parâmetros, fundamentado nas Equações de Maxwell e nas relações de Kramers-Kronig, que considera as relações de causalidade existentes entre a variação da condutividade e da permissividade com a frequência. Também, mostra-se que o fenômeno de dependência da frequência do solo possui certa dispersão estatística e propõe-se uma maneira aproximada de se ter em conta tal dispersão.

No capítulo 7, são destacadas as principais realizações e contribuições deste trabalho e apresentadas as propostas de continuidade.

2. DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO: HISTÓRICO

2.1 - Introdução

Os aterramentos elétricos estão sujeitos a solicitações elétricas diversas, que abrangem desde ocorrências lentas, por exemplo, os curtos-circuitos, até fenômenos mais rápidos, por exemplo, transitórios associados à circulação de correntes advindas de descargas atmosféricas. Considerando esse cenário, a análise rigorosa de aterramentos elétricos passa por uma etapa fundamental, que corresponde à adequada caracterização do solo tendo em conta a gama de solicitações impostas.

Para solicitações lentas, é suficiente a caracterização do solo por uma resistividade equivalente fixa ou por um conjunto de camadas com resistividades fixas. Nesse caso, a resistividade é determinada por meio de medições, aplicando-se técnicas já consolidadas e que têm gerado bons resultados em termos de engenharia [11]. Tais medições empregam instrumentos que operam em baixas frequências (~ 100 Hz ou pouco superior) [12], [13].

Para transitórios, em especial aqueles associados a descargas atmosféricas, além dos fenômenos condutivos, tornam-se relevantes os efeitos capacitivos e indutivos no aterramento [1], [7]. Nesse caso, além da resistividade, são também importantes os parâmetros permissividade e permeabilidade do solo. Adicionalmente, deve-se considerar a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, resistividade e permissividade, que variam de forma significativa ao longo do espectro característico de descargas atmosféricas (~ 100 Hz até alguns MHz) [14], [15]. O valor da permeabilidade magnética pode ser considerado constante e igual à permeabilidade do vácuo, na quase totalidade das aplicações [14].

A origem física da dependência dos parâmetros elétricos, resistividade e permissividade, está relacionada a processos de polarização e perdas associadas que ocorrem no meio [16]-[19]. Esses processos dependem da frequência do campo aplicado. Tal dependência se traduz macroscopicamente em uma variação dos parâmetros resistividade e permissividade com a frequência. Os aspectos físicos relativos à dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo serão explorados no capítulo 6 desta tese.

O objetivo deste capítulo é realizar um levantamento dos principais trabalhos da literatura que tratam da caracterização eletromagnética do solo, basicamente da determinação da dependência da frequência dos parâmetros resistividade e permissividade elétricas. Após uma laboriosa revisão bibliográfica, verificou-se que é grande o número de trabalhos que abordam o tema. Isso se deve às diversas aplicações associadas à medição dos parâmetros do solo e, além disso, às inúmeras faixas do espectro em que tais medições são realizadas, dependendo da aplicação [20]-[22]. A descrição completa de todos esses trabalhos foge do escopo deste texto e, também, torna-se desnecessária tendo em vista as aplicações de interesse. Nesse sentido, antes de apresentar uma descrição sucinta das principais abordagens sobre o tema encontradas na literatura, devem ser feitas algumas ressalvas.

Admitindo-se que na maior parte dos casos o solo apresenta permeabilidade magnética próxima à do vácuo, importa, essencialmente, a caracterização dos parâmetros resistividade e permissividade elétricas. Ambos os parâmetros, se considerados campos estáticos ou quase-estáticos, dependem de diversos fatores, tais como [12]-[13]: i) tipo de solo; ii) umidade; iii) concentração e tipos de sais dissolvidos na água; iv) temperatura; v) compactação e granulometria do solo. Quando se consideram campos alternados, dentro de uma faixa desde frequências mais baixas (~ 100 Hz) até frequências mais elevadas (alguns MHz), as complexidades se avolumam e um número significativo de fatores adicionais pode influir no comportamento dos parâmetros citados. Há alguns trabalhos de cunho analítico que propõem modelos para determinação da dispersão dos parâmetros elétricos do solo. De certa forma,

esses trabalhos têm origem em estudos pioneiros realizados por Maxwell [23] e por Wagner [24]. Eles se baseiam na consideração do solo como um meio composto por uma mistura de duas, três ou mais fases (por exemplo, uma mistura de partículas sólidas, água e ar constitui-se um meio formado pela mistura de três fases). Considera-se cada fase caracterizada por uma permissividade complexa específica, sendo que, a partir da fração de volume de cada componente da mistura e do casamento das condições de fronteira dos campos eletromagnéticos na interface entre uma fase e outra, obtém-se uma expressão da permissividade complexa equivalente do meio, que, dentre outros parâmetros, é função da frequência. Trabalhos que propõem formulações segundo essa abordagem podem ser consultados nas referências [25]-[31].

A despeito desses estudos analíticos, é fundamental enfatizar a dificuldade de se estabelecer uma relação entre o comportamento dos parâmetros elétricos do solo e os diversos fatores de influência (incluindo aqueles decorrentes da variação da frequência), que seja consistente e aplicável a uma ampla variedade de categorias de solo. Isso confere maior importância à medição de tais parâmetros, principalmente em contextos práticos de engenharia elétrica. Ademais, os citados modelos analíticos são geralmente baseados em uma série de variáveis (porosidade, tamanho e formato dos grãos, umidade etc.), cuja medição, além de adicionar complexidades desnecessárias no contexto de aplicação deste trabalho, pode conter erros que, somados, reduzem a confiabilidade e dificulta a utilização de tais modelos.

Considerando o exposto, este capítulo não aborda trabalhos de cunho puramente analítico, mas, essencialmente, aqueles que propõem técnicas de medição ou que desenvolvem formulações baseadas em dados experimentais. Além disso, a ênfase é na descrição de trabalhos que tenham aplicação direta ou indireta na engenharia elétrica e que apresentem estudos dentro ou próximo da faixa de frequências de interesse principal desta tese, que corresponde ao espectro característico de descargas atmosféricas (~100 Hz até alguns MHz).

2.2 - Dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo: Histórico

2.2.1 - Introdução

O interesse e a necessidade de se medir os parâmetros eletromagnéticos do solo surgiram em um contexto de aplicação da então recente teoria eletromagnética nos desenvolvimentos tecnológicos no início do século XX. Em seu trabalho, Maxwell previu a existência de ondas eletromagnéticas (EM), porém se deteve, basicamente, no estudo da luz. As primeiras tentativas de se gerar outras ondas EM que não a luz foram realizadas por G. F. FitzGerald e O. Lodge, entre os anos de 1879 e 1883 [32]. Apesar de conseguirem produzir algumas ondas, eles não tinham idéia de como detectá-las. Esse feito coube a H. Hertz que, entre 1887 e 1888, apresentou um protótipo experimental, o qual permitia transmitir e receber ondas EM entre pequenas distâncias [32], [33].

Na tentativa de se transmitir ondas eletromagnéticas entre distâncias cada vez maiores e, também, com a utilização de frequências cada vez mais elevadas, notou-se que o solo exercia uma influência significativa na propagação de tais ondas. As primeiras verificações do efeito do solo foram de cunho experimental. Por exemplo, em 1905, por meio da variação da altura de uma antena emissora em relação ao solo, J. S. Sachs constatou que a intensidade da onda detectada por uma antena receptora era alterada [34]. Um trabalho teórico sobre o efeito do solo na propagação de ondas EM foi conduzido por A. Sommerfeld em 1909 [35]. Este trabalho constitui-se uma das principais referências sobre o tema até os dias atuais e estabeleceu de forma definitiva que o solo apresenta influência na propagação de ondas EM

sobre ele, caracterizada pela atenuação e defasamento de tais ondas. Ainda, deixou claro que a intensidade desses efeitos depende basicamente das características eletromagnéticas do solo, nomeadamente sua condutividade e permissividade elétricas e permeabilidade magnética.

Nesse sentido, no âmbito da engenharia elétrica aplicada, a obtenção dos parâmetros eletromagnéticos do solo para diversas frequências foi inicialmente motivada pela necessidade de se avaliar a viabilidade de transmissão de ondas eletromagnéticas entre pontos distantes. Posteriormente, com o advento das estações de telecomunicações e do desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência, constatou-se a importância de conexões a terra por meio de sistemas de aterramento. Sabe-se que a impedância de aterramento depende, além da geometria dos eletrodos, fundamentalmente das características eletromagnéticas do solo. Assim, verificou-se a necessidade de caracterização dos parâmetros do solo ao longo do espectro das frequências representativas dos principais fenômenos elétricos que podem solicitar os aterramentos elétricos [36].

Nas subseções seguintes são descritos os principais trabalhos que abordam a variação dos parâmetros elétricos do solo, basicamente pela aplicação de técnicas experimentais.

2.2.2 - Estado da arte

A maior parte das metodologias existentes na literatura para medição da variação dos parâmetros elétricos do solo, na faixa de interesse para avaliação de transitórios associados às descargas atmosféricas (100 Hz a alguns MHz), emprega técnicas laboratoriais. O princípio dessas técnicas consiste na medição da impedância de uma cuba de dimensões e formato bem definidos, preenchida com uma amostra de solo. Se o tamanho da amostra for suficientemente pequeno e desprezando-se as eventuais impedâncias parasitas da própria cuba, pode-se representar a impedância da amostra de solo $Z_s(\omega)$ como a composição de uma capacitância $[C_s(\omega)]$ em paralelo com uma condutância $[G_s(\omega)]$, conforme ilustra a Fig. 2.1, dada por:

$$\frac{1}{Z_s(\omega)} = G_s(\omega) + j\omega C_s(\omega) \quad (2.1)$$

Uma vez que a geometria da cuba que contém a amostra é conhecida, determina-se, para cada frequência de interesse, a condutividade elétrica diretamente de $G_s(\omega)$ e a permissividade elétrica diretamente de $C_s(\omega)$. Vale frisar que, para cada frequência, é válida a seguinte relação:

$$\frac{G_s(\omega)}{C_s(\omega)} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.2)$$

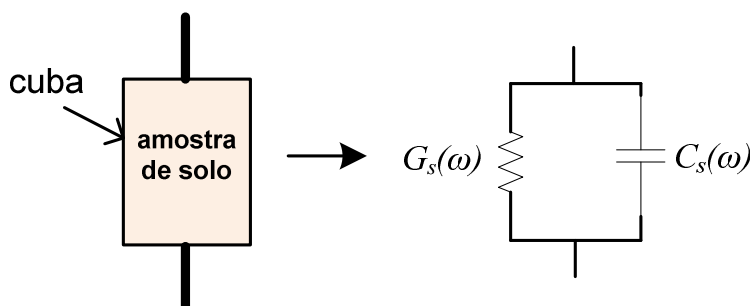


Fig. 2.1 - Amostra de solo modelada por um circuito RC de impedância equivalente Z_s .

A medição de Z_s pode ser realizada de várias formas. Nos primeiros trabalhos sobre o tema, era bastante comum a utilização de pontes de resistores e de capacitores [10], [37]. Em estudos mais recentes, têm-se adotado osciloscópios analógicos [36] e digitais [14], sendo também usual o emprego de analisadores de impedância [38], [39].

Apesar de existirem registros de medições laboratoriais já por volta de 1930 (vide referências [40], [41]), o primeiro conjunto de medições sistemáticas de um grande número de amostras de solo foi apresentado em 1933 por R. L. Smith-Rose [10]. Neste trabalho, o autor utilizou um pequeno capacitor cilíndrico tendo como dielétrico uma amostra de solo sob teste. A medição da capacitância foi realizada com o auxílio de um circuito ressonante composto por uma bobina e um capacitor de valor variável. A partir do valor da capacitância do recipiente preenchido com a amostra e do conhecimento desse mesmo parâmetro tendo o ar como dielétrico, determinou-se a permissividade relativa do solo para a frequência em análise. Da relação entre a condutância G e a capacitância C do recipiente, expressa pela equação (2.2), determinou-se a condutividade do solo¹ para a mesma frequência. Esse procedimento foi aplicado por Smith-Rose a um grande número de amostras de doze regiões distintas da Inglaterra e da Escócia. A faixa de frequências de interesse imediato do trabalho situa-se entre 100 kHz e 10 MHz, com fins de aplicações ligadas à propagação de ondas EM. De um modo geral, os resultados indicam um crescimento da condutividade com o aumento da frequência e uma redução da permissividade relativa, que tende para valores entre 30 e 15 na maior parte dos casos para frequência de 10 MHz. Os resultados finais foram apresentados na forma de tabelas e de acordo com o autor, dentro de certos limites, poderiam ser utilizados para se estimar a ordem de grandeza dos parâmetros elétricos do solo em algumas frequências específicas. Adicionalmente, Smith-Rose estendeu as medições de algumas amostras para faixa de baixas frequências até cerca de 50 Hz. Nesses casos, apesar de o comportamento qualitativo ser mantido, observou-se valores bastante elevados da permissividade relativa (superiores a 10^5) no entorno da frequência de 50 Hz, os quais foram considerados “aparentemente anormais”.

Os valores elevados de permissividade em baixas frequências medidos por Smith-Rose foram motivo de certa controvérsia. Não se sabia ao certo se esses valores realmente refletiam as propriedades dielétricas do solo ou se haviam sido produzidos artificialmente pelo método de medição em laboratório. O próprio Smith-Rose sugeriu que tais valores poderiam estar associados a uma película fina de polarização formada na superfície dos eletrodos de medição [10]. Medições posteriores realizadas por outros pesquisadores também indicaram valores elevados de permissividade em frequências mais baixas e sugeriram que estes eram advindos de efeitos de polarização na interface de contato entre os eletrodos e a amostra [42], [43].

A despeito da importância reduzida da permissividade na faixa de baixas frequências (considere-se, como referência, frequências inferiores a 10 kHz), em que a corrente de condução prevalece, estudos adicionais foram realizados para avaliação dos eventuais erros decorrentes do fenômeno de polarização interfacial nos eletrodos. Esse fenômeno guarda semelhança com o mecanismo de polarização de Maxwell-Wagner ou interfacial. Seja, por exemplo, uma cuba cilíndrica preenchida com uma amostra de solo e eletrodos de corrente e potencial nas extremidades. Em geral, o tipo de condução no eletrodo (metálico, na maior parte das aplicações) é distinto daquele na amostra; nesta predominantemente iônica, naquele eletrônica. Isso resulta em um acúmulo de íons na interface amostra/eletrodo, quando uma corrente flui pela cuba, conforme ilustra a Fig. 2.2. Tal acúmulo gera dois efeitos principais. Primeiro, tem-se uma polarização adicional resultante da separação de cargas entre os eletrodos, que se soma aos mecanismos de polarização naturais presentes na amostra de solo. O efeito básico dessa polarização adicional se traduz em um aumento da capacitância medida

¹ A condutividade σ é o inverso da resistividade, $\sigma=1/\rho$. Em muitos trabalhos é comum descrever os resultados em termos da condutividade e da não resistividade.

e, conseqüentemente, da permissividade associada, que não reflete necessariamente as reais propriedades dielétricas da amostra em teste. Segundo, essa mesma separação de cargas entre os eletrodos gera uma diferença de potencial adicional, que tende a aumentar o valor da impedância total medida. Esse aumento pode influenciar tanto os valores de permissividade quanto de resistividade detectados. Aparentemente, esse erro é tão mais significativo quanto menores forem os níveis de tensão aplicados à cuba. Ressalte-se que o processo de polarização interfacial, que envolve o deslocamento de íons pela amostra até a interface dos eletrodos, é relativamente lento, por isso importante em frequências mais baixas.

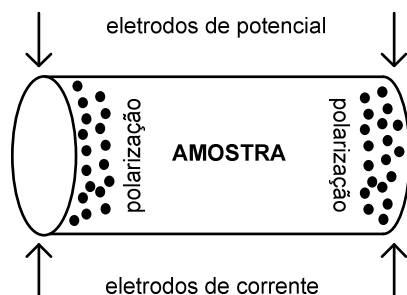


Fig. 2.2 - Erro introduzido devido à polarização nos eletrodos de corrente.

Dados os erros associados aos efeitos de polarização dos eletrodos e considerando que tais efeitos implicam desvios mais pronunciados nas medições de tensão, um novo arranjo, diferente daquele ilustrado na Fig. 2.2, foi proposto por volta do início da década de 1960. Esse arranjo, representado de forma esquemática na Fig. 2.3, adota uma configuração de 4 eletrodos², em que os de potencial são afastados da região de polarização próxima aos de corrente. Uma vez que o circuito de medição de tensão possui impedância elevada, a corrente que flui pelos eletrodos de potencial é muito reduzida e, portanto, os efeitos de polarização são pouco significativos. Assim, em princípio, o arranjo de 4 eletrodos permite a realização de uma medição na qual os desvios em decorrência da polarização na interface amostra/eletrodo são moderados. Uma proposta de instrumentação utilizando componentes da época para medições de impedância de amostras, segundo a técnica de 4 eletrodos, pode ser encontrada em [44]. Apesar da idéia relativamente simples, a técnica descrita introduz algumas complicações no processo de medição, basicamente associadas ao acoplamento eletromagnético entre os circuitos de tensão e de corrente. Além disso, complexidades adicionais relativas à instrumentação adotada neste tipo de medição foram fatores que colaboraram para sua utilização relativamente restrita nos anos seguintes à sua divulgação.

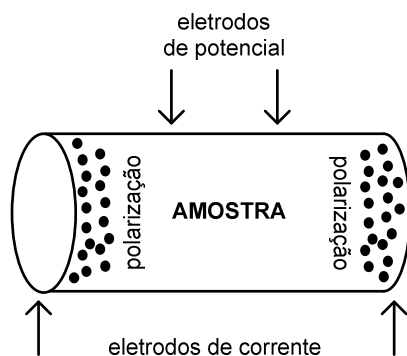


Fig. 2.3 - Novo arranjo proposto para minimização dos erros introduzidos pelo efeito de polarização interfacial.

² O arranjo da Fig. 2.2 é comumente chamado de arranjo ou método de 2 eletrodos e o da Fig. 2.3 de arranjo ou método de 4 eletrodos.

De certo modo, isso colaborou para a busca de outras soluções para o problema de medição introduzido pela polarização na interface amostra/eletrodo, no método de 2 eletrodos. Conforme já mencionado, a causa básica da polarização interfacial é a diferença entre os mecanismos de condução nos eletrodos, tipicamente metálicos, e no solo. Por outro lado, se for possível desenvolver eletrodos especiais, em que se processem algumas reações químicas de tal forma que exista uma troca de portadores de carga através da interface, o acúmulo de cargas nessa região pode ser reduzido. Em 1959, T. R. Madden e D. J. Marshall apresentaram um estudo preliminar em que foi avaliado o efeito da utilização de diversos tipos de eletrodos, alguns deles envolvidos em eletrólitos, na polarização resultante na interface entre o eletrodo e a amostra de solo sob teste [45]. Esse trabalho tinha motivações ligadas à geologia, especificamente a prospecção de minerais. A aplicação de procedimento similar, com fins de minimização dos erros relativos à polarização interfacial na medição da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, foi realizada por J. H. Scott *et al.*, entre 1966 e 1967 [37], [46]. Nesse trabalho, os pesquisadores analisaram uma série de eletrodos envolvidos por diferentes tipos de eletrólitos, com o objetivo de verificar os erros resultantes na medição de amostras de rocha e de solo devido ao efeito de polarização interfacial. O desvio advindo da aplicação de cada eletrodo desenvolvido foi avaliado efetuando-se a medição da permissividade relativa de amostras de solo de diferentes comprimentos. Se não existir erro devido à polarização, a permissividade medida para amostras de comprimento distinto deve ser aproximadamente igual, com pequenas diferenças em decorrência da não homogeneidade da amostra. Pela aplicação sistemática desse procedimento, um eletrodo de platina envolvido em solução de prata e cloreto de prata foi selecionado como o mais adequado, dentre as várias combinações investigadas. Com esse eletrodo foram efetuadas medições de diversas amostras de rocha e de solo, na faixa de frequências de 100 Hz a 1 MHz e tendo em conta distintos níveis de umidade artificialmente alterados em laboratório. Empregaram-se cubas cilíndricas, sendo a impedância medida com o auxílio de pontes de capacitores e de resistores. A partir dos dados de medição de diversas amostras e da aplicação do método de mínimos quadrados, foram obtidas as seguintes relações empíricas que permitem estimar a condutividade e a permissividade relativa do solo em uma dada frequência em função da condutividade medida em 100 Hz [46]:

$$\sigma(f) = 10^K \quad (2.3a)$$

$$K = 0,028 + 1,098 \log(\sigma_0) - 0,068 \log(f) + 0,036 \log^2(\sigma_0) + \\ -0,046 \log(f) \log(\sigma_0) + 0,018 \log^2(f) \quad (2.3b)$$

$$\varepsilon_r(f) = 10^D \quad (2.4a)$$

$$D = 5,491 + 0,946 \log(\sigma_0) - 1,097 \log(f) + 0,069 \log^2(\sigma_0) + \\ -0,114 \log(f) \log(\sigma_0) + 0,067 \log^2(f) \quad (2.4b)$$

Nas equações (2.3) e (2.4) f é a frequência (Hz), σ_0 é a condutividade em 100 Hz (mS/m), $\sigma(f)$ é a condutividade na frequência f em mS/m e $\varepsilon_r(f)$ é a permissividade relativa na frequência f .

A técnica explorada por Scott *et al* é uma alternativa para minimização dos erros de medição devido à polarização interfacial inerente ao método de dois eletrodos. No entanto, deve-se ressaltar que a escolha do tipo de eletrodo depende razoavelmente do material sob investigação. Ao selecionar determinada combinação de eletrodo e solução iônica, supõe-se que a maior parte dos portadores de carga do meio sob teste reage quimicamente com os íons desta solução. Ademais, a construção de tais eletrodos é complexa e podem existir dificuldades de contato com a amostra, o que acarretaria a introdução de lacunas (*gaps*) de ar

entre a amostra e o eletrodo. Essas lacunas podem gerar capacitâncias adicionais, da mesma ordem de grandeza da amostra [37]. Portanto, a utilização da técnica descrita deve ser feita com bastante cautela.

Também, vale destacar que as medições apresentadas por Scott *et al* restringem-se à frequência superior de 1 MHz. Em estudos associados à proteção contra descargas atmosféricas, dependendo do tipo de fenômenos analisado (primeiras descargas de retorno ou descargas subsequentes), pode ser necessário o conhecimento dos parâmetros do solo para faixas um pouco superiores de frequência. Ainda é importante mencionar que a variação artificial da umidade das amostras de solo em laboratório pode provocar desvios na medição e os resultados não corresponderem àqueles que seriam obtidos em condições reais de campo. No caso das medições realizadas por Scott *et al*, esse aspecto é particularmente importante para solos de alta resistividade, que foram obtidos somente na condição de amostras muito secas.

As curvas experimentais obtidas por Scott *et al* motivaram, anos depois, em 1975, o desenvolvimento de um modelo de solo pelos pesquisadores C. L. Longmire e K. S. Smith [47]. A idéia fundamental do modelo proposto parte da relação entre a densidade de corrente total e o campo elétrico no domínio da frequência, ou seja:

$$\vec{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad (2.5)$$

Tendo em conta um volume unitário de solo, define-se a admitância $Y = (\sigma + j\omega\epsilon)$ e assume-se que Y pode ser representada por uma rede RC, conforme ilustra a Fig. 2.4. Uma vez determinados os parâmetros dessa rede, é possível inferir a condutividade e a permissividade do solo a partir das partes real e imaginária da admitância, respectivamente. Com base nessas idéias fundamentais, as seguintes equações foram obtidas para a condutividade (σ) e a permissividade (ϵ_r) [47]:

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 + \epsilon_0 \sum_{n=1}^N a_n \beta_n \frac{(\omega/\beta_n)^2}{1 + (\omega/\beta_n)^2} \quad (2.6)$$

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \sum_{n=1}^N \frac{a_n}{1 + (\omega/\beta_n)^2} \quad (2.7)$$

em que $\epsilon_\infty = C_\infty/\epsilon_0$, $\sigma_0 = 1/R_0$, $a_n = C_n/\epsilon_0$, e $\beta_n = (R_n C_n)^{-1}$.

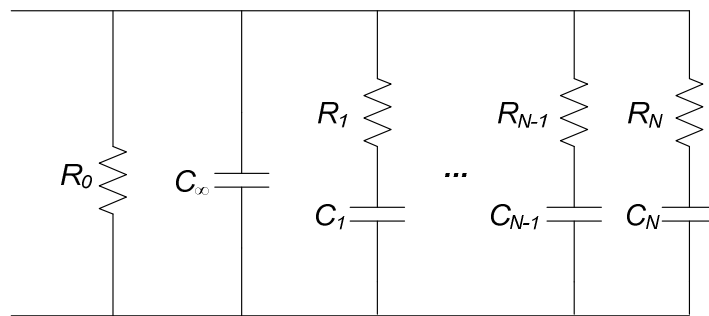


Fig. 2.4 - Rede RC. A resistência R_0 corresponde à resistência do circuito para frequência 0 Hz e está relacionada com a condutividade do solo em baixas frequências. A capacitância C_∞ corresponde à capacitância para frequência infinita e está relacionada com a permissividade do solo na faixa de altas frequências.

Os parâmetros das equações (2.6) e (2.7) foram determinados de modo a ajustá-las às curvas experimentais obtidas por Scott *et al*. Adicionalmente, com o intuito de estender os

limites de aplicação do modelo proposto, Longmire e Smith utilizaram dados de medição de amostras de concreto para faixa de frequência de 10^6 a 2×10^8 Hz fornecidos por Wilkenfeld³. Ainda, baseando-se em “boas medições”, os autores extrapolaram as curvas de medição até a frequência de 10^{12} Hz. A partir dessas considerações e empregando-se 13 ramos RC ($N=13$), os seguintes parâmetros foram determinados [47]:

$$\varepsilon_{\infty} = 5 \quad (2.8)$$

$$\beta_n = \left(\frac{w}{10}\right)^{1,28} 10^{n-1} \quad (2.9)$$

$$\sigma_0 = 8 \times 10^{-3} \left(\frac{w}{10}\right)^{1,54} \quad (2.10)$$

ε_{∞} corresponde à permissividade relativa na faixa superior do espectro, 10^{12} Hz, determinada por meio da extrapolação das curvas. w é o valor de umidade (em % do volume) do solo. σ_0 é a condutividade em baixas frequências, descrita em termos da umidade w e obtida por um ajuste dos dados de Scott *et al.* Os valores dos coeficientes a_n estão apresentados na Tabela 2.1. O circuito obtido pela aplicação das equações (2.8) a (2.10) e dos coeficientes da Tabela 2.1 foi chamado de “circuito ou modelo universal do solo” [47].

Tabela 2.1 - Coeficientes a_n .

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a_n	$3,4 \cdot 10^6$	$2,74 \cdot 10^5$	$2,58 \cdot 10^4$	$3,38 \cdot 10^3$	$5,26 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^2$	$2,72 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^1$	4,8	2,17	0,98	0,392	0,173

Embora a representação do solo por meio de uma rede RC seja fisicamente consistente, a obtenção dos parâmetros do modelo por Longmire e Smith foi baseada em uma série de hipóteses questionáveis. Primeiro, a utilização de amostras de concreto não é representativa da estrutura do solo, sobretudo tendo-se em conta a proposição de um “modelo universal”. Também, note-se que a dependência da frequência dos parâmetros é função unicamente da umidade do solo (além da própria frequência), o que é fisicamente inconsistente. As propriedades do solo dependem de diversos outros parâmetros além do conteúdo de água, por exemplo, dos sais presentes no meio. De acordo com o próprio trabalho de Scott *et al.*, a dependência dos parâmetros do solo não é uma função simples da umidade e seria melhor descrita em função da condutividade (ou resistividade) em baixa frequência, que sintetiza uma série de características do solo, incluindo a sua umidade. Além disso, em um contexto prático de engenharia elétrica, é usual a medição da resistividade em baixa frequência, mas não da umidade do solo.

Apesar de o comportamento do solo para frequências superiores a alguns MHz não ser relevante para as aplicações de interesse desta tese, é importante mencionar outro desvio cometido por Longmire e Smith. Definitivamente, a extrapolação dos dados de medição para frequências superiores, no caso até 10^{12} Hz, não é fisicamente consistente. Observe-se que, para frequências muito elevadas, superiores a 10^9 Hz, outros processos físicos de polarização podem ocorrer no meio, sendo que tais processos não estão contemplados pelos dados disponíveis de medição (nem mesmo pelos dados de concreto). A tentativa de inferir o comportamento do solo para essas faixas de frequência por simples extrapolação de curvas de medição pode resultar em erros significativos.

³ Vale salientar que esses dados de concreto são referenciados no trabalho de Longmire e Smith como uma “comunicação particular” (*private communication*) estabelecida com J. Wilkefeld. Não há informações de amplo acesso disponíveis sobre a natureza desses dados muito menos a respeito da metodologia de medição empregada.

Em 1987, Visacro e Portela apresentaram alguns resultados de medições da variação da resistividade e da permissividade de três tipos de solo, ao longo da faixa de frequências de 40 Hz a 2 MHz [36]. Foram utilizadas cubas de medição constituídas de tubos cilíndricos de alumínio, concêntricos e de mesmo comprimento, separados por uma distância de 15 mm, onde as amostras de solo foram densamente compactadas. Empregaram-se cubas de dois comprimentos: 0,19 m e 0,95 m. Nos ensaios foram considerados valores de umidade entre 15% e 2,5%, variados artificialmente pela adição de água destilada. Aplicaram-se tensões senoidais (amplitudes de 8 a 20 V) entre as faces condutoras e mediu-se a queda de tensão e a corrente resultantes na amostra de solo. Por meio da amplitude e do defasamento entre essas duas grandezas, calculou-se a impedância da amostra e, a partir da geometria da cuba, foram determinados os parâmetros resistividade e permissividade do solo, supondo-se um circuito RC para a amostra. Em algumas medições foi detectado um efeito de polarização interfacial, que resulta em valores muito elevados de permissividade relativa em baixas frequências ($\sim 10^6$ em alguns casos), apesar de tenderem para uma faixa entre 10 e 100 na parte superior do espectro analisado. Um procedimento aproximado para minimização dos efeitos de polarização nos resultados é proposto, baseado na dedução desse efeito pela comparação da medição de amostras de diferentes comprimentos. Da aplicação desse procedimento e da análise complementar dos resultados de medição obtidos, as seguintes fórmulas simples foram sugeridas para estimar a dependência da frequência da resistividade e da permissividade do solo:

$$\rho \approx \rho_{100\text{Hz}} \left(\frac{100}{f} \right)^{0,072} \quad (2.11)$$

$$\epsilon_r \approx 2,34 \times 10^6 (\rho_{100\text{Hz}})^{-0,535} \cdot f^{-0,597} \quad (2.12)$$

sendo $\rho_{100\text{Hz}}$ a resistividade medida em 100 Hz em Ωm e f a frequência em Hz. Como descrito em [48], as expressões (2.11) e (2.12) foram obtidas pelo manuseio das relações de primeira ordem originalmente propostas por Scott *et al* em [37]. A avaliação da efetividade dessas expressões foi realizada comparando-se as estimativas fornecidas por elas com os resultados de medição das amostras analisadas. De acordo com os autores, os erros no cálculo da permissividade são inferiores a 20% para baixas frequências, caindo para cerca de 10% a partir de 20 kHz. No caso da resistividade, os desvios são reduzidos quando considerados os valores extremos superior (1 MHz) e inferior (100 Hz) do espectro, embora apresentem um crescimento na faixa de kHz.

Em função do pequeno número de amostras analisadas, os autores optaram por não generalizar os resultados obtidos. Por outro lado, vale realçar que o trabalho citado foi desenvolvido em um contexto de aplicação na avaliação de transitórios em sistemas de aterramento, particularmente aqueles associados à incidência de descargas atmosféricas. Parece que esse foi o primeiro trabalho a tratar do tema sob essa ótica e destacar a importância de se determinar um modelo consistente do solo, que contemple a variação de seus parâmetros com a frequência, em análises envolvendo o comportamento impulsivo de aterramentos elétricos.

Entre os anos de 1997 e 2002, Portela apresentou uma série de trabalhos que descreve uma nova metodologia laboratorial de medição da dependência da frequência dos parâmetros do solo [14], [49]-[51]. A faixa investigada foi de 100 Hz a 2 MHz, com interesse na avaliação de transitórios em sistema de aterramentos solicitados por correntes advindas de descargas atmosféricas. Segundo [14], os aspectos básicos do procedimento de medição devem: i) Assegurar a manutenção da consistência e da umidade naturais do solo, com uma amostra “idêntica” ao solo natural; ii) Evitar a influência de efeitos da superfície, tais como

sol, vento e vegetação; iii) Evitar efeitos de heterogeneidade do solo local; iv) Limitar os erros de medição devido às condições de contato entre os eletrodos de medição e a amostra. Considerando esses aspectos, adotaram-se procedimentos especiais para coleta das amostras, segundo cada tipo específico de solo [14]. As medições foram realizadas em cubas cilíndricas ou em forma de paralelepípedo, dependendo do procedimento de coleta. Empregaram-se dois eletrodos de corrente (EC) nas extremidades da amostra e dois eletrodos de potencial (EP) no interior, conforme exemplo de geometria indicada na Fig. 2.5. Por meio de um gerador de frequência variável, correntes foram injetadas na amostra. A partir das medições de corrente (via R_{shunt} , Fig. 2.5) e da queda de tensão entre os eletrodos de potencial, e dada a geometria da cuba, determinaram-se os parâmetros resistividade e permissividade da amostra de solo.

