

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº XXX

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA IONIZAÇÃO DO SOLO SUBMETIDO
A CAMPO ELÉTRICO DE ALTA INTENSIDADE E NÃO UNIFORME
GERADO POR CORRENTES IMPULSIVAS**

ÍCARO OLIVEIRA VIANA

DATA DA DEFESA: 24/08/2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA IONIZAÇÃO DO SOLO SUBMETIDO
A CAMPO ELÉTRICO DE ALTA INTENSIDADE E NÃO UNIFORME
GERADO POR CORRENTES IMPULSIVAS**

ÍCARO OLIVEIRA VIANA

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Silverio Visacro Filho

BELO HORIZONTE
AGOSTO DE 2021

V614a	<p>Viana, Ícaro Oliveira. Análise teórico-experimental da ionização do solo submetido a campo elétrico de alta intensidade e não uniforme gerado por correntes impulsivas [recurso eletrônico] / Ícaro Oliveira Viana. - 2021. 1 recurso online (75 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Silvério Visacro Filho.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f.71-75.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Campos elétricos – Teses. 3. Impedância (Eletricidade) – Teses. 4. Ionização – Teses. I. Visacro Filho, Silvério. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	--

"Análise Teórico-experimental da Ionização do Solo Submetido a Campo Elétrico de Alta Intensidade e Não Uniforme Gerado por Correntes Impulsivas"

Ícaro Oliveira Viana

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 24 de agosto de 2021.

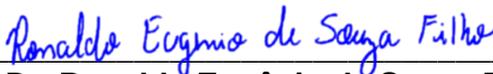
Por:



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



Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Ronaldo Eugênio de Souza Filho
ICT (UNIFEI - Campus de Itabira)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me abençoar com a oportunidade de crescer academicamente colocando pessoas especiais em meu caminho, concedendo a mim vida e saúde para prosseguir neste grande objetivo.

À minha noiva, Thaís da Silva Alves, amiga e companheira de todas as horas. Sem seu estímulo eu não teria chegado até aqui. Agradeço pelo seu companheirismo, amor e dedicação.

A meus pais, Gilson Rogério Viana e Maria Aparecida de Oliveira Viana, que são minha base e inspiração. Obrigado pelo sacrifício, esforço e amor incondicional. Vocês são meu espelho para a vida.

Aos meus irmãos, Ígor Oliveira Viana e Isabella Oliveira Viana e familiares que sempre estiveram presentes para apoiar e contribuir com amizade e companheirismo.

Ao professor, pesquisador e orientador Silvério Visacro pelos preciosos ensinamentos e orientações que estruturaram a base intelectual que concebeu esta pesquisa.

Ao colega Felipe Eduardo Moreira Cota pelo esforço, apoio e suporte tão relevantes para a viabilização da realização deste estudo.

Aos professores e amigos do Lightning Research Center, todos merecem destaque e agradecimento pelos momentos de compartilhamento e amizade.

Este trabalho teve financiamento do PROGRAMA de P&D da ANEEL por meio de projeto desenvolvido em parceria da UFMG com a TAESA e a AETE.

Resumo

Esta dissertação de mestrado apresenta os resultados obtidos a partir da análise do vasto banco de dados estruturado de ensaios de corrente impulsiva aplicada a quinze amostras de solo dispostas em cuba cilíndrica coaxial, representando cenário de campo elétrico com característica não uniforme. Cada amostra foi testada em três diferentes umidades (natural, 5% de umidade e 10% de umidade) e os ensaios foram realizados para dois tempos de frente de onda (frente rápida, referente a sinais impulsivos com características de descargas subsequentes e frente lenta, referente a primeira descarga).

Apesar do tema ionização ter sido já amplamente investigado, a construção de banco de dados tão extenso para a análise da dinâmica da evolução efeito, contemplando os efeitos da resistividade, umidade e tempo de frente de onda é pioneira. Ao todo foram mais de 7.300 ensaios validados com registro das ondas de tensão e corrente impulsivas obtidos a partir de gerador de impulso de 600kV.

Foi elaborada rotina computacional para processar o banco de dados e realizar as análises propostas. Observou-se que variáveis como umidade, tempo de frente de onda e resistividade não influenciam de forma relevante a evolução do processo de ionização, sendo a intensidade do campo elétrico o parâmetro determinante para a ocorrência do fenômeno.

Para o cômputo do efeito de ionização do solo foi proposta uma curva relacionando a densidade linear de corrente dispersa para o solo com o aumento do raio equivalente do eletrodo. Tal curva foi obtida a partir da relação entre diminuição da impedância de transitória de amostras de solo e a intensidade de campo elétrico na superfície do eletrodo. Atribuindo-se um grau de conservadorismo a esta curva (do tipo da redução de 10% da densidade linear de corrente, correspondendo a acréscimo de mesma ordem na intensidade do campo elétrico), é possível quantificar com aproximação razoável o efeito de ionização de solos genéricos no entorno de condutores cilíndricos.

Palavras-chave: Ionização do solo, Impedância transitória, Resistividade do solo, Campo elétrico, Raio equivalente

Abstract

This thesis presents the results obtained from the analysis of a large database of impulsive current tests applied to fifteen soil samples arranged in a coaxial cylindrical vat, representing an electric field scenario with a non-uniform characteristic. Each sample was tested at three different moistures (natural, 5% moisture and 10% moisture) and the tests were performed for two wavefront times (fast front, referring to impulsive currents with characteristics of subsequent return strokes and slow front, concerning with the first strokes).

Although soil ionization has already been widely investigated, the construction of such an extensive database for the analysis of the dynamics of the effect evolution, contemplating the effects of resistivity, moisture and wavefront time, is pioneer. Altogether, more than 7,300 tests were validated with recording of impulse voltage and current waves obtained from a 600kV impulse generator.

A computational routine was created to process the database and carry out the proposed analyses. It was observed that variables such as moisture, wavefront time and resistivity don't significantly influence the evolution of the ionization process, with the intensity of the electric field being the determining parameter for the occurrence of the phenomenon.

For the considering the soil ionization effect, the work suggested using a curve relating the linear density of current dispersed from the electrode to the soil with an increased equivalent radius of the electrode. This curve was obtained considering the decrease of the transient impedance of samples as a function the electric field strength at the electrode surface. Attributing a conservativeness degree to this curve (e.g., decreasing the linear current density in about 10%, corresponding to an increase of the same order of the electric field intensity), allows using it for taking the ionization effect of generic soils around cylindrical conductors into account.

Keyword: Soil ionization, Transient impedance, Soil resistivity, Electric field, Equivalent radius

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Relevância e motivação.....	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Metodologia.....	3
1.4	Organização do texto.....	3
2	O EFEITO DE IONIZAÇÃO DO SOLO.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Consideração introdutória de aspectos físicos do fenômeno.....	5
2.3	Abordagens de trabalhos relacionados ao fenômeno em ordem cronológica	7
3	DESCRIÇÃO DOS TESTES E EXPRESSÕES PARA ANÁLISE DE RESULTADOS	13
3.1	Introdução.....	13
3.2	Descrição dos testes experimentais	14
3.3	Amostras analisadas	14
3.4	Descrição do experimento	16
3.5	Tratamento dos dados e construção do banco de dados.....	18
3.6	Cálculo do campo elétrico	19
3.7	Cálculo da resistividade das amostras.....	21
3.8	Cálculo do raio equivalente do eletrodo interno.....	23
4	RESULTADOS.....	25
4.1	Introdução.....	25
4.2	Impedância transitória das amostras	27
4.2.1	Resultados para ondas representativas de primeiras descargas	28
4.2.2	Resultados para ondas representativas de descargas subsequentes .	34

4.3	Evolução de $Z_t(10 \mu s)$ x Eri para diferentes umidades	40
4.3.1	$Z_t(pu)$ x Eri para diferentes umidades – tempo de frente de típico de primeira descarga.....	41
4.3.2	$Z_t(pu)$ x Eri para diferentes umidades – tempo de frente de típico de descarga subsequente	43
4.4	Evolução Raio equivalente x Eri para diferentes umidades	45
4.4.1	Req x Eri para diferentes umidades – tempo de frente de típico de primeira descarga.....	45
4.4.2	Req x Eri para diferentes umidades – tempo de frente de típico de descarga subsequente	48
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	50
5.1	Relação entre intensidades de campo elétrico e ionização	50
5.1.1	Resultados de Z_t versus campo elétrico para ondas com frente lenta 52	
5.1.2	Relação entre Z_t e Campo elétrico para ondas com frente rápida ...	55
5.1.3	Análises	58
5.1.4	Ajuste dos resultados para aplicação em aterramentos	61
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	66
6.1	Considerações finais.....	66
6.2	Conclusões.....	67
6.3	Sugestão de alternativa para ter em conta o efeito de ionização do solo em aterramentos elétricos	68
6.4	Propostas de Continuidade	70
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e motivação

O Aterramento Elétrico constitui um componente importante dos sistemas elétricos e eletrônicos, cuja resposta, quando submetido ao fluxo de correntes associados a ocorrências anômalas no sistema, de ordem interna ou externa, pode afetar o desempenho desse sistema.

Notadamente, uma das ocorrências de maior relevância nos sistemas elétricos e eletrônicos são aquelas associadas a descargas atmosféricas, que impõem correntes impulsivas de curta duração (da ordem de milissegundos), mas de intensidade muito elevada (da ordem de várias dezenas de Quilo ampères) aos componentes do sistema e, frequentemente, aos aterramentos deste.

As correntes associadas a descargas têm características particulares, sobretudo a forma de onda impulsiva com intensidades extremas e um amplo espectro de componentes de frequência. A resposta do aterramento submetido a tais correntes é muito diferente daquela observada frente a correntes associadas a fenômenos de variação lenta, como curto-circuito e desbalanço de cargas. As diferenças decorrem de distintos efeitos, como os de atenuação e distorção da corrente impulsiva que se propaga ao longo dos eletrodos (VISACRO, 1995) e a dependência da frequência da resistividade permissividade do solo (VISACRO, 2011).

De uma forma geral, a investigação da resposta de aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas tem sido objeto de investigação de muitos pesquisadores desde 1934, quando Bewley apresentou um estudo sobre a resposta de cabos contrapeso em linhas de transmissão de energia quando submetidas à descargas atmosféricas (BEWLEY, 1934). Desde então, muitos desafios científicos vêm sendo enfrentados pelos pesquisadores da área, notadamente o desenvolvimento de modelos para predição do comportamento transitório do aterramento, a dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo e o efeito de ionização desse meio.

Em particular, esta dissertação considera o efeito da ionização do solo que ocorre no entorno dos eletrodos quando densidades de corrente muito intensas (e correspondentes elevados campos elétricos) no solo circunvizinho ao eletrodo ultrapassam determinados limiares. Esse efeito, quando intenso, tem potencial para reduzir significativamente a impedância do aterramento, o que pode afetar o desempenho do sistema aterrado.

Embora o estudo de tal efeito tenha se iniciado há muito, considera-se que o conhecimento sobre este e o equacionamento da sua intensidade e impacto na resposta do aterramento ainda não tenha alcançado um nível satisfatório para fins de seu cômputo de forma confiável nas aplicações de engenharia. Isto motiva a realização de investigações sobre a influência da intensidade da corrente de descarga na variação do comportamento do aterramento (LIMA, 2008).

Há vários anos, o LRC (Lightning Research Center - UFMG) vem desenvolvendo uma linha de pesquisa específica dedicada ao tema, que envolve atividades de medição laboratorial de amostras de solo submetidas a campos elétricos de alta intensidade, comparáveis aos gerados por descargas atmosféricas, e capazes de gerar ionização do meio. Envolve, também, a interpretação do fenômeno e a sua modelagem para fins de inclusão do efeito nas avaliações da resposta transitória do aterramento e do sistema aterrado. Nessa perspectiva, recentemente foi desenvolvida uma dissertação de mestrado dedicada à ionização do solo submetido a campo elétrico intenso e uniforme, gerado por correntes impulsivas (CORRÊA, 2020). De forma complementar, esta dissertação é dedicada à investigação da ionização de solos sujeitos a campo elétrico não uniforme gerados por correntes impulsivas, como aqueles que existem no entorno dos eletrodos cilíndricos de aterramentos elétricos (VIANA, 2021).

1.2 Objetivo

O principal objetivo da dissertação é contribuir para o aprimoramento da compreensão do fenômeno de ionização do solo, decorrente da ocorrência de intensos campos elétricos nas proximidades dos eletrodos expostos a correntes elétricas intensas, procurando desenvolver novas abordagens relacionadas a dinâmica progressiva dos canais ionizados em situações de campo elétrico não uniforme promovido por condutores cilíndricos coaxiais.

Tal investigação foi realizada a partir da análise de uma vasta base de dados experimentais desenvolvida no LRC, obtida de ensaios de alta tensão realizados em amostras de diferentes solos com diferentes unidades. Foram avaliados meios de computar o efeito através da associação da dinâmica do processo de ionização do solo com parâmetros típicos do solo, tais como a resistividade e condutividade.

1.3 Metodologia

O ponto de partida da dissertação proposta se baseia na análise sistemática dos resultados de ensaios experimentais que, considerando grande diversidade de solos em diferentes condições de umidade, reproduziu o efeito de ionização em amostras de solo, buscando desenvolver subsídios para a interpretação teórica dos resultados para entendimento dos processos físicos envolvidos, segundo uma abordagem macroscópica.

A metodologia de desenvolvimento segue basicamente a sequência das atividades planejadas para o trabalho de pesquisa:

1. Revisão bibliográfica;
2. Processamento dos dados adquiridos;
3. Análise dos resultados;

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica que contemplou os aspectos já discutidos na literatura científica referentes à ionização do solo. Em seguida foram processados e analisados os dados experimentais já desenvolvidos no LRC a partir dos ensaios de alta tensão em amostras de solo (COTA, 2017). Na sequência, buscou-se desenvolver-se interpretações e o entendimento dos processos físicos envolvidos na ocorrência de ionização do solo. Prospectou-se a existência de relação desta com as características do solo, notadamente sua resistividade, na busca de uma forma de representar o fenômeno nos procedimentos para avaliação da resposta de aterramentos submetidos a correntes de descargas atmosféricas.

1.4 Organização do texto

O texto foi organizado da seguinte forma: o presente capítulo apresenta a introdução do trabalho, demonstrando a relevância e motivação do tema proposto e uma breve descrição da metodologia adotada.

No **Capítulo 2**, é apresentada uma análise geral do tema “Aterramentos Elétricos”, descrevendo os parâmetros e conceitos já consolidados a partir dos quais a presente dissertação pretende propor analogias e aplicações para associar variáveis já conhecidas, como a resistividade do solo e a impedância transitória (relação instantânea $v[t]/i[t]$), com a ocorrência de canais ionizados no solo.

No **Capítulo 3**, a metodologia utilizada é descrita através da apresentação dos procedimentos e premissas adotadas durante as análises experimentais e durante o processamento dos dados coletados, definindo os principais parâmetros de saída que serão analisadas ao longo do documento.

O **Capítulo 4** retrata os resultados das medições após tratamento computacional, apresentando o comportamento das ondas impulsivas de tensão e corrente e a dinâmica da impedância transitória dos solos em meio à ocorrência de primeira descarga e subsequente, antes e durante o registro da ocorrência da ionização do solo, para três cenários de umidade das amostras.

O **Capítulo 5** apresenta a análise dos resultados, associando a dinâmica do fenômeno de ionização dos solos a parâmetros já conhecidos das amostras.

As principais conclusões são apresentadas no **Capítulo 6** onde são representadas de forma conclusiva os pareceres referentes aos processos físicos envolvidos na ocorrência da ionização do solo em meio à exposição a campo elétrico não uniforme.

As referências bibliográficas citadas ao longo do texto se encontram listadas ao final do texto.

2 O EFEITO DE IONIZAÇÃO DO SOLO

2.1 Introdução

Há muito, o efeito da ocorrência de ionização do solo submetido a campos elétricos muito intensos é conhecido. Destaca-se a contribuição do fenômeno para a redução da impedância transitória e da correspondente elevação de potencial associado na superfície, quando da injeção das elevadas correntes responsáveis pelos campos intensos no solo, por meio dos eletrodos de aterramento.

Os parâmetros do solo que definem a sua resistividade (granulometria, concentração de sais, umidade, presença de materiais orgânicos, dentre outros) podem influenciar de forma significativa a dinâmica do surgimento de caminhos ionizados pelo solo.

Este capítulo apresenta uma análise física do fenômeno de ionização, além de um breve histórico sobre pesquisas mais relevantes relacionadas ao tema.

2.2 Consideração introdutória de aspectos físicos do fenômeno

O processo de ionização no solo circunvizinho ao sistema de aterramento pode ser significativo quando o mesmo é submetido a densidades de corrente elevadas (normalmente de natureza impulsiva).

Considerando-se um eletrodo colocado num solo de resistividade ρ , a corrente transversal que flui para o solo apresentará componentes condutivas e capacitivas, proporcionais ao campo elétrico na superfície do condutor. A densidade de corrente total (\vec{J}) dispersa para solo será composta pela soma das parcelas condutiva (\vec{J}_C) e capacitiva (\vec{J}_D), conforme definida pela Equação 2.1, onde \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico e t é o tempo.

$$\vec{J} = \vec{J}_C + \vec{J}_D = \vec{J}_C + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (2.1)$$

Recorrendo-se às relações que demonstram as propriedades macroscópicas da matéria (2.1 e 2.2) expressa-se a relação entre a densidade de corrente total deixando eletrodo e a intensidade do campo elétrico na superfície deste (2.4).

$$\vec{J}_C = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

$$\vec{J}_D = \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} + \frac{d(\epsilon \cdot \vec{E})}{dt} \quad (2.4)$$

Onde:

- \vec{J}_C Densidade de corrente elétrica de condução [A/m²]
- σ Condutividade elétrica do meio [S/m]
- \vec{E} Intensidade de campo elétrico [V/m]
- \vec{J}_D Densidade de corrente capacitiva [A/m²]
- ϵ Permissividade elétrica do meio [F/m]

Particularmente, ao considerar-se a variação harmônica no tempo das grandezas (2.5), obtém-se a relação entre a intensidade do campo elétrico e a densidade de corrente total (2.6) no domínio da frequência ($\omega = 2\pi f$):

$$\vec{E} = \vec{E}_s \cdot e^{j\omega t} \rightarrow \frac{d\epsilon \vec{E}}{dt} = j\omega \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{J}}{\sigma + j\omega \epsilon} \quad (2.6)$$

Dada uma corrente de injeção I no sistema, definindo-se uma área de dissipação fixa para um segmento do eletrodo, a densidade de corrente (J_C e J_D) irá se comportar de forma proporcional.

Visto que o campo elétrico se relaciona com a densidade de corrente através da equação 2.6, nota-se que para valores elevados de J o campo elétrico associado apresentará elevada intensidade. Conforme o valor do campo elétrico aumenta, ocorrerão descargas parciais no solo, caracterizando o evento de ionização do solo, conforme apresenta a Figura 2-1.

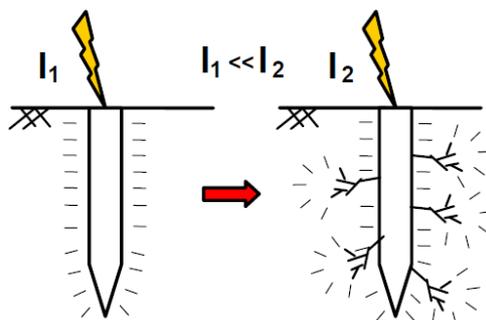


Figura 2-1 - Surgimento de canais ionizados no solo derivados das descargas parciais no meio (Fenômeno de ionização do solo). Adaptado de (VISACRO, 2007).

2.3 Abordagens de trabalhos relacionados ao fenômeno em ordem cronológica

A ionização do solo pode ter impacto significativo no desempenho dos aterramentos elétricos quando solicitados por correntes de alta intensidade. Constituem fatores relevantes na avaliação da ocorrência do efeito a definição teórico-experimental do campo elétrico crítico (valor limiar do campo elétrico que inicia o processo de ionização) e a relação desta grandeza com a resistividade do solo e os parâmetros da corrente, notadamente aqueles de correntes impulsivas do tipo das correntes de retorno de descargas atmosféricas. Este cenário motivou a investigação da ionização do solo desde o início do século passado.

Entre 1941 e 1943 P. Bellaschi divulgou um conjunto de experimentos destinados à observação do desempenho de diferentes tipos de solos com diversas configurações de aterramentos frente a solicitações com perfis impulsivos (simulando a ocorrência de descargas atmosféricas) e senoidais (simulando a ocorrência de faltas a terra oriundas de curto-circuito). Com isto, conseguiu demonstrar a significativa diferença entre a resistência de aterramento (medida a 60 Hz com baixos valores de corrente) e a “resistência” impulsiva (relação entre picos de tensão e corrente das ondas impulsivas) obtida quando da injeção de correntes muito elevadas no solo. Em sua primeira publicação, Bellaschi (1941) comprovou que, ao aplicar correntes impulsivas com tempo de frente entre 6 μ s e 12 μ s entre cilindros coaxiais separados por amostras de solo, a “resistência” impulsiva apresentava valor consideravelmente menor que os da resistência de aterramento em 60 Hz. Citando outras obras anteriores (que ainda não haviam se

aprofundado tanto em análises experimentais) como Towne (1928), McEachron et al (1930) e Norinder (1939), Bellaschi justifica a redução da “resistência” impulsiva pela ocorrência de arcos elétricos próximos à superfície do cilindro a partir de determinados limiares de tensão.

Na continuação de sua pesquisa em 1942 Bellaschi se aprofundou na aplicação de sinais impulsivos agregando mais amostras de solo (com resistividade compreendidas entre 77 Ω .m e 290 Ω .m), novos arranjos de eletrodos de aterramento dispostos em solo nativo (haste única com comprimento e profundidade bem definida, paralelismo entre duas hastes e agrupamento de quatro hastes) e tempos de frente de onda de corrente definidos em 8 μ s, 20 μ s e 25 μ s onde, para isto, utilizou um gerador de sinais de 100 kV.

Desta vez constatou que a redução da “resistência” impulsiva estaria relacionada principalmente ao tipo de solo (caracterizado pela resistividade ρ), disposição dos eletrodos e valor de pico de corrente, associada ao gradiente crítico de ruptura e início do processo de ionização. Concluiu que o tempo de frente do sinal de corrente seria irrelevante para a redução da “resistência” impulsiva. Em relação à ocorrência de ionização do solo, para a faixa de resistividade analisada, Bellaschi estimou valores de campo elétrico crítico entre 0.12 MV/m e 0.42 MV/m.

Em 1974 os pesquisadores Liew e Darveniza propuseram um modelo matemático que buscava representar o efeito de ionização por meio da redução da resistividade do solo nas proximidades dos eletrodos. O modelo representava a dinâmica de comportamento da resistividade do solo em meio a solicitações impulsivas (ondas com tempo de frente entre 6 μ s e 16 μ s e 1 kA a 20 kA). Para isto, os autores se limitaram a pôr em prova apenas 3 amostras de solo (50 Ω .m, 50,5 Ω .m e 540 Ω .m) para consolidar o modelo matemático proposto. O modelo analítico apresentado divide o solo submetido a solicitações impulsivas em três regiões bem definidas: Parcela do solo não ionizado, parcela do solo que sofreu ionização discreta e parcela do solo altamente ionizado. Os autores constataram significativa redução da resistência impulsiva com o aumento da corrente, comprovando a inexistência de linearidade entre os sinais de tensão e corrente. Mostraram que o pico de tensão ocorre antes do pico de corrente (comportamento indutivo) para os solos ensaiados e que o instante de mínima resistência ocorre após o pico de corrente. O modelo é limitado por apresentar como variável o campo elétrico

crítico, cuja determinação é complexa. O modelo busca determinar o campo elétrico crítico que possibilite obter dinâmica similar de evolução da ionização em termos da relação tensão versus corrente, verificada nos experimentos. Com base em seus desenvolvimentos, os autores concluem que, para solos testados com resistividade na faixa $50 \Omega.m$ e aterramento composto por haste única, o campo elétrico crítico está compreendido entre 0.11 MV/m e 0.3 MV/m . Para solos classificados pelo autor como de elevada resistividade ($\sim 540 \Omega.m$), o modelo não apresentou de forma satisfatória o comportamento do aterramento frente às solicitações impulsivas o que corresponde a uma considerável limitação do modelo proposto.

Ao final dos anos 80, mais precisamente em 1988, Oettlé trouxe sua contribuição à pesquisa do comportamento do solo submetido a correntes impulsivas ao dar continuidade à pesquisa de Korsuntcev (1958), que apresentou uma curva experimental que relaciona a impedância impulsiva do solo (grandeza proposta pelo autor para mensurar o efeito de ionização, calculada a partir de equações relacionadas a parâmetros do solo calculada para V/I em $6\mu s$) com a intensidade de corrente em hastes dispostas no solo sem a necessidade de conhecimento prévio a respeito do campo elétrico crítico das amostras estudadas. Como resultado de sua pesquisa, Oettlé propõe o valor de campo elétrico crítico E_o aproximado de 1 MV/m .

Em 1991 o CIGRE lançou o guia de procedimentos para estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente à descargas atmosféricas. Em relação à ocorrência de ionização do solo, é apresentada uma análise prática do comportamento da relação instantânea entre tensão e corrente de eletrodos hemisféricos e hastes horizontais dispostos em solo de $1000 \Omega.m$. Considerando a aplicação de uma onda de tensão com tempo de frente de $5 \mu s$ foi demonstrado o perfil da impedância transitória (classificada como a relação instantânea $v[t]/i[t]$), que apresentou valor mínimo no instante da ocorrência do valor de pico de tensão. O guia apresenta a curva que relaciona a impedância impulsiva com a intensidade de corrente aplicada através de equacionamento similar ao proposto por Korsuntcev, propondo 400 kV/m como campo elétrico crítico para obter comportamento aproximado para as amostras apresentadas.

Outro trabalho que merece destaque na busca pela definição do comportamento do solo frente a solicitações de correntes impulsivas foi Mousa (1994). Avaliando os

métodos mais utilizados à época da pesquisa quanto à efetividade de modelar a ocorrência da redução da relação instantânea entre tensão e corrente, nomeado pelo autor como “resistência impulsiva” quando impulsos de corrente da ordem de 30kA são aplicados, típicas propostas por Berger (BERGER, 1975). Ao analisar o desempenho de solos com aterramentos compostos por hastes verticais e condutores semiesféricos através de 97 medições realizadas através da aplicação de sinais impulsivos em 4 amostras diferentes de solo (100 Ω .m, 500 Ω .m, 1000 Ω .m e 3000 Ω .m), Mousa concluiu que o campo elétrico crítico E_o tem relação direta com a umidade do solo, havendo decréscimo conforme a concentração de água é aumentada. Apesar da exatidão questionável no processo de cálculo, o autor conclui que E_o não tem relação direta com a resistividade do solo e propõe assumir-se em 300 kV/m o valor típico do campo elétrico crítico.

Em 1995 Visacro apresentou sua contribuição à pesquisa quando avaliou os efeitos da intensidade de corrente de descarga no comportamento transitório de aterramentos elétricos. Através de um extenso banco de dados que contou com cerca de 300 experimentos, foram aplicados sinais impulsivos com características de primeira descarga a diversas amostras cilíndricas de solo com diferentes resistividades e umidade. Visacro caracteriza a ocorrência da ionização do solo através da alteração da relação tensão-corrente (expressa graficamente) em função da formação de canais ionizados no solo quando a corrente imposta à amostra é aumentada. Analisando o comportamento da curva $V \times I$ associada à medição, a redução drástica da relação V/I devido ao processo de ionização promove um deslocamento da curva caracterizando um “loop” em forma de “8”. Ao associar a ocorrência de ionização do solo a um correspondente aumento das dimensões do eletrodo, relaciona o aumento efetivo do raio com a densidade linear de corrente no solo testado, obtendo uma relação praticamente linear que confirma a hipótese de que o efeito de ionização é regido basicamente pela intensidade de campo elétrico.

Em 1996 Loboda realizou rotina de ensaios de corrente impulsiva aplicada em haste condutora, que inicialmente apresentava raio 0,0025 m que posteriormente foi substituída por haste de raio 0,0125 m disposta em cuba cilíndrica coaxiais, onde a casca cilíndrica metálica de raio 0,1m apresentava base e topo isolantes e o meio foi preenchido com diferentes amostras de solo. Ao todo, foram analisadas 6 amostras com resistividades compreendidas entre 40 Ω .m e 2150 Ω .m e com dois níveis de umidade diferente (6% e 3,5% para solos arenosos, 25% e 35% para solos argilosos). Para a realização dos ensaios

foi utilizado gerador de impulsos cujo tempo de frente t_c para as ondas de corrente analisadas foi dividido em ensaios de 2 μ s, 6 μ s e 10 μ s. Concluiu-se que a polaridade e tempo de frente da corrente injetada é pouco relevante quanto à ocorrência de descargas parciais no solo. Além disto, demonstrou que o componente mais relevante para a formação dos canais ionizados registrados a partir da redução da impedância impulsiva é a densidade de corrente. Após a realização de uma série de testes nas amostras verificou que, tipicamente, o campo elétrico crítico que leva à ionização do solo encontra-se entre 0,2 MV/m e 1 MV/m considerando-se um raio de ionização uniforme, semelhante a um aumento equivalente do raio do eletrodo.

Em 2004 Gonos e Stathopulos realizaram experimentos para estudar a ionização do solo e a variação do campo elétrico crítico em função da resistividade do solo. Duas amostras, sendo uma de 1300 Ω .m (solo A) e outra de 1000 Ω .m (solo B), foram colocadas entre dois cilindros coaxiais condutores, sendo as bases (superior e inferior) do cilindro externo compostas por placas isolantes circulares. Através de um gerador de impulsos de 100 kV foram realizados ensaios com sinais impulsivos de tensão aplicados que apresentaram tempo de frente médio compreendido entre 2 μ s e 8 μ s. Uma estimativa do gradiente crítico de ionização foi apresentado, da ordem de 200 kV/m, seguido pela constatação de que o campo elétrico crítico para solo úmido diminui para aproximadamente 35% do valor correspondente para solo seco.

No ano de 2017 Cota e Visacro apresentaram resultados experimentais do efeito de ionização do solo em eletrodos aterrados considerando diferentes valores de resistividade (100 Ω .m a 1450 Ω .m) totalizando onze amostras testadas. As amostras tratadas foram dispostas em cuba cilíndricas (análise de campo não uniforme) e em cuba de placas paralelas (análise de campo uniforme) e os ensaios foram realizados através de gerador de impulso de 600 kV para diferentes condições de umidade (original, 5% e 10%). Os resultados das análises demonstraram que independentemente da umidade do solo e da natureza do campo elétrico (uniforme ou não uniforme) o início do processo de ionização se iniciou para o um campo crítico de aproximadamente 0,3 MV/m.

A Tabela 2-1 apresenta de forma resumida o campo elétrico crítico E_0 apresentado pelos trabalhos supracitados destacando a variedade de solos analisados através da resistividade das amostras estudadas. O trabalho realizado pelo LRC conta com uma série

de ensaios realizados por Visacro e Cota que construíram uma vasta base de dados que serviram como base para a presente dissertação.

Tabela 2-1 – Valores recomendados para campo elétrico crítico E_0 Por diferentes autores

Autor	$\rho(\Omega.m)$	E_0 (MV/m)
Korsuntcev	470	1,2
	180	1,0
	100	0,8
Bellaschi	100	0,03
	100	0,27
	85	0,127
	75	0,22
	300	0,425
Liew e Darveniza	50	0,1 - 0,3
	60	0,05
	150	0,2
	300	0,05
Oettle	~60	0,75
	~400	0,75
	~700	1
	~1000	1,6
	~10000	1,6
CIGRE	1000	0,4
Mousa	Não informado	0,3
Loboda	40	0,54
	50	0,54
	70	0,37
	200	0,46
	800	0,56
	2150	0,65
LRC	80	0,5
	250	0,53 – 0,61
	350	0,63
	600	0,57 – 9
	1090	0,6
	2000	0,37
	3000	0,9
	5000	1,16
	7000	0,5
	10000	0,55 – 1,44

3 DESCRIÇÃO DOS TESTES E EXPRESSÕES PARA ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Introdução

Para análise do fenômeno de ionização, em trabalhos anteriores do *Lightning Research Center - LRC* (COTA, 2017), (CORRÊA, 2020) e (VIANA, 2021) foram realizados testes laboratoriais envolvendo 15 amostras de solos com diferentes resistividades, sob diferentes condições de umidade, cujas amostras foram submetidas a solicitação impulsiva em condição de campo elétrico uniforme e não uniforme.

O detalhamento desses testes consta do trabalho de Cotta (COTA, 2017) e, em uma primeira realização abordando unicamente ensaios em campo elétrico uniforme, Corrêa (CORRÊA, 2020) apresentou análise para a definição do campo elétrico crítico para o banco de dados desenvolvido, que conta com amostras de 100 Ω .m a 10000 Ω .m. Como continuação do trabalho desenvolvido pela equipe do LRC, o presente trabalho desenvolve análises referentes aos resultados obtidos a partir das medições de tensão e corrente impulsivas em campo elétrico não uniforme, como descrito a seguir.

As amostras foram tratadas e dispostas em cuba cilíndrica, cuja estrutura fornecida pelo grupo de pesquisa LRC da UFMG permitiu que ensaios de corrente impulsivas fossem realizadas a partir de um gerador de 600kV.

Na próxima seção são descritas as abordagens adotadas para agregar conteúdo às pesquisas relacionadas ao fenômeno de ionização do solo associado a condições de campo elétrico não uniforme a partir das medições de tensão e corrente impulsivas realizadas por cota (COTA, 2017).

3.2 Descrição dos testes experimentais

Com o intuito de simular a dinâmica da propagação da densidade de corrente impulsiva pelo solo através de hastes aterradas foi configurada uma montagem experimental para avaliar o fenômeno de ionização do solo.

Esta montagem contou com três componentes essenciais:

1. Gerador de impulsos: Componente responsável por simular as ondas impulsivas de descarga;
2. Cuba cilíndrica coaxial: Componente responsável por estabelecer o campo elétrico de mesma intensidade que aquele gerado por correntes de descargas no solo, nas proximidades de eletrodos de aterramentos;
3. Amostra de solo: Principal componente responsável por ditar a dinâmica do fenômeno de ionização;

A Figura 3-1 ilustra a montagem utilizada durante os experimentos, apresentando as dimensões da haste centralizada, da casca cilíndrica condutora e da amostra de solo alocada entre os eletrodos que compõem o experimento.

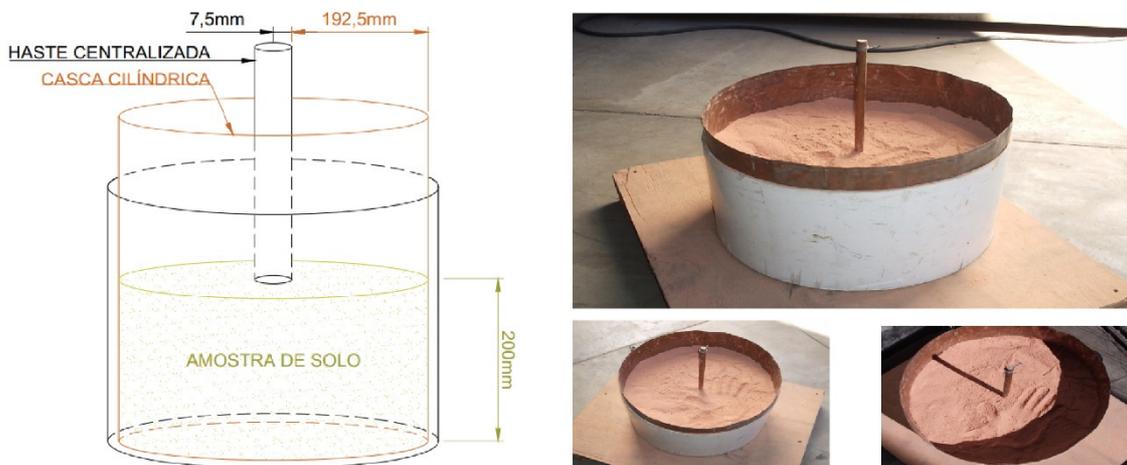


Figura 3-1 - Topologia cilíndrica.

3.3 Amostras analisadas

As amostras de solo foram coletadas em diferentes localidades do estado de Minas Gerais. Antes da coleta das amostras, foi realizada a medição de resistividade do solo no local através do método de Wenner. Estas medições iniciais apresentam as condições do

solo em seu estado natural, tais como a compactidade, a umidade, a concentração de sais, dentre outras. A Tabela 3-1 apresenta a resistividade medida para cada amostra analisada.

Tabela 3-1 - Resistividade medida das amostras analisadas (COTA, 2017).

Amostras	ρ medido ($\Omega.m$)
Solo 1	1200
Solo 2	276
Solo 3	1450
Solo 4	400
Solo 5	700
Solo 6	720
Solo 7	100
Solo 8	440
Solo 9	500
Solo 10	100
Solo 11	750
Solo 12	5950
Solo 13	5460
Solo 14	2500
Solo 15	10000

Após a extração das amostras, o tratamento padrão prévio antes dos ensaios era composto pelas seguintes etapas:

1. Remoção de pedras maiores que 1cm e detritos como folhagens, galhos, etc;
2. Pesagem;
3. Separação das amostras em três grupos divididos por umidade: Grupo um com umidade natural, grupo dois com 5% do peso da amostra composto por água deionizada e o grupo três com 10% do peso da amostra composto por água deionizada;
4. Mistura das amostras de solo com água de modo a obter material homogêneo;

Após os passos supracitados a amostra estava preparada para os ensaios.