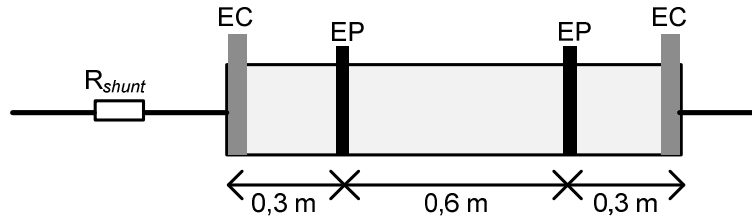


Fig. 2.5 - Representação de um exemplo de cuba e esquema de eletrodos utilizados para medição da variação da resistividade e da permissividade com a frequência - Adaptado de [14].

Para análise dos dados de medição, Portela empregou uma abordagem física similar àquela proposta por Longmire e Smith [47] e supôs que o solo pode ser representado por uma rede de ramos RC [49]. A principal diferença é que, ao invés de adotar uma abordagem discreta, Portela assumiu uma distribuição contínua de ramos RC. Esses desenvolvimentos, detalhados em [49], resultaram em um modelo para o solo da seguinte forma:

$$\sigma + j\omega\epsilon = K_0 + K_1 \cdot \omega^\alpha \quad (2.13)$$

sendo K_0 uma constante real, independente da frequência, K_1 uma constante complexa, dependente da frequência e α uma constante real entre 0 e 1. A partir de uma análise estatística de 68 amostras detalhada em [50] e considerando o modelo básico definido pela equação (2.13), apresentou-se em [51] a seguinte formulação para cálculo da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo:

$$\sigma + j\omega\epsilon = \sigma_0 + \Delta i \left[\cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) + j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \times 10^6} \right)^\alpha \quad (2.14)$$

em que σ_0 é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) e α e Δi são parâmetros que podem ser determinados pela análise dos dados de medição obtidos pela aplicação da metodologia proposta ou podem ser adotados valores medianos sugeridos em [51], quais sejam $\alpha=0,706$ e $\Delta i=11,71$ mS/m.

O procedimento de medição e o tratamento físico descritos por Portela são ambos rigorosos e consistentes. Contudo, como ficará claro em alguns pontos desta tese, a aplicação da formulação (2.14) proposta por Portela, considerando valores medianos de α e Δi , implica um comportamento dos parâmetros do solo que leva a erros na resposta de aterramentos elétricos frente a correntes impulsivas, tendo como referência resultados experimentais. Uma hipótese para esses desvios são erros introduzidos em decorrência da polarização interfacial, a despeito da utilização do esquema de 4 eletrodos. Outra hipótese se refere à modelagem estatística dos parâmetros, que pode não ser a mais adequada dependendo do número de amostras. Esse último aspecto é discutido no capítulo 6 desta tese.

2.3 - Considerações finais

Apresentou-se uma breve descrição de alguns dos principais trabalhos que abordam a medição da variação dos parâmetros do solo com a frequência e/ou que propõem formulações para se estimar essa variação com base em resultados de medição.

De modo geral, os métodos empregados para medição da dependência da frequência dos parâmetros do solo na faixa de interesse deste trabalho, 100 Hz a alguns MHz, baseiam-se em técnicas laboratoriais. Os métodos laboratoriais têm como atrativo principal a possibilidade de realização de um grande número de medições sob situações controladas. No entanto, a representatividade das medições laboratoriais depende de cuidados especiais, notadamente a minimização dos erros introduzidos pelos efeitos de polarização na interface eletrodo/amostra e a manutenção da amostra nas condições naturais do solo.

O fenômeno de polarização interfacial provoca desvios mais significativos na medição da permissividade, sobretudo na faixa de baixas frequências, e tem seu efeito reduzido na faixa superior do espectro. Desde que sejam tomadas certas precauções, os erros introduzidos pela polarização interfacial podem ser minimizados de modo que o seu efeito global seja desprezível em termos práticos, principalmente na faixa de frequências em que a permissividade possui papel relevante.

Em relação à manutenção da amostra de solo em suas condições naturais de campo, técnicas específicas devem ser adotadas para este fim. Note-se que esse é um aspecto fundamental. Uma vez modificadas as características naturais do solo, as medições realizadas em laboratório podem não corresponder ao comportamento esperado para o mesmo solo em condições reais de campo. Nesse sentido, merece atenção especial aqueles casos em que a umidade da amostra de solo é artificialmente modificada em laboratório, sobretudo naquelas condições em que ela é drasticamente reduzida para se obter amostras de valor elevado de resistividade.

Com caráter ilustrativo, a Fig. 2.6 apresenta uma comparação dos resultados de dependência da frequência da resistividade (ρ) e da permissividade relativa (ϵ_r) obtidos pela aplicação das formulações propostas por Scott *et al* [37], Longmire e Smith [47], Visacro [48] e Portela [51], e considerando valores de resistividade em baixa frequência (100 Hz) aproximadamente iguais a (a) 300 Ωm , (b) 1000 Ωm e (c) 3000 Ωm . Os resultados estão apresentados para a faixa de 100 Hz a 1 MHz.

No caso da resistividade, nota-se que as formulações apresentam o mesmo comportamento qualitativo, qual seja, a redução da resistividade com o aumento da frequência. Porém, são observadas diferenças em termos dos valores fornecidos por cada formulação ao longo do espectro e, também, com relação aos valores de resistividade na faixa superior do espectro. De modo geral, a formulação proposta por Portela indica reduções mais pronunciadas da resistividade com o aumento da frequência.

No caso da permissividade relativa, observa-se que as formulações também apresentam um comportamento qualitativo similar, qual seja, a redução da permissividade com o aumento da frequência. De modo geral, na faixa de alguns kHz, a permissividade relativa apresenta valores elevados, da ordem de $\sim 10^3$. À medida que a frequência aumenta, a permissividade diminui e tende para valores entre 30 e 10 na faixa superior do espectro, com exceção da formulação de Portela que indica valores razoavelmente elevados ao longo de todo o espectro e tende na faixa superior para valores maiores do que 100.

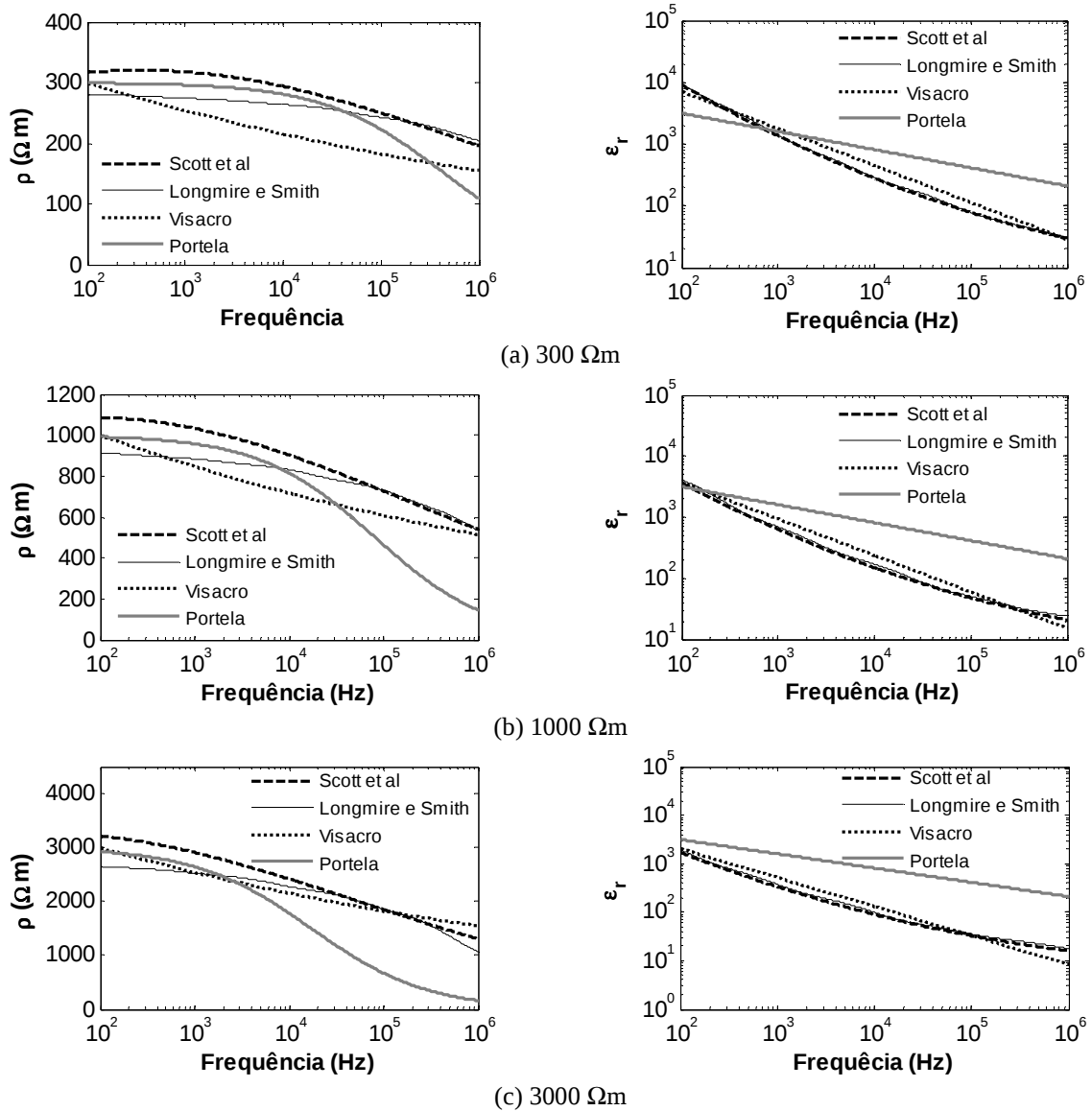


Fig. 2.6 - Comparação entre os resultados providos pelas formulações propostas por Scott *et al* [37], Longmire e Smith [47], Visacro [48] e Portela [51] para se estimar a dependência da frequência da *resistividade* ρ (**esquerda**) e da *permissividade relativa* ϵ_r (**direita**), considerando valores de resistividade em baixa frequência aproximadamente iguais a (a) 300 Ωm , (b) 1000 Ωm e (c) 3000 Ωm .

As diferenças observadas entre o comportamento dos parâmetros do solo estimado pelas formulações disponíveis na literatura levam ao seguinte questionamento: *qual é a formulação adequada para se ter em conta a dependência da frequência dos parâmetros do solo, considerando as aplicações de interesse deste trabalho?* Uma resposta rigorosa a essa indagação não é trivial e demanda uma análise minuciosa de todos os aspectos relevantes associados a cada formulação individual. Por outro lado, parece inócua uma discussão sobre a consistência das formulações apresentadas, já que, sem exceção, observa-se a ausência de procedimentos consistentes de validação dos resultados providos pelos trabalhos citados.

Uma contribuição adicional é necessária ao tema.

3. NOVA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO E DEMONSTRAÇÃO DA RELEVÂNCIA DESSE EFEITO NO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE ATERRAMENTOS

3.1 - Introdução

De acordo com o capítulo 2, é difícil decidir qual abordagem adotar para se ter em conta a dependência da frequência dos parâmetros do solo, uma vez que nem os métodos laboratoriais descritos nem as formulações associadas foram validados experimentalmente tendo em vista as aplicações de interesse.

Tal cenário motivou o desenvolvimento de uma nova metodologia para determinação da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, a partir de medições realizadas diretamente em condições de campo. Dentre outros aspectos, essa metodologia possui o diferencial de possibilitar a determinação da resposta em frequência do solo em condições naturais.

Os fundamentos desta nova metodologia são descritos neste capítulo. Também, são apresentados resultados experimentais de validação da metodologia proposta e que demonstram a relevância do efeito da dependência dos parâmetros do solo no comportamento transitório de aterramentos. Os desenvolvimentos originais deste capítulo correspondem basicamente a três publicações do autor [52], [53], [54].

3.2 - Metodologia proposta

3.2.1 - Aspectos teóricos básicos

O princípio básico da técnica proposta consiste na consideração de uma cuba hemisférica enterrada no solo investigado, conforme ilustra de forma esquemática a Fig. 3.1. Seja a injeção de uma onda de corrente impulsiva $i(t)$ na cuba e as elevações de potencial resultantes no nível do solo, por exemplo, nos pontos r_1 [$v_1(t)$] e r_2 [$v_2(t)$], como indicado na Fig. 3.1. Dada a configuração hemisférica, é bastante razoável supor que a corrente que dispersa para o solo deste eletrodo possui apenas caráter divergente, sendo composta por uma parcela de natureza condutiva e outra capacitiva, cujas densidades estão relacionadas ao campo elétrico, no domínio da frequência, por:

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d = \sigma \vec{E} + j\omega\epsilon \vec{E} = (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E} \quad (3.1)$$

em que $\vec{J}$ é a densidade de corrente total, $\vec{J}_c$ é a densidade de corrente de condução e $\vec{J}_d$ é a densidade de corrente capacitiva ou de deslocamento. Na equação (3.1) supõe-se o solo como um meio linear, isotrópico e representado, aproximadamente, por uma resistividade ($\rho = 1/\sigma$) e permissividade (ϵ) elétricas equivalentes.

Tendo em conta a geometria da cuba, a densidade de corrente total pode ser escrita, para cada frequência, em função da transformada de Fourier da corrente impulsiva $i(t)$ injetada:

$$\vec{J} = \frac{I(\omega)}{2\pi r^2} \hat{r} \quad (3.2)$$

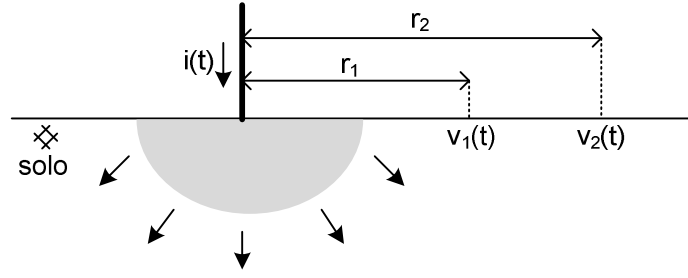


Fig. 3.1 - Cuba hemisférica enterrada no solo sob teste.

sendo $I(\omega) = \mathcal{F}\{i(t)\}$, em que $\mathcal{F}$ indica a transformada direta de Fourier, avaliada em uma frequência específica ω , e $\hat{r}$ é o vetor unitário na direção radial em coordenadas esféricas. Substituindo (3.2) em (3.1), tem-se:

$$\vec{E} = \frac{I(\omega)}{2\pi r^2} \frac{1}{(\sigma + j\omega\epsilon)} \hat{r} \quad (3.3)$$

A diferença de potencial entre r_1 e r_2 pode ser calculada a partir da integral de linha de (3.3) entre esses pontos:

$$V_1(\omega) - V_2(\omega) = - \int_{r_2}^{r_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{I(\omega)}{2\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.4)$$

em que $V_1(\omega) = \mathcal{F}\{v_1(t)\}$ e $V_2(\omega) = \mathcal{F}\{v_2(t)\}$. A partir de (3.4), pode-se determinar a impedância $Z_{12}(\omega)$ da porção de solo compreendida entre os pontos r_1 e r_2 , definida como a razão entre a diferença dos fasores de tensão $V_1(\omega)$ e $V_2(\omega)$ e o fasor da corrente injetada $I(\omega)$:

$$Z_{12}(\omega) = \frac{V_1(\omega) - V_2(\omega)}{I(\omega)} = \frac{1}{2\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.5)$$

e a admitância $Y_{12}(\omega)$ correspondente:

$$Y_{12}(\omega) = \frac{1}{Z_{12}(\omega)} = (\sigma + j\omega\epsilon) \left[2\pi \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)^{-1} \right] \quad (3.6)$$

Assim, uma vez determinada a admitância $Y_{12}(\omega)$ para as frequências de interesse, os parâmetros σ e ϵ podem ser derivados diretamente da equação (3.6) como:

$$\sigma(\omega) = \text{Re}\{Y_{12}(\omega)\} \times k_{\text{geom}} \quad (3.7)$$

$$\epsilon(\omega) = \text{Im}\{Y_{12}(\omega)\} \times \frac{k_{\text{geom}}}{\omega} \quad (3.8)$$

em que $\text{Re}\{Y_{12}(\omega)\}$ e $\text{Im}\{Y_{12}(\omega)\}$ correspondem, respectivamente, às partes real e imaginária da admitância $Y_{12}(\omega)$ e $k_{\text{geom}} = (1/r_1 - 1/r_2)/2\pi$.

3.2.2 - Aspectos práticos

As equações (3.5) a (3.8) sintetizam as bases da metodologia proposta. Resta estabelecer um arranjo de medição que possibilite a determinação da impedância (3.5) ao longo do espectro de interesse. Uma montagem com essa finalidade é ilustrada de forma esquemática na Fig. 3.2. Os principais aspectos práticos associados à implementação dessa montagem em campo são descritos sucintamente a seguir.

Estabelece-se uma tensão impulsiva entre a cuba hemisférica e a malha auxiliar, localizada a uma distância bem superior ao diâmetro do hemisfério (da ordem de 10 vezes ou mais, de modo a evitar que as áreas de influência da cuba e da malha se sobreponham). Isso resulta no fluxo de uma corrente impulsiva entre os eletrodos, medida por meio da queda de tensão através de um resistor em série com o circuito de corrente. Essa corrente causa uma queda de tensão no solo, sendo que parte dela é detectada através de hastes de potencial cravadas em r_1 e r_2 . A medição da corrente e da queda de tensão descritas pode ser realizada simultaneamente por meio de um osciloscópio de dois canais ou, dependendo da topologia de medição, por meio de um osciloscópio de dois ou mais canais isolados, porém com disparo (*trigger*) comum. Uma vez medidas a corrente e a queda de tensão no solo, calcula-se a transformada de Fourier desses sinais e determina-se a variação dos parâmetros do solo com a frequência pela aplicação das equações (3.5) a (3.8).

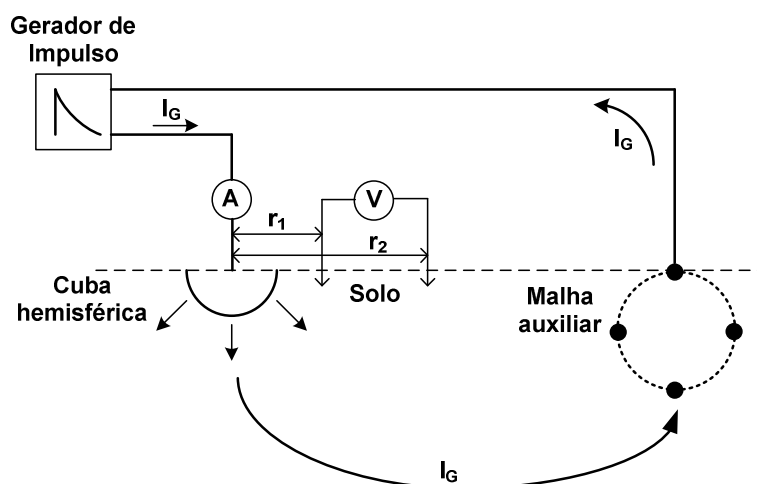


Fig. 3.2 - Montagem implementada para determinação da dependência da frequência dos parâmetros do solo, por meio de medições diretamente em condições de campo.

Os pontos a seguir enfatizam alguns aspectos práticos importantes que devem ser observados na aplicação da metodologia.

1. As dimensões da cuba hemisférica, metálica, devem ser tais que sua área de influência abranja a região do solo de interesse na medição. Como uma primeira estimativa, considerando um solo homogêneo, para o fluxo de uma corrente pela cuba hemisférica (raio a), 50% e 75% da elevação de potencial resultante localizam-se, respectivamente, a distâncias de dois e quatro raios a do centro da cuba. Recomenda-se que a cuba seja enterrada não diretamente no nível do solo, mas a uma pequena profundidade, de forma a se evitar as constantes alterações promovidas na região superficial em decorrência de mudanças climáticas, chuvas etc. Também, é de fundamental importância que, ao enterrá-la, seja garantido um bom contato entre a sua superfície e o solo e, além disso, seja aguardado um tempo mínimo de acomodação de duas ou mais semanas. No momento da medição, deve-se

realizar uma raspagem do solo no entorno da cuba de maneira que ela fique localizada no nível do solo e no mesmo nível da região circunvizinha.

2. Deve-se utilizar um gerador de impulsos com capacidade de injetar níveis de corrente satisfatórios para sensibilização dos instrumentos de medição, porém baixos o suficiente para evitar a ionização do solo (como referência, neste trabalho foram utilizados níveis de corrente entre aproximadamente 1A e 5A). Adicionalmente, é importante que o gerador seja capaz de produzir uma onda ou um conjunto de ondas com pequeno tempo de frente ($\sim 0,25 \mu\text{s}$ ou inferior) e tempo total de duração longo ($\sim 1 \text{ ms}$ ou superior). Isso é essencial para que o solo seja percorrido por uma onda de corrente que apresente uma gama de componentes representativos, desde frequências mais baixas até frequências mais elevadas. Na maior parte das medições apresentadas neste trabalho, foram utilizadas três ondas de corrente: **i)** Denominada lenta, com tempo de frente de $\sim 20 \mu\text{s}$ e tempo total de duração de $\sim 10 \text{ ms}$; **ii)** Denominada rápida, com tempo de frente de $\sim 0,2 \mu\text{s}$ e tempo total de duração variável entre $100 \mu\text{s}$ e $200 \mu\text{s}$; **iii)** Denominada ultra-rápida, com tempo de frente de $\sim 0,1 \mu\text{s}$ e tempo total de duração de $\sim 10 \mu\text{s}$. A escolha desses tempos de frente e de duração foi feita com base na faixa de frequências de interesse deste trabalho. Essas ondas apresentam componentes de frequência complementares e permitem abranger uma ampla faixa, desde frequências mais baixas (100 Hz) até frequências mais elevadas (alguns MHz). Vale salientar que a utilização de um conjunto de ondas e não uma onda única permite uma melhora nos resultados obtidos e, além disso, minimiza a dificuldade de medição e de armazenamento de uma única onda com tempo de frente curto e duração total longa. No item 3.2.3 são apresentados mais detalhes sobre as formas de onda injetadas.

3. A impedância total do circuito, composta basicamente pelas impedâncias de aterramento da cuba e da malha auxiliar e impedância de surto dos cabos de conexão, pode limitar os níveis de corrente fornecidos pelo gerador. Desse modo, torna-se indispensável que a malha auxiliar tenha a menor impedância possível, de maneira a reduzir a impedância total do circuito e evitar que a sensibilização dos instrumentos de medição seja comprometida. Na maior parte dos casos, uma configuração composta por um conjunto de hastes é suficiente para construção da malha auxiliar. Em algumas situações de solos de altíssima resistividade, também pode ser necessário atuar nos cabos de conexão, empregando-se uma conexão com dois ou mais condutores em paralelo de modo a reduzir a impedância de surto.

4. É importante que os cabos dos circuitos de medição de corrente e de tensão sejam posicionados ortogonalmente. Isso minimiza os efeitos de acoplamento eletromagnético entre esses circuitos e reduz os erros introduzidos na medição em função de tensões induzidas. Na medição da queda de tensão, a escolha dos espaçamentos r_1 e r_2 pode depender do solo e da aplicação de interesse. Contudo, deve-se ter em mente que essas distâncias delimitam a porção de solo para a qual se determina a variação de seus parâmetros com a frequência. Com base em diversas avaliações práticas da metodologia, determinou-se que a utilização de r_1 igual ao raio da cuba e r_2 igual a cerca de 4 vezes r_1 permite obter resultados que caracterizam com boa exatidão a região no entorno da cuba.

3.2.3 - Exemplo de aplicação da metodologia

A Fig. 3.3 apresenta um exemplo de resultado obtido pela aplicação da metodologia descrita a um solo específico. Nessa medição, utilizou-se uma cuba de cobre de raio 23 cm e espaçamentos $r_1 = 23 \text{ cm}$ e $r_2 = 92 \text{ cm}$. A Fig. 3.3(a) ilustra a forma de onda de tensão $[v_{12}(t)]$ entre os pontos r_1 e r_2 e a Fig. 3.3(b) a forma de onda de corrente $[i(t)]$ resultante, que possui

tempo de frente $\sim 0,2 \mu\text{s}$ e duração total de $\sim 100 \mu\text{s}$. A partir da transformada de Fourier dos sinais $v_{12}(t)$ e $i(t)$ e da razão entre os fasores resultantes, $V_{12}(\omega)$ e $I(\omega)$, obtêm-se a impedância harmônica $Z_{12}(\omega)$ da porção de solo delimitada por r_1 e r_2 . O módulo e a fase de $Z_{12}(\omega)$ estão apresentados, respectivamente, nas Figs. 3.3(c) e 3.3(d), para faixa de frequências de 10 kHz a 1 MHz. Uma vez definida a impedância $Z_{12}(\omega)$ e tendo em conta os dados geométricos da medição, os parâmetros resistividade $[\rho(\omega)]$ e permissividade $[\epsilon(\omega)]$ são diretamente determinados, ao longo do espectro de frequências analisado, pela aplicação das equações (3.5) a (3.8). As Figs. 3.3(e) e 3.3(f) ilustram, respectivamente, a variação da resistividade e da permissividade relativa para o solo analisado.

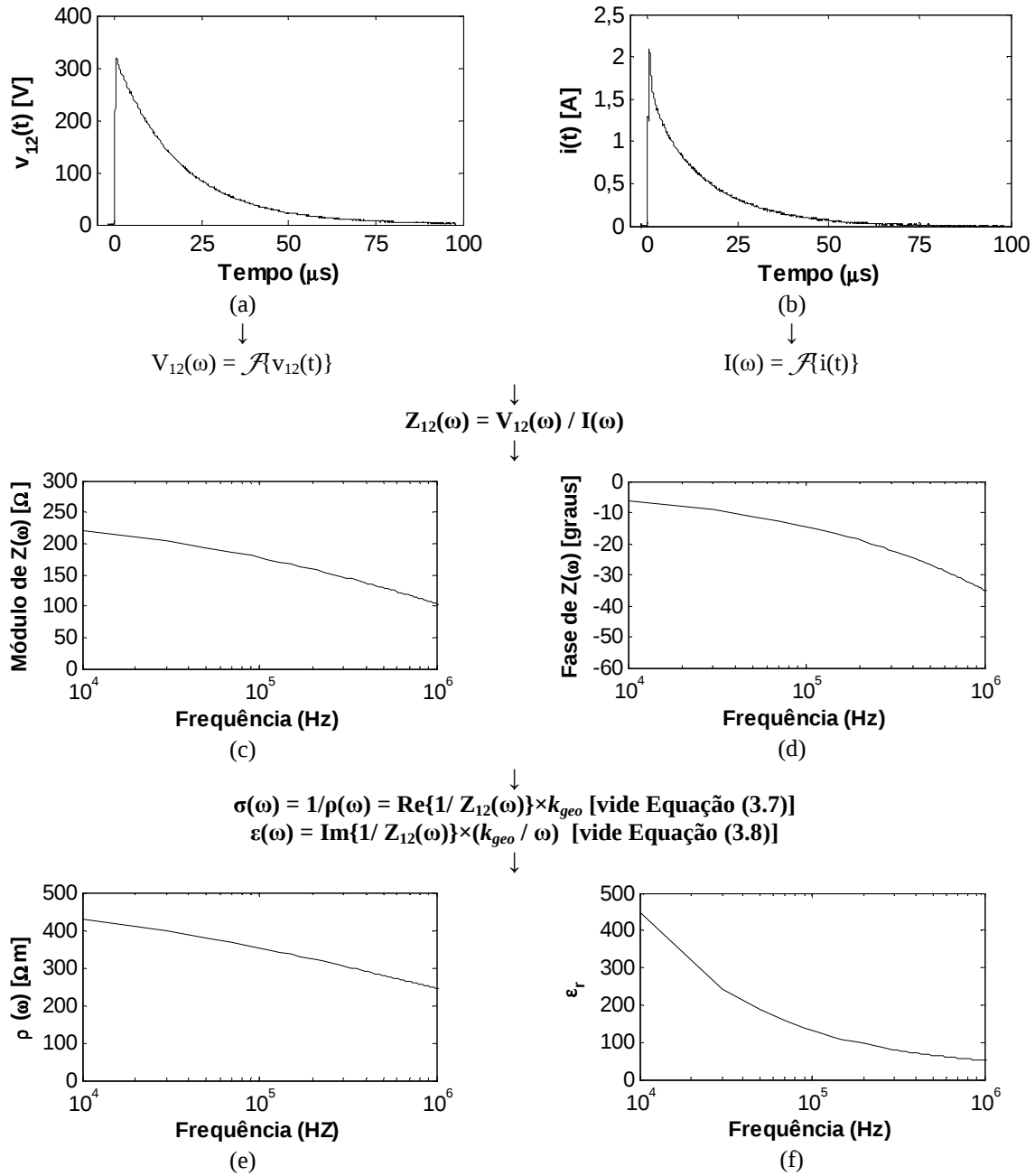


Fig. 3.3 - Exemplo de resultado para um determinado solo.

A Fig. 3.3 indica os passos aplicados em cada medição realizada. Note-se que nesse exemplo foram apresentados apenas os resultados associados a uma onda de corrente com tempo de frente da ordem de $0,2 \mu\text{s}$ e duração de cerca de $100 \mu\text{s}$ (denominada onda rápida, conforme o ponto 2 do item 3.2.2). Na realidade, os passos resumidos na Fig. 3.3 são aplicados a três ondas de tempos de frente e duração distintos. A Fig. 3.4 ilustra as ondas de tensão entre os pontos r_1 e r_2 e as correntes resultantes, para o mesmo solo, considerando: (a) onda lenta com frente $\sim 20 \mu\text{s}$ e duração de $\sim 10 \text{ ms}$; (b) onda rápida com frente $\sim 0,2 \mu\text{s}$ e duração de $\sim 100 \mu\text{s}$; (c) onda ultra-rápida com frente $\sim 0,1 \mu\text{s}$ e duração de $\sim 10 \mu\text{s}$. A Fig. 3.5 apresenta o módulo (a) e a fase (b) da impedância $Z_{12}(\omega)$, que é determinada pela razão entre os fasores de tensão e de corrente obtidos considerando-se as três ondas em questão. A Fig. 3.6 indica a variação dos parâmetros resistividade (a) e permissividade relativa (b) com a frequência, tendo em conta os gráficos de impedância e a geometria da configuração de medição.

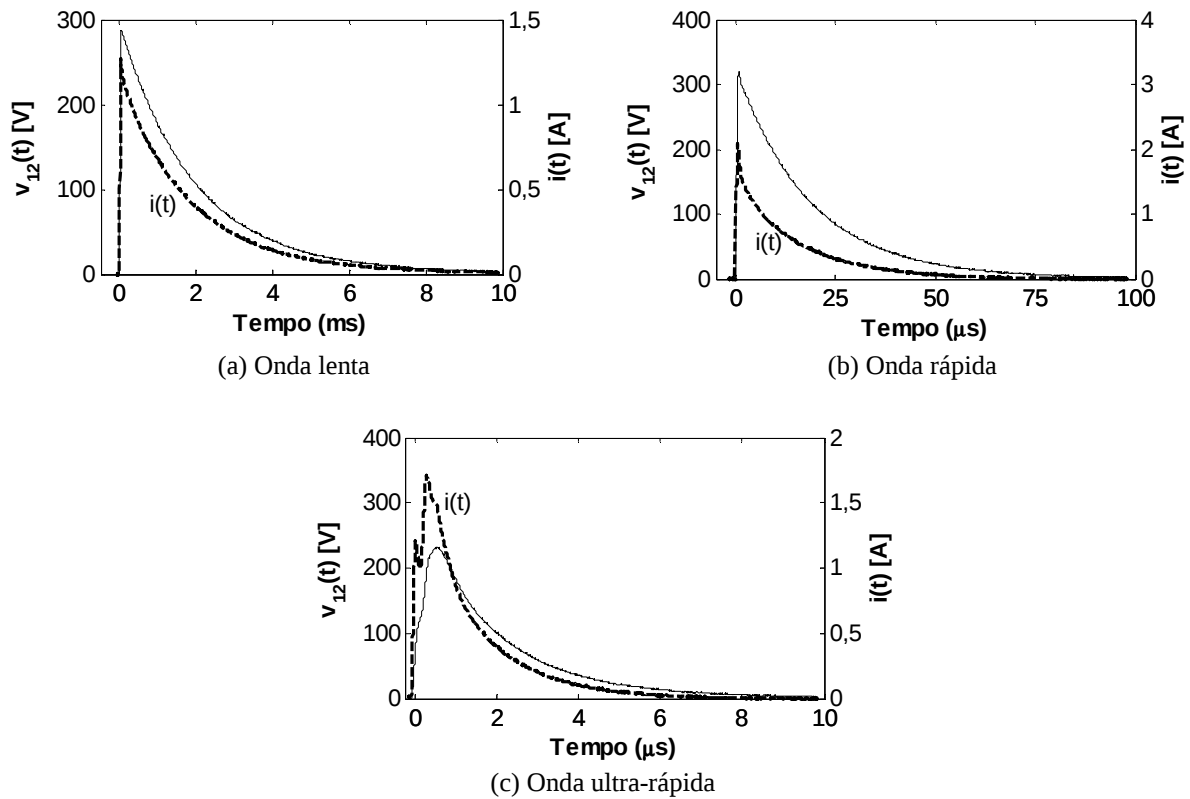


Fig. 3.4 - Ondas de tensão entre os pontos r_1 e r_2 e ondas de corrente resultantes.