3.4 Descrição do experimento

Para avaliar o fenômeno de ionização do solo, havia sido realizado nos laboratórios do LRC em período anterior a este trabalho uma série de testes, envolvendo ensaios em diferentes amostras de solo em diferentes umidades, aproximadamente 180 amostras incluindo aquelas ensaiadas com campo elétrico uniforme (cubas de placas planas) e não uniformes (cubas cilíndricas coaxiais), as quais foram submetidas a ondas de corrente com condições distintas de tempo de frente de onda ($1 \mu\text{s}$ e $3 \mu\text{s}$) e de amplitude (a partir de variação da amplitude da onda de tensão aplicada pelo gerador de impulso, iniciando em 5 kV e com passos de 5 kV por estágio). A Figura 3-2 mostra a representação genérica do circuito de medição nos testes com a cuba cilíndrica.

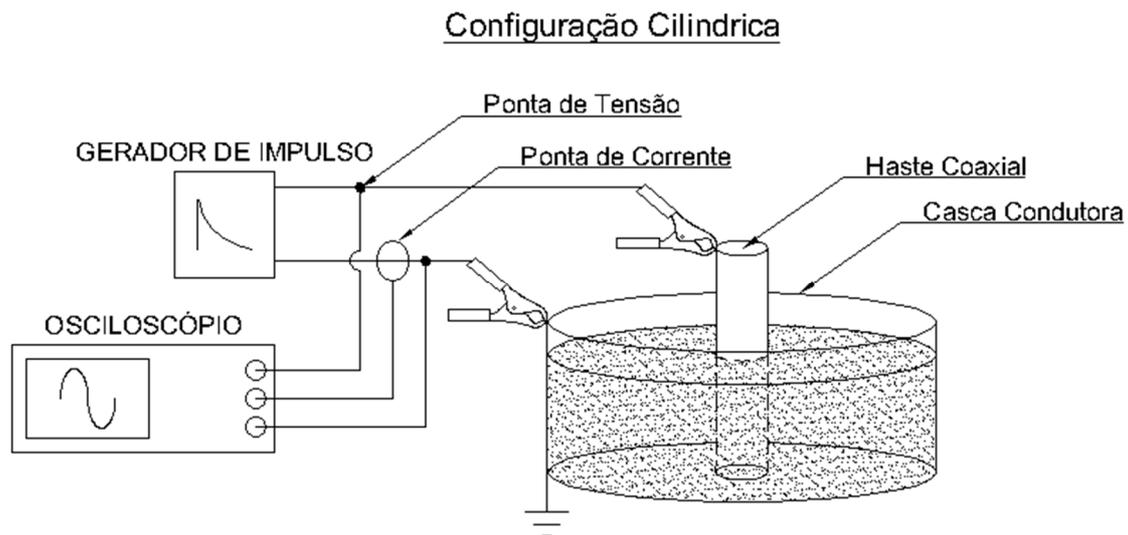


Figura 3-2 - Circuito equivalente do gerador de impulsos.

O perfil de onda do sinal impulsivo imposto às amostras de solo foi configurado de modo a retratar de forma experimental a ocorrência de descargas atmosféricas onde o tempo de frente (T_1) e o tempo de cauda (T_2) foram ajustados de modo a simular a ocorrência de primeira descarga e descarga subsequente.

A forma de onda do sinal impulsivo de tensão e corrente constituída pelo gerador de impulsos seguiram as recomendações previstas pela NBR IEC 60060-1: 2013, conforme ilustra a Figura 3-3.

Dentre os parâmetros indicados, destacam-se as principais variáveis:

- T1: Parâmetro virtual definido como 1/0,6 vezes o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de pico na curva da tensão de ensaio (pontos A e B da Figura 3-3);
- O₁: Instante que precede o correspondente ponto A da curva de tensão de ensaio (Figura 3-3) com o tempo 0,3xT1;
- T2: Parâmetro virtual definido como o intervalo entre a origem virtual, O₁, e o instante no qual a curva de tensão de ensaio tenha decrescido até a metade do valor da tensão de ensaio (Figura 3-3);

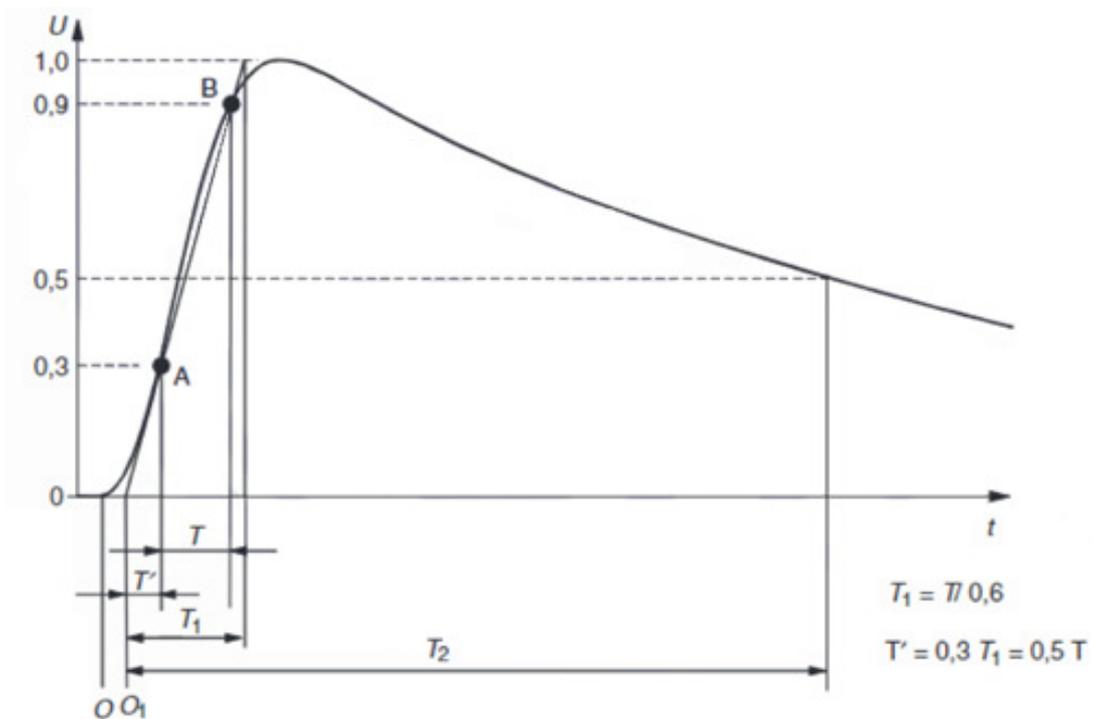


Figura 3-3 - Parâmetros de tempo do impulso atmosférico pleno. (Extraído da NBR IEC 60060-1)

O gerador de impulso apresenta um circuito básico composto por fonte de tensão contínua (transformador com retificador), capacitor de choque (Cs) e resistor de carga de valor elevado (Rc). O circuito RC é responsável pelo tempo de subida T1 através da constante de tempo ($\tau=RcCs$) sendo que a tensão aplicada V é definida pela distância entre as esferas do centelhador (G), regulável automaticamente no comando do gerador.

O resistor de frente (R_s) tem como finalidade compor o tempo de subida (Constante RC) da tensão impulsiva aplicada à cuba, através da haste coaxial. Após alcançar o valor de pico máximo, a tensão impulsiva decai à partir da descarga do divisor capacitivo sobre a resistência R_p .

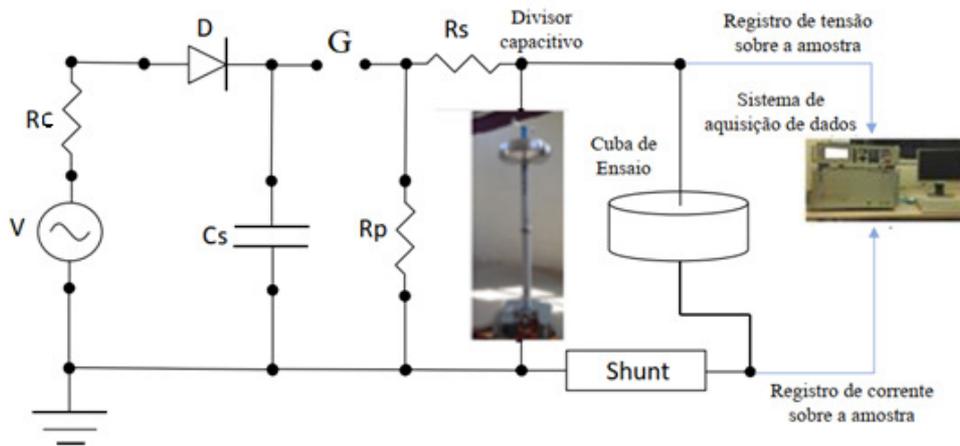


Figura 3-4 - Circuito simplificado do gerador de impulso. Adaptado de (COTA e VISACRO, 2017).

3.5 Tratamento dos dados e construção do banco de dados

Foi constituído um banco de dados a partir dos resultados das medições realizadas pelo sistema de análise do equipamento. Conforme os ensaios de tensão impulsiva foram realizados, o sistema do gerador de impulsos salvou os dados em arquivos em formato .txt, disponíveis para baixar após a realização de cada ensaio. O conjunto de testes realizados em cuba cilíndrica coaxial compôs um banco de dados de 30,4 Gb.

Para cada ensaio de tensão aplicada o gerador registra no arquivo .txt dois arquivos, sendo um referente aos registros de tensão e tempo e o segundo de corrente e tempo. A janela de tempo se estendia de um instante anterior à medição ($50 \mu s$ antes – “Preset”) até um tempo de $250 \mu s$ após o início da corrente, com resolução de $8,333 ns$ (frequência de amostragem de 120 MHz).

Para cada amostra testada foram ensaiados 3 grupos de umidade (umidade original, 5% de umidade e 10% de umidade) e 2 grupos relativos ao tempo de frente de onda (frente rápida referente a sinais impulsivos com características de descargas subsequentes e lenta referente à primeira descarga). Assim, considerando os 15 diferentes

solos testados, havia um total de 90 grupos de amostras das quais foi padronizado um número mínimo de 46 e máximo de 310 ensaios com diferentes valores ajustados de tensão aplicada, mantendo-se o tempo de frente aproximadamente constante.

Para processar o vasto banco de dados desenvolvido que contou com aproximadamente 7.304 ensaios válidos, foi elaborado uma rotina através do software MatLab® para tratar e representar as ondas de tensão e corrente medidas, que apresentavam elevado espectro de ruídos de alta frequência. A partir da elaboração de filtro digital tipo FIR, adotando o método de janelamento de Blackman, foi possível realizar a filtragem dos sinais de tensão e corrente de modo a preservar o tempo de frente e o valor de pico máximo de tensão e corrente, conforme ilustra a Figura 3-5.

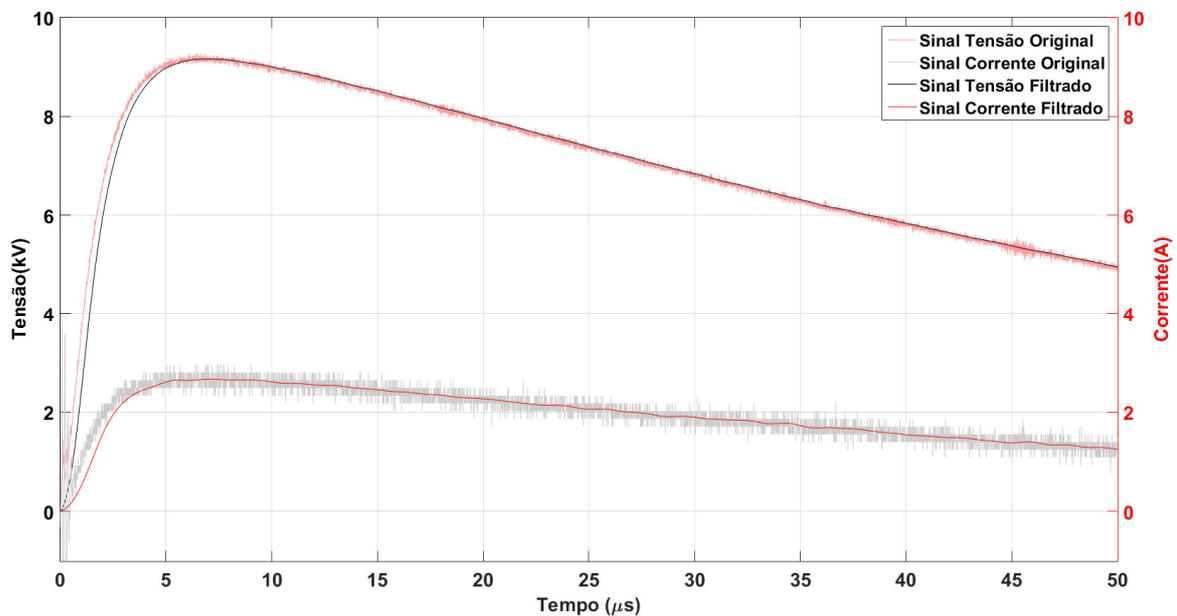


Figura 3-5 - Comparativo entre sinais filtrado e não filtrado.

3.6 Cálculo do campo elétrico

Para todas as amostras analisadas, foi realizado o monitoramento da relação $v(t)/i(t)$ no tempo de 10 μs com o intuito de verificar a dinâmica do decrescimento da impedância transitória conforme o campo elétrico aplicado entre os eletrodos aumentava. Este ponto foi escolhido devido ao fato de que, para todas as amostras, neste marco de tempo a impedância transitória apresentou valor bem definido tanto para os ensaios onde inexistiu efeitos relevantes de ionização quanto para ensaios onde houve ruptura total da amostra.

Para a disposição cilíndrica dos condutores, a equação 2.6 pode ser manipulada de modo a determinar o campo elétrico em um ponto presente entre os eletrodos.

$$E(\sigma + j\omega\varepsilon) = \frac{I}{2\pi Lr} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{I}{2\pi Lr} \times \frac{1}{(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (3.2)$$

Onde:

ω	Frequência angular [rad/s]
I	Corrente injetada total [A]
L	Altura do volume [m]
r	Distância onde se deseja calcular o campo elétrico [m]
r_i	Raio da haste concêntrica [m]
r_e	Raio da cuba cilíndrica[m]
r_{ie}	Diferença entre raio da cuba e raio da haste [m]
ΔV	Diferença de potencial [V]
V_i	Potencial calculado em r_i [V]
V_e	Potencial calculado em r_e [V]
E_i	Campo elétrico calculado em r_i [V/m]
E_{med}	Campo elétrico médio entre r_i e r_e [V/m]

Por definição, a diferença de potencial entre dois pontos pode ser calculada a partir da equação 3.3.

$$\Delta V = - \int_{r_e}^{r_i} \vec{E} \cdot \vec{dl} \quad (3.3)$$

Para a configuração cilíndrica:

$$\Delta V = - \int_{r_e}^{r_i} E \cdot dr \quad (3.4)$$

Substituindo a equação 3.2 em 3.4:

$$\Delta V = \frac{I}{(2\pi L)(\sigma + j\omega\epsilon)} \times \ln\left(\frac{re}{ri}\right) \quad (3.5)$$

Logo, substituindo 3.5 em 3.2 na posição ri :

$$Ei = \frac{\Delta V}{ri \times \ln\left(\frac{re}{ri}\right)} \quad (3.6)$$

Nos ensaios, o raio “ ri ” referente ao eletrodo interno era de 7,5 mm enquanto “ re ”, referente ao condutor da extremidade da cuba, era de 200 mm. Nas análises de resultados se monitorava a intensidade do campo elétrico na superfície do cilindro interior, “ Ei ”, à medida em que a amplitude da tensão aplicada era aumentada. Além disto foi realizado o cálculo e monitoramento da intensidade do correspondente campo elétrico médio, entre os cilindros coaxiais, a partir da equação 3.7.

$$Emed = \frac{Vi - Ve}{rie} \quad (3.7)$$

3.7 Cálculo da resistividade das amostras

A medição local das amostras de solo coletada objetivava ter ideia da ordem de grandeza da resistividade dos solos coletados. Naturalmente, havia expectativa de que as amostras de solo tratadas e colocadas nas cubas cilíndricas apresentassem valores diferentes de resistividade. Assim, para cada solo testado foi medido o valor real da resistividade da amostra a partir dos valores instantâneos de tensão e corrente na cauda das ondas de teste. A resistividade foi calculada utilizando a Equação 3.8 (válida para arranjo cilíndrico), onde a resistência de baixa frequência ($Ra = V/I$) das amostras foi calculada na "cauda" dos sinais de corrente e tensão, num instante padronizado de 65 μ s. Este marco de tempo foi definido após a constatação da inexistência de variação da impedância transitória, que converge para valor constante antes da corrente a partir de 65 μ s até o instante de tempo do qual a leitura de corrente passa por zero.

$$\rho = \frac{Zt_{65\mu s} \times 2\pi L}{\ln\left(\frac{re}{ri}\right)} \quad (3.8)$$

Onde:

ρ Resistividade do solo [$\Omega.m$]

$Zt_{65\mu s}$ Impedância transitória da amostra em 65 μs [Ω]

A Tabela 3-2 apresenta a resistividade das amostras de solo (medidas e calculadas) que compõem o banco de dados analisado.

Tabela 3-2 - Resistividade calculada, medida e comparativo calculado.

Amostras	Calculado (Eq.3.8)	Medido (Método de Frank Wenner)	$\frac{ \rho_{calculado} - \rho_{medido} }{\rho_{medido}} \times 100$
	ρ ($\Omega.m$)		
Solo 1	212,77	100	112,77
Solo 2	404,66	2500	83,81
Solo 3	517,34	5950	91,31
Solo 4	522,76	100	422,76
Solo 5	611,82	5460	88,79
Solo 6	629,93	400	57,48
Solo 7	693,14	720	3,73
Solo 8	1427,72	750	90,36
Solo 9	2548,00	700	264,00
Solo 10	3760,00	10000	62,40
Solo 11	1808,73	1200	50,73
Solo 12	103,82	276	62,38
Solo 13	2008,15	1450	38,49
Solo 14	398,22	440	9,49
Solo 15	474,48	500	5,10

As resistividades apresentadas pela Tabela 3-2 são referentes à amostra em condições naturais, sem que fosse acrescida água para alteração da umidade natural.

Para todas as análises realizadas nos tópicos seguintes, foram utilizados os valores de resistividade calculados a partir da equação 3.8. Uma vez que características relevantes

dos solos foram alteradas após extração das condições nativas e disposição em cuba cilíndrica (compacidade, segunda camada bem definida, etc.), é mais consistente a utilização da resistividade obtida a partir da resistência em baixa frequência calculada para a condição real do solo sob teste, disposto em cuba cilíndrica.

3.8 Cálculo do raio equivalente do eletrodo interno

Conforme mencionado nos tópicos anteriores, o surgimento de canais ionizados de baixa impedância no solo é retratado pelo súbito aumento da corrente que flui entre os eletrodos, conforme ilustrado pela Figura 4-1.

A partir da equação 3.7 é possível relacionar a intensidade do campo elétrico da qual a amostra de solo é submetida à corrente que circula entre os eletrodos de uma disposição cilíndrica. Sendo J a densidade de corrente (Corrente por unidade de área), é possível definir que:

$$E = \varphi \frac{I}{2\pi rL} \quad (3.9)$$

Onde:

- I Corrente injetada total [A];
- r Raio da superfície cilíndrica coaxial [m];
- L Comprimento axial da cuba [m];
- $\varphi = \frac{1}{\sigma + j\omega\varepsilon}$

A diferença de potencial entre dois pontos “x” e “y”, separados da fonte de campo por respectivas distâncias r_i e r_e é definida pela equação 3.10.

$$V_{ab} = - \int_{r_e}^{r_i} \vec{E} d\vec{l} \quad (3.10)$$

Logo, substituindo 3.9 em 3.10:

$$V_{ab} = - \int_{r_e}^{r_i} \varphi \frac{I}{2\pi r L} dr$$

$$V_{ab} = \varphi \frac{I}{2\pi r L} \ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right) \quad (3.11)$$

O raio “re” é bem definido como sendo a extremidade do eletrodo cilíndrico que contem a amostra de solo. O raio “ri” se comporta como uma função de Vab (ri = f[Vab]) sendo que conforme a diferença e, conseqüentemente, o campo elétrico entre os eletrodos aumenta a intensidade, descargas começam a se formar em torno do cilindro interior. Fisicamente este fenômeno pode ser equiparado a um aumento relativo do raio interno, conforme ilustra a Figura 3-6.

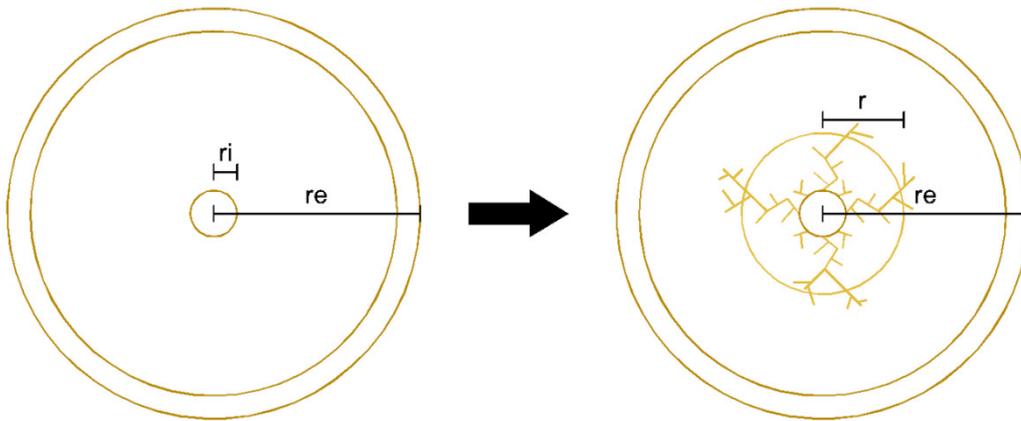


Figura 3-6 - Formação de descargas parciais e extensão do raio equivalente r.

Definindo-se Zo como impedância inicial do sistema onde a presença de ionização é inexistente e Zi a impedância transitória para um dado nível de ionização, pode-se determinar-se o raio equivalente “r”, a partir das expressões a seguir:

$$\frac{Z_i}{Z_o} = \frac{\ln \left(\frac{r_e}{r} \right)}{\ln \left(\frac{r_e}{r_i} \right)} \quad (3.12)$$

$$\ln r = \ln \left(r_e \left(1 - \frac{Z_i}{Z_o} \right) \times r_i \left(\frac{Z_i}{Z_o} \right) \right) \quad (3.13)$$

$$r = r_e \left(1 - \frac{Z_i}{Z_o} \right) \times r_i \left(\frac{Z_i}{Z_o} \right) \quad (3.14)$$

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Os resultados de interesse para este trabalho consistem nos dados relativos aos testes com diferentes amplitudes de ondas impulsivas de tensão e corrente realizados na cuba constituída de cilindros coaxiais, nas várias amostras de solo com distintas umidades. Estes estão incluídos na base de dados desenvolvida para análise da evolução do efeito da ionização de solos, com diferentes resistividades na faixa 100 Ωm a 10.000 Ωm .

Busca-se entender a dinâmica do fenômeno de ionização e verificar possíveis relações diretas entre parâmetros do solo e a ocorrência da ionização, a partir dos resultados obtidos das ondas impulsivas de tensão e corrente a que foram submetidas às amostras de solo.

Em trabalho anterior desenvolvido pelo grupo de pesquisa do LRC (VISACRO, 1995), tentou-se desenvolver tal entendimento a partir da modificação das curvas de $V \times I$ (tensão e corrente) de cada solo em função da amplitude da corrente impressa à amostra de solo. Logrou-se gerar resultados do efeito de ionização em aterramentos relacionando-se a variação da inclinação das curvas na parcela posterior ao pico de tensão com um aumento equivalente do raio do eletrodo interno da cuba cilíndrica de teste. Apesar do resultado prático, este não tinha generalidade de aplicação, pois verificou-se que o conjunto das curvas $V \times I$ de cada solo tinham formas e valores específicos. Isto ensejou a busca de relações de intensidade de ionização em relação a outras grandezas (ou conjunto de grandezas), que pudessem conferir generalidade à forma de cômputo do efeito.

Nesta perspectiva, para buscar entender e equacionar a dinâmica do efeito de ionização no solo, decidiu-se nesse trabalho explorar uma linha de investigação baseada na análise da redução do quociente dos valores instantâneos de tensão e corrente nas amostras solo, designado impedância transitória Z_t , em função do aumento da amplitude

de corrente, bem como a eventual relação desta redução com parâmetros como resistividade, umidade e tempo de frente de onda.

A Figura 4-1 mostra um par de resultados típicos de ensaios com a cuba cilíndrica, ilustrando duas condições extremas envolvidas no processo de análise.

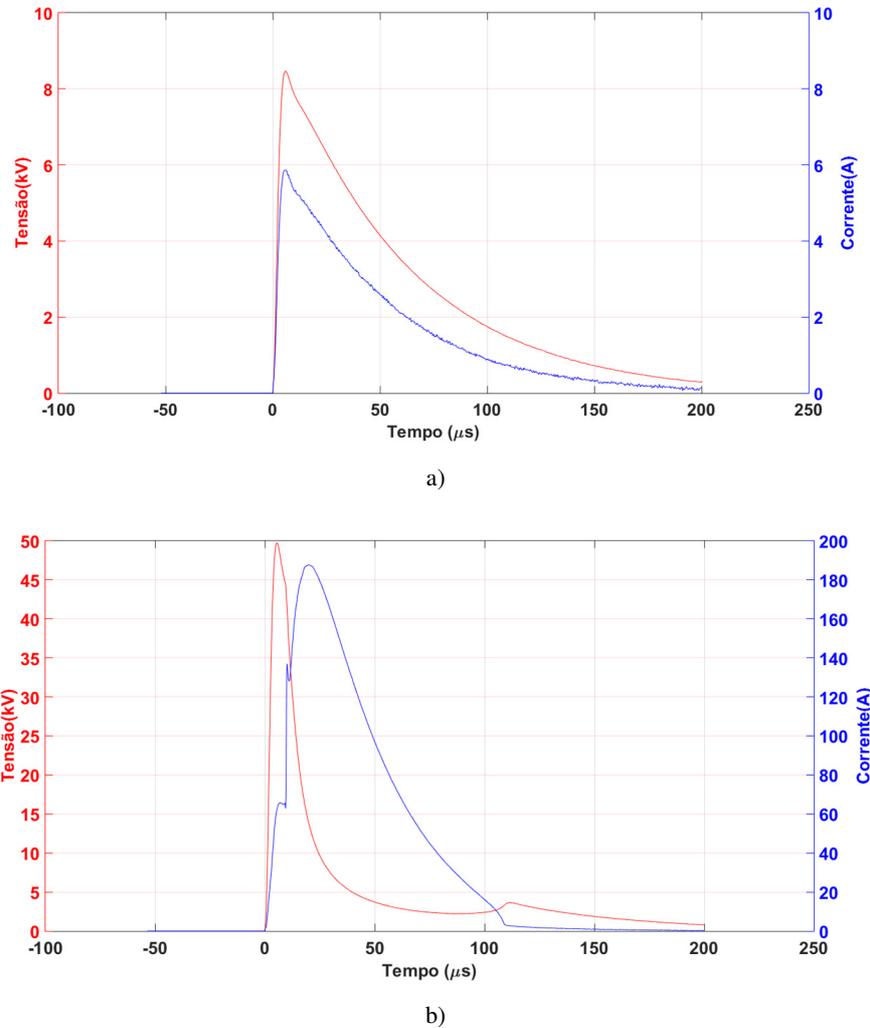


Figura 4-1 – Sinais de tensão e corrente registrados para o solo 7 – umidade original onde a) Não foi registrada a ocorrência do efeito de ionização do solo. b) Ocorrência de ionização do solo.

Inicialmente a figura mostra uma condição de corrente relativamente baixa, na qual a densidade de corrente na superfície do cilindro interior e respectiva intensidade de campo elétrico não são suficientes para dar início ao processo de ionização da amostra de solo, Figura 4-1(a). Este teria início num patamar superior de amplitude corrente e se tornaria mais intenso à medida que tal amplitude fosse aumentada. Numa segunda condição extrema, o efeito foi tão intenso que a extremidade de um dos canais associados à ionização, iniciado no cilindro interno, alcançou o cilindro externo, dando

origem à ruptura do meio e a um aumento brusco da corrente e associado colapso de tensão, como ilustrado na Figura 4-1(b).

Nos ensaios a que se refere este trabalho foram sistematicamente aplicadas tensões com valores crescentes entre esses dois extremos para cada solo e para cada condição de umidade deste, além de ondas com tempos de frente típicos de primeira descarga e de descarga subsequente.

Como mencionado, na análise da evolução do processo de ionização recorreu-se ao monitoramento do comportamento da impedância transitória $Z_t(t)$ das amostras de solo. Em vista de que esta variável altera seu valor no tempo, definiu-se um ponto específico para monitoramento da intensidade do efeito, correspondente a 10 μ s após o início da corrente impulsiva. Assim, não são apresentadas nesse texto os pares de curvas específicas de tensão e corrente medidas para cada intensidade de corrente, mas o processamento destas na forma de gráficos da impedância transitória ao longo do tempo. Parte dos resultados obtidos estão compilados na próxima seção e correspondem a quatro diferentes solos que em sua condição natural tinham resistividades de 213, 517, 693 e 1428 Ω m. No capítulo seguinte, os resultados para outros solos são incorporados, possibilitando a análise de 10 diferentes solos.

4.2 Impedância transitória das amostras

No presente tópico mostra-se a dinâmica do comportamento de $Z_t(t)$, considerando-se testes com correntes com tempo de frente representativo das correntes de primeira descarga e das subseqüentes (BERGER, 1975). As figuras têm indicação do solo (número), de sua resistividade (conforme Tabela 3-2), do tempo de frente da onda de corrente e da umidade da amostra (em termos do percentual de água tri-distilada adicionada à amostra).

4.2.1 Resultados para ondas representativas de primeiras descargas

4.2.1.1 Solo 1 – $\rho=212,77 [\Omega.m]$

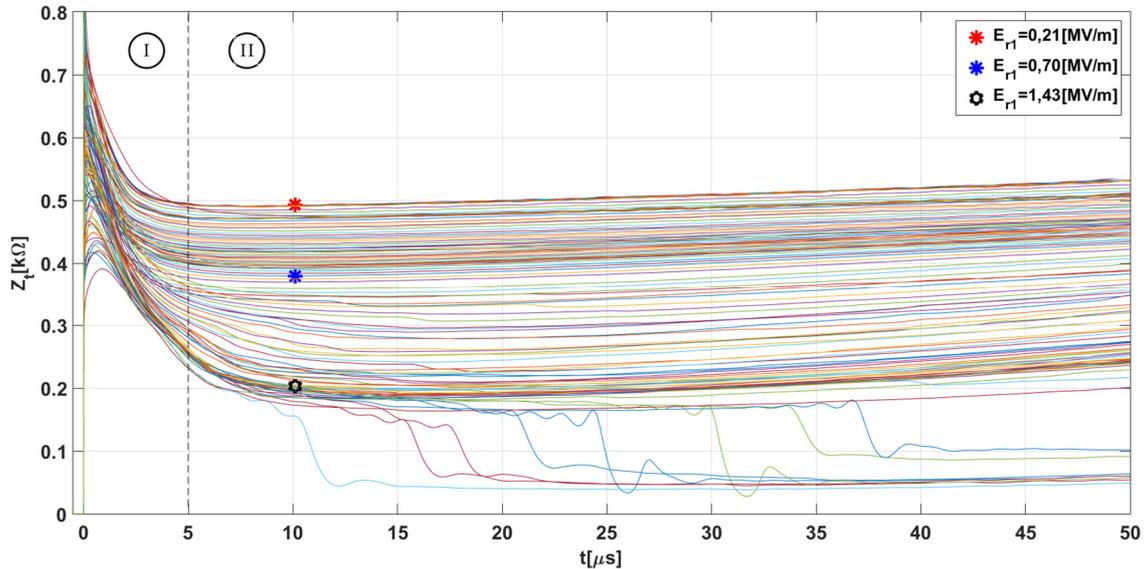


Figura 4-2 – Z_t umidade original/ $T_f=4,3\mu s$.

Na Figura 4-2 e nas demais apresentadas em sequência foram indicadas as intensidades de campo elétrico em “ri” associadas às condições de Z_t (10 μs) correspondentes a: ionização desprezível (vermelho), ocorrência do efeito com redução significativa de Z_t (azul) e limiar de ruptura da amostra (preto).

O comportamento típico da impedância transitória das amostras divide-se em 2 intervalos bem definidos. No intervalo “I”, tipicamente anterior ao tempo de 5 μs , o comportamento decorre do avanço da onda de corrente em relação à de tensão, em função da característica capacitiva das amostras de solo. Nota-se, inclusive, o pico da impedância muito antes dos 5 μs . Após 5 μs , o intervalo “II” indica uma relação $v(t)/i(t)$ praticamente constante, onde o valor da impedância transitória se aproxima daquele da linha horizontal. Com o aumento da amplitude de corrente e, por conseguinte do campo elétrico na superfície do eletrodo interior, verifica-se a redução desse valor de impedância até atingir-se determinado limiar de intensidade de campo elétrico, a partir do qual se verifica a ruptura do isolamento de solo da amostra, com abrupta redução da impedância transitória, associada ao aumento brusco da corrente e ao colapso da tensão.

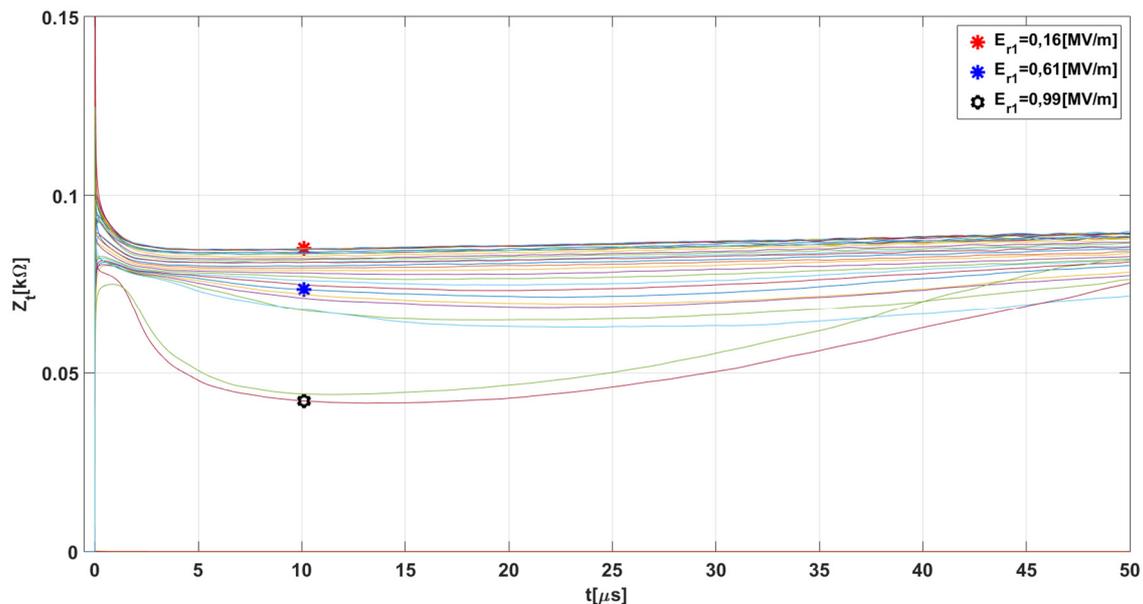


Figura 4-3 – Z_t umidade 5%/ $T_f=3,1 \mu s$.