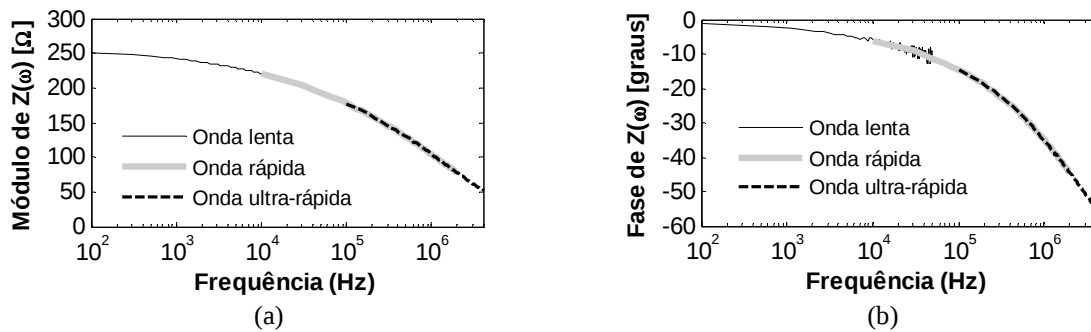


Fig. 3.5 - Impedância [(a) módulo e (b) fase] da porção de solo entre r_1 e r_2 , considerando as três ondas de corrente.

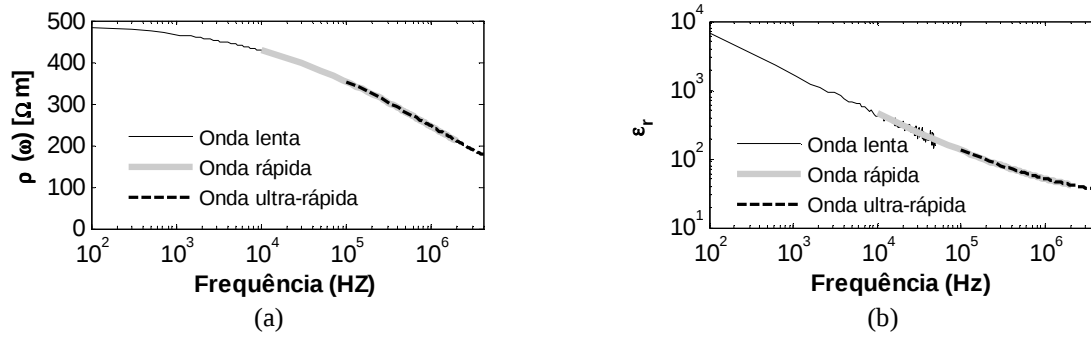


Fig. 3.6 - Resistividade (a) e permissividade (b), considerando as três ondas de corrente.

Observe-se que há uma sobreposição dos resultados obtidos para $\rho(\omega)$ e $\epsilon_r(\omega)$ nas frequências limites associadas a cada onda de corrente. Tal interseção, além de indicar a consistência do procedimento adotado, permite abranger com maior exatidão uma ampla faixa de frequências que vai desde 100 Hz até alguns MHz. Neste trabalho, a frequência superior de interesse corresponde a 4 MHz, de modo que a faixa investigada (100 Hz–4 MHz) contempla um espectro representativo de solicitações associadas a descargas atmosféricas, considerando desde as primeiras descargas de retorno até as descargas subsequentes.

Vale destacar que a utilização de um conjunto de ondas de corrente (e não uma única onda) corresponde a uma melhoria da metodologia [54]. A implementação dessa melhoria teve como motivação básica permitir uma caracterização mais precisa da variação dos parâmetros do solo ao longo da faixa de frequências de interesse. Note que esse aspecto é muito importante, tendo em vista a obtenção de dados para caracterização geral do comportamento do solo na frequência. Sendo assim, procedeu-se a um laborioso estudo de geração de ondas de corrente impulsivas. O conhecimento prático adquirido possibilitou o desenvolvimento de geradores com as seguintes características principais [55]: i) Controle preciso dos tempos de subida e duração da onda; ii) Tempos de subida curtos, de até 80 ns; iii) Níveis de tensão entre ~0,5 e ~1,5 kV; iv) Alimentação baseada em uma bateria simples de 12 V, com autonomia para realização de várias medições em campo. A utilização de um gerador desse tipo permitiu produzir ondas com tempos de frente e duração bastante distintos, como as empregadas nas medições.

O resultado de variação da permissividade relativa do solo com a frequência merece alguns comentários específicos. Observe-se que foi empregada uma escala logarítmica para traçar os dados referentes à permissividade relativa; isso porque os valores de ϵ_r para frequências inferiores a 10 kHz, sobretudo entre 100 Hz e 1 kHz, são muito elevados. Tais valores elevados estão fisicamente associados a processos de polarização mais lentos que ocorrem no solo e, também, a erros de medição introduzidos pelo fenômeno de polarização na interface entre a cuba e o solo. Em particular, o efeito de polarização interfacial (cuba-solo) basicamente não afeta os resultados para resistividade e provoca um aumento dos valores de permissividade, principalmente na faixa de frequências entre 100 Hz e 1 kHz. Essas conclusões são baseadas em resultados experimentais de validação da metodologia, apresentados na seção 3.3 deste capítulo, e em análises da consistência física dos resultados obtidos pela aplicação da metodologia, discutidas no capítulo 6.

É importante enfatizar que, de um modo geral e independentemente dos erros introduzidos pelo fenômeno de polarização interfacial (cuba-solo), há uma maior dificuldade de medição da permissividade em frequências mais baixas, particularmente em solos de menor resistividade. Nesses casos, o ângulo de defasamento entre os fasores de tensão e de corrente é muito pequeno, muitas vezes da ordem das incertezas de medição. Por outro lado, deve-se salientar que, justamente em solos de baixa resistividade, a razão $\sigma/\omega\epsilon$ para

frequências inferiores a 10 kHz é muito superior à unidade. Isso indica que, nessa faixa de frequências, a corrente no solo apresenta natureza predominantemente condutiva, sendo a parcela capacitiva desprezível. Desse modo, o conhecimento dos valores de ϵ_r para frequências inferiores a 10 kHz, considerando solos de baixa resistividade, apresenta importância reduzida em termos práticos e os erros citados têm pouca relevância. Já nos casos de solos de resistividade mais elevada, a mesma relação $\sigma/\omega\epsilon$ pode ter valores menores, mesmo nas faixas de frequências inferiores, o que indica que a parcela de corrente capacitiva no solo tem um papel mais significativo. Porém, nessas situações, o defasamento entre os fasores de tensão e de corrente é mais bem definido, o que implica uma medição da permissividade com maior exatidão, incluindo em frequências mais baixas.

Neste ponto, cabe introduzir outro parâmetro que será amplamente utilizado ao longo deste trabalho, chamado resistividade relativa ρ_r , e definido como a razão entre $\rho(\omega)$ e a resistividade em baixa frequência (100 Hz) ρ_0 . A Fig. 3.7 apresenta a variação da resistividade relativa para o exemplo considerado nesta seção. Esse parâmetro será muito útil em diversas análises posteriores. É importante ressaltar que, uma vez determinada a dependência da frequência da resistividade relativa $\rho_r(\omega)$ para um solo, o comportamento da resistividade $\rho(\omega)$ desse mesmo solo pode ser imediatamente determinado pela multiplicação de $\rho_r(\omega)$, em todo o espectro, pela resistividade em baixa frequência, obtida por métodos já consolidados na literatura (por exemplo, método de Frank-Wenner ou estimativa de um valor equivalente a partir da resistência de aterramento de uma configuração de eletrodos).

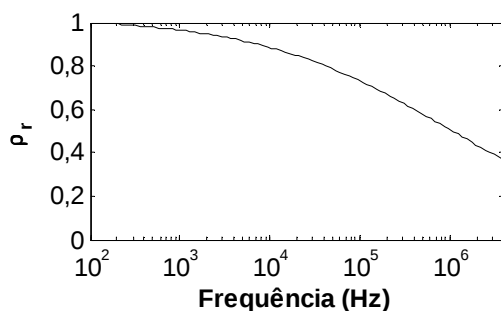


Fig. 3.7 - Comportamento da resistividade relativa para solo considerado nesta seção, na faixa de 100 Hz a 4 MHz.

3.3 - Validação da metodologia proposta e demonstração da relevância do efeito da dependência da frequência

Os itens anteriores descrevem os fundamentos teóricos e práticos da nova metodologia proposta para determinação da dependência da frequência dos parâmetros do solo. Um passo natural nesse desenvolvimento é a verificação da consistência dos resultados providos pela nova metodologia para as aplicações de interesse, que, no caso desta tese, compreendem a avaliação da resposta impulsiva de aterramentos elétricos. Desse modo, elaborou-se um estudo experimental-teórico com a finalidade de verificar a consistência da metodologia proposta tendo em vista as aplicações citadas. Os passos e os resultados fundamentais desse estudo, originalmente apresentados em [53], estão resumidos nos itens a seguir.

3.3.1 - Medição da resposta impulsiva de um eletrodo horizontal de aterramento

O primeiro passo correspondeu à avaliação experimental da resposta transitória de um arranjo de aterramento. Um eletrodo de 9,6 m foi enterrado a 0,5 m de profundidade em um solo específico. A partir da medição da resistência de aterramento desse eletrodo, estimou-se a

resistividade equivalente do solo ρ_0 em cerca de $1400 \Omega\text{m}$. Para fins de avaliação da resposta transitória da configuração, utilizou-se um gerador para aplicar tensões impulsivas entre o eletrodo e uma malha auxiliar, conforme montagem ilustrada na Fig. 3.8. A corrente no aterramento e a elevação de potencial resultante foram medidas com o auxílio de um osciloscópio de dois canais, sendo tomadas as devidas precauções para minimização do eventual acoplamento eletromagnético entre os cabos dos circuitos de medição de tensão e de corrente [56]. Os resultados de medição da elevação de potencial no aterramento (GPR - *Grounding Potential Rise*) estão apresentados na Fig. 3.9 considerando duas ondas de corrente distintas, com tempos de frente de $0,4 \mu\text{s}$ (a) e $1,4 \mu\text{s}$ (b).

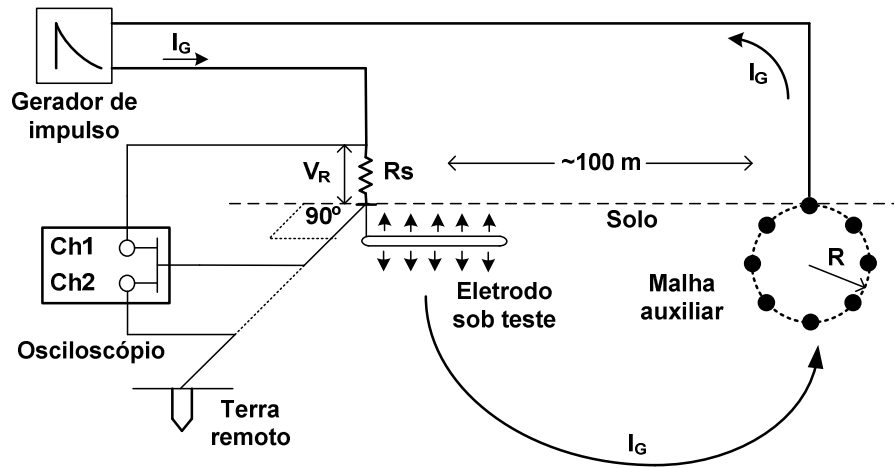


Fig. 3.8 - Montagem para medição da elevação de potencial resultante da circulação de uma corrente impulsiva por um eletrodo horizontal de 9,6 m enterrado em um solo de $\rho_0 \approx 1400 \Omega\text{m}$.

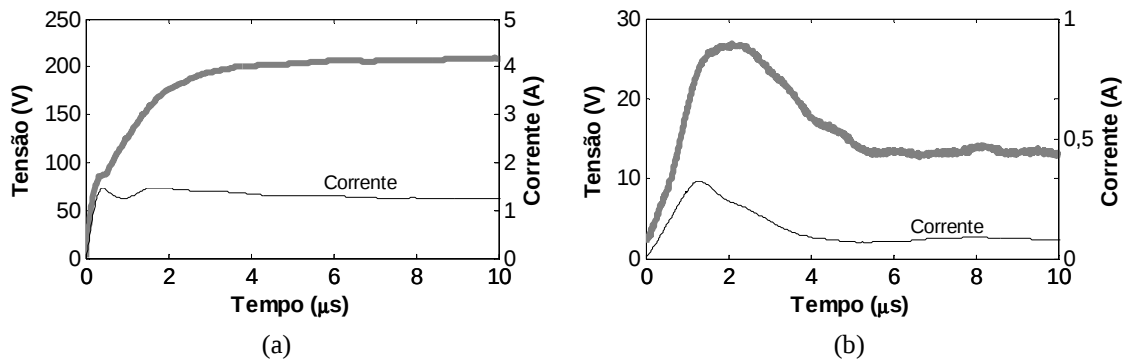


Fig. 3.9 - GPR medido para ondas de corrente impulsivas de tempo de frente de $0,4 \mu\text{s}$ (a) e $1,4 \mu\text{s}$ (b).

3.3.2 - Medição da variação de ρ_r e ϵ_r com a frequência

O segundo passo compreendeu a aplicação da metodologia de medição proposta para determinação da dependência da frequência da resistividade e da permissividade do mesmo solo (e na mesma época) no qual estava enterrado o eletrodo avaliado no item anterior. Na medição, utilizou-se uma cuba de cobre de 23 cm e foram adotados espaçamentos $r_1 = 23 \text{ cm}$ e $r_2 = 92 \text{ cm}$, de acordo com a montagem indicada na Fig. 3.2.

A Fig. 3.10 ilustra o comportamento obtido pela metodologia para a resistividade relativa ρ_r (a) e a permissividade relativa ϵ_r (b) para o solo em questão, considerando a faixa de $100 \text{ Hz} - 4 \text{ MHz}$ para ρ_r e $5 \text{ kHz} - 4 \text{ MHz}$ para ϵ_r . Observe que a variação dos parâmetros ρ_r e ϵ_r é bastante significativa ao longo do espectro avaliado, com redução de ambos entre as frequências limite inferior e superior consideradas.

No caso específico da permissividade relativa, para frequências inferiores a 5 kHz, foi feita uma extrapolação da curva para valores conservadores, muito inferiores àqueles usualmente encontrados nesta faixa de frequências.

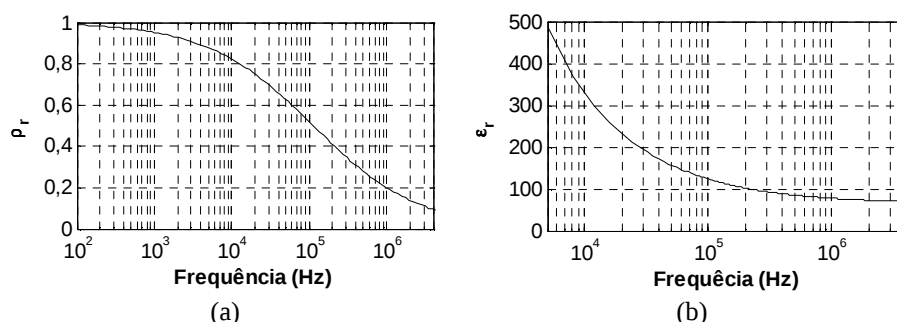


Fig. 3.10 - Dependência da frequência da resistividade relativa ρ_r (a) e da permissividade relativa ϵ_r (b) para o solo analisado, determinada pela metodologia proposta.

3.3.3 - Simulação da resposta do eletrodo horizontal incluindo a dependência da frequência dos parâmetros do solo e comparação com resultados experimentais

Com o intuito de realizar uma primeira avaliação da importância do efeito da dependência dos parâmetros do solo no comportamento transitório de aterramentos, simulou-se a resposta do eletrodo de 9,6 m frente às correntes impulsivas injetadas (vide Fig. 3.9), empregando-se um elaborado modelo eletromagnético [5]. Duas hipóteses foram contempladas nas simulações: i) consideração dos parâmetros elétricos do solo constantes, sendo a resistividade igual ao valor medido em baixa frequência e a permissividade relativa igual a 20 e ii) consideração dos parâmetros elétricos variáveis com a frequência, segundo medições apresentadas no item 3.3.2, sendo a resistividade determinada pela multiplicação de ρ_r [Fig. 3.10(a)] por $\rho_0 = 1400 \Omega\text{m}$ e a permissividade determinada diretamente do produto de ϵ_r [Fig. 3.10(b)] por $\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (permissividade do vácuo). A Fig. 3.11 compara as curvas de GPR medido e simulado, considerando as duas hipóteses citadas e as ondas de corrente de tempos de frente de $0,4 \mu\text{s}$ (a) e $1,4 \mu\text{s}$ (b).

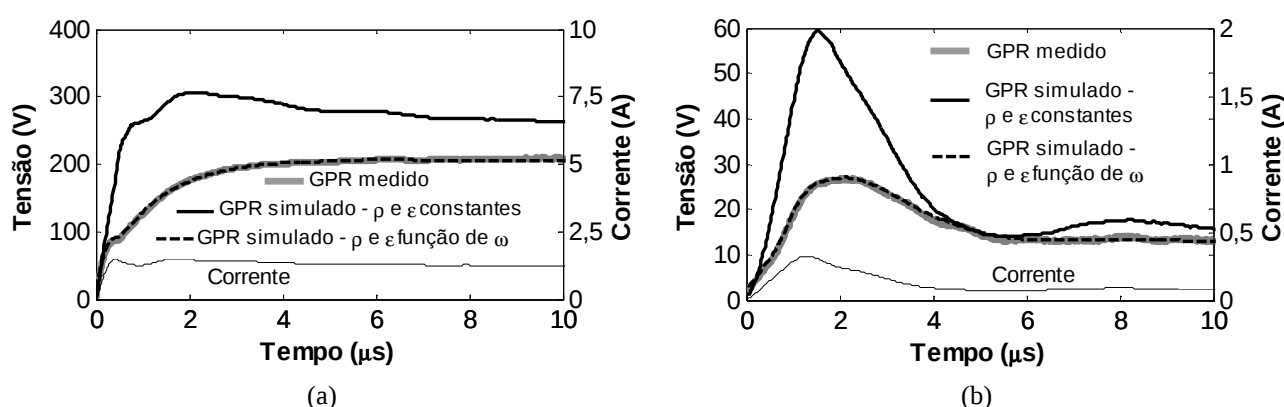


Fig. 3.11 - Comparação entre GPR medido e simulado considerando as hipóteses de parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência e ondas de corrente com tempos de frente de $0,4 \mu\text{s}$ (a) e $1,4 \mu\text{s}$ (b).

Os resultados obtidos são muito significativos e denotam a relevância do efeito. A inclusão da variação dos parâmetros do solo com a frequência, determinada pelo método proposto, basicamente promove a coincidência das curvas medidas e simuladas de GPR. Por outro lado, os resultados de simulação decorrentes da hipótese de parâmetros do solo

constantes leva a valores de pico do GPR muito superiores aos medidos: aproximadamente 50% e 110%, respectivamente para as ondas de corrente de tempos de frente 0,4 μ s e 1,4 μ s.

Resultados similares determinados para outros dois solos, um de baixa e outro de alta resistividade, e considerando um eletrodo horizontal de 12 m, estão ilustrados na Fig. 3.12. Detalhes adicionais sobre esses resultados complementares podem ser encontrados em [53].

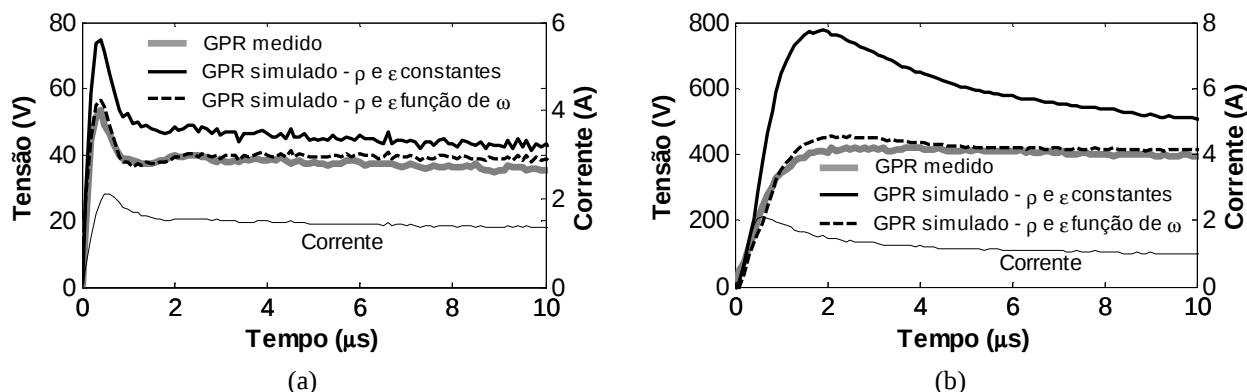


Fig. 3.12 - Comparação entre GPR medido e simulado para um eletrodo de 12 m submetido a correntes impulsivas e enterrado em um solo (a) de baixa resistividade ($\sim 260 \Omega\text{m}$) e (b) de alta resistividade ($\sim 4000 \Omega\text{m}$).

3.4 - Considerações finais

Foram apresentados neste capítulo os fundamentos de uma nova metodologia de medição da variação dos parâmetros do solo com a frequência, aplicável à faixa de interesse deste trabalho. Nessa faixa, de 100 Hz a alguns MHz, as técnicas de medição do comportamento dos parâmetros elétricos do solo são de caráter laboratorial. Até onde vai o conhecimento do autor, a metodologia desenvolvida é a primeira que propõe a medição de ρ e ϵ na citada faixa de frequências em condições diretamente de campo. Nesse sentido, note-se que, tomadas as devidas precauções indicadas no item 3.2.2, o comportamento do solo é avaliado em condições naturais, inclusive de umidade, o que confere maior representatividade às medições. Vale salientar que a metodologia de medição proposta constitui uma das contribuições originais deste trabalho.

Com a finalidade de validar a metodologia proposta, comparou-se resultados de medição da resposta de eletrodos de aterramento frente a correntes impulsivas com resultados de simulação incluindo-se a dependência dos parâmetros do solo determinada pela aplicação da metodologia. Dada a notável concordância entre os resultados medidos e simulados com a dependência da frequência dos parâmetros do solo, dois aspectos principais podem ser destacados.

Primeiro, a metodologia de medição proposta fornece resultados consistentes tendo em vista as aplicações de interesse desta tese, notadamente a avaliação da resposta transitória de aterramentos elétricos.

Segundo, os resultados obtidos constituem uma evidência experimental da relevância do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos. Em particular, a evidência experimental obtida é outra contribuição original deste trabalho.

Os resultados alcançados neste capítulo motivaram a aplicação da metodologia desenvolvida para estudos adicionais da dependência da frequência dos parâmetros do solo e do efeito desse fenômeno na resposta de aterramentos elétricos. Os capítulos 4, 5 e 6 a seguir apresentam parte desses estudos.

4. CARACTERIZAÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DA RESISTIVIDADE E DA PERMISSIVIDADE DO SOLO: MEDIÇÕES E PROPOSTA DE FÓRMULA PREDITIVA

4.1 - Introdução

Os resultados apresentados no capítulo 3 mostram que a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo tem influência relevante na resposta transitória do aterramento. Também, mostram que desconsiderar essa dependência em simulações corresponde a uma abordagem conservadora. Contudo, os erros significativos observados na avaliação da resposta do aterramento, quando se ignora a dependência da frequência dos parâmetros solo, sugerem que em estudos mais rigorosos que envolvam a proteção contra descargas atmosféricas tal dependência deve ser considerada.

A variação dos parâmetros pode ser determinada, basicamente, segundo duas abordagens: i) medição direta ou ii) aplicação de uma formulação geral que permita estimar o comportamento de ρ e ϵ em função da frequência.

A primeira abordagem, sempre que possível, deve ser a adotada, pois permite um estudo específico do solo onde o sistema de aterramento está instalado. A metodologia proposta e validada no capítulo 3 é uma alternativa viável para medição da variação dos parâmetros do solo, além de possuir o diferencial de ser aplicada diretamente em condições de campo.

A segunda abordagem, dada a grande variedade de tipos de solo e a sua composição diversificada, pode implicar alguns desvios nos resultados obtidos. Por outro lado, para realização de uma primeira análise do impacto da dependência da frequência dos parâmetros do solo na resposta transitória do aterramento, parece atraente a disponibilidade de uma formulação que permita quantificar tal variação, ainda que de forma aproximada. Além disso, essa formulação seria útil naqueles casos em que a medição direta não é viável ou encerra dificuldades. A avaliação da possibilidade de se obter uma formulação para esse fim pode ser realizada baseando-se em um grande número de medições contemplando diferentes solos. A metodologia de medição proposta pode ser utilizada em tal avaliação.

Com base no exposto, procedeu-se a uma aplicação extensiva da metodologia de medição proposta para determinação da dependência da frequência dos parâmetros de um grande número de solos, abrangendo diferentes tipos e uma ampla faixa de resistividades. A partir das tendências observadas para o comportamento dos parâmetros do solo, foi possível propor expressões que permitem estimar de forma aproximada a variação da resistividade e da permissividade do solo com a frequência. Os detalhes de desenvolvimento e validação dessas expressões são objeto de duas publicações específicas do autor [54], [57].

4.2 - Considerações básicas

Até a data de submissão desta tese, a metodologia proposta foi aplicada para medição da dependência da frequência dos parâmetros de 65 solos distribuídos em diferentes regiões do estado de Minas Gerais, que contemplam uma ampla faixa de resistividades e diferentes categorias de solos.

As medições foram realizadas em épocas distintas ao longo do ano. Assim, devido às mudanças sazonais, os diferentes solos testados não foram avaliados em uma condição única de umidade. O registro dessas diferentes condições foi realizado por meio de anotações relativas à inspeção visual do solo na época do teste e por meio de medição aproximada da umidade utilizando um medidor simples [58]. Também, para todos os casos, tem-se como referência a resistividade de baixa frequência ρ_0 da porção de solo analisada. Note-se que ρ_0

tem uma correlação significativa com a umidade do solo, além de ser um parâmetro de aplicação e medição mais imediata em um contexto prático de aterramentos elétricos. Ademais, esse é um parâmetro que caracteriza de forma mais geral o solo, já que sintetiza informações não apenas de umidade, mas também de sais presentes no solo, compactidade e granulometria. Como referência, para os solos medidos, os valores mínimo e máximo de ρ_0 foram, respectivamente, $\sim 60 \Omega\text{m}$ e $\sim 20.000 \Omega\text{m}$.

Em todo o processo, desde a instalação da cuba no solo até a medição final, foram seguidos os cuidados destacados no capítulo 3. Utilizou-se uma cuba de cobre com raio de 23 cm, sendo avaliada a porção de solo compreendida entre a sua superfície e um ponto a 92 cm de seu centro ($r_1 = 23 \text{ cm}$ e $r_2 = 92 \text{ cm}$, de acordo com a montagem da Fig. 3.2, capítulo 3). No procedimento de medição empregou-se, também conforme descrito no capítulo 3, um conjunto de ondas de modo a abranger uma ampla faixa de frequências. Na maior parte das medições, foram aplicadas três ondas de corrente (lenta, rápida e ultra-rápida), sendo que em alguns poucos casos foram utilizadas apenas duas ondas (lenta e rápida).

4.3 - Resultados obtidos da aplicação sistemática da metodologia de medição

4.3.1. Resistividade elétrica

A Fig. 4.1 apresenta as curvas de variação da resistividade relativa ρ_r [$\rho(\omega)/\rho_0$] ao longo da faixa de frequências entre 100 Hz e 4 MHz para alguns solos específicos, que são representativos do conjunto total de medições. Da análise dessas curvas, as seguintes tendências podem ser observadas:

- Para todos os solos, a resistividade relativa tem valores próximos à unidade na faixa de baixas frequências e apresenta uma redução à medida que a frequência cresce.
- A redução total de ρ_r , considerando as faixas inferiores e superiores de frequência, é em geral tão mais significativa quanto maior o valor de ρ_0 . Essa tendência está indicada pela seta na Fig. 4.1 e pelos grupos de curvas destacados de acordo com a faixa de resistividades. Como referência, para solos com valor de ρ_0 inferior a $\sim 200 \Omega\text{m}$, a resistividade diminui de cerca de 20% no intervalo de frequência entre 100 Hz e 1 MHz. Nesse mesmo intervalo, são observadas reduções de cerca de 30% a 50% para solos de ρ_0 entre $\sim 600 \Omega\text{m}$ e $\sim 1000 \Omega\text{m}$ e de até 80% para solos de ρ_0 superior a $\sim 4000 \Omega\text{m}$.
- A frequência a partir da qual a redução de ρ_r se torna mais pronunciada varia de acordo com a resistividade do solo. Basicamente, observa-se que essa frequência é menor no caso de solos de alta resistividade (ρ_0 elevado), por volta de 10 kHz ou inferior, e tende a aumentar à medida que a resistividade decresce, sendo próxima de 100 kHz para solos de baixa resistividade (menor ρ_0). Isso indica que, para solos de resistividade mais elevada, a redução de ρ_r com o aumento da frequência, além de mais acentuada, torna-se relevante já nas faixas inferiores do espectro.

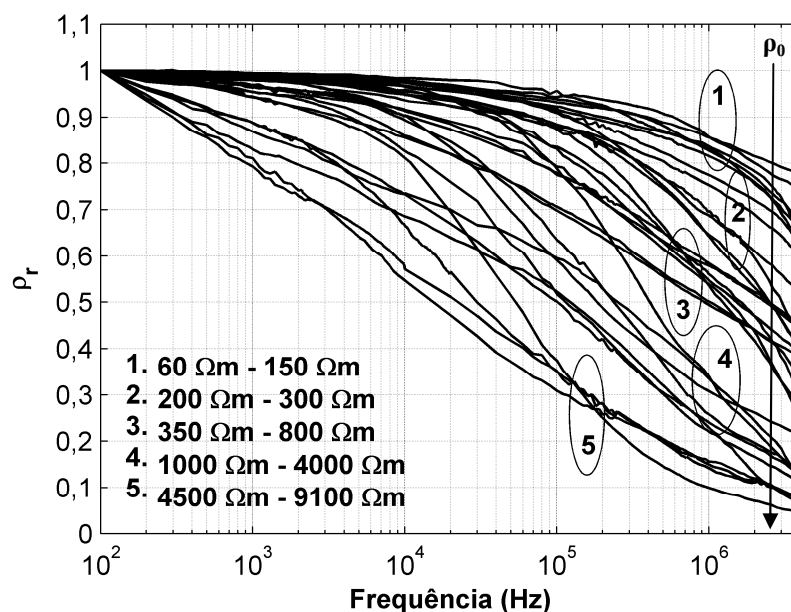


Fig. 4.1 - Variação da resistividade relativa ρ_r ao longo da faixa de 100 Hz a 4 MHz para alguns dos solos medidos. O sentido da seta indica o crescimento da resistividade de baixa frequência ρ_0 .

4.3.2. Permissividade elétrica

A Fig. 4.2 apresenta a curva de variação da permissividade relativa ϵ_r [$\epsilon(\omega)/\epsilon_0$] ao longo da faixa de 10 kHz a 4 MHz⁴. Da análise dessas curvas, as seguintes tendências podem ser observadas:

- Há uma maior dispersão dos dados de medição de ϵ_r na faixa inferior do espectro em relação à faixa superior. Considerando uma curva média, o valor da permissividade relativa é elevado no entorno da frequência de 10 kHz, com valores da ordem de $\sim 10^2$, e decresce à medida que a frequência aumenta, tendendo na maioria dos casos para um valor entre 20 e 30 na parte superior do espectro.
- Para os solos medidos, e considerando as diferentes condições em que foram avaliados em campo, não se observa uma relação *bem definida* entre a variação de ϵ_r e a resistividade em baixa frequência ρ_0 . Com caráter ilustrativo, na Fig. 4.2 estão destacados alguns conjuntos de curvas com as respectivas faixas de resistividades associadas. Vale salientar que, embora não se observe uma relação bem definida entre ρ_0 e a dependência da frequência de ϵ_r , os maiores e os menores valores de permissividade em 10 kHz estão relacionados, em média, com solos de menor e maior resistividade respectivamente.
- A diminuição da permissividade é mais significativa na faixa entre 10 kHz e 1 MHz, apresentando reduções moderadas a partir dessa última frequência. Também, é importante mencionar que, a despeito da redução da permissividade, o produto $\omega\epsilon$ aumenta com a frequência para os solos avaliados. Esse produto está fisicamente associado à corrente de natureza capacitiva que circula no solo.

⁴ Preferiu-se apresentar os dados nessa faixa, pois para frequências inferiores os erros de medição, sobretudo quando se analisam solos de baixa resistividade, são maiores. Para uma discussão sobre a importância desses erros, consultar a parte final do item 3.2.3 do capítulo 3.