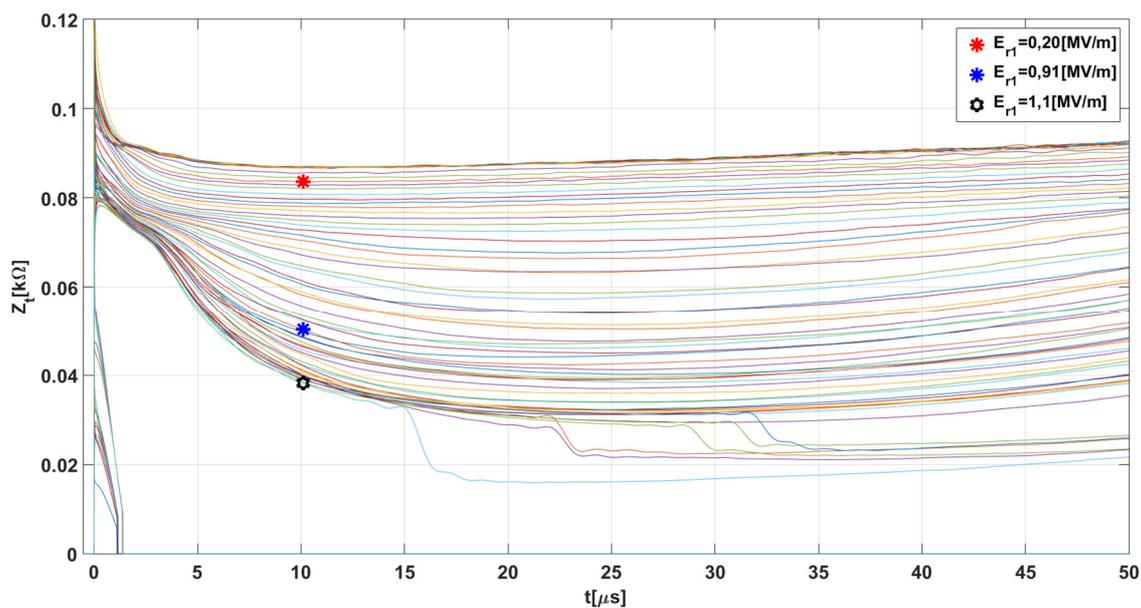


Figura 4-4 – Z_t umidade 10%/ $T_f=4,6 \mu s$.

A seguir são apresentados resultados do mesmo tipo para amostras de outros solos testados.

4.2.1.2 Solo 3 – $\rho=517,34 [\Omega.m]$

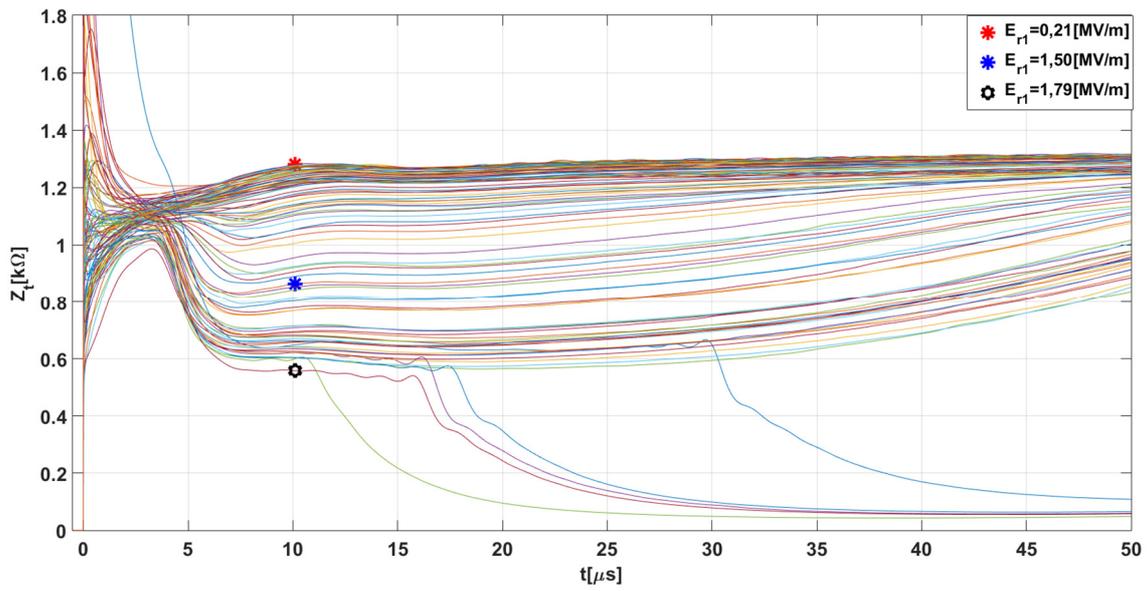


Figura 4-5 – Z_t umidade original/ $T_f=4,7\mu s$.

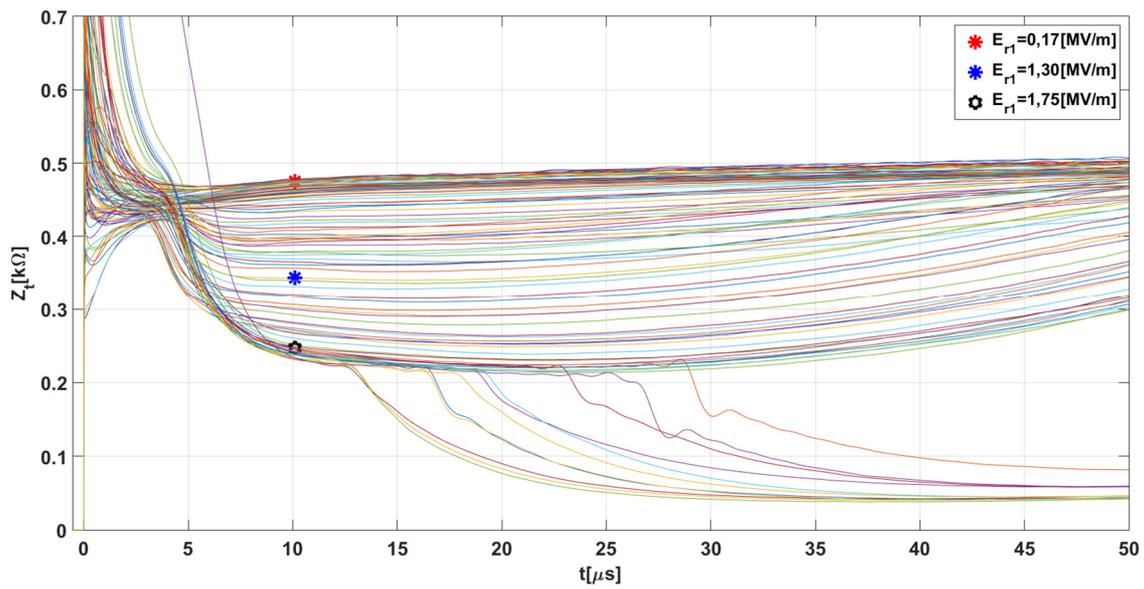


Figura 4-6 – Z_t umidade 5%/ $T_f=4,6\mu s$.

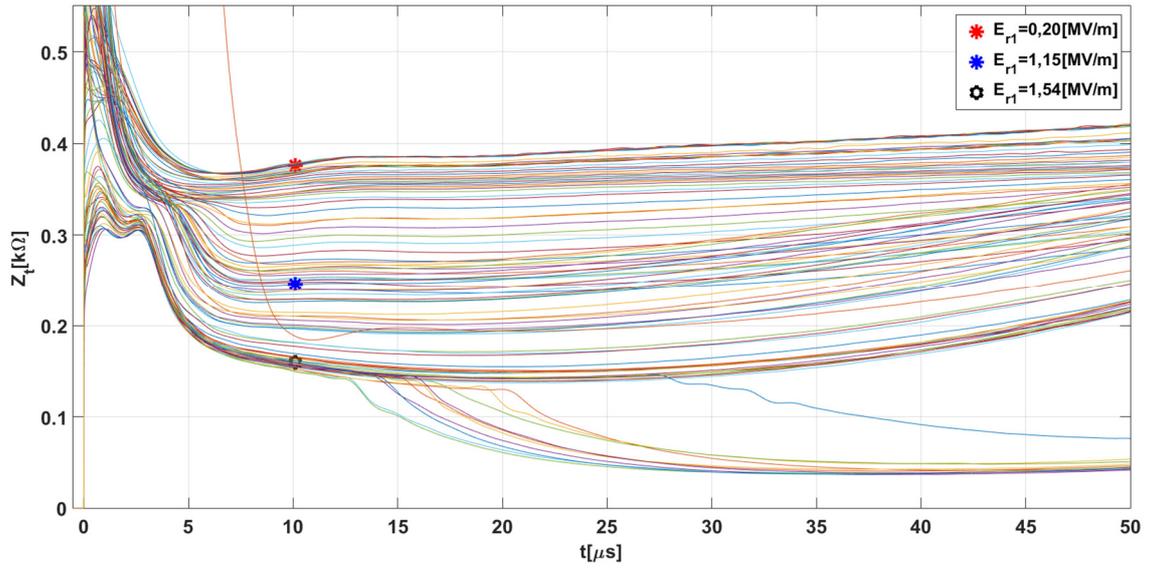


Figura 4-7 – Z_t umidade 10%/ $T_f=4,5\mu s$.

4.2.1.3 Solo 7 – $\rho=693,14[\Omega m]$

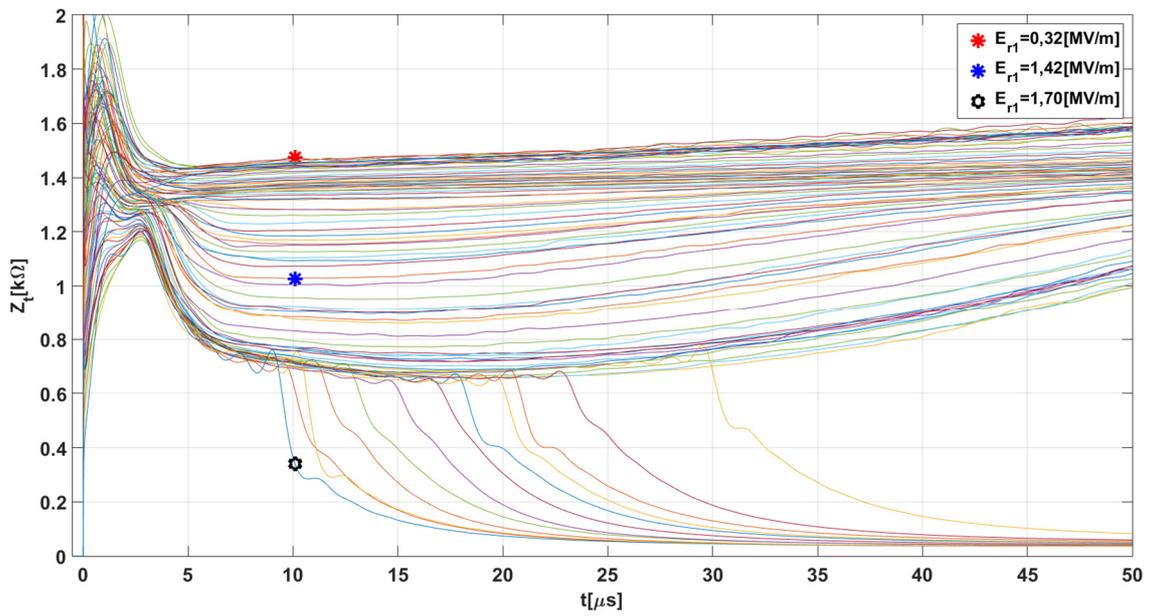


Figura 4-8 – Z_t umidade original/ $T_f=4,2\mu s$.

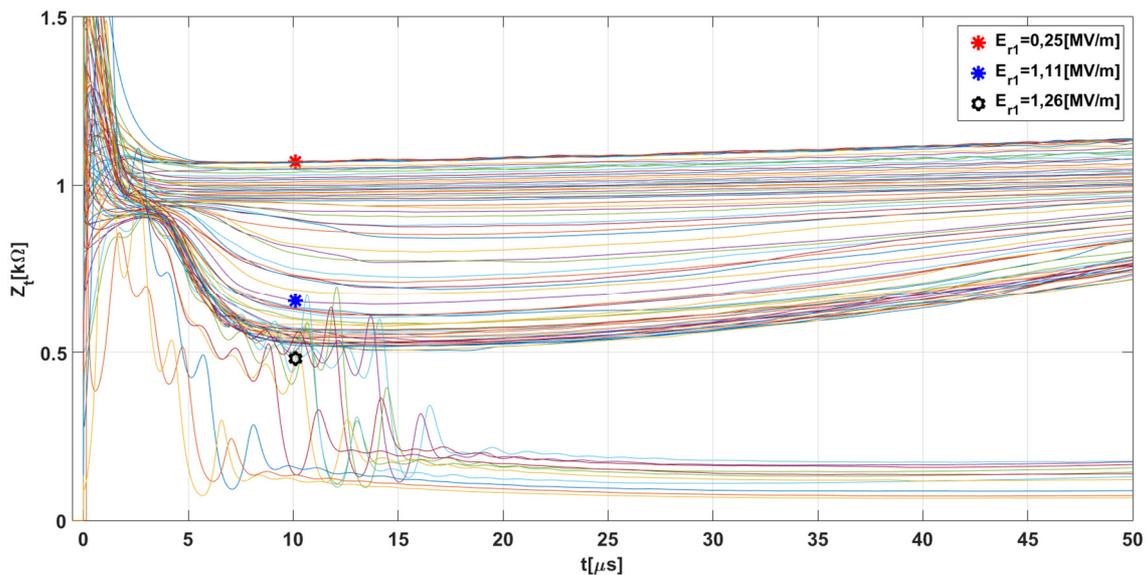


Figura 4-9 – Z_t umidade 5%/ $T_f=4,2\mu s$.

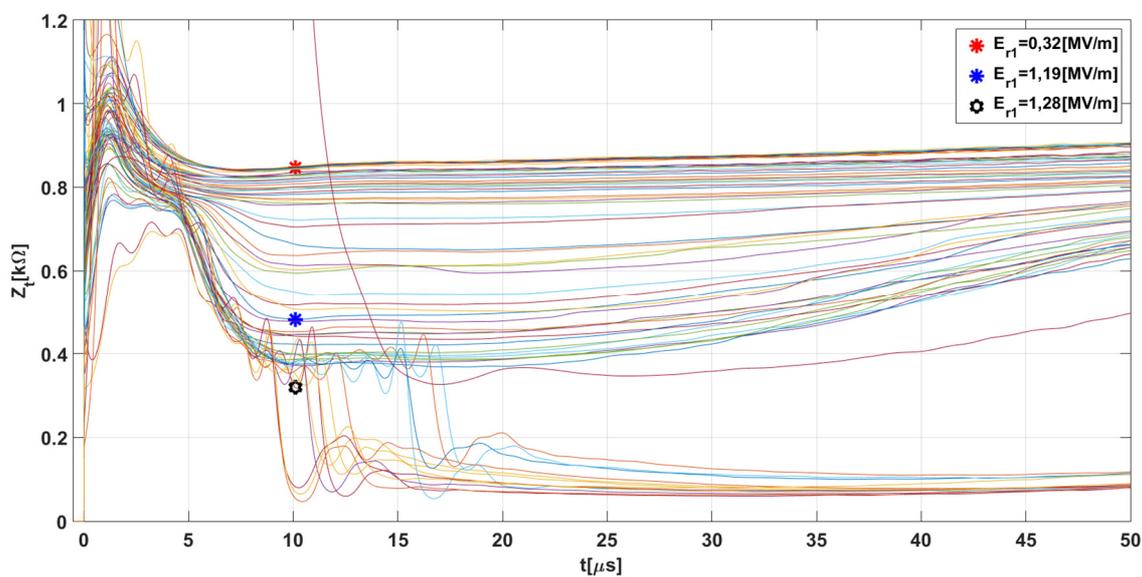


Figura 4-10 – Z_t umidade 10%/ $T_f=4,8\mu s$.

4.2.1.4 Solo 8 – $\rho=1427,72[\Omega m]$

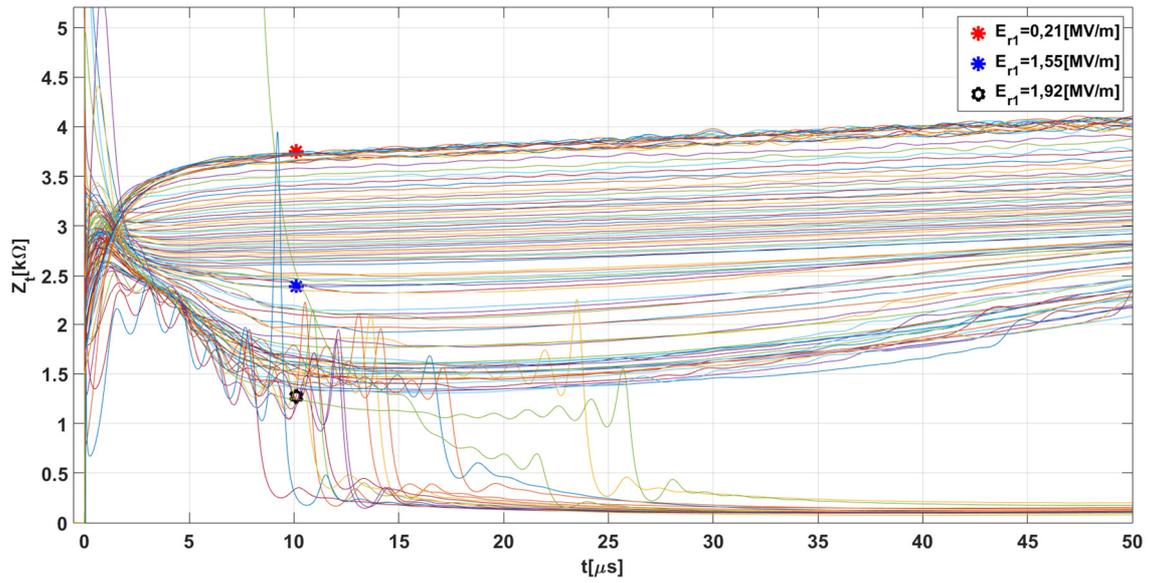


Figura 4-11 – Zt umidade original/Tf=4μs.

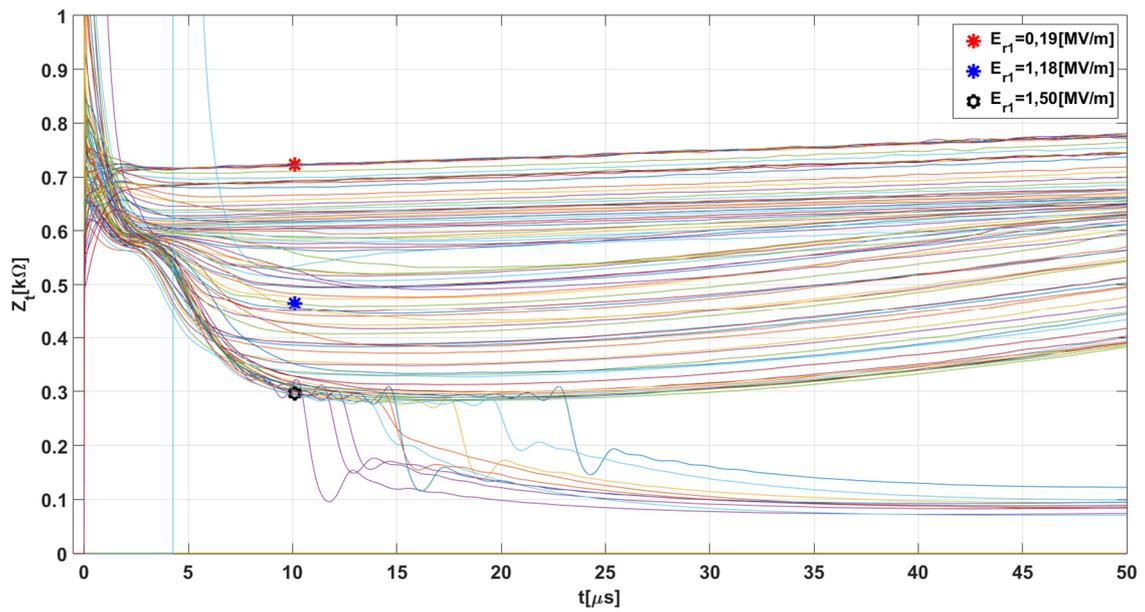


Figura 4-12 – Zt umidade 5%/Tf=4,5μs.

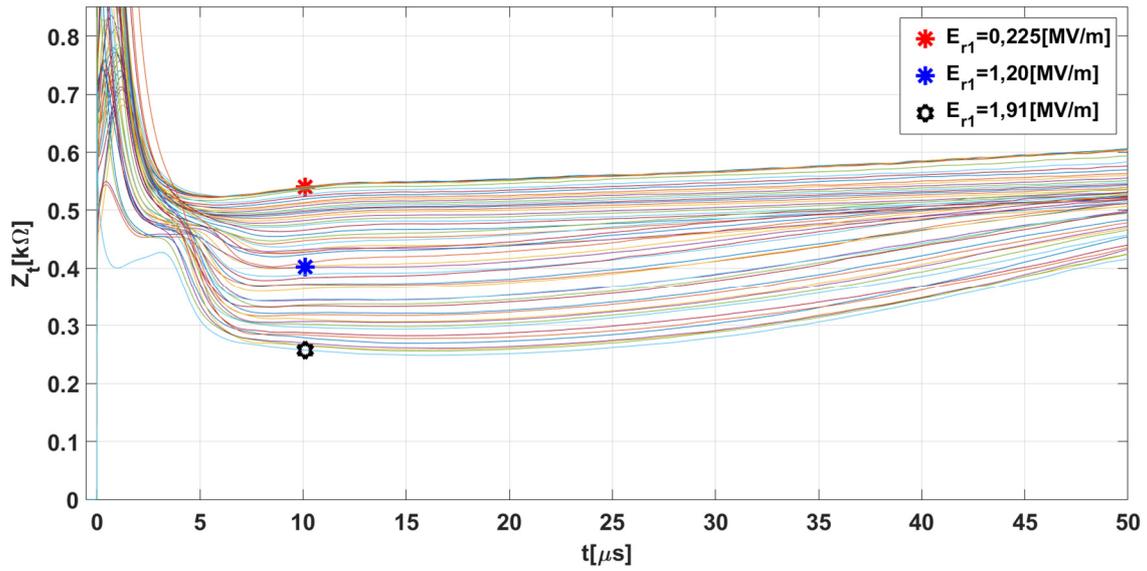


Figura 4-13 – Z_t umidade 10%/Tf=4,5μs.

4.2.2 Resultados para ondas representativas de descargas subsequentes

4.2.2.1 Solo 1 – $\rho=212,77$ [Ω.m]

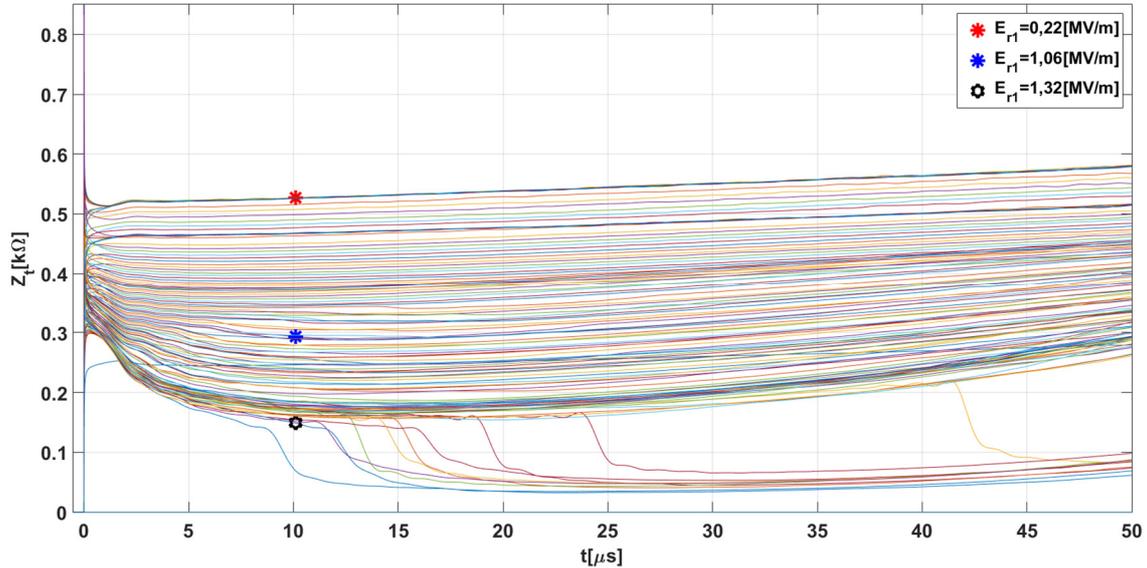


Figura 4-14 – Z_t umidade original/Tf=1,1μs.

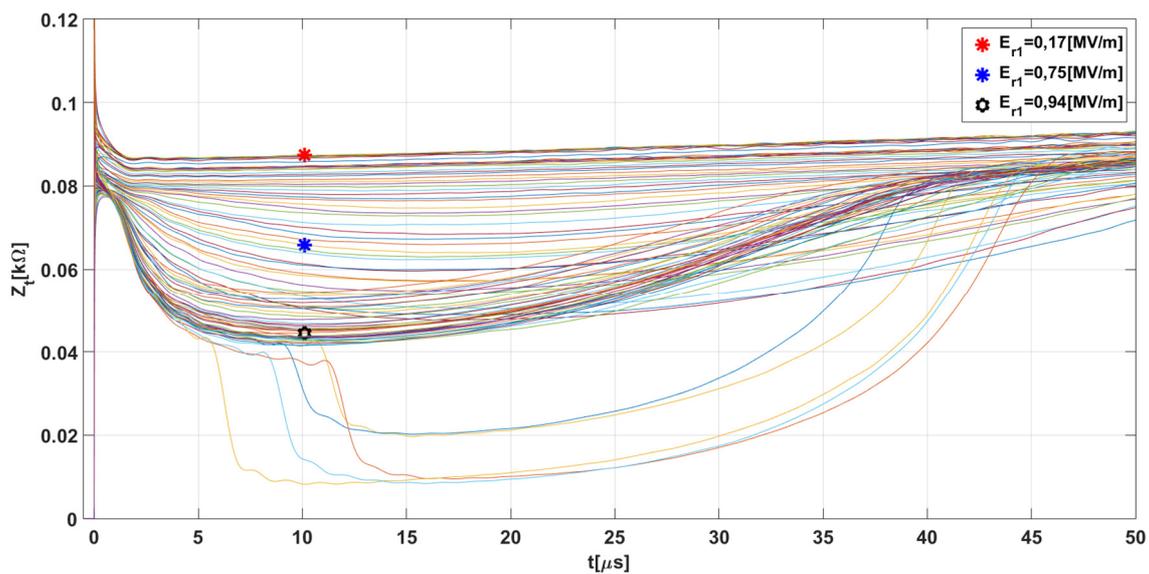


Figura 4-15 – Z_t umidade 5%/Tf=1,2μs.

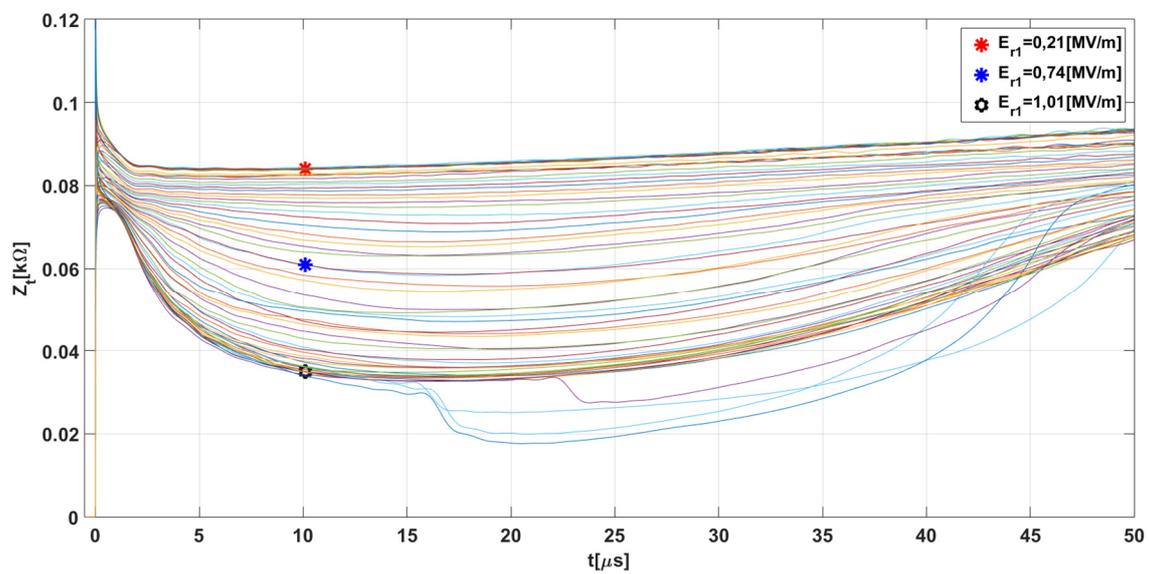


Figura 4-16 – Z_t umidade 10%/Tf=1,3μs.

4.2.2.2 Solo 3 – $\rho=517,34 [\Omega.m]$

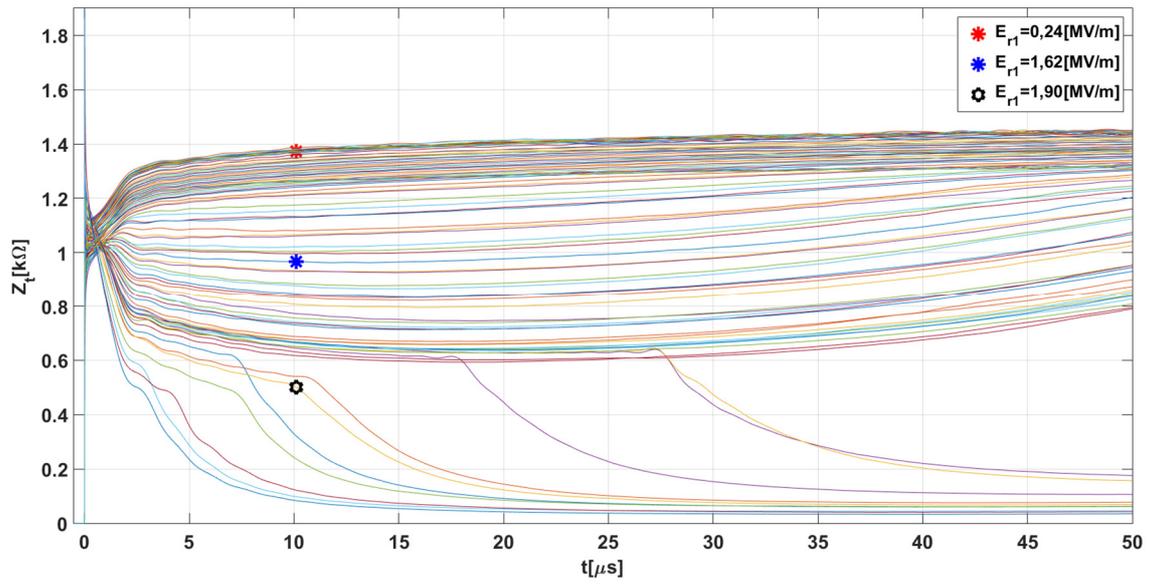


Figura 4-17 – Z_t umidade original/ $T_f=1,3\mu s$.

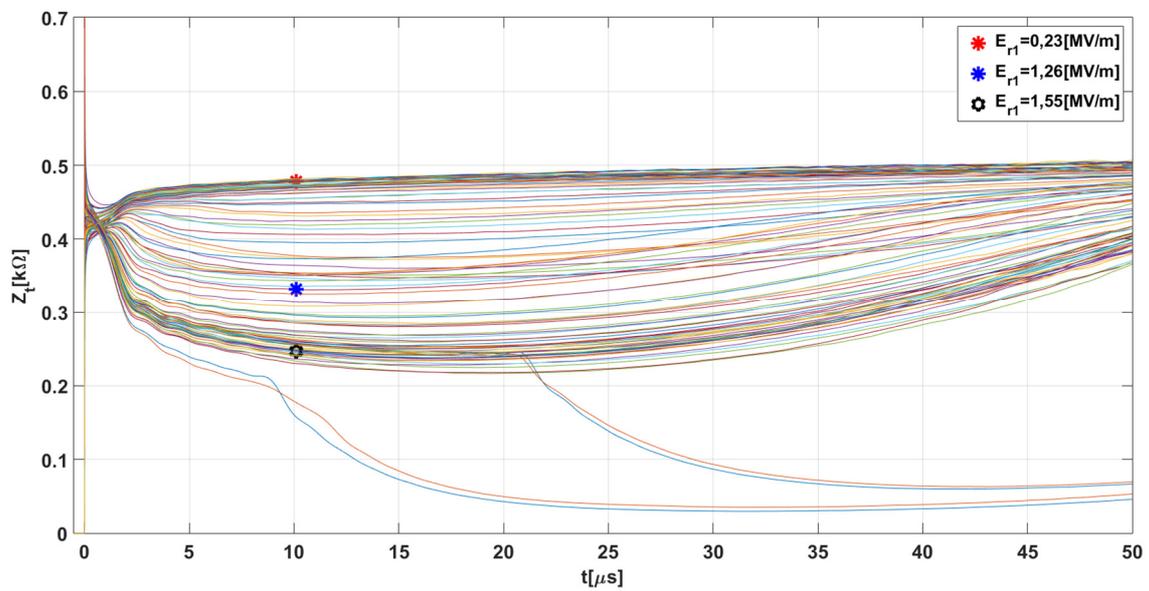


Figura 4-18 – Z_t umidade 5%/ $T_f=1,3\mu s$.

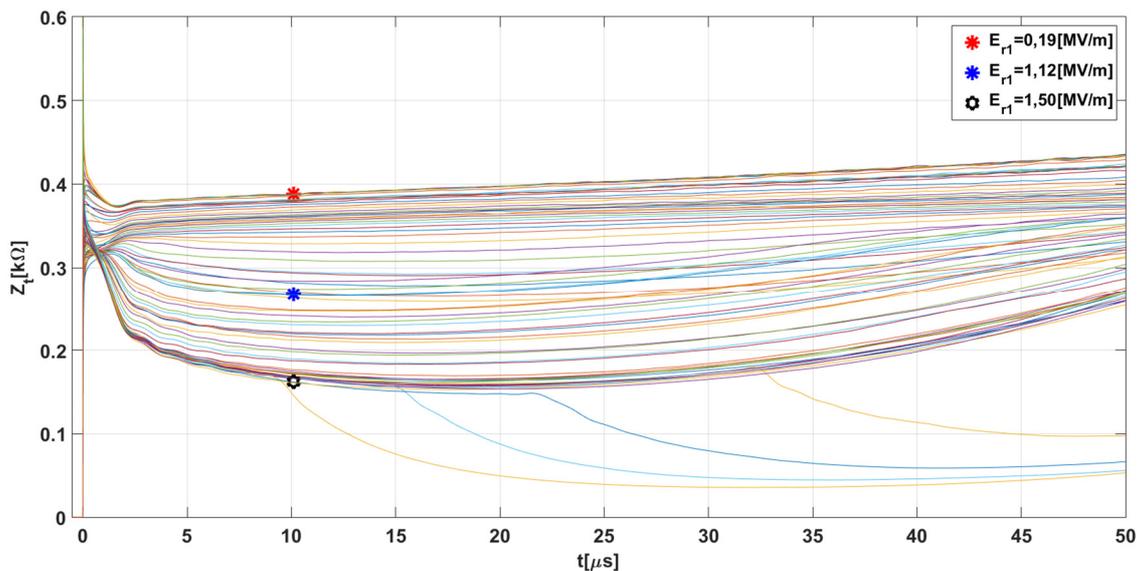


Figura 4-19 – Zt umidade 10%/Tf=1,3μs.

4.2.2.3 Solo 7 – $\rho=693,14[\Omega m]$

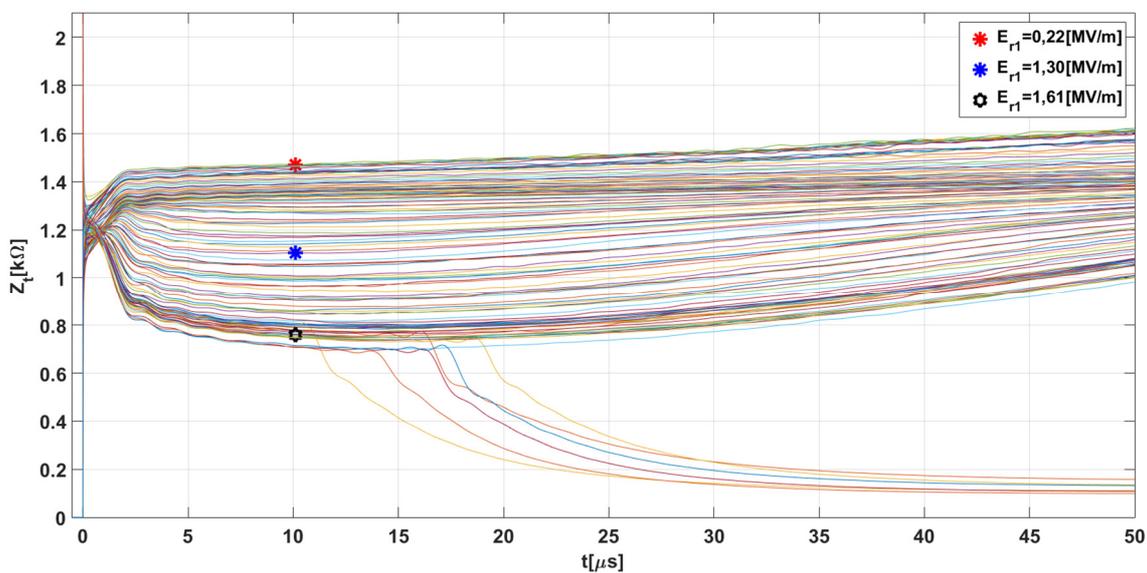


Figura 4-20 – Zt umidade original/Tf=1,2μs.