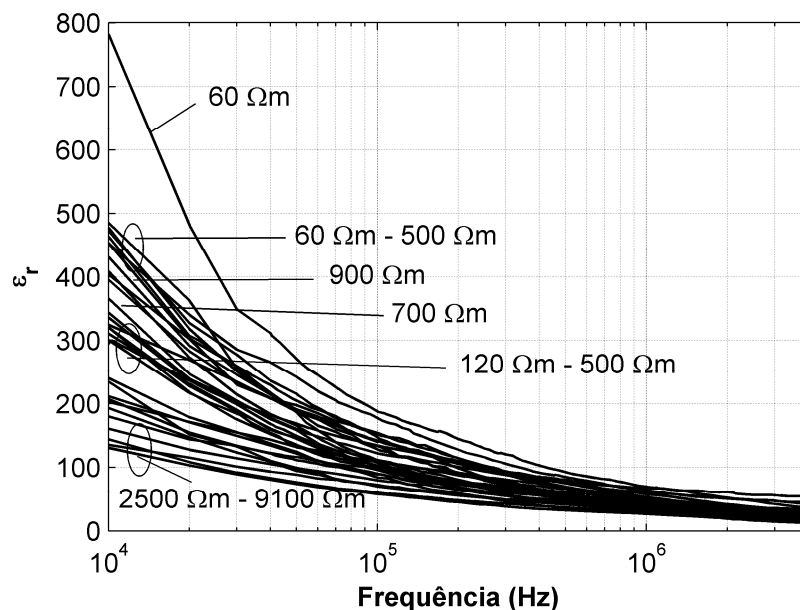


Fig. 4.2 - Variação da permissividade relativa ϵ_r ao longo da faixa de 10 kHz a 4 MHz para alguns dos solos medidos.

4.4 - Desenvolvimento de fórmulas para estimativa da dependência da frequência da resistividade e da permissividade do solo

Os resultados de medição apresentados na seção 4.3 indicam algumas tendências de comportamento da variação da resistividade e da permissividade elétricas do solo. Tais tendências permitiram a proposição de fórmulas para estimativa aproximada da dependência da frequência dos parâmetros do solo [54].

Vale salientar que as fórmulas originalmente apresentadas em [54] foram obtidas considerando-se medições de 31 solos. Posteriormente, ao longo do desenvolvimento desta tese, novas medições da dependência da frequência dos parâmetros do solo foram realizadas. Em todos os casos, a comparação desses novos resultados de medição com aqueles providos pelas fórmulas propostas em [54], e apresentadas nesta seção, foi satisfatória, com erros dentro de faixas aceitáveis para medições de aterramento em condições de campo (inferiores a 10%).

4.4.1. Fórmula para dependência da frequência da resistividade do solo

De acordo com a Fig. 4.1 e os comentários do item 4.3.1, observou-se uma correlação entre a variação relativa da resistividade, expressa pelo parâmetro ρ_r , e o valor de resistividade em baixa frequência ρ_0 . Na faixa inferior do espectro, a resistividade é aproximadamente constante e igual a ρ_0 . Assim, parece adequada uma formulação para ρ_r composta por duas parcelas, uma independente da frequência e igual à unidade e outra que expresse a dependência da frequência e que seja função de ρ_0 .

Tendo em conta essas observações iniciais, foi proposta a seguinte fórmula para a condutividade relativa:

$$\sigma_r = 1 + h(\sigma_0) \left\{ \frac{f - 100}{1 \times 10^6} \right\}^a \Leftrightarrow \rho_r = \frac{1}{\sigma_r} \quad (4.1)$$

Em (4.1), $\sigma_r = 1/\rho_r$ é a condutividade relativa, $\sigma_0 = 1/\rho_0$ é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) expressa em mS/m, f é a frequência em Hz e a é o parâmetro que fundamentalmente define a forma da variação da resistividade com a frequência, sendo sugerido o valor $a = 0,65$ com base nos resultados de medição. A proposição de uma fórmula para a condutividade relativa e não para a resistividade relativa está relacionada a questões numéricas de ajuste de curvas e, também, a motivações associadas ao significado físico da variação dos parâmetros do solo, aspecto que será abordado de maneira mais aprofundada no capítulo 6 desta tese.

A função $h(\sigma_0)$ é dada por:

$$h(\sigma_0) = 1,5 \times \sigma_0^{-0,73} \quad (4.2)$$

e expressa de modo aproximado a variação relativa da condutividade entre as frequências de 100 Hz e 1 MHz, em função da condutividade em baixa frequência. Essa função foi obtida por meio de um ajuste de curva dos valores da diferença $\Delta\sigma_r = \sigma_r(1 \text{ MHz}) - \sigma_r(100 \text{ Hz})$ determinados a partir dos dados de medição de variação dos parâmetros do solo. A Fig. 4.3 ilustra $h(\sigma_0)$ e os resultados advindos de medição. Note-se que a função $h(\sigma_0)$ traduz a tendência observada nas medições de que o decrescimento relativo da resistividade (ou crescimento relativo da condutividade) é tão mais significativo quanto maior for a resistividade em baixa frequência (ou menor a condutividade em baixa frequência).

Em termos da resistividade relativa, tem-se a seguinte expressão final:

$$\rho_r(f) = \left\{ 1 + \left[1,2 \times 10^{-6} \times \rho_0^{0,73} \right] \right\} \cdot \left[(f - 100)^{0,65} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

em que ρ_0 é a resistividade em baixa frequência expressa em Ωm e f é a frequência em Hz entre 100 Hz e 4 MHz. A resistividade ρ , também expressa em Ωm , em uma dada frequência f é prontamente obtida pela multiplicação do resultado fornecido por (4.3) pela resistividade em baixa frequência ρ_0 .

Ainda, vale salientar que a expressão (4.3) traduz um *comportamento médio* da dependência da frequência da resistividade do solo. Na realidade, devido à estrutura diversificada e complexa do solo, naturalmente existe certa dispersão desta dependência da frequência. A Fig. 4.3, por exemplo, ilustra esse aspecto mostrando que, para valores próximos de resistividade em baixa frequência ($\rho_0 = 1/\sigma_0$), têm-se variações relativas ligeiramente diferentes da resistividade entre 100 Hz e 1 MHz.

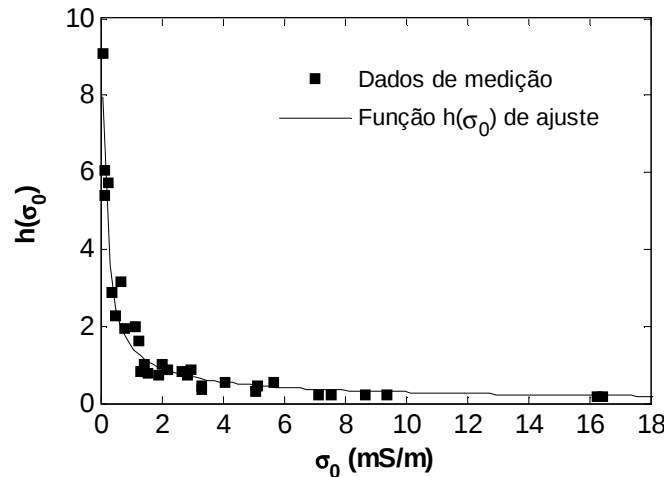


Fig. 4.3 - A função $h(\sigma_0)$ ajusta os dados de medição correspondentes à variação relativa da condutividade entre as frequências de 100 Hz e 1 MHz. Essa função traduz a tendência observada nas medições de que o decrescimento relativo da resistividade é tão mais significativo quanto maior for a resistividade em baixa frequência.

4.4.2. Fórmula para dependência da frequência da permissividade do solo

No caso da permissividade, não se verificou uma relação bem definida entre a sua variação e a resistividade em baixa frequência. Também, observou-se uma maior dispersão dos dados na faixa de baixas frequências. Na faixa superior do espectro, a dispersão é menor e a permissividade relativa tende para um valor médio entre 20 e 30. Ainda, salienta-se que a corrente capacitiva (proporcional a ϵ_r) tem importância, sobretudo, na faixa superior do espectro, em relação à corrente condutiva (proporcional a $\sigma=1/\rho$).

Com base nessas considerações, uma curva média com aspectos conservadores foi proposta para estimar o comportamento da permissividade. Nessa abordagem, supôs-se que, para cada frequência, os valores medidos de permissividade seguissem uma distribuição estatística normal. Primeiramente, uma curva média foi determinada a partir das 31 curvas de permissividade medidas. Em seguida, o desvio padrão foi calculado para cada frequência e subtraído da curva média de modo a se obter uma curva conservadora da dependência da frequência da permissividade do solo. A equação a seguir descreve essa curva conservadora:

$$\epsilon_r(f) = 7,6 \times 10^3 f^{-0,4} + 1,3 \quad (4.4)$$

A equação (4.4) é válida para frequências f (em Hz) entre 10 kHz e 4 MHz. Para frequências inferiores a 10 kHz, sugere-se, segundo uma abordagem conservadora, adotar um valor constante e igual àquele determinado pela equação (4.4) para $f = 10$ kHz.

4.5 - Avaliação da qualidade dos resultados obtidos pela aplicação das fórmulas propostas e comparação com outras formulações

A metodologia de medição proposta permite quantificar com boa exatidão a dependência da frequência dos parâmetros do solo. Conforme capítulo 3, a utilização das curvas de $\rho(\omega)$ e $\epsilon(\omega)$ determinadas por essa metodologia praticamente promove o casamento da resposta impulsiva medida e simulada de eletrodos de aterramento.

As fórmulas apresentadas na seção 4.4 têm o objetivo de fornecer uma estimativa aproximada da dependência da frequência naqueles casos em que a medição direta é inviável ou encerra dificuldades. Com o intuito de se avaliar a qualidade da estimativa provida por essas fórmulas em um contexto prático de aterramentos elétricos, foram comparados resultados independentes de medição da resposta impulsiva de diferentes arranjos de aterramento com resultados de simulação aplicando-se as fórmulas propostas para se ter em conta a dependência da frequência dos parâmetros do solo. A seguir são apresentados alguns resultados representativos dessa investigação.

As Figs. 4.4 e 4.5 ilustram resultados de GPR medidos para hastes de 3 m cravadas em solos de resistividade baixa ($\rho_0 \approx 410 \Omega\text{m}$, Fig. 4.5) e elevada ($\rho_0 \approx 2000 \Omega\text{m}$, Fig. 4.4) e considerando ondas de corrente com tempos de frente similares àqueles de correntes de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes. As medições foram realizadas utilizando-se um arranjo semelhante àquele ilustrado na Fig. 3.8 do capítulo 3 e tomando-se as devidas precauções para se evitar acoplamento eletromagnético entre os cabos dos circuitos de medição de corrente e de tensão.

São apresentados dois tipos de resultados de simulação. Um se refere à usual consideração de parâmetros constantes, $\rho=\rho_0$ e $\epsilon_r=10$. O outro corresponde à inclusão da dependência da frequência nas simulações empregando as expressões propostas na seção 4.4 e, adicionalmente, utilizando as formulações propostas por Longmire e Smith [47] e por Portela [51]. A formulação de Scott *et al* [37] não foi incluída, pois fornece resultados muito

próximos àqueles da formulação de Longmire e Smith. (Vale lembrar que a formulação de Longmire e Smith é baseada nos resultados de medição de Scott *et al.*)

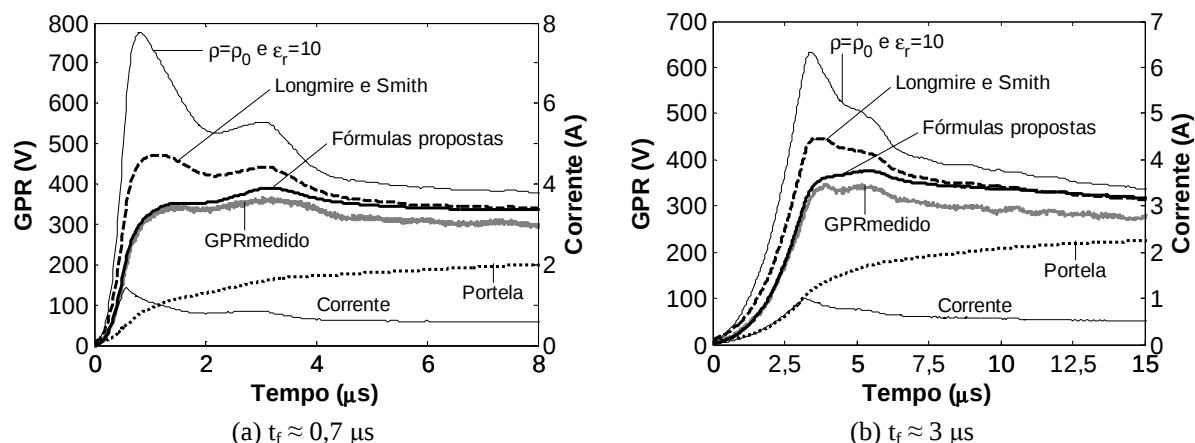


Fig. 4.4 - Comparação entre GPR medido de uma haste de 3 m enterrada em um solo de $\rho_0 \approx 2000 \Omega m$ e resultados de simulação sob as seguintes hipóteses: parâmetros constantes ($\rho=\rho_0$ e $\epsilon_r=10$) e parâmetros dependentes da frequência de acordo com Longmire e Smith [47], Portela [51] e fórmulas propostas nesta tese.

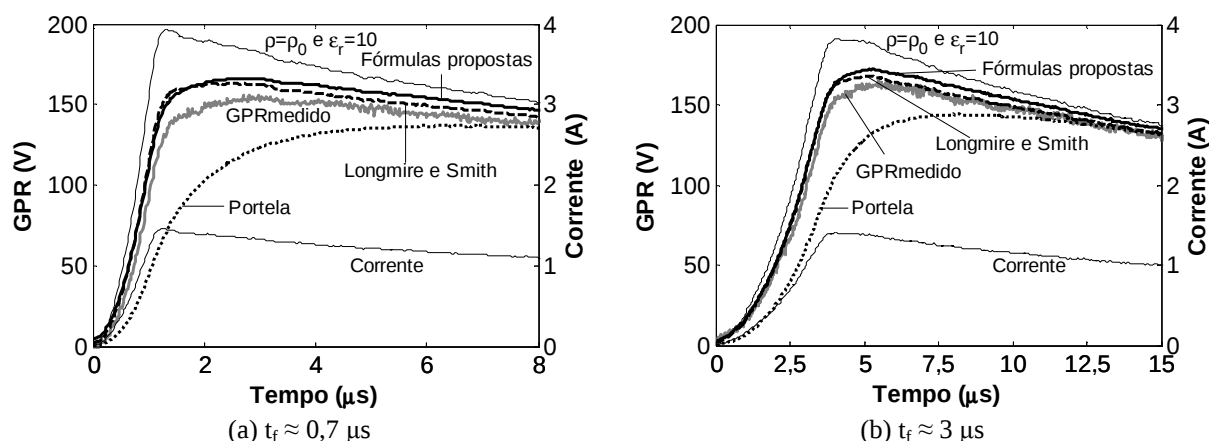


Fig. 4.5 - Comparação entre GPR medido de uma haste de 3 m enterrada em um solo de $\rho_0 \approx 410 \Omega m$ e resultados de simulação sob as seguintes hipóteses: parâmetros constantes ($\rho=\rho_0$ e $\epsilon_r=10$) e parâmetros dependentes da frequência de acordo com Longmire e Smith [47], Portela [51] e fórmulas propostas nesta tese.

De acordo com os resultados, a aplicação das fórmulas propostas reduz consideravelmente o erro no cálculo do GPR, em relação aos resultados de hipótese de parâmetros constantes, para todas as resistividades analisadas. Em termos dos valores de pico de GPR, para o solo de $\rho_0 \approx 2000 \Omega m$, os erros são reduzidos de 114% para 7%, no caso de $t_f \approx 0,7 \mu s$, e de 81% para 7%, no caso de $t_f \approx 3,0 \mu s$. Para o solo de $\rho_0 \approx 410 \Omega m$, os erros são reduzidos de 26% para 6%, no caso de $t_f \approx 0,7 \mu s$, e de 17% para 4%, no caso de $t_f \approx 3,0 \mu s$.

A aplicação da formulação de Longmire e Smith fornece resultados satisfatórios para o solo de resistividade baixa; contudo, para o solo de resistividade mais elevada, embora se verifique uma redução dos desvios em relação à hipótese de parâmetros constantes, ainda são observados erros de 30% e de 28% nos valores de pico de GPR, respectivamente para os tempos de frente de $0,7 \mu s$ e $3 \mu s$. Note-se também que as diferenças entre as formas de onda do GPR medido e simulado são mais pronunciadas. Resultados complementares mostram que, à medida que a resistividade aumenta, a formulação de Longmire e Smith tende a apresentar erros maiores.

A aplicação da formulação de Portela fornece, em ambos os casos, valores de GPR inferiores ao medido. Além disso, há diferenças importantes em termos das formas de onda do GPR simulado e medido. Isso é devido às reduções significativas da resistividade com o aumento da frequência e aos valores elevados de permissividade sugeridos pela formulação proposta pelo pesquisador. A utilização dessa formulação não é recomendada, ao menos considerando-se parâmetros medianos.

4.6 - Considerações finais

Foram apresentados neste capítulo alguns resultados de medição em condições de campo da variação de ρ_r e ϵ_r com a frequência, que abrangem uma ampla faixa de resistividades do solo. A partir das tendências de comportamento observadas, foram propostas fórmulas para estimar a dependência da frequência da resistividade e da permissividade. Vale salientar que as expressões desenvolvidas são contribuições originais deste trabalho.

De acordo com resultados experimentais, as fórmulas propostas são consistentes para as aplicações de interesse que correspondem à avaliação da resposta impulsiva de aterramentos elétricos. De modo geral, o uso dessas fórmulas reduz os erros de simulação da resposta impulsiva de aterramentos elétricos, em relação à usual hipótese de parâmetros constantes. Resultados adicionais de validação das expressões propostas, diferentes dos apresentados neste capítulo, podem ser encontrados em [54], [59], [60], incluindo arranjos de eletrodos horizontais e malhas de aterramento e outros valores de resistividade.

Também, deve-se destacar que, até onde vai o conhecimento do autor desta tese, pela primeira vez apresentou-se uma comparação de resultados medidos de GPR com aqueles simulados empregando-se formulações aproximadas para se ter em conta o efeito da dependência da frequência. Note-se que esse é um procedimento fundamental do ponto de vista prático, já que possibilita avaliar a qualidade dos resultados providos por tais formulações.

A utilização das expressões desenvolvidas neste capítulo permite realizar uma avaliação do efeito médio da dependência da frequência do solo no cálculo de parâmetros importantes para caracterização do comportamento de aterramentos frente a correntes de descargas atmosféricas. Esse é o objetivo do próximo capítulo.

5. ANÁLISE DO EFEITO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO NA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

5.1 - Introdução

Os desenvolvimentos do capítulo 4 culminaram com a obtenção de expressões que podem ser empregadas para estimar a dependência da frequência dos parâmetros do solo em função da resistividade em baixa frequência. A disponibilidade de tais expressões permite, juntamente com um modelo eletromagnético rigoroso para simulação do aterramento, a realização de uma análise de sensibilidade sistemática para avaliação do efeito médio da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento impulsivo de sistemas de aterramentos.

Como referência, a quase totalidade dos trabalhos que abordam o cálculo da resposta transitória de aterramentos despreza a dependência da frequência e assume que os parâmetros do solo são constantes [61]-[76]. Em geral, o valor adotado para a resistividade é aquele medido por instrumentos convencionais, que aplicam sinais de baixa frequência (~100 Hz) ao solo [1]. Segundo uma abordagem similar, adota-se um valor de permissividade relativa entre 4 e 81, de acordo com a umidade do solo [1]. Em particular, vale salientar que em duas publicações recentes o eminente pesquisador L. Grcev apresentou uma série de resultados de simulação do comportamento impulsivo de eletrodos [8] e malhas de aterramento [9]. A partir desses resultados, estabeleceu-se um conjunto de conclusões referentes a parâmetros importantes na caracterização do comportamento transitório de aterramentos, por exemplo, o comprimento efetivo (eletrodos), a área efetiva (malhas) e o coeficiente de impulso (relação entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento). Em todas as simulações, considerou-se um valor constante de resistividade, independente da frequência, e uma permissividade relativa igual a 10, também independente da frequência [8], [9]. Ora, os resultados experimentais apresentados no capítulo 3 deixam claro que a incorreta consideração de parâmetros elétricos do solo constantes implica erros significativos no cálculo da resposta impulsiva do aterramento. Isso indica que, embora conservadores, os resultados apresentados em [8] e [9] contêm desvios.

Tendo em conta esse cenário, o objetivo deste capítulo é apresentar os principais resultados advindos de uma extensa análise de sensibilidade do impacto da dependência da frequência dos parâmetros do solo na resposta transitória de aterramentos elétricos. Os desenvolvimentos seguintes correspondem, basicamente, a duas publicações do autor [77], [78]. Resultados adicionais, não incluídos neste capítulo, podem ser encontrados em outras duas publicações [60], [79].

5.2 - Desenvolvimentos

5.2.1. Simulação da resposta do aterramento

As simulações do comportamento transitório do aterramento foram realizadas utilizando-se o *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM), cujos detalhes e validação com resultados experimentais estão apresentados em [5]. Em síntese, esse modelo discretiza o sistema de aterramento em diversos elementos e determina o acoplamento eletromagnético entre eles de forma rigorosa empregando-se os potenciais vetor e escalar. Todos os cálculos são realizados no domínio da frequência, o que permite a inclusão direta da dependência dos parâmetros do solo. Resultados no domínio do tempo são obtidos pela aplicação de uma transformada inversa de Fourier.

Avaliam-se neste capítulo arranjos de aterramento compostos por eletrodos horizontais de raio 7 mm, enterrados a 0,5 m de profundidade no solo e de comprimentos entre 5 e 90 m. Os resultados obtidos para essa configuração permitem ilustrar com clareza o efeito da dependência da frequência no comportamento de aterramentos elétricos. Também, como discutido no fim deste capítulo, os resultados determinados para eletrodos horizontais são representativos de outros arranjos de aterramento.

As ondas de corrente injetadas nos eletrodos estão ilustradas na Fig. 5.1. De acordo com [80], as formas de onda típicas das primeiras descargas de retorno têm um formato inicial côncavo seguido de um crescimento abrupto próximo ao primeiro pico e diversos picos adicionais, sendo, em geral, o segundo pico o maior deles. As ondas típicas de descargas subsequentes apresentam usualmente um único pico e uma forma relativamente suave. As formas de ondas da Fig. 5.1 procuram reproduzir essas características e consideram os principais parâmetros medianos de ondas de corrente reais de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, medidas na estação do Morro do Cachimbo localizada em Minas Gerais [81].

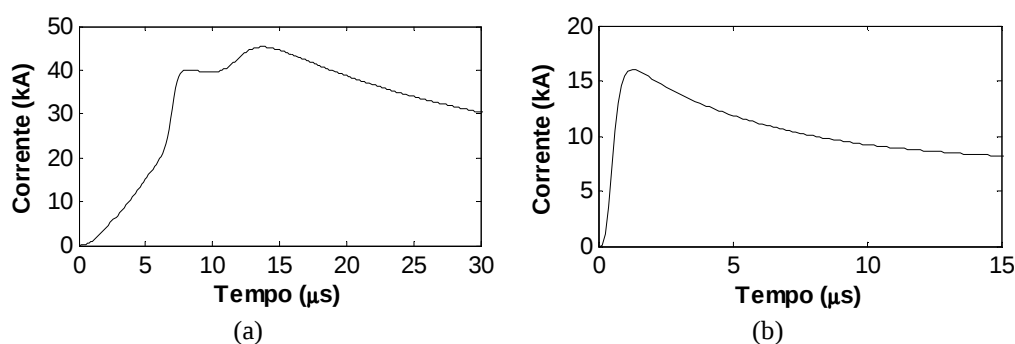


Fig. 5.1 - Ondas de correntes representativas de (a) primeiras descargas de retorno e (b) descargas subsequentes, medidas na Estação do Morro do Cachimbo [81]. Adaptado de [82].

Os seguintes parâmetros são calculados: resistência de aterramento de baixa frequência (R_{LF}), impedância harmônica de aterramento [$Z(\omega)$], elevação de potencial do aterramento (GPR), impedância impulsiva de aterramento (Z_p) e coeficiente de impulso (I_C). As definições desses parâmetros são apresentadas no início de cada item de resultados e também podem ser consultadas em textos clássicos da área [1], [8].

5.2.2. Comportamento dos parâmetros do solo

Nas simulações, são considerados seis valores de resistividade em baixa frequência, $\rho_0 = 100, 300, 600, 1000, 2000$ e $4000 \Omega m$, os quais abrangem solos de resistividade baixa (100 e 300 Ωm), moderada (600 e 1000 Ωm) e elevada (2000 e 4000 Ωm). Nas simulações, o efeito da ionização do solo foi desconsiderado.

Duas hipóteses são adotadas para os parâmetros do solo: i) parâmetros constantes e independentes da frequência, $\rho = \rho_0$ e $\epsilon_r = 10$ e ii) parâmetros dependentes da frequência e estimados pelas expressões (4.3) e (4.4) propostas no capítulo 4 desta tese.

A Fig. 5.2 ilustra a dependência da frequência da resistividade relativa (ρ_r) e da permissividade relativa (ϵ_r) para os solos considerados, estimada pelas expressões (4.3) e (4.4).

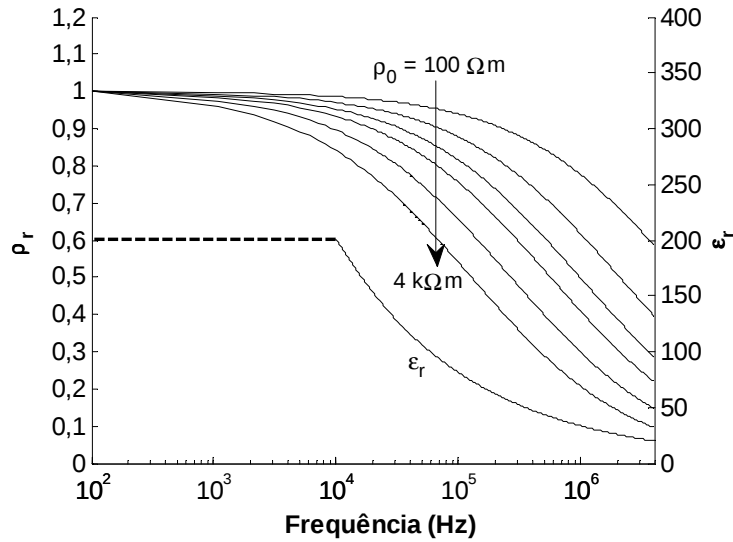
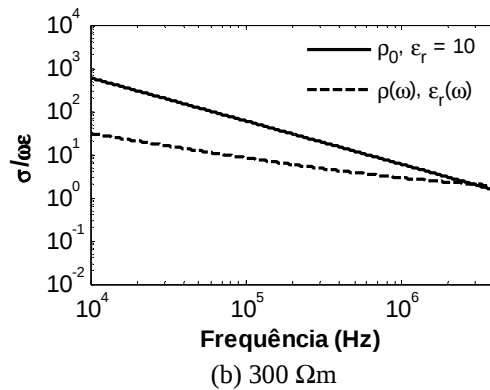
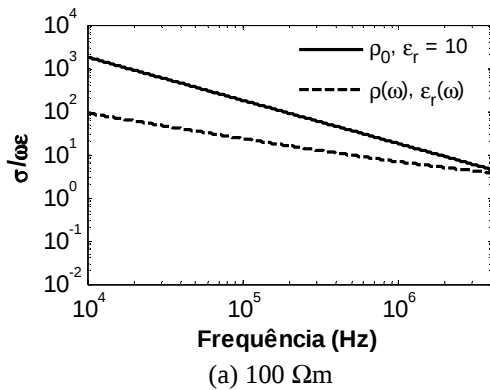


Fig. 5.2 - Dependência da frequência da resistividade relativa, ρ_r , e da permissividade relativa, ϵ_r , de acordo com as equações (4.3) e (4.4) do capítulo 4, para solos de resistividade em baixa frequência ρ_0 de 100, 300, 600, 1000, 2000 e 4000 Ωm .

Note-se que, conforme comportamento observado para os resultados de medição de campo apresentados no capítulo 4, a resistividade relativa diminui com o crescimento da frequência e tal redução torna-se mais pronunciada à medida que a resistividade em baixa frequência aumenta.

No caso da permissividade relativa, uma única curva média conservadora é empregada para todos os solos. De acordo com a Fig. 5.2, na faixa de 10 kHz a 1 MHz, a permissividade relativa assume valores muito maiores do que aqueles usualmente considerados na hipótese de parâmetros constantes (normalmente entre 10 e 20). Apenas na faixa superior do espectro a permissividade relativa apresenta valores mais baixos, tendendo para cerca de 20 acima de 1 MHz. Para frequências inferiores a 10 kHz, adotou-se um valor de ϵ_r constante e igual àquele em 10 kHz em função da maior incerteza associada à medição desse parâmetro nessa faixa.

A corrente que dispersa dos eletrodos de aterramento para o solo é composta de duas parcelas, uma de natureza condutiva e outra de natureza capacitiva. A razão entre essas duas parcelas é expressa, no domínio da frequência, por $\sigma/\omega\epsilon$. Essa razão define, também, a relação entre a taxa de energia dissipada e armazenada no solo para cada frequência. A Fig. 5.3 ilustra o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo na razão $\sigma/\omega\epsilon$ para faixa entre 10 kHz e 4 MHz.



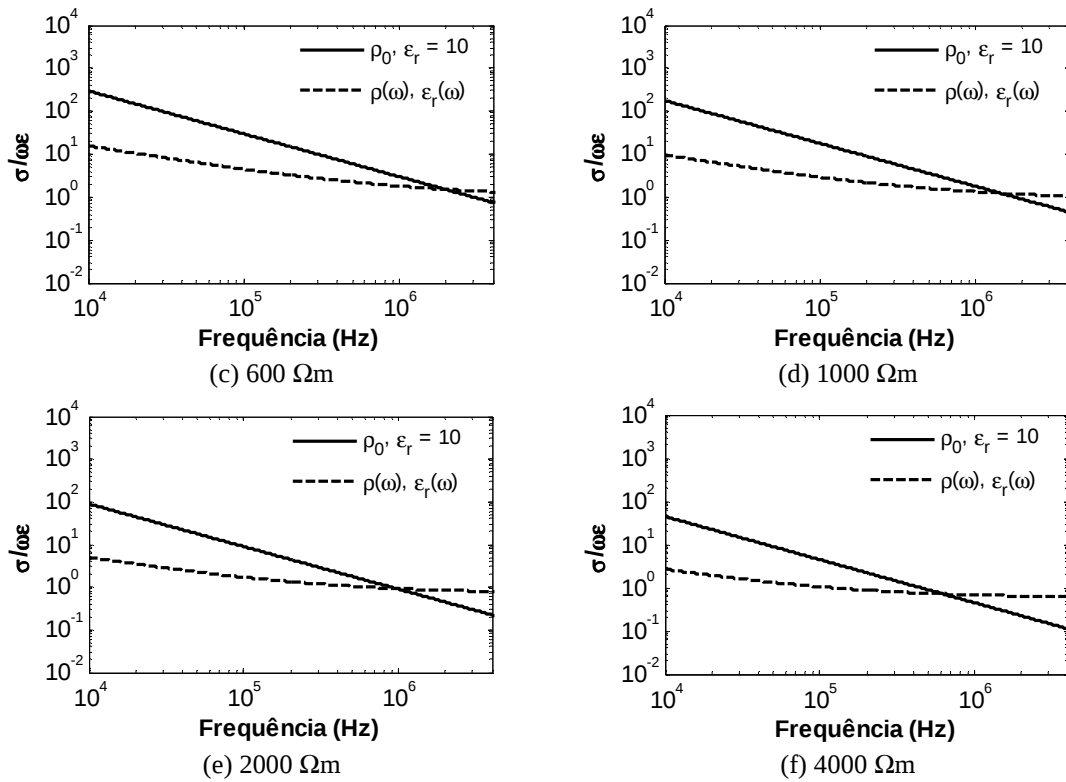


Fig. 5.3 - Razão entre as correntes condutiva e capacitiva no solo, $\sigma/\omega\epsilon$, para valores de resistividade em baixa frequência ρ_0 de (a) 100 Ωm , (b) 300 Ωm (c) 600 Ωm (d) 1000 Ωm (e) 2000 Ωm e (f) 4000 Ωm , sob a hipótese de parâmetros constantes e dependentes da frequência.

No caso de parâmetros constantes, a relação $\sigma/\omega\epsilon$ apresenta valores elevados em 10 kHz, da ordem de 10^3 – 10^2 , e decresce continuamente com o aumento da frequência tendendo para valores da ordem de 10^1 – 10^{-1} na faixa superior do espectro.

No caso de parâmetros dependentes da frequência, a razão $\sigma/\omega\epsilon$ tem valores menores para frequências inferiores a 1 MHz, em relação àqueles determinados sob a hipótese de parâmetros constantes. Isso é devido aos valores elevados de permissividade relativa em comparação com aqueles usualmente empregados (~ 10). À medida que a frequência aumenta, a razão $\sigma/\omega\epsilon$ também decresce, a despeito do aumento da condutividade. Em uma dada frequência, que diminui com a resistividade ρ_0 , as curvas de $\sigma/\omega\epsilon$ para parâmetros constantes e dependentes da frequência se cruzam. A partir desse ponto, a razão $\sigma/\omega\epsilon$ torna-se maior para o caso de parâmetros dependentes da frequência e fica basicamente constante. Isso é decorrente do aumento acentuado da condutividade na faixa superior do espectro e também devido à redução da permissividade que tende para um valor próximo de 20.

Em síntese, das curvas da Fig. 5.3 depreende-se que, no caso de parâmetros dependentes da frequência, o efeito capacitivo torna-se mais pronunciado para frequências menores do que 1 MHz, sobretudo inferiores a 500 kHz. Adicionalmente, isso implica que, nessa mesma faixa de frequências, há um aumento da relação entre a taxa de energia armazenada e dissipada no solo.

5.3 – Resultados

5.3.1. Impedância harmônica

A impedância harmônica é uma grandeza complexa dada pela razão entre os fasores de elevação de potencial no aterramento e de corrente injetada, $Z(\omega) = V(\omega)/I(\omega)$.