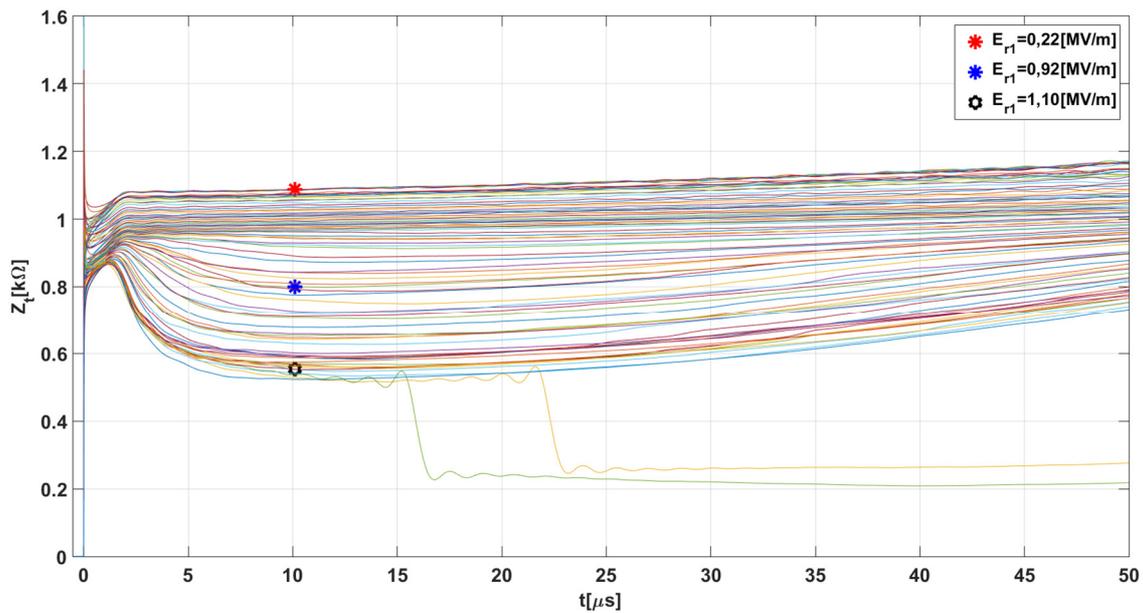


Figura 4-21 – Zt umidade 5%/Tf=1,2μs.

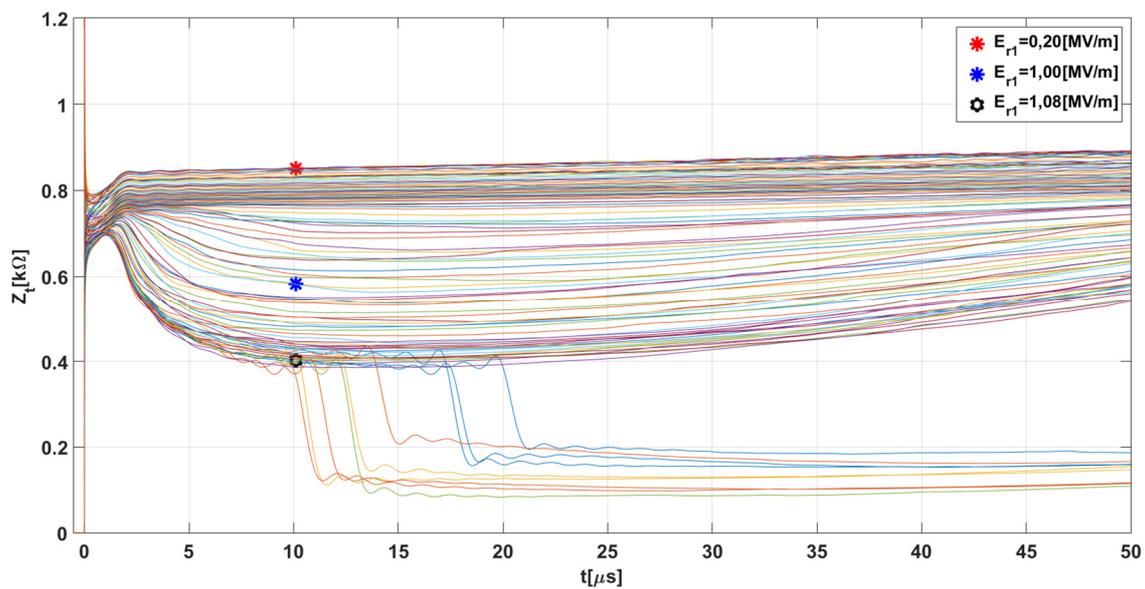


Figura 4-22 – Zt umidade 10%/Tf=1,2μs.

4.2.2.4 Solo 8 – $\rho=1427,72[\Omega m]$

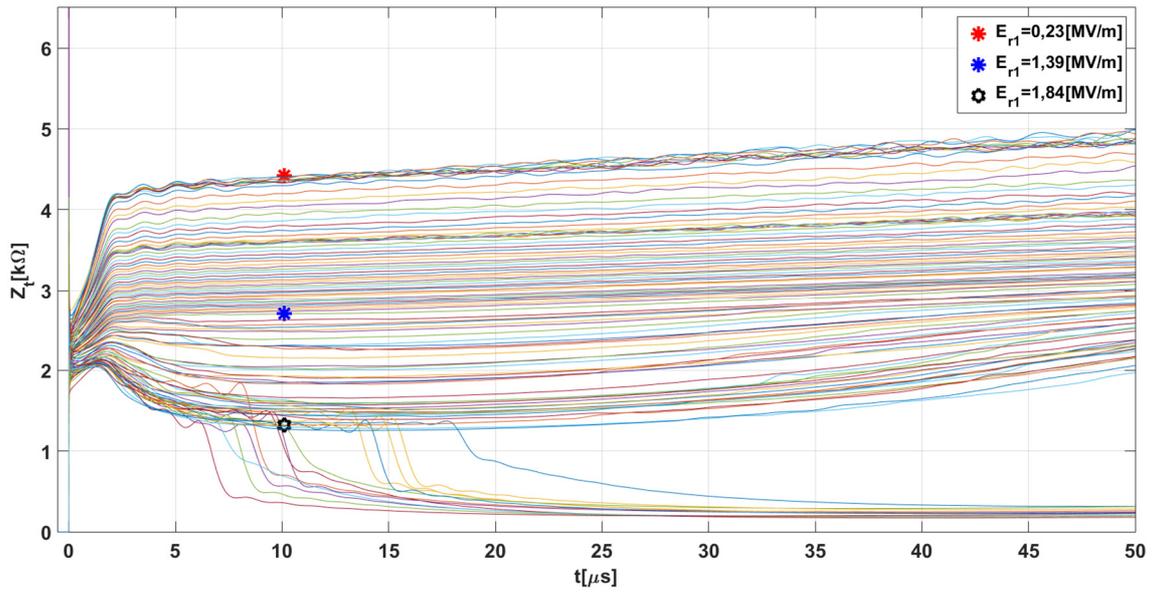


Figura 4-23 – Zt umidade original/Tf=1,2μs.

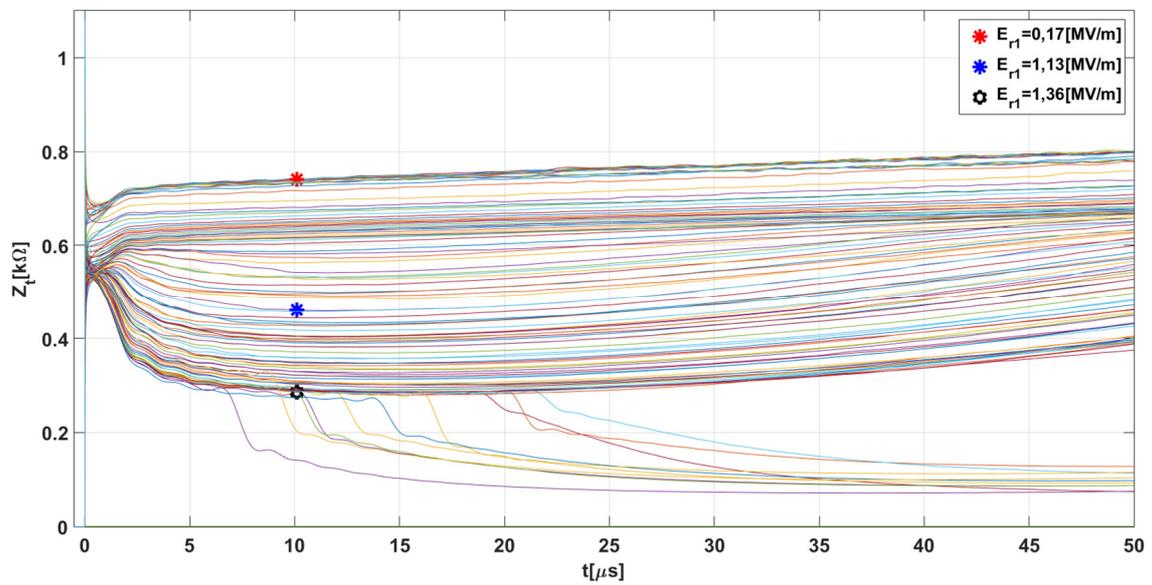
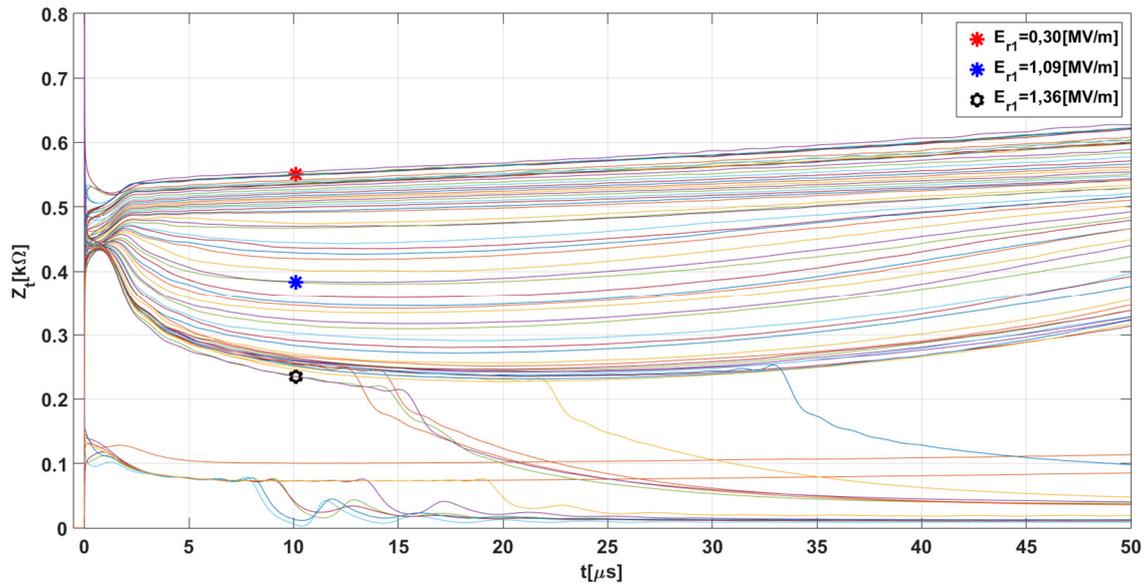


Figura 4-24 – Zt umidade 5%/Tf=1,2μs.

Figura 4-25 – Z_t umidade 10%/ $T_f=1,5\mu s$.

Vale mencionar que resultados semelhantes aos apresentados para os solos numerados 1, 3, 7 e 8 foram desenvolvidos para as 15 diferentes amostras de solo. Estes não são aqui explorados por simples questão de espaço.

4.3 Evolução de $Z_t(10 \mu s)$ x E_{ri} para diferentes umidades

Outro tipo de resultado desenvolvido diretamente a partir das medições corresponde à evolução do valor da impedância transitória (em pu na base Z_0) em função da intensidade do campo elétrico na superfície do eletrodo interior, calculado usando-se a expressão 3.6 em “ r_i ”, calculados especificamente em $10 \mu s$, $Z_t(10 \mu s)$.

4.3.1 $Z_t(pu) \times E_{ri}$ para diferentes umidades – tempo de frente de típico de primeira descarga

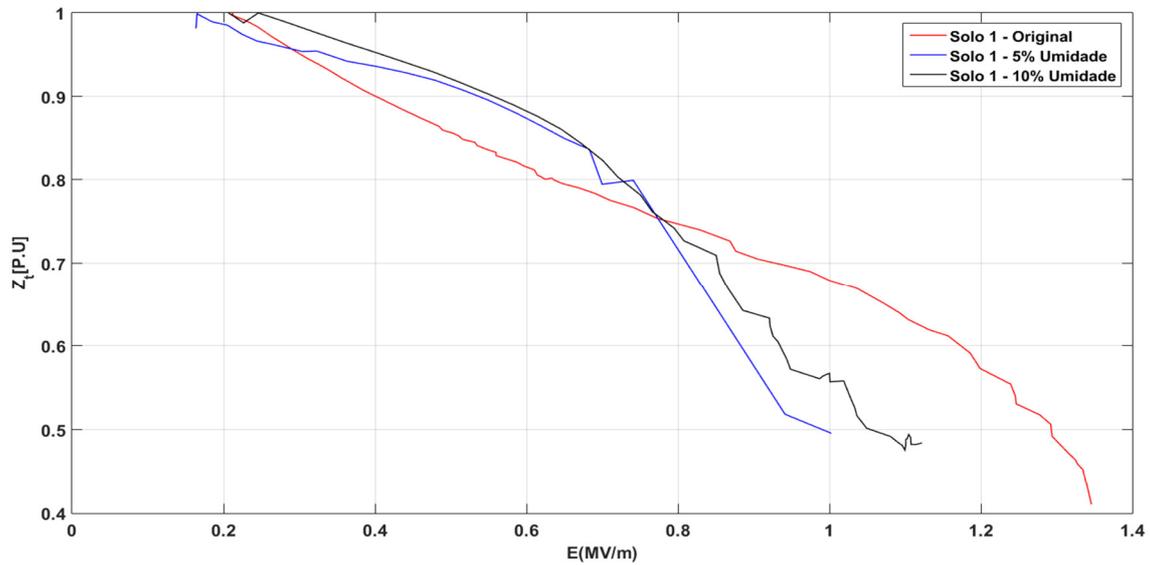


Figura 4-26 – Eri x Zt (Solo1).

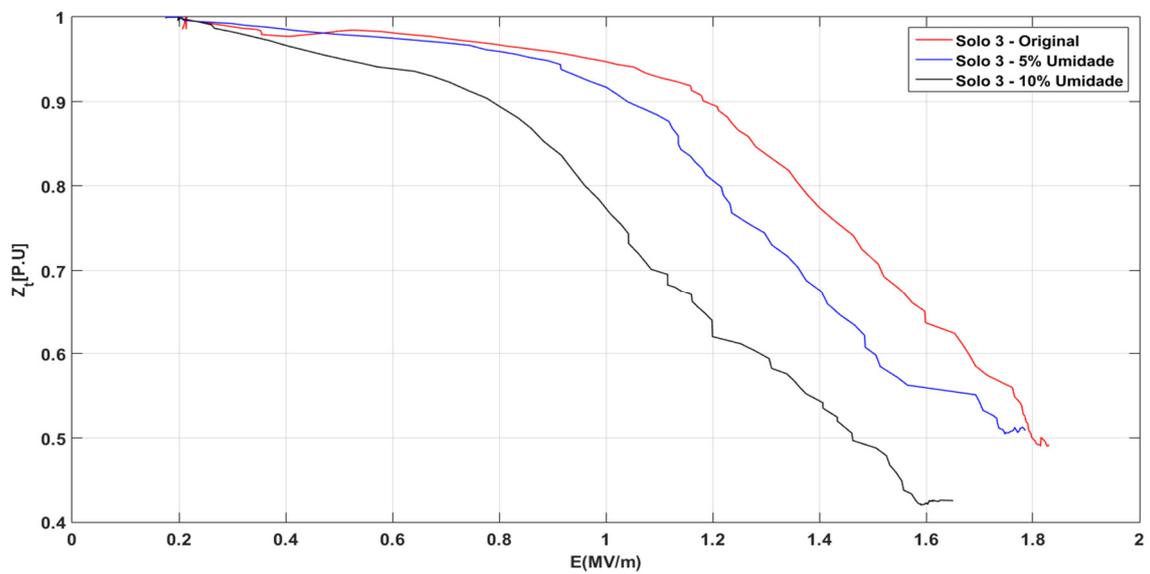


Figura 4-27 – Eri x Zt (Solo3).

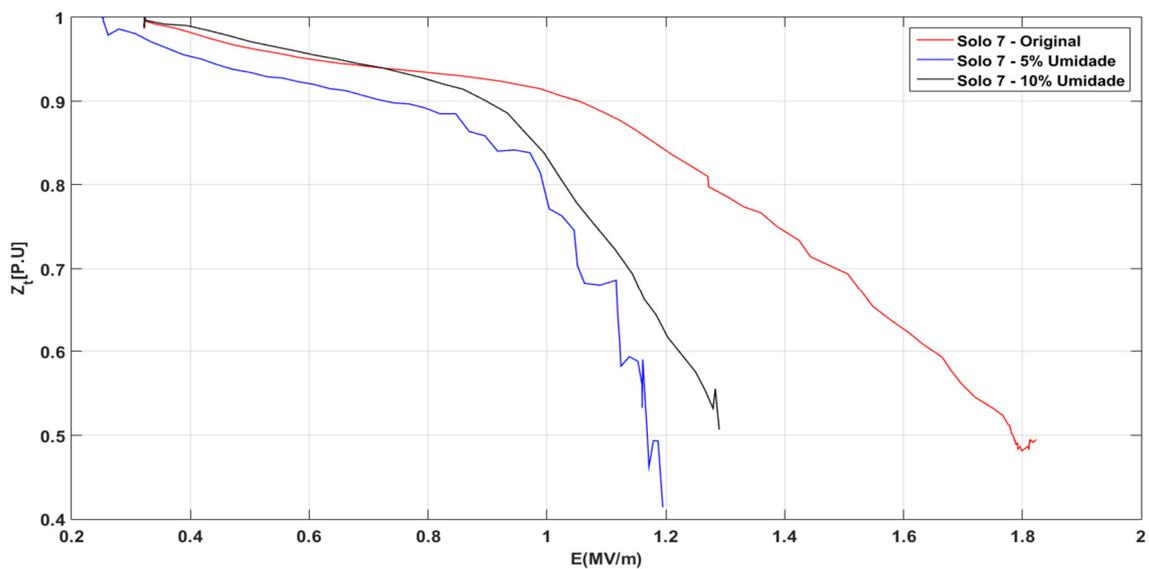


Figura 4-28 – Eri x Zt (Solo7).