As curvas da Fig. 5.4 ilustram o impacto da dependência da frequência dos parâmetros do solo no módulo e na fase da impedância harmônica de um eletrodo horizontal de 30 m enterrado em solos de resistividade baixa (a), moderada (b) e elevada (c). Em todos os casos, a partir de uma dada frequência, a dependência dos parâmetros do solo provoca uma redução do módulo da impedância, em relação aos resultados da hipótese de parâmetros constantes. A partir dessa mesma frequência, verifica-se um aumento do efeito capacitivo, que pode ser identificado pela redução do valor do ângulo de fase.

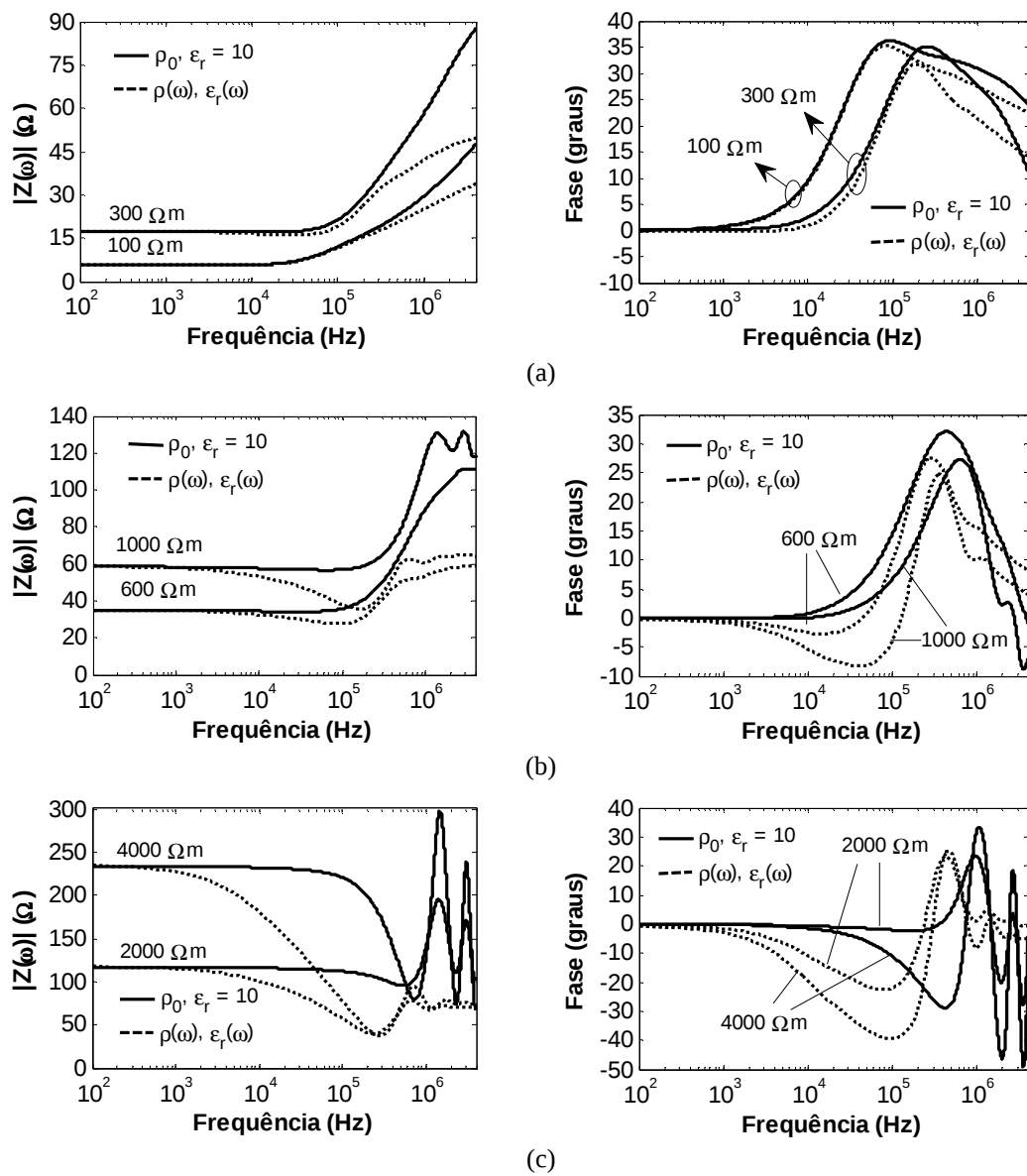


Fig. 5.4 - Impedância harmônica de aterramento de um eletrodo horizontal de 30 m, 7 mm de raio, enterrado a 0,5 m de profundidade em solos de resistividade (a) baixa, (b) moderada e (c) elevada, sob a hipótese de parâmetros constantes e dependentes da frequência.

A frequência na qual os dois efeitos citados, redução do módulo de $Z(\omega)$ e aumento do efeito capacitivo, começam a se manifestar é tão menor quanto maior é a resistividade do solo em baixa frequência. Além disso, esses mesmos dois efeitos são mais pronunciados para solos de resistividade mais elevada. Isso pode ser prontamente compreendido analisando-se as curvas da Fig. 5.2 e 5.3, que denotam o comportamento dos parâmetros do solo empregado nas simulações sob a hipótese de parâmetros dependentes da frequência. Primeiro, observe-se que a redução relativa da resistividade é tão mais significativa quanto maior é a resistividade do solo em baixa frequência; portanto, espera-se uma maior redução da impedância nesses casos. Segundo, o efeito da corrente capacitiva é naturalmente mais relevante em solos de resistividade mais elevada, em função dos valores moderados (menores do que 10) ou baixos (próximos da unidade) assumidos pela relação $\sigma/\omega\epsilon$, que denota a composição de corrente no meio.

Ainda vale destacar que, pela análise das Figs. 5.2 e 5.3, a redução da impedância na faixa de frequências inferiores a 1 MHz se deve tanto à redução da resistividade com o aumento da frequência quanto aos valores elevados de permissividade. Após essa faixa, o efeito da diminuição da resistividade prevalece, uma vez que a permissividade relativa aproxima-se de 20, que é da ordem de grandeza do valor assumido na hipótese de parâmetros constantes.

5.3.2. Elevação de potencial no aterramento

A elevação de potencial desenvolvida no aterramento (GPR) é obtida pela transformada de Fourier inversa do produto entre a impedância harmônica, $Z(\omega)$, e a transformada de Fourier direta do sinal de corrente injetado no aterramento, $I(\omega)$, ou seja:

$$GPR = F^{-1} \{ Z(\omega) \cdot I(\omega) \} \quad (5.1)$$

Dos resultados do item anterior, claro está que o impacto da variação dos parâmetros na impedância harmônica reflete diretamente no cálculo do GPR desenvolvido no aterramento. Ainda, de acordo com (5.1), a influência de $Z(\omega)$ na determinação do GPR depende do conteúdo de frequência da corrente injetada no aterramento.

A Fig. 5.5 apresenta os resultados de GPR simulados sob as hipóteses de parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência, para o mesmo eletrodo de 30 m e resistividades consideradas no item 5.3.1.

Pela análise das curvas apresentadas, o efeito da dependência da frequência do solo no GPR calculado, notadamente a sua redução, é pouco relevante para solos de resistividade ρ_0 inferior a 300 Ωm , considerável para ρ_0 superior a 600 Ωm e bastante significativo para ρ_0 igual ou superior a 1000 Ωm . Esse resultado está de acordo com aqueles obtidos para a impedância harmônica, que denotam que as maiores reduções da impedância estão associadas aos solos de maior resistividade.

Os resultados também indicam que o efeito de redução do GPR é mais expressivo na frente da onda e tende a se atenuar ao longo da cauda. Isso ocorre porque à frente da onda estão associados os componentes de alta frequência e é justamente nas faixas superiores do espectro que o efeito da dependência dos parâmetros do solo, sobretudo a redução da resistividade, é mais significativo. Por outro lado, à cauda da onda estão associados os componentes de baixa frequência. Nas faixas inferiores do espectro, o efeito da dependência da frequência do solo na redução da impedância harmônica, e consequentemente do GPR, é pouco relevante, com exceção dos casos de resistividades muito elevadas (2000 Ωm ou superior).

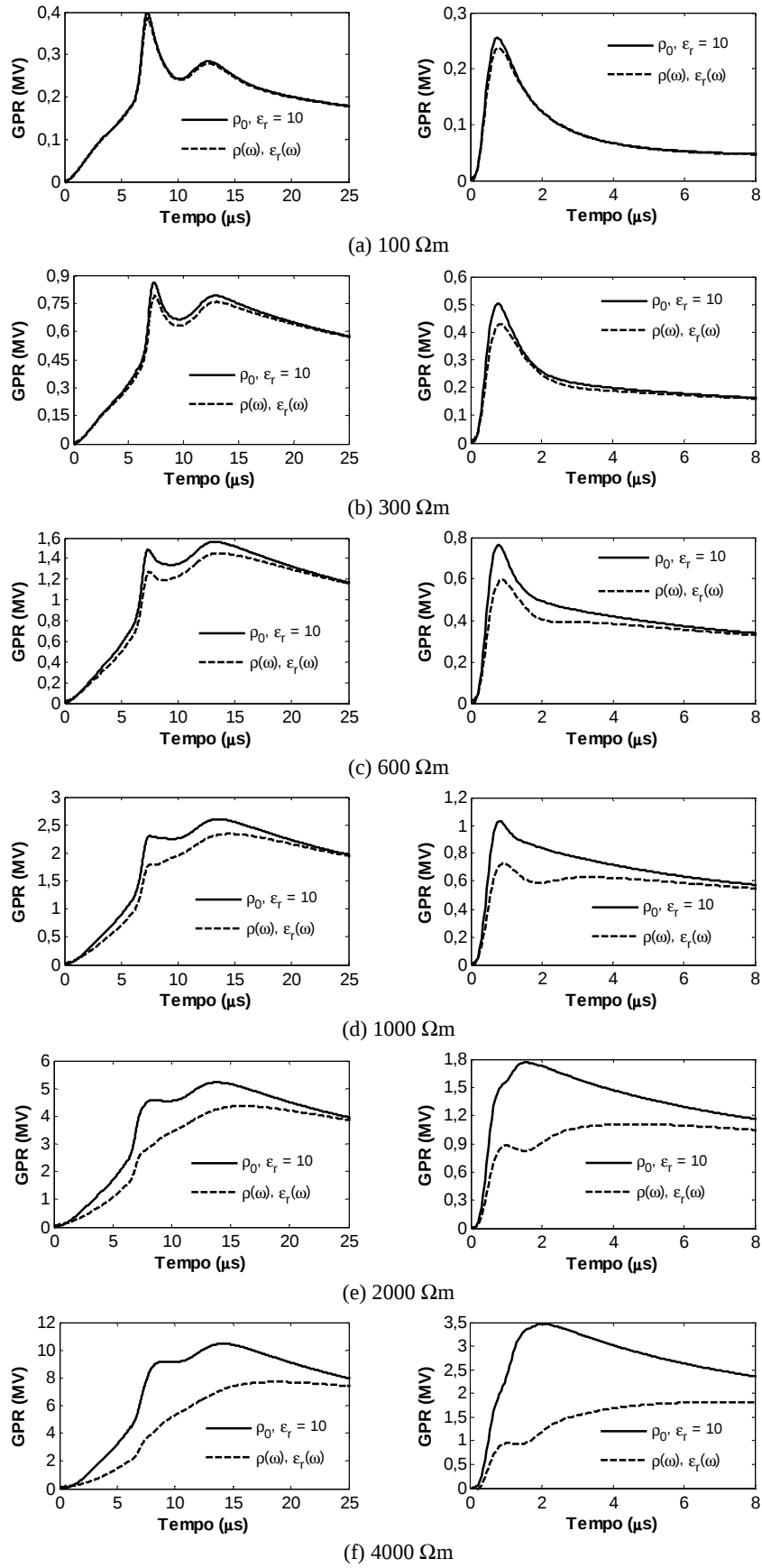


Fig. 5.5 - GPR simulado de um eletrodo de 30 m, 7 mm de raio, enterrado a 0,5 m de profundidade submetido a correntes representativas de *primeiras descargas de retorno* (**esquerda**) e *descargas subsequentes* (**direita**) para solos de resistividade ρ_0 de: (a) 100 Ωm , (b) 300 Ωm , (c) 600 Ωm , (d) 1000 Ωm , (e) 2000 Ωm e (f) 4000 Ωm .

Pelas mesmas razões descritas anteriormente, o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo é mais acentuado para as correntes de descargas subsequentes, uma vez que tais correntes possuem componentes de frequência na faixa superior do espectro de maior amplitude, em relação àqueles associados às correntes de primeiras descargas.

Ainda, após um dado instante de tempo, que aumenta com o crescimento de ρ_0 , as curvas de GPR obtidas para as duas hipóteses de parâmetros do solo se sobrepõem. Isso acontece porque, a partir desse instante, o comportamento do aterramento é governado apenas por sua resistência de aterramento, parâmetro este que não é influenciado pela dependência da frequência dos parâmetros do solo. A sobreposição das curvas de GPR para solos de resistividade mais elevada ocorre apenas após intervalos de tempo mais longos, já que para tais solos o decrescimento da resistividade se inicia em frequências mais baixas (vide Fig. 5.2).

5.3.3. Impedância impulsiva e comprimento efetivo

Resultados similares àqueles da Fig. 5.5 foram desenvolvidos para os mesmos solos, porém considerando eletrodos de comprimento variando entre 5 m e 90 m. A partir de tais resultados, a impedância impulsiva de aterramento Z_p , dada pela razão entre os valores de pico do GPR e da corrente injetada, foi calculada para obtenção dos gráficos apresentados nas Figs. 5.6 e 5.7.

Antes de analisar os resultados, é importante introduzir o conceito de comprimento efetivo. Quando o aterramento é submetido a sinais com componentes de alta frequência, como as descargas atmosféricas, a corrente que dispersa dos eletrodos para o solo apresenta uma distribuição não uniforme ao longo do mesmo, em decorrência do fenômeno de atenuação [1]. Basicamente, a densidade de corrente de dispersão diminui ao longo do eletrodo. Dessas considerações, deriva-se o conceito de comprimento efetivo (L_{EF}) que corresponde a um comprimento limite do eletrodo de aterramento. Aumentos adicionais do comprimento além desse limite não implicam reduções relevantes da impedância impulsiva de aterramento. Isso ocorre justamente porque a atenuação do campo para tal comprimento é tão acentuada que a corrente que dispersa para o solo a partir dali é desprezível. A existência de eletrodo a partir desse ponto é inócua e não afeta o valor da impedância impulsiva.

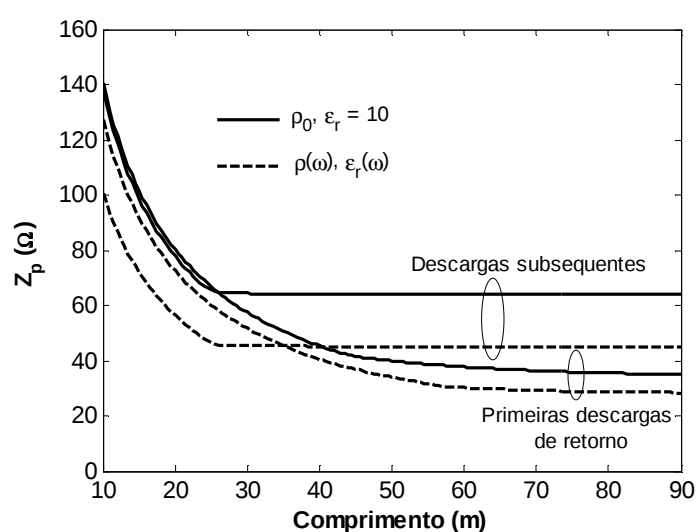


Fig. 5.6 - Impedância impulsiva Z_p de eletrodos horizontais, raio 7 mm, enterrados a 0,5 m de profundidade em um solo de 1000 Ωm , considerando correntes representativas de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes.

A Fig. 5.6 ilustra o comportamento de Z_p em função do comprimento do eletrodo para um solo específico de $\rho_0 = 1000 \, \Omega\text{m}$, considerando correntes representativas de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes e ambas as hipóteses de parâmetros do solo. De um modo geral, as curvas indicam um decrescimento inicial de Z_p com o aumento do comprimento do eletrodo até que o comprimento efetivo L_{EF} é atingido. A partir desse ponto, Z_p permanece basicamente constante para aumentos adicionais do comprimento. É interessante notar que o comprimento efetivo é menor para correntes de descargas subsequentes. Isso ocorre porque as correntes subsequentes, cujas frequências representativas são mais elevadas, ficam submetidas a efeitos de atenuação mais pronunciados ao se propagarem ao longo dos eletrodos de aterramento. O efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo na redução de Z_p é discutido a seguir.

A Fig. 5.7 apresenta curvas de Z_p em função do comprimento separadamente para primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, considerando seis valores de resistividade ρ_0 . Adicionalmente, a curva de resistência de aterramento em baixa frequência R_{LF} foi incluída nos gráficos.

Os resultados mostram que a dependência da frequência dos parâmetros do solo provoca uma redução considerável ou muito significativa da impedância impulsiva para solos de resistividade igual ou superior a $600 \, \Omega\text{m}$. A redução de Z_p está intimamente associada à diminuição dos níveis de GPR em decorrência da variação dos parâmetros elétricos do solo. Dessa maneira, pelas mesmas razões já descritas, a redução de Z_p é mais pronunciada para solos de maior resistividade e para correntes de descargas subsequentes. Os resultados também indicam que, apesar de a dependência da frequência basicamente não afetar o comprimento efetivo no caso de correntes de descargas subsequentes, há um aumento de L_{EF} para as correntes de primeiras descargas de retorno. Esse efeito em específico será mais bem ilustrado e discutido na subseção seguinte.

É interessante observar que, sob a hipótese de parâmetros constantes, a impedância impulsiva e a resistência de aterramento são praticamente iguais para comprimentos inferiores ao efetivo, tanto para as correntes de primeiras descargas de retorno quanto para as de descargas subsequentes. Em termos práticos, isso implica que a impedância impulsiva deveria ser sempre igual ou superior à resistência de aterramento, já que, uma vez atingido o comprimento efetivo, Z_p fica constante enquanto que R_{LF} continua a decrescer. Essas conclusões, em concordância com os resultados de simulação apresentados por Grcev em [8], divergem de resultados de medições apresentados em [56] que indicam valores de Z_p inferiores à resistência de aterramento no caso de eletrodos curtos.

Por outro lado, sob a hipótese de parâmetros dependentes da frequência, a impedância impulsiva é menor do que a resistência de aterramento para eletrodos de comprimento inferior a L_{EF} . Para eletrodos mais longos, o decrescimento contínuo de R_{LF} faz com que a resistência de aterramento torne-se menor do que Z_p para um dado comprimento, que é identificado pelo ponto no qual as curvas de Z_p e R_{LF} se cruzam. Observe que esse comprimento aumenta à medida que a resistividade do solo ρ_0 aumenta. Em termos práticos, esse resultado indica que, ao menos para eletrodos de comprimento igual ou inferior ao efetivo, a impedância impulsiva de aterramento é menor do que a resistência de aterramento.

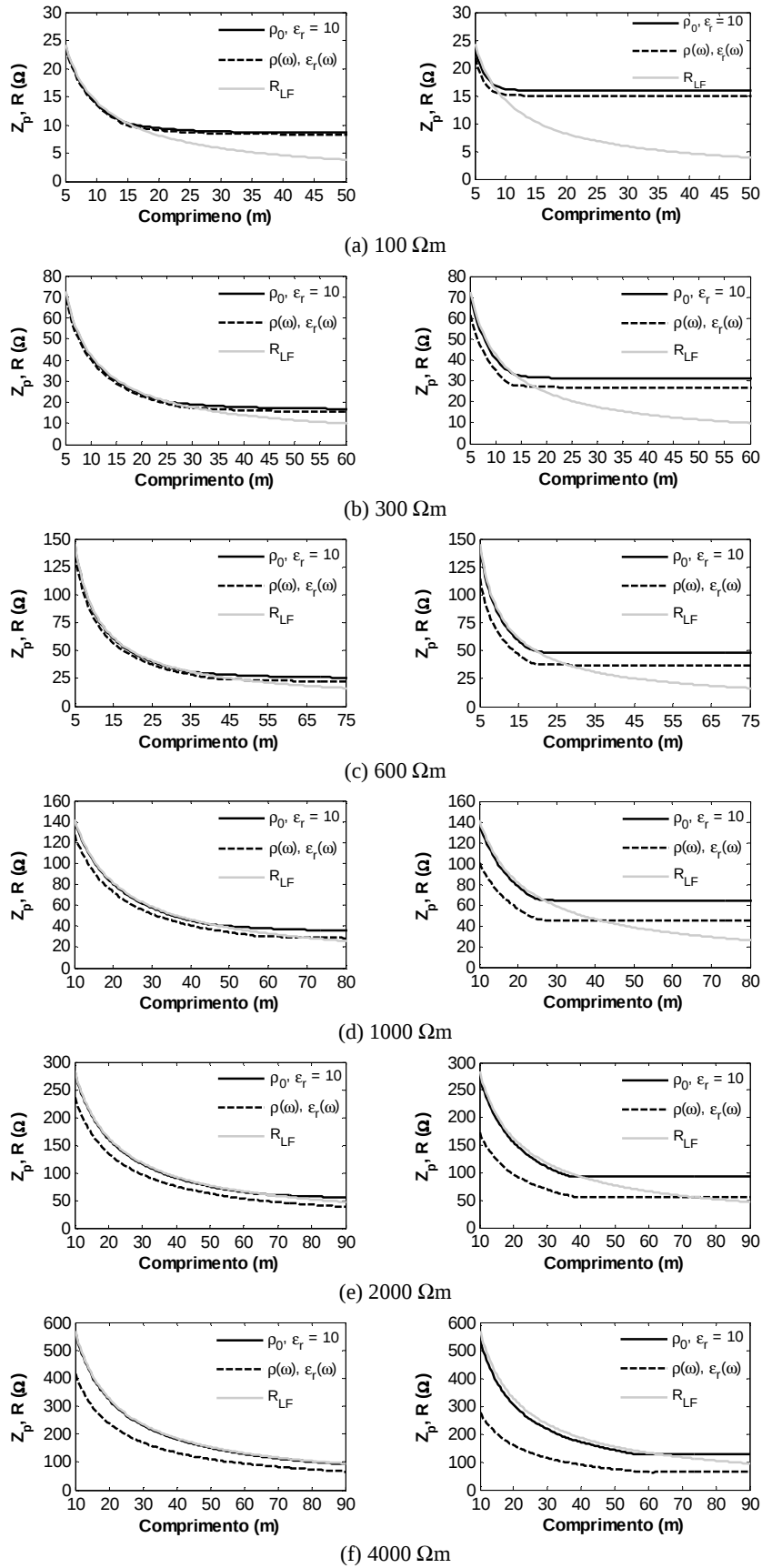


Fig. 5.7 - Impedância impulsiva Z_p de eletrodos horizontais, 7 mm de raio, enterrados a 0,5 m de profundidade submetidos a correntes representativas de *primeiras descargas de retorno* (**esquerda**) e *descargas subsequentes* (**direita**) para solos de resistividade ρ_0 de: (a) 100 Ωm , (b) 300 Ωm , (c) 600 Ωm , (d) 1000 Ωm , (e) 2000 Ωm e (f) 4000 Ωm .

5.3.4. Coeficiente de impulso

Com base nas curvas da Fig. 5.7, é possível calcular outro importante parâmetro para aplicações de proteção contra descargas atmosféricas, que corresponde ao coeficiente de impulso I_C , dado pela razão entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento. Esse é um parâmetro de interesse prático, pois, na maior parte dos casos, a medição da impedância impulsiva de aterramento em condições de campo é inviável ou apresenta dificuldades. A prática comum é realizar a medição da resistência de aterramento. Assim, o conhecimento do coeficiente de impulso, $I_C = Z_p/R_{LF}$, permite estimar a resposta do aterramento frente a descargas atmosféricas, expressa por Z_p , a partir da resistência de aterramento medida.

A Fig. 5.8 ilustra como a dependência da frequência do solo afeta o coeficiente de impulso separadamente para as primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes.

Tipicamente, sob a hipótese de parâmetros constantes, o valor de I_C é aproximadamente unitário para eletrodos de comprimento menor do que L_{EF} . Uma vez atingido o comprimento efetivo, I_C cresce continuamente já que Z_p permanece constante enquanto que R_{LF} segue diminuindo com o aumento do comprimento. O ponto de inflexão na curva de I_C determina o L_{EF} .

Os resultados para a hipótese de parâmetros dependentes da frequência mostram que, embora a forma das curvas seja similar àquelas obtidas para parâmetros constantes, em todos os casos a dependência da frequência provoca uma redução dos valores de I_C . Novamente, e por razões já comentadas, essa redução é mais expressiva para solos de maior resistividade e para as descargas subsequentes. Como referência, a Tabela 5.1 apresenta os valores de I_C para eletrodos de comprimento inferior a L_{EF} sob as duas hipóteses de parâmetros do solo, considerando as resistividades analisadas e as correntes de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes.

Em termos práticos, os resultados da Tabela 5.1 indicam que, ao contrário do que é usualmente assumido na literatura especializada [8], [9], o coeficiente de impulso pode ser inferior à unidade, notadamente no caso de eletrodos menores do que L_{EF} . Isso é uma consequência direta da redução dos valores de Z_p em decorrência da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo.

Como já comentado, o ponto de inflexão nas curvas de I_C indica o comprimento efetivo, isto é, aquele ponto em que Z_p permanece praticamente constante enquanto R_{LF} continua diminuindo. De acordo com os resultados da Fig. 5.8, percebe-se que o ponto de inflexão das curvas de I_C correspondentes às descargas subsequentes é basicamente mantido. Por outro lado, para as curvas associadas às primeiras descargas, nota-se um deslocamento do ponto de inflexão para a direita, ou seja, um aumento de L_{EF} . Isso pode ser entendido recorrendo-se novamente às curvas da Fig. 5.3 que comparam a relação $\sigma/\omega\epsilon$ para as hipóteses de parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência. O fenômeno de atenuação das ondas de tensão e de corrente que se propagam ao longo do eletrodo depende da relação entre a energia dissipada e a energia armazenada no solo. Observe-se que, em decorrência dos valores mais elevados de permissividade no caso de parâmetros dependentes da frequência, a relação entre os efeitos de armazenamento e de dissipação aumenta na faixa típica de componentes de frequência das primeiras descargas. Assim, devido à redução relativa dos efeitos de dissipação e, por conseguinte, diminuição da atenuação das ondas que se propagam no eletrodo, há um aumento do comprimento efetivo para as primeiras descargas de retorno. Esse aumento de L_{EF} é mais expressivo para solos de maior resistividade.

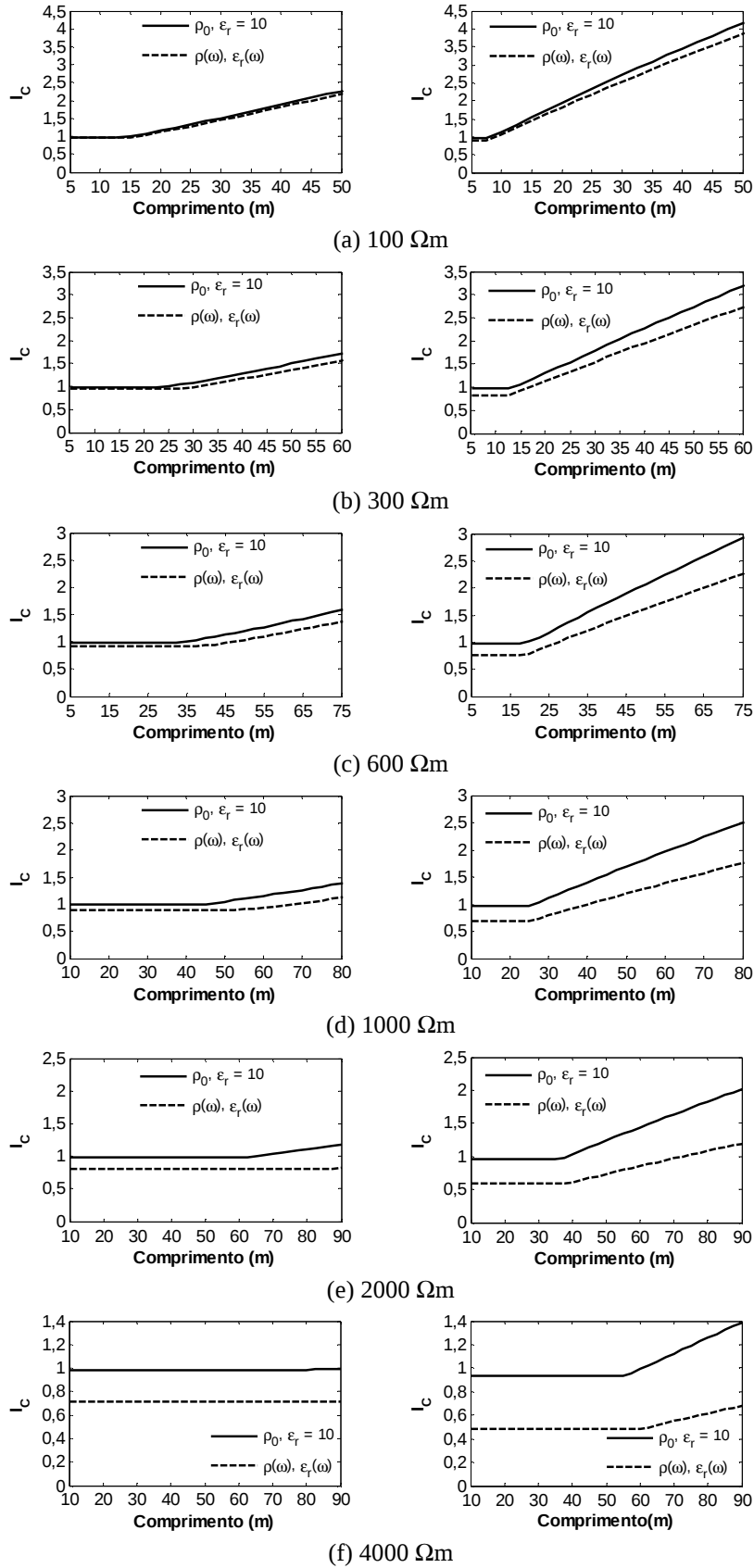


Fig. 5.8 - Coeficiente de impulso, $I_C = Z_p/R_{LF}$, de eletrodos horizontais, 7 mm de raio, enterrados a 0,5 m de profundidade submetidos a correntes representativas de *primeiras descargas de retorno* (esquerda) e *descargas subsequentes* (direita) para solos de resistividade ρ_0 de: (a) 100 Ωm , (b) 300 Ωm , (c) 600 Ωm , (d) 1000 Ωm , (e) 2000 Ωm e (f) 4000 Ωm .

Tabela 5.1 - Efeito médio da dependência da frequência na redução do coeficiente de impulso I_C para eletrodos de comprimento inferior ao efetivo (L_{EF}).

ρ_0 (Ωm)	Primeiras descargas de retorno		Descargas subsequentes	
	$\rho_0, \epsilon_r=10$	$\rho(\omega), \epsilon(\omega)$	$\rho_0, \epsilon_r=10$	$\rho(\omega), \epsilon(\omega)$
100	1	0,98	1	0,91
300	1	0,95	1	0,84
600	1	0,92	1	0,77
1000	1	0,89	1	0,70
2000	1	0,82	1	0,60
4000	1	0,72	1	0,50

5.4 – Conclusões e considerações sobre o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo na resposta transitória de outros arranjos de aterramento

Tendo em conta os resultados e as análises apresentadas do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento transitório de eletrodos horizontais de aterramento, as seguintes conclusões preliminares podem ser destacadas:

- A dependência da frequência do solo provoca uma redução do módulo da impedância harmônica e também um crescimento do efeito capacitivo, a partir de uma dada frequência. Esses dois efeitos, redução do módulo de $Z(\omega)$ e acentuação do efeito capacitivo, tornam-se mais pronunciados à medida que a resistividade do solo em baixa frequência aumenta. Ainda, a frequência a partir da qual os dois efeitos citados se manifestam se reduz para maiores valores de ρ_0 .

O efeito da dependência da frequência na impedância harmônica, grandeza complexa e definida no domínio da frequência, reflete diretamente em grandezas definidas no domínio do tempo, por exemplo, a elevação de potencial no aterramento (GPR), a impedância impulsiva (Z_p), o comprimento efetivo (L_{EF}) e o coeficiente de impulso (I_C). Sobre o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo nessas grandezas, os seguintes aspectos merecem ser ressaltados:

- Os valores de GPR e de Z_p apresentam reduções quando se considera a dependência da frequência dos parâmetros do solo, em relação aos resultados obtidos sob a hipótese usual de parâmetros constantes. Tais reduções são pouco significativas para solos de resistividade ρ_0 inferior a 300 Ωm , consideráveis para solos de ρ_0 superior a 600 Ωm e bastante expressivas para solos de ρ_0 igual ou superior a 1000 Ωm . De um modo geral, o efeito da dependência da frequência é mais acentuado para as descargas subsequentes.
- O comprimento efetivo para descargas subsequentes praticamente não é modificado quando se considera a dependência da frequência dos parâmetros do solo. Por outro lado, observa-se um aumento de L_{EF} no caso das primeiras descargas de retorno. Isso se deve ao aumento relativo da energia armazenada no campo elétrico em relação à energia dissipada, em decorrência dos valores elevados de permissividade em comparação àqueles usualmente considerados na hipótese de parâmetros constantes.
- O formato das curvas de I_C para ambas as hipóteses de parâmetros do solo é similar. Contudo, a dependência da frequência do solo provoca uma redução geral dos valores de I_C . Tal redução é mais significativa para solos de maior resistividade e para correntes de descargas subsequentes. Nesses casos, eletrodos de comprimento menor do que L_{EF} possuem valores de I_C entre 0,7 e 0,5 para solos de resistividade ρ_0 variando de 1000 Ωm

a $4000 \Omega m$. É importante salientar que esse resultado implica em termos práticos que, para eletrodos de comprimento inferior a L_{EF} , a impedância impulsiva é menor do que a resistência de aterramento. Essa conclusão está de acordo com resultados experimentais e contradiz a hipótese usualmente aceita de que a impedância impulsiva é igual ou maior do que a resistência de aterramento.

Os resultados e as conclusões anteriores constituem contribuições originais desta tese. O trabalho [77] apresentando na 31ª Conferência Internacional sobre Proteção contra Descargas Atmosféricas (*31th International Conference on Lightning Protection – ICLP*), que contempla parcialmente os resultados citados, foi premiado pelo comitê científico do evento por suas contribuições relevantes para o campo de proteção de sistemas elétricos contra descargas atmosféricas (vide Apêndice I).

Deve-se destacar que as análises apresentadas referem-se a eletrodos horizontais de aterramento. Essa configuração inicial foi escolhida por ser representativa de diversos arranjos de aterramento e em função da maior facilidade de se explorar o efeito da dependência da frequência nos principais parâmetros que caracterizam o comportamento transitório de aterramentos elétricos. Os resultados obtidos para essa configuração permitiram estabelecer as conclusões fundamentais sobre o efeito da dependência da frequência do solo no comportamento transitório do aterramento, notadamente as reduções de GPR, Z_P e I_C , que são mais pronunciadas para solos de maior resistividade e para correntes de descargas subsequentes.

Naturalmente, os estudos realizados foram expandidos para diversas outras configurações de interesse prático, tais como hastes ou conjunto de hastes, anéis e malhas de aterramento. De modo geral, os resultados obtidos para essas configurações são similares aos determinados para eletrodos horizontais. Inclusive, as reduções relativas de GPR, Z_P e I_C são basicamente mantidas. Isso era esperado, pois o efeito da dependência da frequência está associado essencialmente aos parâmetros do solo e não à configuração de eletrodos enterrados. Nesse sentido, entende-se que, no contexto desta tese, é desnecessária a apresentação de extensos resultados adicionais contemplando outros arranjos de aterramento. Para resultados específicos de arranjos compostos por hastes, conjuntos de hastes e anéis de aterramentos, a referência [60] pode ser consultada; para resultados específicos de malhas de aterramentos, a referência [79] pode ser consultada. Vale salientar que a referência [60] também inclui a proposição de fórmulas práticas para cálculo de grandezas, tais como Z_P , L_{EF} e I_C , sem a necessidade de utilização de modelos computacionais elaborados.

6. MODELO FÍSICO ORIGINAL PARA DESCRIÇÃO DA DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO

6.1 - Introdução

Nos capítulos anteriores, adotou-se uma abordagem prática, tipicamente de engenharia, na investigação do fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo e do efeito dessa dependência no comportamento transitório de aterramentos elétricos. Essa abordagem compreendeu os seguintes passos básicos: identificação do fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo (capítulos 1 e 2), proposição de uma metodologia experimental para mensurar essa dependência (capítulo 3), desenvolvimento de fórmulas para estimativa aproximada da dependência dos parâmetros com base em resultados experimentais (capítulo 4) e análise do impacto do fenômeno na resposta transitória de aterramentos (capítulo 5).

Com o intuito de gerar uma contribuição de caráter amplo ao tema, este capítulo aborda alguns aspectos físicos do fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo. Acredita-se que, além de expandir a abrangência deste trabalho, a compreensão dos mecanismos físicos básicos relacionados à dependência da frequência dos parâmetros do solo permite uma aplicação e interpretação mais consciente e aprofundada dos resultados apresentados nos capítulos anteriores.

Sendo assim, este capítulo apresenta inicialmente algumas considerações físicas qualitativas acerca da dependência da frequência dos parâmetros do solo, com foco nas relações de causalidade existentes entre a variação da condutividade e da permissividade com a frequência. Em seguida, tais relações de causalidade são avaliadas experimentalmente pela aplicação das clássicas relações de Kramers-Kronig a resultados de medição de $\rho(\omega)$ e $\varepsilon(\omega)$. Após uma breve discussão sobre a dispersão estatística observada no fenômeno da dependência da frequência do solo, propõem-se equações que consideram de forma simplificada essa dispersão e, adicionalmente, contemplam a relação de causalidade existente entre as variações da condutividade e da permissividade. Os desenvolvimentos deste capítulo são objeto parcial de duas publicações do autor [83], [84].

6.2 - Considerações físicas básicas sobre a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo

A matéria é composta por partículas elementares carregadas. Quando submetida a campos eletromagnéticos externos, essas partículas interagem com tais campos modificando-os [85]. Essa interação é quantificada classicamente por meio dos parâmetros constitutivos da matéria [18], [85], [86], [87]: condutividade elétrica (σ), permissividade elétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ). Eles expressam, sob um ponto de vista macroscópico, os efeitos resultantes da interação de campos eletromagnéticos com a matéria. Quando se consideram campos estáticos, tais parâmetros apresentam, em geral, valores bem definidos, que dependem basicamente das características do meio. Por outro lado, quando se considera a aplicação de campos alternados, têm-se alguns efeitos complementares, que podem afetar o comportamento dos parâmetros eletromagnéticos em função da frequência do campo aplicado. Note-se que as ligações entre átomos resultam em moléculas que são, na verdade, sistemas dinâmicos bastante complexos, sujeitos a leis quânticas, não clássicas [85]. Contudo, tendo em conta uma abordagem macroscópica e sob um ponto de vista de engenharia aplicada, o tratamento clássico do tema, embasado nas Equações de Maxwell, é suficiente.

Explicações detalhadas sobre o significado físico dos parâmetros constitutivos da matéria podem ser encontradas em livros de eletromagnetismo clássico [18], [85].

Explicações tradicionais sobre a origem da dependência da frequência dos parâmetros elétricos da matéria, condutividade e permissividade, podem ser encontradas em livros de eletromagnetismo clássico ou aplicado [18], [85], [88], livros sobre dielétricos [16], [17] ou textos consagrados da área [89]. Sendo assim, esta seção apresenta apenas uma síntese dos aspectos mais relevantes sobre a origem física da dependência da frequência dos parâmetros elétricos da matéria com o objetivo de realçar alguns pontos essenciais para os desenvolvimentos propostos neste capítulo. Também, vale destacar que os desenvolvimentos específicos desta seção não constituem simplesmente um resumo das referências citadas, mas expressam a visão do autor sobre o tema.

Antes de iniciar as discussões desta seção, é importante citar que, na maioria dos casos, a permeabilidade magnética do solo pode ser suposta igual à do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) e independente da frequência, com a exceção de certos tipos específicos de minério de ferro [49]. Desse modo, são abordados nesta seção apenas os fundamentos físicos associados à dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo (condutividade e permissividade).

Quando submetido a um campo elétrico harmônico $\vec{E}$, a densidade de corrente total $\vec{J}_T$ (soma das correntes condutiva $\vec{J}_C$ e de deslocamento $\vec{J}_D$) resultante no solo é relacionada com o rotacional do campo magnético $\vec{H}$ pela lei de Ampère-Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma_0 \vec{E} + j\omega\epsilon_* \vec{E} = \vec{J}_C + \vec{J}_D = \vec{J}_T \quad (6.1)$$

Em (6.1), a condutividade em baixa frequência σ_0 fornece uma medida da capacidade do meio de conduzir cargas elétricas e das perdas associadas ao processo de condução. Para o solo e na faixa de frequências de interesse deste trabalho, σ_0 é suposto um número real de acordo com evidências experimentais. A permissividade ϵ_* fornece uma medida da capacidade do meio de se polarizar sob a ação de um campo elétrico e da energia armazenada associada ao processo de polarização. Ao contrário de σ_0 , para as aplicações de interesse, a permissividade é suposta uma grandeza complexa:

$$\epsilon_* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (6.2)$$

Em (6.2), a parte real da permissividade ϵ' expressa a capacidade de polarização e de armazenamento de energia do meio e a parte imaginária ϵ'' expressa as perdas decorrentes do processo de polarização.

Basicamente, o processo de polarização corresponde a uma separação de cargas no meio em resposta à aplicação de um campo elétrico externo. Vários tipos de polarização podem ser induzidos em meios heterogêneos como o solo [89]: *polarização eletrônica* devido ao deslocamento da nuvem de elétrons com relação ao núcleo positivo dentro do átomo; *polarização atômica* devido ao deslocamento de átomos entre si em moléculas e compostos iônicos; *polarização dipolar* devido ao efeito do campo aplicado sobre a orientação de moléculas com dipolos permanentes; e finalmente *polarização interfacial* provocada pelo acúmulo de íons livres na interface entre materiais com diferentes condutividades e permissividade. Quando um meio heterogêneo é submetido a um campo elétrico estático, todos os tipos anteriores contribuem para a polarização total do meio.

Em geral, cada tipo diferente de polarização demanda um tempo distinto para ocorrer, normalmente chamado *tempo de relaxação*. Processos que envolvem o deslocamento de cargas de maior inércia são geralmente mais lentos e possuem maior tempo de relaxação. Tal fato significa que, dependendo da frequência do campo aplicado, alguns processos podem não contribuir para a polarização total no meio. Em termos macroscópicos, isso se traduz em uma

diminuição da polarização total do meio, com redução da capacidade de armazenamento de energia, à medida que a frequência do campo aplicado cresce e, portanto, uma redução da parte real da permissividade ϵ' com o aumento da frequência.

A Fig. 6.1 ilustra de forma esquemática o comportamento descrito. Note-se também que, ao longo do intervalo de frequência em que ocorre a redução de ϵ' , há um crescimento das perdas, expresso pelo aumento de ϵ'' , com um pico em uma frequência central, normalmente chamada de *frequência de relaxação*.

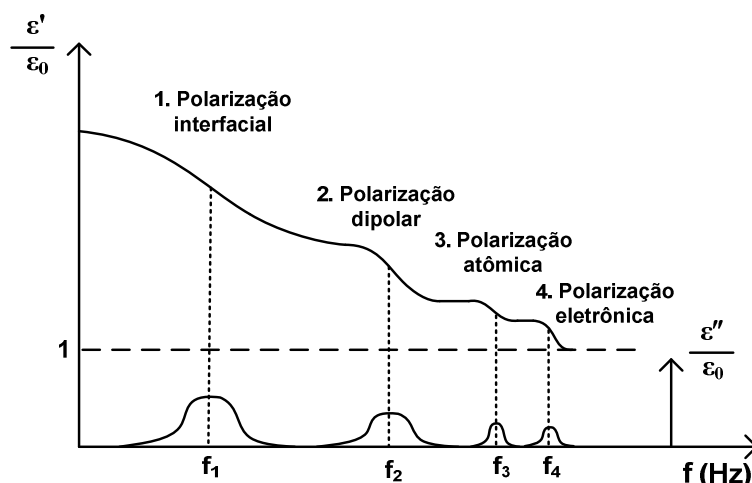


Fig. 6.1 - Representação esquemática da dependência da frequência das partes real e imaginária da permissividade complexa. Processos de polarização deixam de contribuir para a polarização total a partir de uma certa frequência do campo aplicado, o que se traduz macroscopicamente em uma redução da parte real da permissividade ϵ' . Nessa mesma frequência, observam-se picos, chamados picos de absorção, da parte imaginária da permissividade ϵ'' .

Vale ressaltar que a variação de ϵ' e ϵ'' com a frequência não são fenômenos independentes, mas relacionados. Isso pode ser fisicamente compreendido considerando o comportamento de um dipolo elétrico simples imerso em um meio dispersivo submetido a um campo elétrico harmônico de frequência variável. Nesse caso, existem dois efeitos mais relevantes. O primeiro, caracterizado por ϵ' , corresponde à tendência do dipolo de se orientar de acordo com o sentido do campo aplicado, induzindo polarização e armazenamento de energia no meio. O segundo, caracterizado por ϵ'' , corresponde às perdas em decorrência das forças de atrito a que fica submetido o dipolo enquanto se desloca em resposta ao campo aplicado. Essas perdas dependem da natureza física do meio e, também, são proporcionais à velocidade do dipolo e à distância deslocada.

As Figs. 6.2(a) e 6.2(b) ilustram, respectivamente, o comportamento de ϵ' e ϵ'' em função da frequência considerando o dipolo citado. Na faixa de baixas frequências, o dipolo é capaz de seguir as variações do campo aplicado e, como a velocidade é baixa, a maior parte da energia do campo é armazenada no meio e uma parcela muito pequena é dissipada na forma de calor (atrito). À medida que a frequência aumenta, há um crescimento das perdas em decorrência do aumento da velocidade dos dipolos e, portanto, uma redução proporcional da energia armazenada no meio. Do ponto de vista macroscópico, isso se traduz em um aumento de ϵ'' e em uma redução proporcional de ϵ' . Esse comportamento se mantém até que ϵ'' atinge um pico. Esse pico corresponde a uma frequência na qual o intervalo de tempo necessário para o dipolo se alinhar com o campo (tempo de relaxação) está exatamente sincronizado com o período do campo externo aplicado. Para essa frequência, as perdas por ciclo são máximas e a energia armazenada é basicamente a média dos limites de frequência inferior e superior. Aumentando-se a frequência a partir desse ponto, o dipolo não consegue mais acompanhar o campo aplicado sem defasamentos. Tal fato provoca reduções adicionais na capacidade de

polarização e de armazenamento de energia do meio e, portanto, reduções complementares de ϵ' . Também, depois de atingido o pico, há uma diminuição das perdas, já que, a despeito do aumento da velocidade de deslocamento do dipolo, a distância deslocada é paulatinamente reduzida até tender para zero em uma frequência superior, na qual, em decorrência de sua inércia, o dipolo não consegue sequer se mover em resposta às rápidas variações do campo.

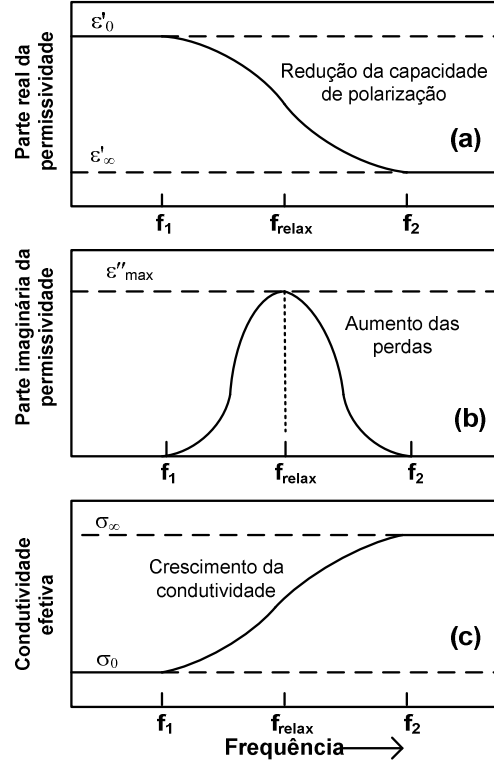


Fig. 6.2 - Representação esquemática do comportamento de (a) ϵ' e (b) ϵ'' considerando um meio submetido a um campo de frequência variável e um dipolo simples. O crescimento resultante da condutividade efetiva é ilustrado em (c). O comportamento de meios complexos como o solo pode ser compreendido considerando-se a superposição de diversos dipolos equivalentes.

É importante mencionar que, para fins didáticos, a Fig. 6.2 ilustra uma única frequência de relaxação. No entanto, em meios complexos como o solo, resultados experimentais sugerem a presença de uma distribuição de frequências de relaxação. Tal fato implica que, nesses casos, a dependência da frequência da permissividade complexa é uma superposição de vários mecanismos de polarização com tempos de relaxação distintos. A presença de uma distribuição de frequências de relaxação tende a produzir um decrescimento suave da parte real da permissividade ao longo da frequência, juntamente com uma distribuição contínua de picos da parte imaginária.

A relação entre a dependência da frequência das partes real e imaginária da permissividade, qualitativamente descrita anteriormente, é expressa quantitativamente pelas clássicas *relações de Kramers-Kronig* [16], [87]:

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega' \epsilon''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (6.3a)$$

$$\epsilon''(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{\epsilon'(\omega') - \epsilon_\infty}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (6.3b)$$

Tais relações foram derivadas pela primeira vez por H. A. Kramers (1927) e por R. de L. Kronig (1926) de forma independente [87]. Nas equações (6.3), a variável de integração ω' (rad/s) é real e ϵ_∞ (F/m) é um parâmetro que tem relação com mecanismos de polarização que respondem a um campo alternado em um intervalo de tempo desprezível tendo em conta a faixa de frequências de interesse (por exemplo, se $f \rightarrow \infty$, então $\epsilon_\infty \rightarrow \epsilon_0$). As equações (6.3a) e (6.3b) denotam a existência de uma relação de causalidade entre a dependência da frequência das partes real e imaginária da permissividade. Além disso, mostram que, uma vez obtida a dependência da frequência de ϵ'' , o comportamento de ϵ' no mesmo intervalo pode ser prontamente determinado e vice-versa⁵.

Considerando a permissividade complexa, a equação (6.1) pode ser reescrita como:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma_0 \vec{E} + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'') \vec{E} = \sigma \vec{E} + j\omega\epsilon' \vec{E} \quad (6.4)$$

Em (6.4), σ é a condutividade efetiva dada por:

$$\sigma = \sigma_0 + \omega\epsilon'' \quad (6.5)$$

De acordo com as equações (6.4) e (6.5) e comentários anteriores, a condutividade efetiva cresce e a parte real da permissividade decresce com o aumento da frequência. O crescimento da condutividade efetiva está associado com o produto $\omega\epsilon''$. Adicionalmente, de acordo com as relações de Kramers-Kronig, pode-se inferir que a dependência da frequência da condutividade e da permissividade estão relacionadas entre si. De fato, essa relação de causalidade entre a dependência de σ e ϵ' está ilustrada qualitativamente na Fig. 6.2 [vide partes (a) e (c)]. Observe-se que a condutividade efetiva aumenta à medida que a parte real da permissividade diminui, como se um parâmetro estivesse sendo “transformado” no outro [89].

Intermissão: Nas seções a seguir deste capítulo, a condutividade efetiva σ será chamada simplesmente de condutividade. Também, embora em um contexto prático de aterramentos elétricos seja mais comum trabalhar com a resistividade do solo, os desenvolvimentos deste capítulo são baseados na condutividade devido à abordagem de caráter físico proposta e à relação causal direta existente entre a condutividade e a permissividade. De qualquer forma, naqueles trechos em que for indiferente descrever os resultados em termos de resistividade ou de condutividade, utilizar-se-á o termo resistividade. Ainda, nas seções a seguir, a parte real ϵ' da permissividade complexa é chamada, na maioria dos casos, simplesmente de permissividade.

6.3 - Causalidade dos resultados de medição

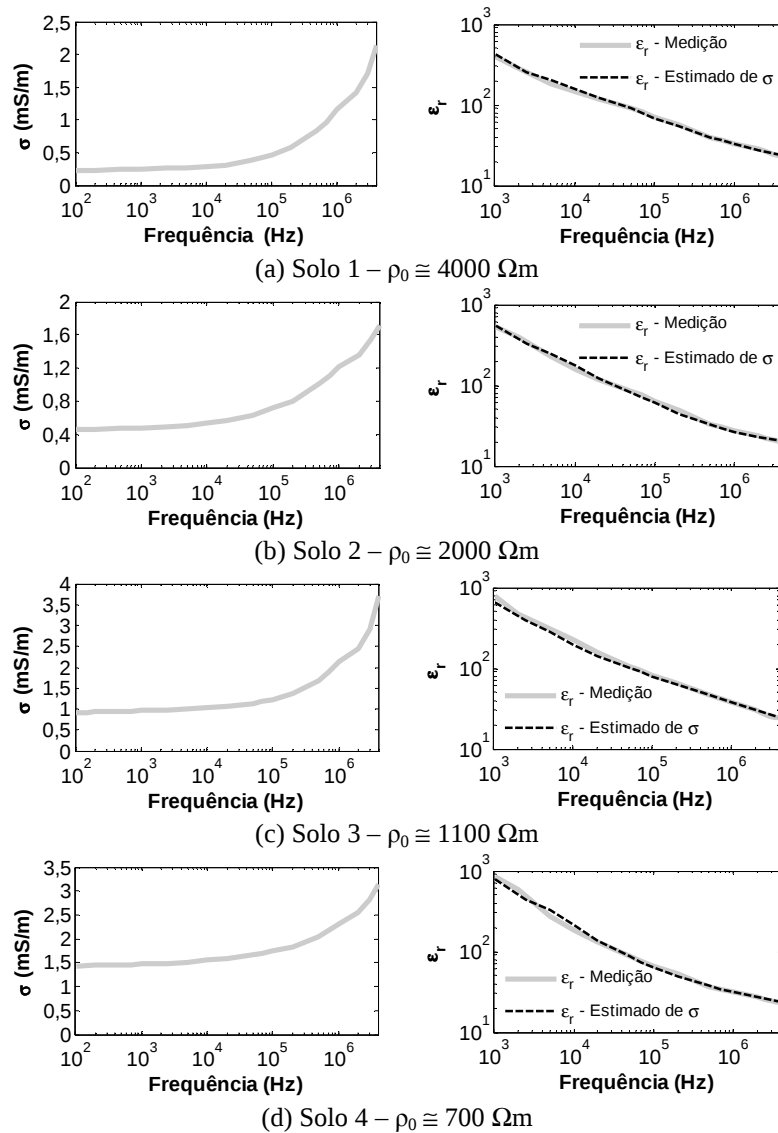
De acordo com as relações de Kramers-Kronig, há uma relação de causalidade entre a dependência da frequência da condutividade e da permissividade. Isso significa que é possível determinar a variação da permissividade em uma dada faixa de frequências a partir da curva medida de condutividade na mesma faixa, e vice-versa. Tendo isso em mente e os resultados

⁵ Em uma abordagem mais geral, as relações de Kramers-Kronig denotam uma relação causal entre o campo elétrico $\mathbf{E}$ e a densidade de fluxo elétrico (ou deslocamento elétrico) $\mathbf{D}$. Uma vez atendidas essas relações, garante-se que em um instante de tempo t apenas valores do campo elétrico nesse instante, ou em instantes anteriores a ele, entram na determinação da densidade de fluxo elétrico, em acordo com as idéias fundamentais de causalidade em fenômenos físicos. De outro modo, ter-se-ia uma conexão temporal não-local entre $\mathbf{D}$ e $\mathbf{E}$, em que $\mathbf{D}$ em um instante t poderia depender de $\mathbf{E}$ em instantes posteriores a t . Para uma discussão mais detalhada desses aspectos, a referência [87] pode ser consultada.

de medição de mais de 60 solos (vide capítulo 4), foram determinadas curvas de dependência da frequência de permissividade a partir das curvas medidas de condutividade, por meio da integração numérica das relações de Kramers-Kronig.

Vale salientar que, de acordo com [87], as integrais definidas pelas relações de Kramers-Kronig devem ser avaliadas como um valor principal de Cauchy [90]. Ainda, como discutido em [91], deve-se ter cuidado ao tratar a singularidade dessas integrais no entorno do ponto $\omega'=\omega$. Formas alternativas dessas integrais, mais convenientes para realização da integração numérica e que levam ao mesmo valor principal de Cauchy, podem ser encontradas em [90]. Embora as minúcias envolvidas na solução matemática de integrais similares às de Kramers-Kronig sejam muito interessantes, foge ao escopo desta tese detalhá-las. Apenas *aplica-se* aqui o conhecimento estabelecido por outros estudiosos da área e que pode ser consultado nas referências [87], [90], [91].

A Fig. 6.3 ilustra os resultados obtidos para seis solos de resistividades variando entre $\rho_0 \approx 300 \Omega\text{m}$ e $\rho_0 \approx 4000 \Omega\text{m}$. À esquerda, estão apresentadas as curvas de condutividade medidas. À direita, estão apresentadas as curvas de permissividade relativa medidas e as curvas de permissividade relativa calculadas a partir da condutividade medida e da integração numérica das relações de Kramers-Kronig. A integração numérica foi realizada entre 100 Hz e 4 MHz e os valores de permissividade calculados para frequências entre 1 kHz e 4 MHz.



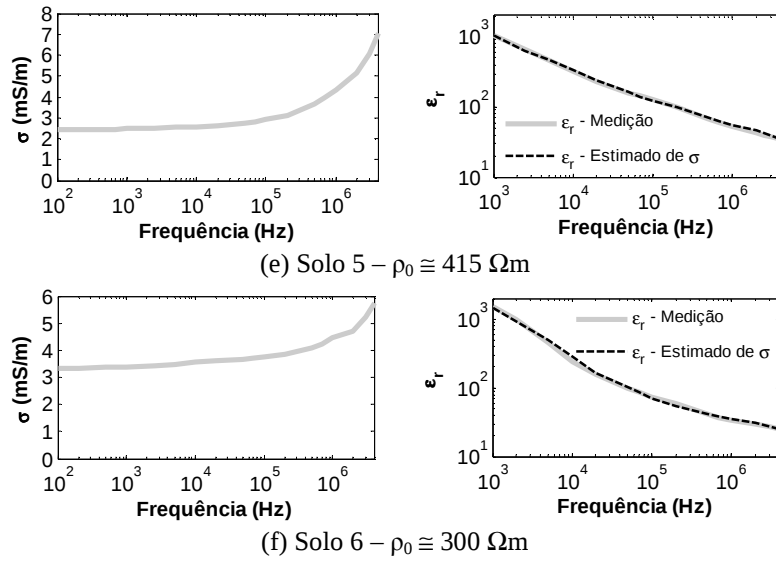


Fig. 6.3 - Curvas de *condutividade* (**esquerda**) medida e *permissividade relativa* (**direita**) medida e calculada por meio da integração numérica das relações de Kramers-Kronig.

Como pode ser observado, as curvas de permissividade estimadas a partir da condutividade pela integração das relações de Kramers-Kronig estão em excelente concordância com as curvas determinadas diretamente dos resultados de medição. De modo geral, resultados similares aos da Fig. 6.3 foram obtidos para os outros solos medidos.

Vale comentar que o cálculo da permissividade a partir das curvas de condutividade para frequências na faixa entre 100 Hz e 1 kHz leva a valores, de modo geral, inferiores àqueles obtidos por medição, sobretudo no caso de solos de menor resistividade. Os erros mais expressivos nessa faixa decorrem das maiores dificuldades de medição da permissividade e, também, da influência dos efeitos de polarização na interface entre a cuba e o solo.

Os resultados apresentados denotam dois aspectos relevantes. Primeiro, mostram a *consistência física* dos resultados de medição oriundos da aplicação da metodologia experimental proposta no capítulo 3 desta tese. Segundo, indicam uma alternativa para obtenção de dados mais confiáveis de permissividade, a partir das curvas medidas de condutividade e das relações de Kramers-Kronig. Esse último aspecto é particularmente útil uma vez que a medição de condutividade tem uma boa exatidão ao longo de toda a faixa de frequências de interesse, o que não acontece com a permissividade.

6.4 - Modelo semi-teórico original para caracterização da dependência da frequência da condutividade e da permissividade

6.4.1. Fundamentos do modelo

O modelo proposto para caracterização da dependência da frequência da condutividade e da permissividade é fundamentado em três premissas básicas apresentadas a seguir.

A *primeira premissa* é baseada na lei de Ampère-Maxwell no domínio da frequência, considerando a permissividade complexa, conforme expressa pela equação (6.4). De acordo com essa equação e com a (6.5), a condutividade é composta de uma parcela constante (σ_0) e de uma parcela dependente da frequência ($\omega\epsilon''$). À medida que a frequência cresce, a condutividade aumenta e esse aumento está associado às perdas decorrentes dos processos de polarização que ocorrem no solo.

A *segunda premissa* é baseada nos resultados de medição oriundos da aplicação da metodologia proposta nesta tese. A consistência dos resultados providos por essa metodologia foi avaliada experimentalmente (capítulo 3) e, também, do ponto de vista de coerência física por meio das relações de Kramers-Kronig (seção 6.3). Considerando os dados experimentais obtidos para mais de 60 solos, a dependência da condutividade, na faixa de frequências de interesse, pode ser descrita de modo geral pelo seguinte tipo de equação:

$$\sigma = \sigma_0 + K_\sigma f^\gamma \quad (6.6)$$

em que K_σ e γ são constantes relacionadas com as propriedades físicas de cada solo específico e f é a frequência. Comparando as equações (6.6) e (6.5), a parte imaginária da permissividade pode ser escrita como:

$$\varepsilon'' = \frac{K_\sigma}{(2\pi)^\gamma} \omega^{\gamma-1} \quad (6.7)$$

A *terceira premissa* é baseada na relação física de causalidade entre a dependência da frequência das partes real e imaginária da permissividade complexa, expressa pelas relações de Kramers-Kronig. Considerando essas relações, a equação (6.7) para ε'' pode ser substituída em (6.3a) e, depois de efetuada a integração, uma expressão do tipo a seguir é obtida para ε' :

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + K_\varepsilon f^\beta \quad (6.8)$$

Como resultado da integração⁶ da equação (6.3a) de Kramers-Kronig, as seguintes relações existem respectivamente entre K_ε e K_σ e entre β e γ :

$$K_\varepsilon = \frac{K_\sigma}{2\pi} \tan\left(\frac{\pi}{2}\gamma\right) \quad (6.9a)$$

$$\beta = \gamma - 1 \quad (6.9b)$$

Antes de interpretar as equações obtidas, é importante mencionar que, de acordo com resultados de medição, $\varepsilon''/\varepsilon_0$ apresenta maiores valores na faixa de frequências entre 100 Hz e 10 kHz, com valores máximos situados entre 10^2 e 10^3 , e decresce até atingir valores da ordem de 10^1 na faixa entre 1 MHz e 4 MHz. Esse comportamento se mantém para frequências até cerca de 6 MHz; a partir daí, os resultados de medição não são suficientemente confiáveis para determinar com exatidão o comportamento de ε'' embora, aparentemente, o mesmo comportamento qualitativo seja mantido até cerca de 10 MHz. Dos comentários anteriores, percebe-se que o integrando da equação da (6.3a) tende a zero para frequências $f' = \omega'/2\pi$ superiores a 4 MHz e, portanto, o resultado da integral nessa faixa praticamente não afeta $\varepsilon'(\omega)$, considerando a faixa de interesse deste trabalho (100 Hz a 4 MHz).

Pela análise das equações (6.6) e (6.8) claro está que elas, juntamente com as relações (6.9), denotam uma relação de causalidade entre a dependência da frequência da

⁶ Vale ressaltar que a equação (6.3a) fornece $\varepsilon'(\omega)$ a partir da integração de ε'' ao longo de uma faixa de frequências definida pela variável de integração ω' . Nesse caso, efetua-se uma mudança de variável na equação (6.7), substituindo ω por ω' , simplesmente para realização da integração definida por (6.3a). As integrais definidas pelas relações de Kramers-Kronig podem ser solucionadas empregando-se a Teoria de Variáveis Complexas [90].

condutividade e da permissividade. De fato, uma vez determinada a parcela da equação (6.6) que descreve a variação da condutividade com a frequência, a parcela da equação (6.8) que expressa a dependência da frequência da permissividade é prontamente obtida pela aplicação das relações (6.9), ou vice-versa. Em ambos os casos, há apenas um parâmetro constante adicional a ser determinado, quais sejam σ_0 e ε_∞ . O primeiro, σ_0 , é a condutividade em baixa frequência, que pode ser determinada por meio de métodos de medição tradicionais. O segundo, ε_∞ , está relacionado com processos de polarização que respondem a campos alternados em um intervalo de tempo desprezível, tendo em conta a faixa de frequências investigada.

Por conveniência e considerando a frequência superior de interesse deste trabalho, a equação (6.8) pode ser reescrita como:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{4\text{MHz}} + K_\varepsilon \left\{ f^\beta - (4\text{MHz})^\beta \right\} \quad (6.10)$$

onde $\varepsilon_{4\text{MHz}}$ é a permissividade do solo em 4 MHz.

A Fig. 6.4 apresenta um resumo das equações que definem o modelo causal proposto para caracterização da dependência da frequência da condutividade (σ) e da permissividade (ε) do solo.

$$\sigma = \sigma_0 + K_\sigma f^\gamma$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{4\text{MHz}} + K_\varepsilon \left\{ f^\beta - (4\text{MHz})^\beta \right\}$$

$$\begin{cases} K_\varepsilon = \frac{K_\sigma}{2\pi} \tan\left(\frac{\pi}{2} \gamma\right) \\ \beta = \gamma - 1 \end{cases}$$

- σ_0 é a condutividade em baixa frequência (100 Hz).
- $\varepsilon_{4\text{MHz}}$ é a permissividade em 4 MHz.
- f é a frequência.
- K_σ , γ , K_ε e β são constantes associadas ao solo e que possuem relações entre si em decorrência das relações de Kramers-Kronig.

Fig. 6.4 - Equações gerais que definem o modelo causal proposto.

É importante mencionar que modelos causais para avaliação da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo também podem ser obtidos por meio da aplicação da *equação de Debye* a sistemas com muitos tempos de relaxação (vide descrição detalhada nos capítulos 2 e 5 da referência [16]) ou por meio de abordagens de circuitos, similares às propostas por Longmire e Smith [47] e por Portela [49] (vide capítulo 2 desta tese). No entanto, vale salientar que tais abordagens constituem particularizações das relações de Kramers-Kronig, derivadas diretamente das Equações de Maxwell [16], [19]. Desse modo, e partindo de uma proposta original, preferiu-se buscar um modelo que fosse baseado nas relações generalizadas de Kramers-Kronig. Na referência [83], o autor mostra como uma abordagem utilizando circuitos equivalentes, baseada em analogias entre grandezas de circuito e grandezas de campo, pode ser empregada para modelar o solo e obter relações causais entre a condutividade e a permissividade.

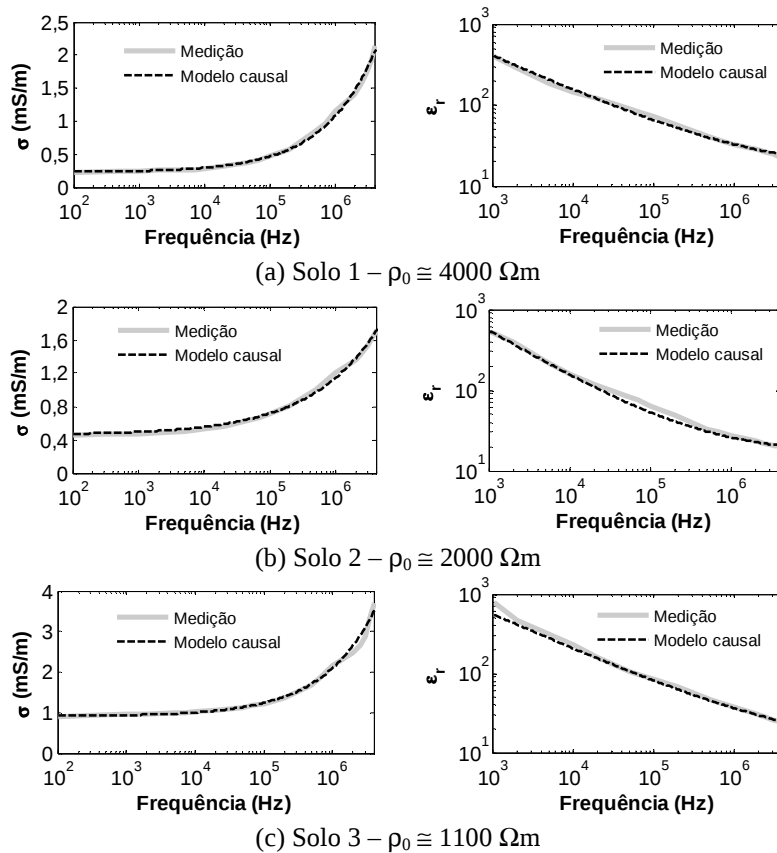
6.4.2. Aplicação do modelo a resultados de medição

O modelo causal proposto, resumido na Fig. 6.4, foi aplicado a resultados de medição da dependência da frequência da condutividade e da permissividade. A Fig. 6.5 apresenta resultados típicos obtidos para diferentes valores de resistividade de baixa frequência. Os parâmetros do modelo para cada solo estão indicados na Tabela 6.1.

Como pode ser observado, o modelo proposto permite reproduzir com excelente exatidão os resultados de medição de condutividade e de permissividade. Os maiores erros ocorrem no caso da permissividade para frequências inferiores a 10 kHz, sobretudo no caso de solos de menor resistividade. Por outro lado, como já mencionado, o valor da permissividade nessa faixa de frequências tem importância reduzida em termos práticos e basicamente não afeta a composição de corrente no solo, principalmente em solos de resistividade mais baixa. Ademais, de modo geral, os resultados providos pelo modelo são conservadores se comparados àqueles determinados por medições.

Também, é interessante observar que a condutividade apresenta uma menor variação entre 100 Hz e 10 kHz. Isso pode ser compreendido verificando que, embora ϵ'' possa apresentar valores elevados nessa faixa de frequências, o produto $\omega\epsilon''$, responsável pelo crescimento da condutividade, é limitado a valores baixos. (Para os casos analisados, ϵ''/ϵ_0 tem valores máximos da ordem de 10^2 a 10^3 na faixa de baixas frequências, entre 100 Hz e 10 kHz, e tende para valores da ordem de 10^1 para frequências superiores entre 1 MHz e 4 MHz).

Ainda, vale salientar que resultados similares aos da Fig. 6.5 foram obtidos para outros solos.



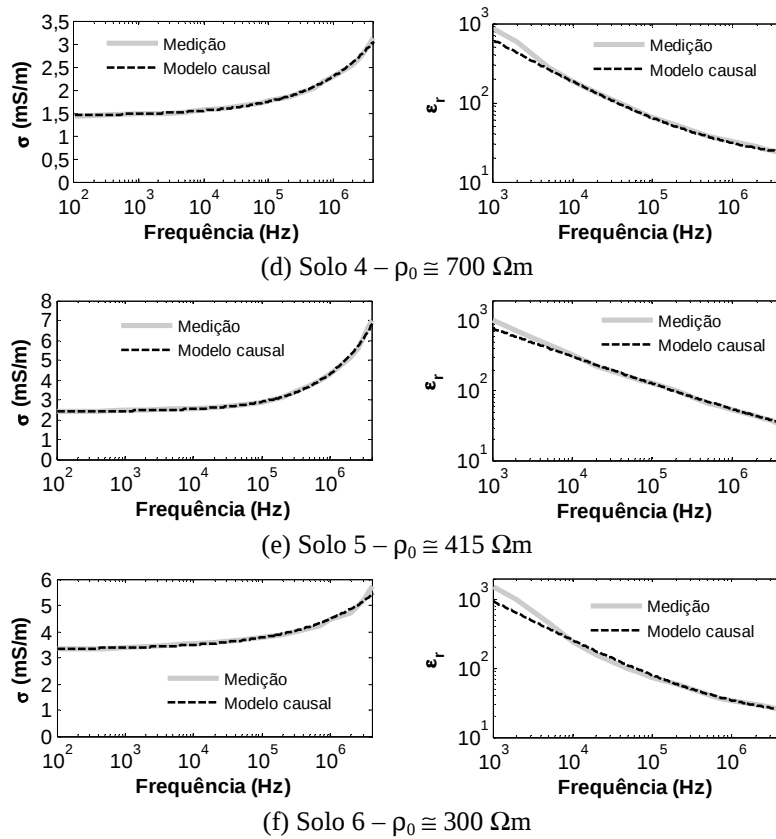


Fig. 6.5 - Comparação entre resultados providos pelo modelo causal proposto e resultados de medição da dependência da frequência da condutividade e da permissividade.

Tabela 6.1 - Parâmetros do modelo para cada solo. ϵ_0 é a permissividade do vácuo $\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

	σ_0 (mS/m)	$\epsilon_{4\text{MHz}} / \epsilon_0$	K_σ ($\mu\text{S/m}$)	γ
Solo 1	0,241	23,51	0,5535	0,59
Solo 2	0,460	20,65	1,991	0,42
Solo 3	0,912	24,66	0,5190	0,56
Solo 4	1,44	23,90	1,853	0,44
Solo 5	2,41	34,95	0,5535	0,59
Solo 6	3,32	25,56	3,955	0,41

6.5 - Aspectos estatísticos da dependência da frequência dos parâmetros do solo

6.5.1. Fundamentos de um modelo estatístico para descrição da dependência da frequência dos parâmetros do solo

De acordo com os resultados do item 6.4.2, o modelo causal proposto permite reproduzir com boa exatidão os resultados *individuais* de medição da dependência da frequência da condutividade e da permissividade. Por outro lado, na busca por uma *caracterização geral* da dependência da frequência do solo, seria conveniente o emprego desse modelo para obtenção de expressões genéricas para condutividade e permissividade, tendo em conta as relações de causalidade existentes entre esses dois parâmetros.

Quando se considera a aplicação do modelo proposto a um grande número de medições, verifica-se uma dispersão estatística dos parâmetros que definem o modelo para cada solo específico (σ_0 , ϵ_∞ , γ , K_σ e K_ϵ). Em particular, observam-se solos de mesma resistividade em baixa frequência ($\rho_0 = 1/\sigma_0$), porém com dependência da frequência da condutividade e da permissividade diferentes. De certo modo, tal comportamento era esperado

uma vez que o solo é um material heterogêneo bastante complexo e um modelo único ou universal para representá-lo não parece plausível.

Constatações similares foram feitas por Portela anos atrás ao analisar seus dados de medição, o que o levou a adotar uma abordagem estatística original para modelagem do solo [50]. Nesse sentido, vale citar que, embora os resultados apresentados neste item não sejam baseados diretamente nos trabalhos de Portela, definitivamente eles foram fonte de inspiração para os desenvolvimentos a seguir.

Tendo em vista esses comentários iniciais, a Fig. 6.6 apresenta duas curvas de dependência da frequência da condutividade obtidas por meio de medição para dois solos de tipos diferentes, porém com mesmo valor de resistividade em baixa frequência $\rho_0 \approx 2000 \Omega\text{m}$.

Pela análise das curvas, é evidente que o aumento da condutividade com a frequência é ligeiramente diferente para os dois solos, a despeito de ambas as curvas partirem de um mesmo valor em baixa frequência (mesmo valor de $\rho_0 = 1/\sigma_0$). Como se sabe, a resistividade em baixa frequência é função de vários fatores tais como: tipo de solo, composição química e concentração de sais dissolvidos, umidade, temperatura, granulometria e compactidade. A combinação desses diversos fatores pode resultar em solos com estruturas distintas, porém com um mesmo valor de resistividade em baixa frequência. Ora, solos com estruturas distintas podem apresentar dependência da frequência também distinta, a despeito de um mesmo valor de ρ_0 .

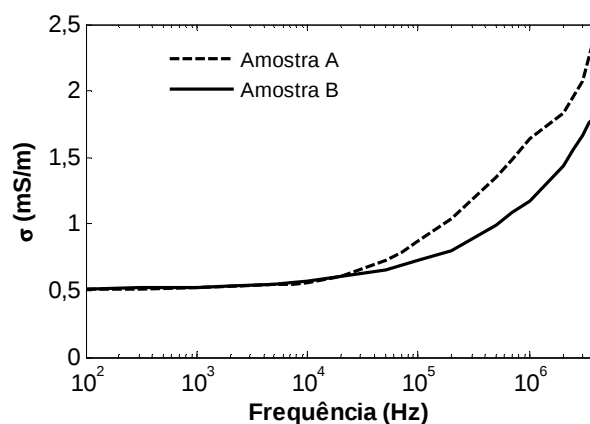


Fig. 6.6 - Dependência da frequência da condutividade de dois solos de tipos diferentes, porém com mesmo valor de resistividade em baixa frequência, $\rho_0 \approx 2000 \Omega\text{m}$.

Os comentários anteriores denotam um aspecto de fundamental importância, já que a quase totalidade das formulações empregadas para estimar a dependência da frequência dos parâmetros do solo, no contexto de aplicação deste trabalho, são uma função unicamente da resistividade em baixa frequência (além, claro, da própria frequência). Com a exceção de Portela, que propõe uma abordagem estatística para caracterização da dependência da frequência dos parâmetros do solo [50], os trabalhos que abordam o tema ou não fazem menção explícita a essa dispersão estatística ou não propõem meios de tê-la em conta. Vale lembrar que a formulação apresentada no capítulo 4 desta tese foi obtida considerando-se uma variação global relativamente conservadora dos parâmetros do solo.

Para os mesmos dois solos anteriores, a Fig. 6.7 apresenta as curvas medidas da dependência da frequência da permissividade relativa entre 10 kHz e 4 MHz. Observe que, para esse caso específico, as duas curvas tendem aproximadamente para um mesmo valor (~ 20) na faixa superior do espectro. Por outro lado, os valores de ϵ_r em 10 kHz diferem, sendo cerca de 210 e 140, respectivamente, para as amostras A e B. Note-se que a amostra que apresenta a maior variação de permissividade entre 10 kHz e 4 MHz também apresenta um

maior crescimento da condutividade com o aumento da frequência. Tal comportamento é esperado, uma vez que há uma relação de causalidade entre a dependência da frequência da condutividade e da permissividade; o crescimento de σ é proporcional ao decrescimento de ϵ . Embora em uma abordagem mais rigorosa fosse necessário analisar a variação da permissividade entre 100 Hz e 4 MHz, preferiu-se trabalhar com a faixa entre 10 kHz e 4 MHz por duas razões principais. Primeiro, devido ao fato de que a condutividade apresenta variações pouco significativas entre 100 Hz e 10 kHz. Segundo, em função da maior exatidão dos resultados de medição da permissividade entre 10 kHz e 4 MHz.

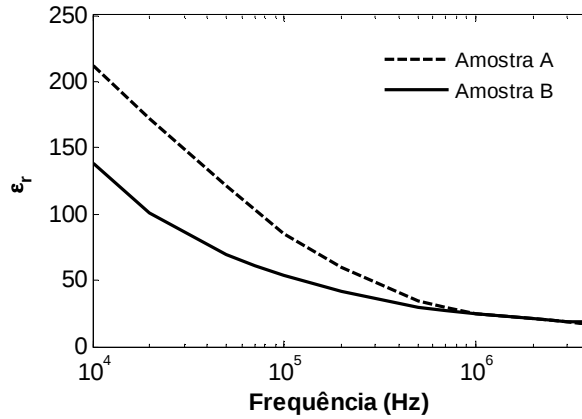


Fig. 6.7 - Dependência da frequência da permissividade de dois solos de tipos diferentes, porém com mesmo valor de resistividade em baixa frequência, $\rho_0 \approx 2000 \Omega\text{m}$.

O comportamento descrito foi observado para diversos outros casos de medições de solos de diferentes tipos, porém com mesmo valor de resistividade em baixa frequência. A Fig. 6.8 ilustra outros dois exemplos para resistividades de (a) $\rho_0 \approx 1000 \Omega\text{m}$ e (b) $\rho_0 \approx 350 \Omega\text{m}$. Esse comportamento, fisicamente consistente com as relações de causalidade entre σ e ϵ , indica que uma abordagem possível para se ter em conta a dispersão estatística da dependência da frequência de solos de mesma resistividade em baixa frequência é observar a variação correspondente da permissividade: para um mesmo ρ_0 , aqueles solos com maior variação da permissividade necessariamente apresentam também maior variação da condutividade na mesma faixa de frequências.

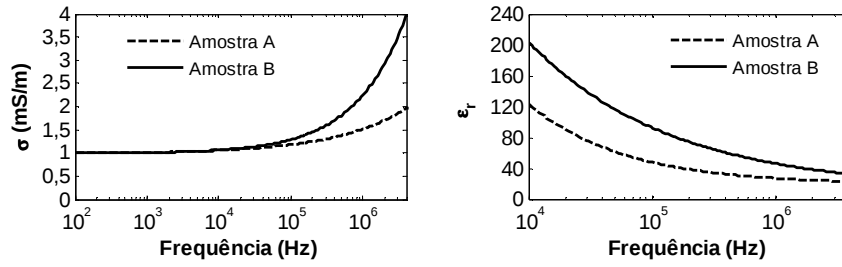
Tomando como base as análises anteriores, as equações do modelo causal proposto (Fig. 6.4) podem ser manipuladas e reescritas da seguinte maneira:

$$\epsilon = \epsilon_{4\text{MHz}} + \left(\frac{\epsilon_{10\text{kHz}} - \epsilon_{4\text{MHz}}}{10\text{kHz}^{\gamma-1} - 4\text{MHz}^{\gamma-1}} \right) (f^{\gamma-1} - 4\text{MHz}^{\gamma-1}) \quad (6.11a)$$

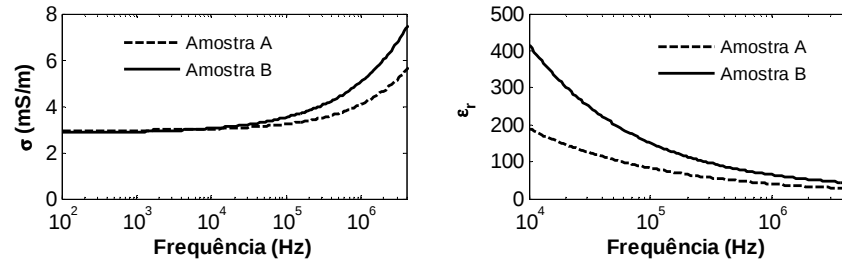
$$\sigma = \sigma_0 + \frac{2\pi K_\epsilon}{\tan(\pi\gamma/2)} f^\gamma \quad (6.11b)$$

em que $\epsilon_{10\text{kHz}}$ é a permissividade elétrica do solo em 10 kHz e:

$$K_\epsilon = \frac{\epsilon_{10\text{kHz}} - \epsilon_{4\text{MHz}}}{10\text{kHz}^{\gamma-1} - 4\text{MHz}^{\gamma-1}} \quad (6.11c)$$



(a) $\rho_0 \approx 1000 \Omega\text{m}$. Para a amostra A: $\epsilon_r(10 \text{ kHz}) \approx 123$ e $\epsilon_r(4 \text{ MHz}) \approx 23$. Para a amostra B: $\epsilon_r(10 \text{ kHz}) \approx 203$ e $\epsilon_r(4 \text{ MHz}) \approx 33$.



(b) $\rho_0 \approx 350 \Omega\text{m}$. Para a amostra A: $\epsilon_r(10 \text{ kHz}) \approx 200$ e $\epsilon_r(4 \text{ MHz}) \approx 28$. Para a amostra B: $\epsilon_r(10 \text{ kHz}) \approx 400$ e $\epsilon_r(4 \text{ MHz}) \approx 40$.

Fig. 6.8 - Dependência da frequência da *condutividade* (esquerda) e da *permissividade* (direita) de solos de tipos diferentes, porém com mesmo valor de resistividade em baixa frequência ρ_0 .

Analisando o conjunto de equações (6.11), o modelo está descrito em termos de quatro parâmetros: σ_0 , $\epsilon_{10\text{kHz}}$, $\epsilon_{4\text{MHz}}$ e γ . Esse conjunto de equações tem a seguinte interpretação física: *para um dado valor de σ_0 , e considerando um expoente γ , o aumento da condutividade é determinado de acordo com a variação da permissividade entre 10 kHz e 4 MHz, expressa por $\Delta\epsilon = \epsilon_{10\text{kHz}} - \epsilon_{4\text{MHz}}$.*

Considerando os resultados de medição obtidos para 65 solos, os parâmetros $\epsilon_{10\text{kHz}}$, $\epsilon_{4\text{MHz}}$ e γ podem ser caracterizados estatisticamente. A Fig. 6.9 apresenta a distribuição empírica de probabilidade cumulativa (representada por pontos) dos parâmetros $\epsilon_{r10\text{kHz}} = \epsilon_{10\text{kHz}}/\epsilon_0$, $\epsilon_{r4\text{MHz}} = \epsilon_{4\text{MHz}}/\epsilon_0$ e γ . A linha contínua mostra uma aproximação dessa distribuição empregando uma função de distribuição de probabilidade log-normal:

$$F_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right) dx \quad (6.12)$$

Na equação acima, $F_X(x)$ corresponde à probabilidade da variável aleatória X (no caso, um dos parâmetros $\epsilon_{r10\text{kHz}}$, $\epsilon_{r4\text{MHz}}$ ou γ) assumir um valor menor ou igual a um valor específico x , $\mu_{\ln x}$ corresponde ao valor médio do logaritmo neperiano da variável aleatória e $\sigma_{\ln x}$ ao desvio padrão logarítmico. Os parâmetros das distribuições estão indicados na Tabela 6.2.

Não é objetivo desta tese apresentar uma extensa análise do comportamento estatístico dos parâmetros $\epsilon_{r10\text{kHz}}$, $\epsilon_{r4\text{MHz}}$ e γ . Os valores medianos desses parâmetros estão indicados na legenda da Fig. 6.9 e outras informações podem ser obtidas diretamente das distribuições empíricas ou por meio da aproximação analítica log-normal. Vale salientar que $\epsilon_{r10\text{kHz}}$ e $\epsilon_{r4\text{MHz}}$ possuem correlação moderada entre si, porém são ambos não-correlacionados com γ . Uma análise física preliminar das relações de correlação entre os parâmetros de um modelo causal pode ser encontrada na referência [83] do autor.

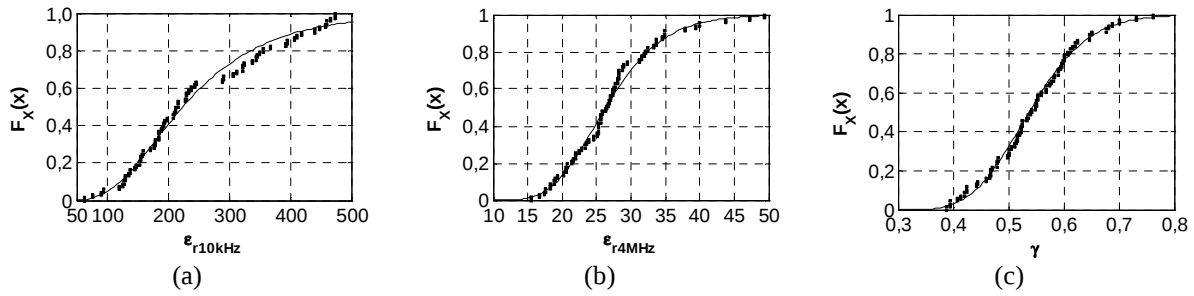


Fig. 6.9 - Distribuição de probabilidade cumulativa empírica (pontos) e aproximação pela função de distribuição log-normal (linha contínua) para os parâmetros (a) $\varepsilon_{r10\text{kHz}} = \varepsilon_{10\text{kHz}}/\varepsilon_0$, (b) $\varepsilon_{r4\text{MHz}} = \varepsilon_{4\text{MHz}}/\varepsilon_0$ e (c) γ . Os valores medianos das variáveis aleatórias $\varepsilon_{r10\text{kHz}}$, $\varepsilon_{r4\text{MHz}}$ e γ valem, respectivamente, 214; 26,5 e 0,54.

Tabela 6.2 - Parâmetros da aproximação log-normal para as variáveis aleatórias $\varepsilon_{r10\text{kHz}}$, $\varepsilon_{r4\text{MHz}}$ e γ .

	X		
	$\varepsilon_{r10\text{kHz}}$	$\varepsilon_{r4\text{MHz}}$	γ
$\mu_{\ln x}$	5,412	3,272	-0,623
$\sigma_{\ln x}$	0,478	0,246	0,157

Tendo em conta essa caracterização estatística, o conjunto de equações (6.11) tem, agora, uma interpretação física mais abrangente: *para um dado valor de σ_0 , e considerando um expoente γ com uma probabilidade associada, o aumento da condutividade é determinado de acordo com a variação da permissividade entre 10 kHz e 4 MHz, expressa por $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10\text{kHz}} - \varepsilon_{4\text{MHz}}$ com uma probabilidade associada.* Sendo assim, a aplicação dessa formulação permite contemplar a dispersão estatística da dependência da frequência dos parâmetros do solo conforme níveis de confiança, os quais são definidos de acordo com as distribuições de probabilidade dos parâmetros do modelo, $\varepsilon_{10\text{kHz}}$, $\varepsilon_{4\text{MHz}}$ e γ .

6.5.2. Limitações da descrição estatística da dependência da frequência dos parâmetros do solo

Na descrição anterior do modelo estatístico, supôs-se que a condutividade em baixa frequência σ_0 não era correlacionada com os demais parâmetros do modelo $\varepsilon_{10\text{kHz}}$, $\varepsilon_{4\text{MHz}}$ e γ . Na realidade, embora os pares $[\sigma_0, \varepsilon_{4\text{MHz}}]$ e $[\sigma_0, \gamma]$ apresentem correlação baixa ou desprezível, o par $[\sigma_0, \varepsilon_{10\text{kHz}}]$ apresenta uma correlação moderada (coeficiente de correlação entre 0,5 e 0,7). Isso já havia sido observado no capítulo 4 pela análise das curvas experimentais de ε_r onde se comentou que, apesar de não existir uma relação bem definida entre a variação da permissividade e o valor de σ_0 , a permissividade relativa em 10 kHz era, em média, maior para solos de menor resistividade. O fato de σ_0 ter correlação com $\varepsilon_{10\text{kHz}}$, mas não com $\varepsilon_{4\text{MHz}}$, decorre das diferenças entre os mecanismos de polarização presentes no solo no entorno das frequências de 10 kHz e 4 MHz.

A existência de uma correlação entre σ_0 e $\varepsilon_{10\text{kHz}}$, ainda que moderada, aponta a necessidade de definição de uma distribuição de probabilidade condicional, relacionando as variáveis aleatórias σ_0 e $\varepsilon_{10\text{kHz}}$. Entretanto, embora o número total existente de medições seja elevado, o número de amostras para cada valor específico de resistividade em baixa frequência ($\rho_0 = 1/\sigma_0$) não é suficientemente grande para a proposição de distribuições de probabilidade condicionais que permitam realizar avaliações com a exatidão desejável para a presente aplicação.

Por outro lado, essa mesma correlação indica que, considerando uma abordagem física rigorosa, a caracterização estatística de $\epsilon_{10\text{kHz}}$ pode apresentar tendências caso exista uma predominância de solos de maior ou de menor resistividade no conjunto de amostras analisadas. Isso significa que, tendo como referência a interpretação proposta do conjunto de equações (6.11), a variação da permissividade com a frequência, expressa por $\Delta\epsilon = \epsilon_{10\text{kHz}} - \epsilon_{4\text{MHz}}$, também pode apresentar tendências. Consequentemente, dada a relação de causalidade existente entre a dependência da frequência de ϵ e σ , o crescimento da condutividade com o aumento da frequência pode ser afetado por essas mesmas tendências⁷.

Com base nos comentários anteriores, entende-se que a formulação proposta no item 6.4.1 seria completamente confiável em termos estatísticos somente no caso da existência de um grande número de medições para cada resistividade ρ_0 de interesse. Dito de outro modo, é necessário não apenas um grande número de solos para obtenção de um modelo estatístico, mas de um grande número de solos para cada resistividade ρ_0 .

Certamente é de interesse do autor a obtenção de um modelo desse tipo. Porém, a realização de um número tão elevado de medições, abrangendo uma ampla gama de resistividades, demanda certo tempo e constitui-se um projeto de médio a longo prazo. Por outro lado, seria desejável viabilizar maneiras de se ter em conta a dispersão estatística da dependência da frequência, mesmo que de forma aproximada, mantendo-se também as relações físicas de causalidade existentes entre σ e ϵ . Uma nova proposta para este fim é apresentada na seção a seguir.

Vale salientar que outras formulações, similares àquela expressa pelo conjunto de equações (6.11), porém utilizando parâmetros diferentes, foram testadas. Em todos os casos, observou-se uma correlação entre a resistividade em baixa frequência e as parcelas que definem a dependência da frequência dos parâmetros do solo.

Ainda, é importante comentar que é difícil realizar uma comparação direta entre os resultados apresentados nesta seção e aqueles obtidos por Portela em sua abordagem estatística, já que os parâmetros que definem o modelo de Portela não são os mesmos que definem o modelo proposto no item anterior. Porém, em linhas gerais, Portela não detectou ou não observou nenhuma correlação significativa entre a condutividade em baixa frequência e as parcelas que definem a dependência da frequência dos parâmetros do solo e sugeriu que: “as parcelas constante e dependente da frequência de $\sigma + i\omega\epsilon$ estão relacionadas com aspectos muito distintos do comportamento físico do solo” [50]. Note-se que esse resultado difere do obtido nesta seção. De fato, as parcelas constante e dependente da frequência de $\sigma + i\omega\epsilon$ estão relacionadas com aspectos físicos distintos: a parcela constante relaciona-se com processos de condução iônica no solo e a parcela dependente da frequência relaciona-se com processos de polarização e perdas associadas. Entretanto, a condutividade em baixa frequência sintetiza uma série de propriedades do solo, as quais certamente têm influência na dependência de seus parâmetros. Sendo assim, acredita-se que a tentativa de se propor modelos cujas parcelas dependentes da frequência sejam não-correlacionadas com a condutividade em baixa frequência pode levar a resultados inconsistentes.

⁷ Vale citar que, em uma abordagem aproximada, poder-se-ia desprezar a correlação entre σ_0 e $\epsilon_{10\text{kHz}}$ e aplicar a formulação estatística proposta, tomando-se como referência as distribuições determinadas para $\epsilon_{10\text{kHz}}$, $\epsilon_{4\text{MHz}}$ e γ obtidas com base nos 65 solos medidos. Nesse caso, a escolha dos parâmetros do modelo deveria ser feita com certa cautela, sobretudo no caso de solos de maior resistividade em que o impacto da dependência da frequência em aplicações de aterramento é mais pronunciado, de modo a minimizar os erros na estimativa da dependência da frequência dos parâmetros do solo. Uma solução alternativa para a questão é proposta na seção 6.6.

6.6 - Uma abordagem de engenharia para se ter em conta a dispersão estatística da dependência da frequência dos parâmetros do solo

6.6.1. Fundamentos de uma abordagem de engenharia para consideração da dispersão estatística da dependência da frequência do solo

Tomando como referência novamente as equações gerais do modelo proposto, Fig. 6.4, a equação da condutividade pode ser reescrita como:

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \left(\frac{f}{1 \text{ MHz}} \right)^\gamma \quad (6.13)$$

onde $\Delta\sigma$ é o crescimento da condutividade entre 100 Hz e 1 MHz. Note-se que, comparando a equação (6.13) e a equação básica de condutividade da Fig. 6.4, $K_\sigma = \Delta\sigma/(1 \text{ MHz})^\gamma$. Segundo uma abordagem similar à proposta no capítulo 4, a equação (6.13) pode ser dividida por σ_0 de modo a obter uma expressão para a chamada condutividade relativa σ_r :

$$\sigma_r = 1 + \Delta\sigma_r \left(\frac{f}{1 \text{ MHz}} \right)^\gamma \quad (6.14)$$

onde $\Delta\sigma_r = \Delta\sigma/\sigma_0$ corresponde ao *crescimento relativo* da condutividade do solo entre 100 Hz e 1 MHz. Como já comentado no capítulo 4, de acordo com resultados experimentais, a variação relativa da condutividade tem uma relação com a condutividade em baixa frequência: quanto menor σ_0 , maior é o crescimento relativo da condutividade (ou, em termos da resistividade, quanto maior ρ_0 , maior é a redução relativa da resistividade). O mesmo comportamento qualitativo é observado considerando-se resultados independentes de medição da dependência da frequência dos parâmetros do solo [37], [50].

Uma vez determinado $\Delta\sigma_r$, a dependência da frequência da permissividade do solo é prontamente obtida por meio das relações de causalidade existentes entre a dependência da frequência de σ e ϵ , ou seja:

$$\epsilon = \epsilon_{4\text{MHz}} + K_\epsilon \left(f^{\gamma-1} - 4\text{MHz}^{\gamma-1} \right) \quad (6.15a)$$

onde:

$$K_\epsilon = \frac{\tan(\pi\gamma/2)\Delta\sigma}{2\pi(1\text{MHz})^\gamma} \quad (6.15b)$$

A escolha dos parâmetros das equações (6-13) a (6.15) é descrita a seguir.

A Fig. 6.10 apresenta um gráfico de $\Delta\sigma_r$ versus σ_0 considerando resultados de medição de 65 solos, juntamente com três funções de ajuste, h_1 , h_2 e h_3 . Esse gráfico mostra que, para um mesmo valor de σ_0 (mS/m), são observadas variações relativas da condutividade ligeiramente diferentes. Essa constatação é apenas outra maneira de “enxergar” a dispersão estatística inerente da dependência da frequência dos parâmetros do solo. As três funções de ajuste sugeridas constituem uma proposta para se ter em conta de forma aproximada essa dispersão. Nesse sentido, h_1 fornece resultados médios, h_2 fornece resultados relativamente conservadores e h_3 fornece resultados conservadores para a maior parte dos casos. As equações que definem h_1 , h_2 e h_3 são:

$$h_1 = 1,26 \times \sigma_0^{-0,73} \quad (6.16a)$$

$$h_2 = 0,95 \times \sigma_0^{-0,73} \quad (6.16b)$$

$$h_3 = 0,70 \times \sigma_0^{-0,73} \quad (6.16c)$$

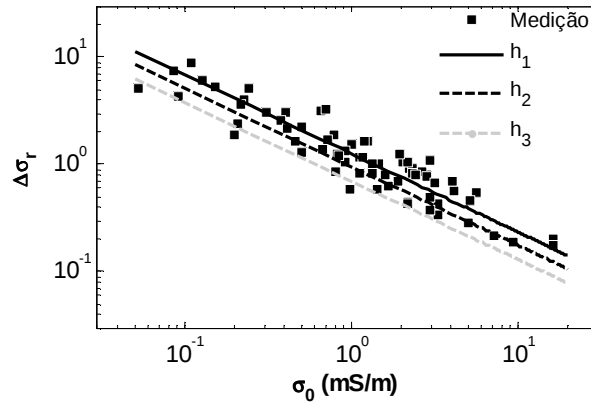


Fig. 6.10 - Crescimento relativo da condutividade entre 100 Hz e 1 MHz ($\Delta\sigma_r$) versus a condutividade em baixa frequência (σ_0 – mS/m) e funções de ajuste h_1 , h_2 e h_3 .

Vale salientar que a função h_1 foi obtida baseando-se no método de mínimos quadrados, que garante o melhor ajuste tendo em conta a minimização da soma dos quadrados dos resíduos. No caso em questão, os resíduos correspondem à diferença entre o valor medido da variação relativa da condutividade entre 100 Hz e 1 MHz e o valor estimado por h_1 (função de ajuste). As funções h_2 e h_3 foram obtidas a partir de h_1 , considerando-se certos graus de conservadorismo: h_2 foi obtida multiplicando-se h_1 por 0,75 e h_3 foi obtida multiplicando-se h_2 por 0,75. A aplicação desses “fatores multiplicativos” tem a finalidade de reduzir a probabilidade de que a variação relativa da condutividade entre 100 Hz e 1 MHz seja excedida. Esses fatores constituem valores sugeridos nesta tese. Evidentemente, outros graus de conservadorismo podem ser definidos e outras funções obtidas a partir de h_1 .

Considerando a dispersão estatística de γ e $\epsilon_{4\text{MHz}}$ e lembrando que esses parâmetros não possuem correlação com σ_0 , os seguintes valores são recomendados: $\gamma=0,54$ e $\epsilon_{4\text{MHz}}/\epsilon_0=25$ para resultados médios, $\gamma=0,58$ e $\epsilon_{4\text{MHz}}/\epsilon_0=20$ para resultados relativamente conservadores e $\gamma=0,62$ e $\epsilon_{4\text{MHz}}/\epsilon_0=15$ para resultados conservadores na maior parte dos casos.

A Fig. 6.11 apresenta um resumo das equações que permitem considerar de forma simplificada a dispersão estatística da dependência da frequência e, também, contemplam as relações de causalidade existentes entre a variação da condutividade (σ) e da permissividade (ϵ).

6.6.2. Exemplo de aplicação

Com o intuito de ilustrar o uso das expressões propostas no item anterior, considera-se a simulação do comportamento transitório de um eletrodo horizontal de 30 m, enterrado a 0,5 m de profundidade, em solos de três valores diferentes de resistividade em baixa frequência ρ_0 : 500, 1000 e 2000 Ωm . As correntes injetadas no eletrodo possuem formas de onda típicas de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes (ondas empregadas nas análises do capítulo 5 – Fig. 5.1).

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \times h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1 \text{ MHz}} \right)^\gamma$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{4\text{MHz}}}{\epsilon_0} + \frac{\tan(\pi\gamma/2) \times 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 (1\text{MHz})^\gamma} \sigma_0 \times h(\sigma_0) (f^{\gamma-1} - 4\text{MHz}^{\gamma-1})$$

- σ é a condutividade em mS/m.
- σ_0 é a condutividade em baixa frequência (100 Hz) em mS/m.
- ϵ_r é a permissividade relativa.
- $\epsilon_{4\text{MHz}}/\epsilon_0$ é a permissividade relativa em 4 MHz.
- ϵ_0 é a permissividade do vácuo, $\epsilon_0 \cong 8,854 \times 10^{-12}$ F/m.
- f é a frequência em Hz.

Os parâmetros $h(\sigma_0)$, γ e $\epsilon_{4\text{MHz}}/\epsilon_0$ estão indicados na tabela abaixo e são escolhidos de acordo com os objetivos do cálculo, isto é, obtenção de valores médios, valores relativamente conservadores ou valores conservadores.

	função $h(\sigma_0)$	γ	$\epsilon_{4\text{MHz}}/\epsilon_0$
valores médios	h_1	0,54	25
valores relativamente conservadores	h_2	0,58	20
valores conservadores	h_3	0,62	15

Fig. 6.11 - Equações gerais de um modelo que permite ter em conta de forma aproximada a dispersão estatística da dependência da frequência e consideram as relações de causalidade existentes entre a variação da condutividade e da permissividade.

A Fig. 6.12 apresenta os resultados de GPR e a Tabela 6.3 os valores de Z_p associados. A dependência da frequência foi considerada de quatro maneiras diferentes: empregando-se as fórmulas desenvolvidas no capítulo 4 desta tese (**C4**), equações (4.3) e (4.4), e utilizando-se o modelo proposto no item anterior (Fig. 6.11) para resultados médios (**M**), relativamente conservadores (**RC**) e conservadores (**C**).

Pela análise da Fig. 6.12 e da Tabela 6.3, verifica-se que a utilização das fórmulas desenvolvidas no capítulo 4 leva a resultados que estão entre aqueles obtidos pela aplicação do modelo causal proposto considerando-se valores médios e relativamente conservadores. Comportamento similar é observado para outros comprimentos de eletrodo e resistividades ρ_0 entre 100 Ωm e 5000 Ωm . De modo geral, tal fato indica que as fórmulas do capítulo 4 podem ser empregadas em aplicações de engenharia para estimativa do efeito médio da dependência da frequência no comportamento transitório de aterramentos elétricos.

A utilização do modelo causal fornece uma caracterização mais completa da dependência da frequência dos parâmetros do solo e permite considerar, de forma aproximada, a dispersão estatística observada no fenômeno. Note-se que este aspecto é particularmente importante no caso de solos de resistividade mais elevada, em que o impacto da dependência da frequência é mais pronunciado. Por exemplo, em situações de solos de alta resistividade (superior a 1000 Ωm) em que não for viável a medição direta da dependência da frequência dos parâmetros, o modelo proposto pode ser utilizado para obtenção de valores mais seguros, relativamente conservadores ou conservadores.

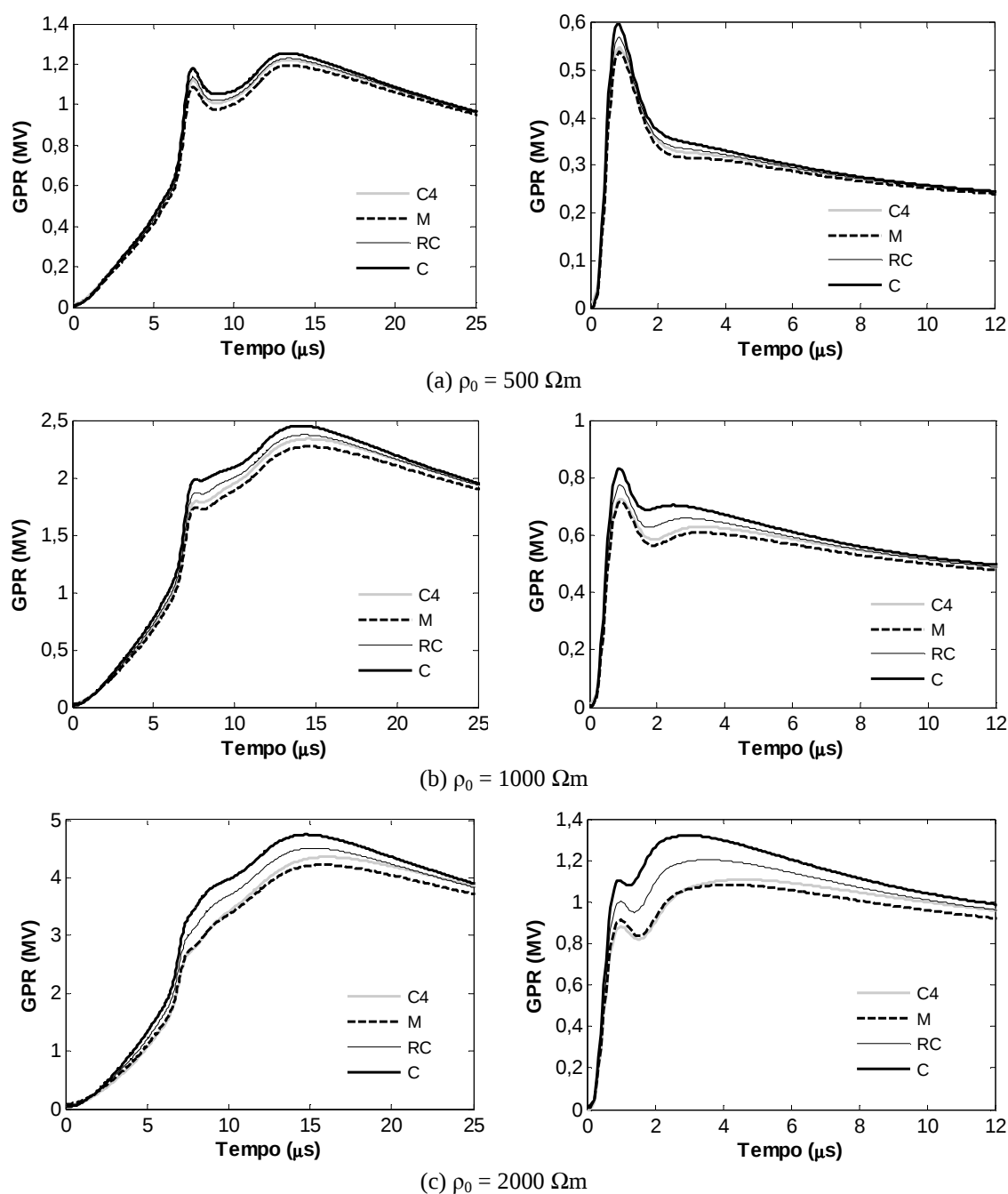


Fig. 6.12 - GPR simulado de um eletrodo de 30 m, 7 mm de raio, enterrado a 0,5 m de profundidade, submetido a correntes representativas de *primeiras descargas de retorno* (**esquerda**) e *descargas subsequentes* (**direita**) para solos de resistividade ρ_0 de: (a) 500 Ωm , (b) 1000 Ωm (c) 2000 Ωm , considerando a dependência da frequência pela aplicação das fórmulas do capítulo 4 e do modelo causal proposto.

Tabela 6.3 - Comparação entre os valores de Z_p determinados por simulação, considerando a dependência da frequência pela aplicação das fórmulas do capítulo 4 e do modelo causal proposto.

$\rho(\omega), \varepsilon(\omega)$	$Z_p (\Omega)$, razão entre os valores de pico do GPR e da corrente injetada					
	$\rho_0 = 500 \, \Omega\text{m}$		$\rho_0 = 1000 \, \Omega\text{m}$		$\rho_0 = 2000 \, \Omega\text{m}$	
	Descargas subsequentes	Primeiras Descargas	Descargas subsequentes	Primeiras Descargas	Descargas subsequentes	Primeiras Descargas
C4	34,35	26,99	45,39	51,62	69,25	96,28
M	33,68	26,38	44,82	50,11	67,76	93,23
RC	35,65	27,15	48,43	52,40	75,26	99,68
C	37,42	27,71	52,00	54,13	82,56	104,82

Também, é importante salientar que o modelo desenvolvido contempla as relações de causalidade existentes entre a dependência da frequência da condutividade e da permissividade, expressas pelas relações de Kramers-Kronig. O emprego de relações não-causais pode levar a certas inconsistências físicas, como valores (de tensão, por exemplo) diferentes de zero em $t = 0$. Sendo assim, em aplicações generalizadas ou que exijam um elevado grau de exatidão nas respostas, recomenda-se a utilização do modelo causal desenvolvido.

6.7 - Considerações finais

Apresentou-se neste capítulo a análise de alguns aspectos físicos relativos à dependência da frequência dos parâmetros do solo, com foco nas relações de causalidade existentes entre as variações da condutividade e da permissividade com a frequência. Pela integração numérica das relações de Kramers-Kronig, mostrou-se que os resultados de medição oriundos da aplicação da metodologia proposta no capítulo 4 são fisicamente consistentes. Além disso, verificou-se que as curvas de dependência da frequência da permissividade podem ser obtidas das curvas medidas de condutividade. Esse último aspecto é particularmente relevante, uma vez que a medição de condutividade possui uma boa exatidão ao longo de toda a faixa de frequências de interesse, ao contrário da permissividade que apresenta erros maiores para frequências inferiores a 10 kHz.

Também, constatou-se que a dependência da frequência dos parâmetros do solo possui uma dispersão estatística inerente e que solos de mesmo valor de resistividade em baixa frequência podem apresentar dependências da frequência da condutividade e da permissividade distintas.

Considerando os comentários anteriores, foi proposto um modelo para caracterização da dependência da frequência da condutividade e da permissividade, que contempla as relações de causalidade existente entre esses dois parâmetros, e que leva em consideração de forma aproximada a dispersão estatística citada.

Vale salientar que, até onde vai o conhecimento do autor, pela primeira vez as relações de Kramers-Kronig são empregadas para avaliação de dados *experimentais* da dependência da frequência dos *parâmetros do solo* e, adicionalmente, para obtenção de modelos para se ter em conta essa dependência com fins de aplicação em engenharia. Também, muitas das análises apresentadas neste capítulo são originais e podem ser expandidas ou mais bem exploradas. Isso é objetivo de uma publicação do autor em processo de submissão [84] e de outras futuras relativas à continuidade do trabalho.

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Esta tese concentrou-se na investigação do fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo e do efeito dessa dependência no comportamento transitório de aterramentos elétricos. O estudo teve como motivação principal a necessidade de contribuições adicionais ao tema, notadamente com relação à determinação experimental da variação dos parâmetros do solo na faixa de frequências típicas dos componentes associados às correntes de descargas atmosféricas, à caracterização geral dessa dependência por meio de formulações generalizadas e à análise do impacto do fenômeno no comportamento transitório de aterramentos.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Desenvolvimento de uma nova metodologia para determinação da dependência da frequência dos parâmetros do solo a partir de medições realizadas diretamente em condições de campo, aplicável na faixa de frequências de interesse na avaliação de transitórios associados às descargas atmosféricas.
- Apresentação de diversas evidências experimentais da relevância do efeito da dependência da frequência na resposta transitória de aterramentos elétricos.
- Caracterização experimental da dependência da frequência dos parâmetros do solo por meio da aplicação da metodologia proposta a mais de 60 solos em condições naturais.
- Caracterização da dependência da frequência dos parâmetros do solo por meio de formulações genéricas, devidamente validadas para as aplicações de interesse.
- Análise sistemática do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos, empregando-se formulações validadas experimentalmente e sinais de corrente com formas de ondas típicas de primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes.
- Avaliação dos aspectos físicos fundamentais associados ao fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo e proposta de um modelo causal para determinação da condutividade e da permissividade em função da frequência e da resistividade em baixa frequência, baseado nas relações de Kramers-Kronig e que leva em conta de forma aproximada a dispersão estatística do fenômeno.

Parte dos resultados obtidos nesta tese foram publicados, aceitos, ou se encontram em processo de submissão/revisão, em periódicos ou em anais de congressos [52], [53], [54], [57], [60], [77], [78], [79], [83], [84], [92], [93], o que demonstra a originalidade e a relevância das contribuições apresentadas (vide Apêndice II). Ainda, resultados obtidos que não fazem parte desta tese, mas que têm origem indireta nos desenvolvimentos aqui apresentados, podem ser encontrados em [94], [95], [96].

As propostas de continuidade deste trabalho consistem em aplicações dos resultados alcançados nesta tese a estudos gerais relativos à proteção contra descargas atmosféricas, quais sejam:

- Análise do impacto da dependência da frequência dos parâmetros do solo na avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, sobretudo na redução do número de desligamentos.
- Análise do efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo no cálculo de campos eletromagnéticos associados ao canal de descargas atmosféricas e no cálculo de tensões induzidas em sistemas elétricos.
- Avaliação do impacto da dependência da frequência dos parâmetros do solo na redução dos riscos à segurança de seres vivos, por exemplo, em subestações de energia submetidas a transitórios.

Finalmente, espera-se que as realizações e os resultados obtidos neste trabalho, em função de seus aspectos originais, forneçam uma contribuição relevante ao tema *aterramentos elétricos*.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386, Jan., 2007.
- [2] L. Grcev and F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, n° 4, pp. 1773–1781, Oct., 1990.
- [3] K. Tanabe, "Novel method for analyzing dynamic behavior of grounding systems based on the finite-difference time-domain method," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, no. 9, pp. 55–57, Sep. 2001.
- [4] M. Tsumura, Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, "FDTD simulation of a horizontal grounding electrode and modeling of its equivalent circuit," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 4, pp. 817–825, Nov. 2006.
- [5] S. Visacro and A. Soares, "HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1206–1208, Apr., 2005.
- [6] J. C. Salari and C. Portela, "A methodology for electromagnetic transients calculation – An application for the calculation of lighting propagation in transmission lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, n° 1, pp. 527–536, Jan., 2007.
- [7] R. S. Alípio, *Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPMMC/CEFET-MG), dezembro de 2008.
- [8] L. Grcev, "Impulse efficiency of ground electrodes," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 441–451, Jan., 2009.
- [9] L. Grcev, "Lightning surge efficiency of grounding grids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 3, pp. 1692–1699, Jul., 2011.
- [10] R. L. Smith-Rose, "The electrical properties of soils for alternating currents at radiofrequencies," *Proc. R. Soc.*, vol. 140, no. 841 A, pp. 359–377, 1933.
- [11] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Std. 81, 2012.
- [12] G. F. Tagg, *Earth Resistances*. London, U.K.: Newnes, 1964.
- [13] S. Visacro Filho, *Aterramentos elétricos*, Artliber, São Paulo, 2002.
- [14] C. Portela, "Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior," in *Proc. of IEEE Int. Sym. Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, 1999, pp. 1004–1009.
- [15] R. Alípio, M. A. O. Schroeder, M. M. Afonso, and T. A. S. Oliveira, "The influence of the soil parameters dependence with frequency on impulse grounding behavior", in *Proc. X Int. Symp. Lightning Protection (SIPDA 2009)*.
- [16] V. V. Daniel, *Dielectric Relaxation*, Academic Press Inc., London, 1967.
- [17] B. Tareev, *Physics of Dielectric Materials*, English Translation–Mir Publishers, Moscow, 1979.
- [18] A. C. Balanis, *Advanced engineering electromagnetic*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [19] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. V. Duzer, *Fields and waves in communication electronics*, John Wiley & Sons, New York, 3rd ed., 1993.
- [20] R. N. Grubb and J. R. Wait, "In situ measurements of the complex propagation constant from 1 MHz to 10 MHz," *Electronic Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 506–507, Aug., 1971.
- [21] R. Jeffrey, "Measurement of earth medium electrical characteristics: techniques, results, and applications," *Proceedings of IEEE*, Feb., 1974.
- [22] S. Lambot, E. C. Slob, I. van den Bosch, B. Stockbroeckx, and M. Vanclooster, "Modeling of ground-penetrating radar for accurate characterization of subsurface electric properties," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 11, pp. 2555–2568, Nov., 2004.
- [23] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. I e II, Macmillan and Company, 1873.
- [24] K. W. Wagner, "Erklärung der dielektrischen Nachwirkungs-worgange auf Grund Maxwellscher vorstellungen: Archiv," *Electrotechnik*, 1914.
- [25] B. D. Fuller and S. H. Ward, "Linear system description of the electrical parameters of rocks," *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, vol. GE-8, no. 1, pp. 7–18, Jan., 1970.
- [26] D. Wobschall, "A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: the semidisperse model," *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, vol. GE-15, no. 1, pp. 49–58, Jan., 1977.
- [27] G. P. De Loor, "The dielectric properties of wet materials," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-21, no. 3, pp. 364–369, Jul., 1983.
- [28] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. El-Rayes, "Microwave dielectric behavior of wet soil – Part II: Dielectric Mixing Models," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-23, no. 1, pp. 35–46, Jan., 1985.
- [29] T. Hanai and K. Sekine, "Theory of dielectric relaxations due to the interfacial polarization for two-component suspensions of spheres," *Colloid and Polymer Science*, vol. 264, no. 10, pp. 888–895, 1986.

- [30] S. Thevanyagam, "Frequency-domain analysis of electrical dispersion of soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 121, no. 8, pp. 618–628, Aug., 1995.
- [31] J. E. Hipp, "Soil electromagnetic parameters as functions of frequency, soil density, and soil moisture," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 98–103, Jan., 1974.
- [32] D. L. Sengupta and T. K. Sarkar, "Maxwell, Hertz, the Maxwellians and the early history of electromagnetic waves," *IEEE Antennas and propagation magazine*, vol. 45, no. 2, pp. 13–19, 2003.
- [33] R. S. Elliott, "The history of electromagnetics as Hertz would have known it," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 36, no. 5, pp. 806–823, May, 1998.
- [34] J. S. Sachs, "The influence of the earth in wireless telegraphy," *Annalen der Physik*, vol. 18, pp. 348, 1905.
- [35] A. Sommerfeld, "On the distribution of waves in wireless telegraphy," *Annalen der Physik*, vol. 28, pp. 665–736, 1909.
- [36] S. Visacro and C. M. Portela, "Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems," in *Proc. of Sym. High Voltage Engineering*, Braunschweig, Germany, 1987.
- [37] J. H. Scott, R. D. Carroll, and D. R. Cunningham, "Dielectric constant and electrical conductivity measurements of moist rock: a new laboratory method," *Journal on Geophysical Research*, vol. 72, no. 20, pp. 5101–5115, Oct., 1967.
- [38] R. J. Knight and A. Nur, "The dielectric constant of sandstones, 60 kHz to 4 MHz," *Geophysics*, vol. 52, pp. 644–654, May, 1987.
- [39] V. A. Rinaldi and F. M. Francisca, "Impedance analysis of soil dielectric dispersion (1 MHz–1 GHz)," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 111–121, Feb., 1999.
- [40] J. A. Ratcliffe and F. W. G. White, "The electrical properties of the soil at radio frequencies," *Philosophical Magazine*, vol. 10, pp. 667, 1930.
- [41] M. J. O. Strutt, "Measurement of the electrical properties of the soil between 20 and 2×10^7 cycles per second," *Elektrische Nachrichten-Technik*, vol. 7, pp. 387, 1930.
- [42] A. G. Tarkhov, "Resistivity and dielectric constant of rocks in alternating current fields," *Nauchn.-Issled. Geol. Inst. Materialy Geofiz.*, vol. 12, pp. 3–42, 1948.
- [43] B. F. Howell and P. H. Licastro, "Dielectric behavior of rocks and minerals," *The American Mineralogist*, vol. 46, pp. 269–287, Mar.-Apr., 1961.
- [44] C. D. Ferris, "Four-Electrode Electronic Bridge for Electrolyte Impedance Determinations," *Review of Scientific Instruments*, vol. 34, pp. 109–111, 1962.
- [45] T. R. Madden and D. U. Marshall, "Electrode and membrane polarization," U.S. AEC Ept. RME-3157 Geology and Mineralogy, 1959.
- [46] J. H. Scott, "Electrical and magnetic properties of rock and soil," U.S. Geol. Surv., Dep. of the Interior, Washington, D.C., 1966.
- [47] C. L. Longmire, and K. S. Smith, "A universal impedance for soils," Topical Report for Period July 1–September 30, Defense Nuclear Agency, Santa Barbara, California, 1975.
- [48] S. Visacro Filho, *Modelagem de aterramentos elétricos*, Tese de doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPER/UFRJ), julho de 1992.
- [49] C. Portela, "Frequency and transient behavior of grounding systems I – Physical and methodological aspects," in *Proc. of IEEE Int. Sym. Electromagnetic Compatibility*, 1997, pp. 379–384.
- [50] C. Portela, "Statistical aspects of soil electromagnetic behavior in frequency domain," in *Proc. 2000 Int. Conf. Grounding Earthing (GROUND 2000)*, Belo Horizonte, Brazil.
- [51] C. Portela, "Soil electromagnetic behavior in frequency domain and its influence in lightning effects," in *Proc. 2002 Int. Conf. Grounding Earthing (GROUND 2002)*, Rio de Janeiro, Brazil.
- [52] S. Visacro, R. Alipio, M. H. Murta Vale, and L. S. de Araújo, "Recent findings in soil parameter frequency dependence and their influence on the lightning response of grounding electrodes," in *Proc. of 2010 Int. Conf. on Grounding and Earthing (GROUND 2010)*, Salvador, Brazil, Nov. 2010.
- [53] S. Visacro, R. Alipio, M. H. Murta Vale, and C. Pereira, "The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 53, no. 2, pp. 401–406, May 2011.
- [54] S. Visacro and R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- [55] R. Alipio, "Geração de ondas impulsivas e desenvolvimento de geradores portáteis", Relatório Interno – LRC, Belo Horizonte, Julho de 2013.
- [56] S. Visacro and G. Rosado, "Response of grounding electrodes to impulsive currents: An experimental evaluation," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 51, pp. 161–164, Feb. 2009.

- [57] S. Visacro and R. Alipio, "An experimental-based formulation for expressing the frequency dependence of soil resistivity and permittivity," in *Proc. of the XI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, Fortaleza, Brazil, Oct. 2011.
- [58] Medidor de pH e umidade do solo – Modelo: PH 2500, Instrutherm, informações disponíveis em: www.instrutherm.com.br, acessado em junho de 2012.
- [59] M. Guimarães N., L. Araujo, R. V. Castro, L. F. D. Santos, M. H. Murta Vale, and S. Visacro, "Impulse response of grounding grids: experimental versus simulated results," in *Proc. of 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, Austria, Sept. 2012.
- [60] R. Alipio and S. Visacro, "Impulse efficiency of grounding electrodes: effect of frequency-dependent soil parameters," *IEEE Trans. Power Delivery* (**accepted for publication**).
- [61] R. Verma and D. Mukhedkar, "Impulse impedance of buried ground wire," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-99, no. 5, pp. 2003–2007, Sep./Oct. 1980.
- [62] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, "Transient analysis of grounding systems," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 2, pp. 389–399, Feb. 1983.
- [63] C. Mazzetti and G. M. Veca, "Impulse behavior of grounded electrodes," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3148–3156, Sep. 1983.
- [64] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency dependent characteristics of grounding systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 2, no. 4, pp. 1073–1081, Oct. 1987.
- [65] M. Ramamoorthy, M. M. B. Narayanan, S. Parameswaran, and D. Mukhedkar, "Transient performance of grounding grids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 4, pp. 2053–2059, Oct. 1989.
- [66] F. Dawalibi and A. Selby, "Electromagnetic fields of energized conductors," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1275–1283, Jul. 1993.
- [67] W. Xiong and F. Dawalibi, "Transient performance of substations grounding systems subjected to lightning and similar surge currents," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1412–1420, Jul. 1994.
- [68] F. Dawalibi, W. Xiong and J. Ma, "Transient performance of substation structures and associated grounding systems," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 520–527, May/Jun. 1995.
- [69] R. Olsen and M. C. Willis, "A comparison of exact and quasi-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 3, pp. 1071–1081, Jul. 1996.
- [70] L. Grcev and M. Heimbach, "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, no. 1, pp. 172–178, Jan. 1997.
- [71] A. F. Otero, J. Cidras, and J. L. del Alamo, "Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 3, pp. 873–878, Jul. 1999.
- [72] A. Geri, "Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: The model and its validation," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 3, pp. 1008–1017, Jul. 1999.
- [73] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzargyriou and B. C. Papadimas, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 517–524, Apr. 2003.
- [74] Y. Liu, N. Theethayi, and R. Thottappillil, "An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: Nonuniform transmission-line approach," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pt. 1, pp. 722–730, Apr. 2005.
- [75] L. Grcev and M. Popov, "On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1598–1603, Apr. 2005.
- [76] J. He, Y. Gao, R. Zeng, J. Zou, X. Liang, B. Zhang, J. Lee, and S. Chang, "Effective length of counterpoise wire under lightning current," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pt. 2, pp. 1585–1591, Apr. 2005.
- [77] R. Alipio and S. Visacro, "How the frequency dependence of soil parameters affects the lightning response of grounding electrodes," in *Proc. of 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, Austria, Sept. 2012.
- [78] R. Alipio and S. Visacro, "Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 1, pp. 132–139, Feb. 2013.
- [79] S. Visacro, R. Alipio, and M. H. Murta Vale, "Grounding grids: effect of frequency dependent soil parameters on lightning performance," in *Proc. of 8th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2013)*, Seoul, Korea, Jun. 2013.
- [80] S. Visacro, "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, L07112, 2004.
- [81] S. Visacro, A. Soares, M. A. O. Schroeder, L. C. L. Cherchiglia and V. J. Sousa, "Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station," *Journal on geophysical research*, vol. 109, D01105, pp. 1–11, Jan., 2004.
- [82] A. De Conti and S. Visacro, "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 49, n° 2, pp. 448–451, May, 2007.

- [83] R. Alipio and S. Visacro, "A physical model for the frequency dependence of soil conductivity and permittivity," in *Proc. of 2012 Int. Conf. on Grounding and Earthing (GROUND 2012)*, Bonito, Brazil, Nov. 2012.
- [84] R. Alipio and S. Visacro, "A new physical model for describing the frequency dependence of soil parameters," **in preparation.**
- [85] A. Macedo, *Eletromagnetismo*, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1988.
- [86] J. A. Stratton, *Electromagnetic theory*, McGraw-Hill, New York, 1941.
- [87] J. D. Jackson, *Classical electrodynamics*, 3rd ed., New York: JohnWiley & Sons, Inc., 1998.
- [88] A. Moliton, *Applied electromagnetism and materials*, Springer, New York, 2007.
- [89] E. J. Murphy and S. O. Morgan, "The dielectric properties of insulating materials," *Bell System Technical Journal*, pp 493–512, Oct. 1937.
- [90] E. A. Guillemin, *The mathematics of circuit analysis*, MIT Press, 1949.
- [91] F. M. Teshe, "On the use of the Hilbert transform for processing measured CW data," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 34, no. 3, pp. 259–266, Aug. 1992.
- [92] S. Visacro e R. Alipio, "Resposta transitória de eletrodos de aterramento: uma avaliação experimental do efeito da dependência com a frequência da resistividade e da permissividade elétricas," em *XXI SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Florianópolis, Brasil, Out. 2011.
- [93] R. Alipio, S. Visacro et al, "The response of grounding grids to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity – experimental and simulated results," **in preparation.**
- [94] S. Visacro, F. Silveira, S. Xavier, and H. B. Ferreira, "Frequency dependence of soil parameters: the influence on the lightning performance of transmission lines," in *Proc. of 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, Austria, Sept. 2012.
- [95] S. Visacro, F. Silveira, D. Brasil, "Proposals for improvement of the lightning performance of transmission lines installed in areas of extremely unfavorable soil conditions," in *Proc. of CIGRE SC C4 2012 Hakodate Colloquium*, 2012.
- [96] F. Silveira, S. Visacro, and A. De Conti "Lightning performance of 138-kV lines: the influence of the frequency dependence of soil parameters and subsequent stroke currents a case study," in *Proc. of 2012 Int. Conf. on Grounding and Earthing (GROUND 2012)*, Bonito, Brazil, Nov. 2012.

APÊNDICE I

Prêmio recebido pelo autor desta Tese na 31ª Conferência Internacional sobre Proteção contra Descargas Atmosféricas (31th International Conference on Lightning Protection – ICLP) pelo comitê científico do evento por suas contribuições relevantes para o campo de proteção de sistemas elétricos contra descargas atmosféricas.

**The Scientific Committee of the
International Conference on Lightning Protection
(ICLP)**

DIPLOMA

presented to

RAFAEL ALPIO

for his high quality presentation of a paper or poster
entitled

**“HOW THE FREQUENCY DEPENDENCE OF SOIL RESISTIVITY
AND PERMITTIVITY AFFECTS THE LIGHTNING RESPONSE OF
GROUNDING ELECTRODES“**

at the International Conference on Lightning Protection
and his notable contributions to the field of lightning research
and lightning protection

**31st International Conference on Lightning Protection
ICLP 2012
Vienna, AUSTRIA
2 - 7 September 2012**


.....
Farhad Rachidi
President


.....
István Berta Carlo Mazzetti Vladimir A. Rakov
Young Scientist Awards Committee


.....
Gerhard Diendorfer
31st ICLP Chairperson

APÊNDICE II: *Publicações originadas desta tese*

- I. S. Visacro, **R. Alipio**, M. H. Murta Vale, and L. S. de Araújo, “Recent findings in soil parameter frequency dependence and their influence on the lightning response of grounding electrodes,” in Proc. of GROUND’2010 International Conference on Grounding and Earthing, Salvador, Brazil, Nov. 2010.
- II. S. Visacro, **R. Alipio**, M. H. Murta Vale, and C. Pereira, “The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity,” IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 53, no. 2, pp. 401–406, May 2011.
- III. S. Visacro and **R. Alipio**, “An experimental-based formulation for expressing the frequency dependence of soil resistivity and permittivity,” in Proc. of the XI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Fortaleza, Brazil, Oct. 2011.
- IV. S. Visacro e **R. Alipio**, “Resposta transitória de eletrodos de aterramento: uma avaliação experimental do efeito da dependência com a frequência da resistividade e da permissividade elétricas,” em XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, Brasil, Out. 2011.
- V. S. Visacro and **R. Alipio**, “Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- VI. **R. Alipio** and S. Visacro, “How the frequency dependence of soil parameters affects the lightning response of grounding electrodes,” in Proc. of 31st International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, Sept. 2012.
- VII. **R. Alipio** and S. Visacro, “A physical model for the frequency dependence of soil conductivity and permittivity,” in Proc. of GROUND’2012 International Conference on Grounding and Earthing, Bonito, Brazil, Nov. 2012.
- VIII. **R. Alipio** and S. Visacro, “Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes,” IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 1, pp. 132–139, Feb. 2013.
- IX. S. Visacro, **R. Alipio**, and M. H. Murta Vale, “Grounding grids: effect of frequency dependent soil parameters on lightning performance,” in 8th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2013), Seoul, Korea, Jun. 2013.
- X. **R. Alipio**, S. Visacro, et al, “The response of grounding grids to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity – experimental and simulated results,” *in preparation*.
- XI. **R. Alipio** and S. Visacro, “Impulse efficiency of grounding electrodes: effect of frequency-dependent soil parameters,” IEEE Trans. Power Delivery (*accepted for publication*).
- XII. **R. Alipio** and S. Visacro, “A new physical model for describing the frequency dependence of soil parameters,” *in preparation*.