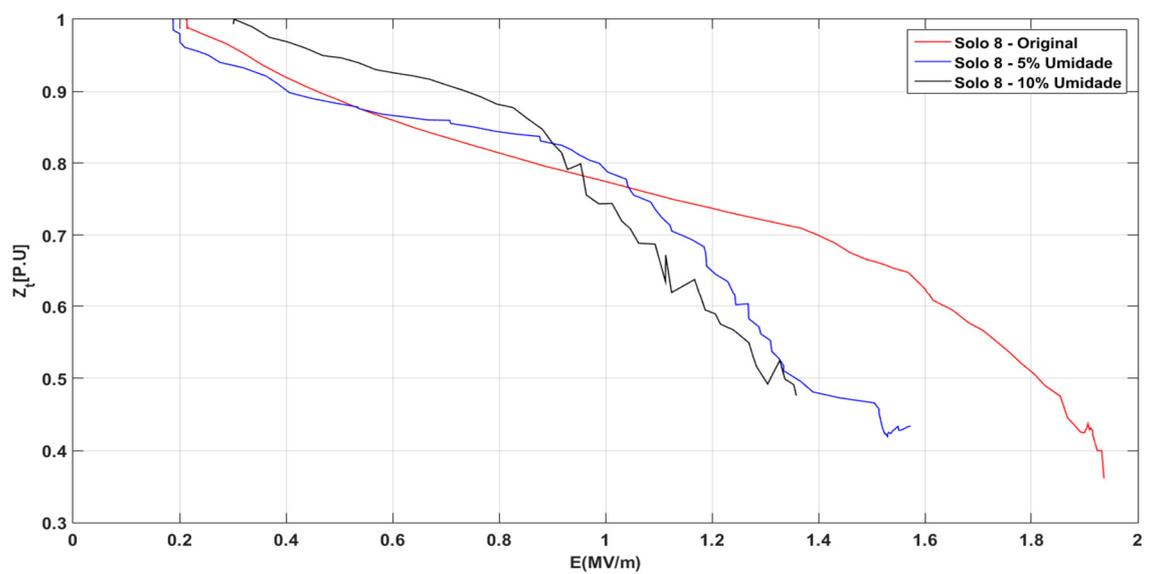


Figura 4-29 – Eri x Zt (Solo8).

4.3.2 $Z_t(pu)$ x Eri para diferentes umidades – tempo de frente de típico de descarga subsequente

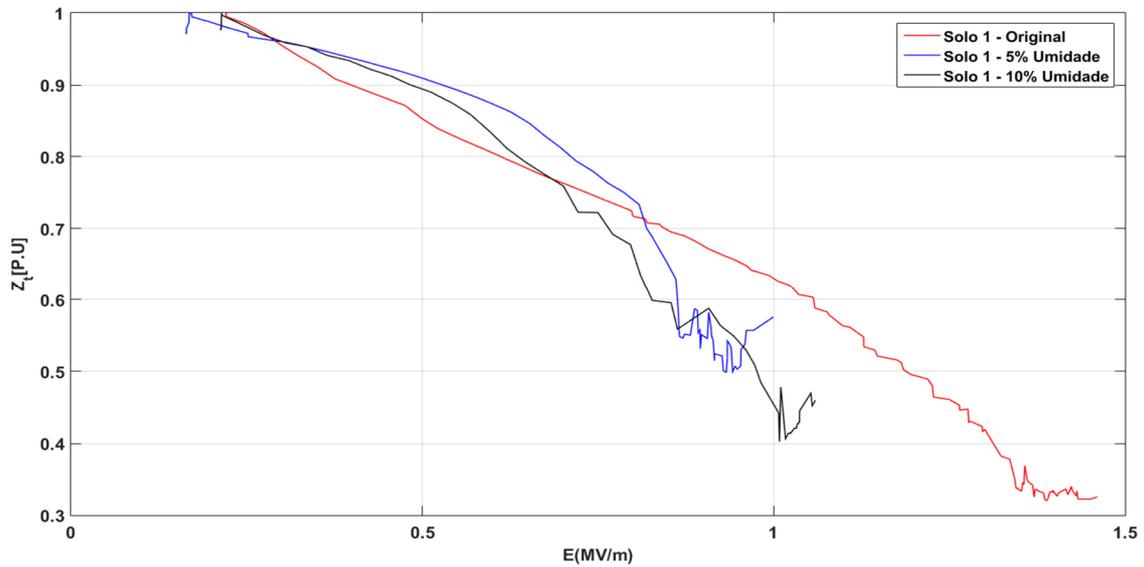


Figura 4-30 – Eri x Z_t (Solo1).

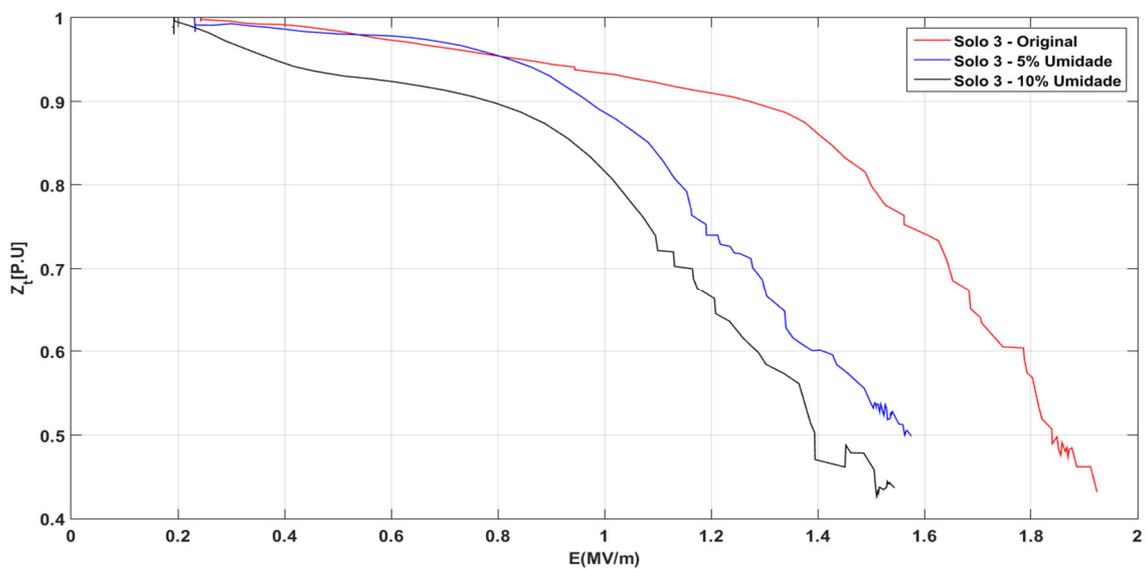


Figura 4-31 – Eri x Z_t (Solo3).

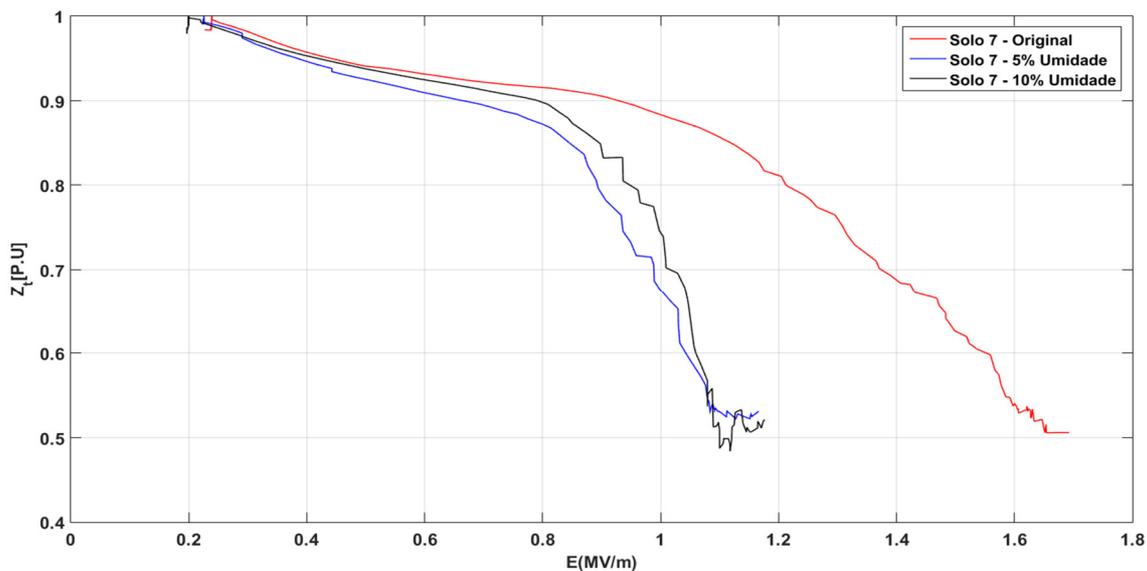


Figura 4-32 – Eri x Zt (Solo7).

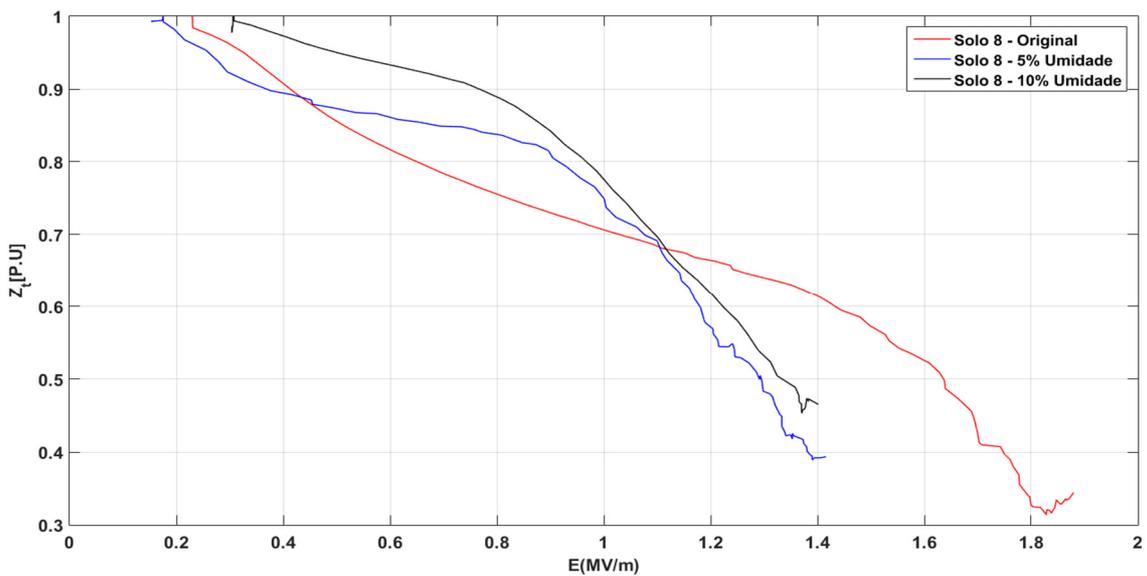


Figura 4-33 – Eri x Zt (Solo8).

Nota-se que em todos os casos há redução do valor em pu de Z_t com o aumento do campo elétrico. No que se refere à umidade do solo, foi identificado dois perfis de comportamentos distintos.

O primeiro perfil de amostras demonstrou uma relação inicial inversamente proporcional entre a presença de umidade no solo e campo elétrico. Solos com menor concentração de água apresentaram maior sensibilidade na redução da impedância transitória para campos elétricos menos intensos do que as amostras com maior umidade, apresentando menor $Z_t[P.U]$ para valores intermediários de campo elétrico (tipicamente entre 0,4 MV/m e 0,8 MV/m). Conforme a intensidade do campo elétrico cresce, os solos com maior umidade tendem naturalmente a valor finais de $Z_t[P.U]$ menores, promovendo um cruzamento das curvas.

Em um segundo cenário (principalmente para ondas com T_f típico de primeira descarga) o perfil de comportamento apresenta os solos com maior umidade sempre com Z_t inferior aos de menor umidade.

4.4 Evolução Raio equivalente x Eri para diferentes umidades

Utilizando-se a expressão 3.14, estimou-se a ampliação do raio equivalente r em função da intensidade de campo elétrico na superfície do cilindro interior, como indicam as Figura 4-34 a Figura 4-37 para os solos 1, 3, 7 e 8.

4.4.1 *Req x Eri para diferentes umidades – tempo de frente de típico de primeira descarga*

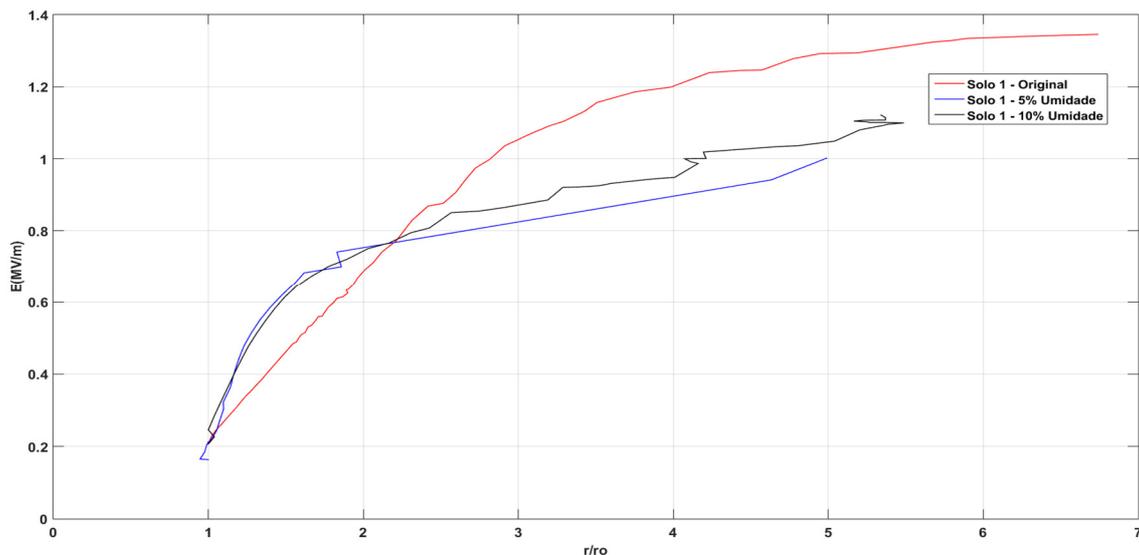


Figura 4-34 - Raio equivalente x Eri (Solo1).

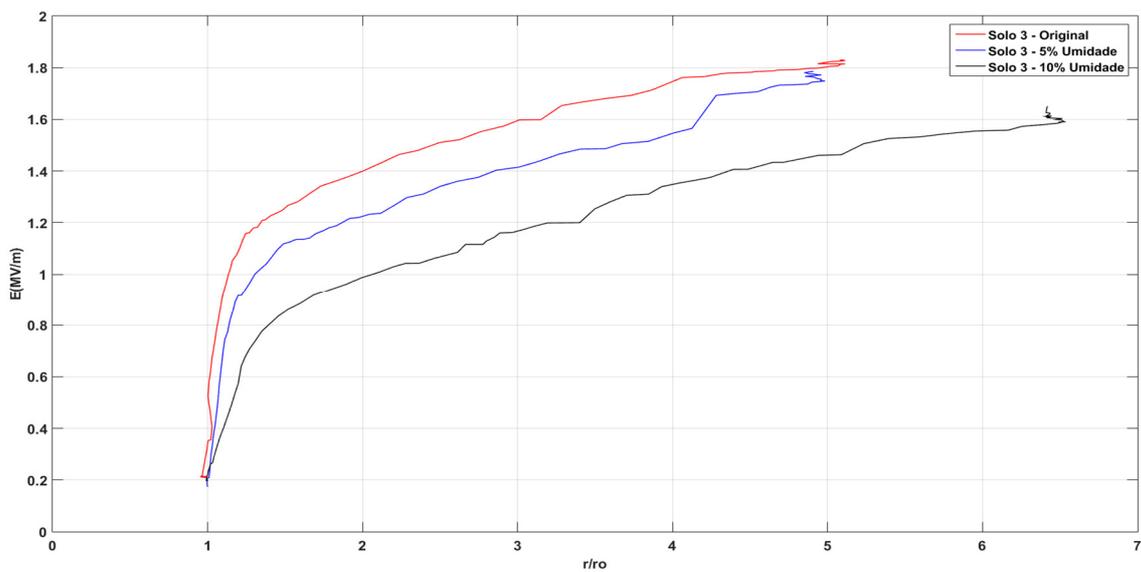


Figura 4-35 - Raio equivalente x Eri (Solo3).

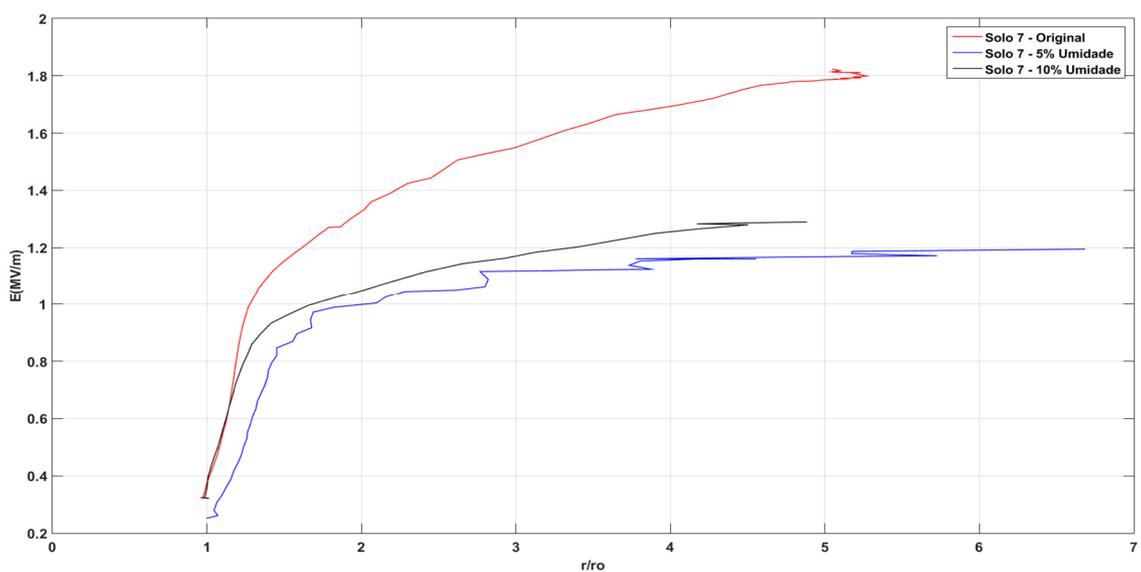


Figura 4-36 - Raio equivalente x Eri (Solo7).

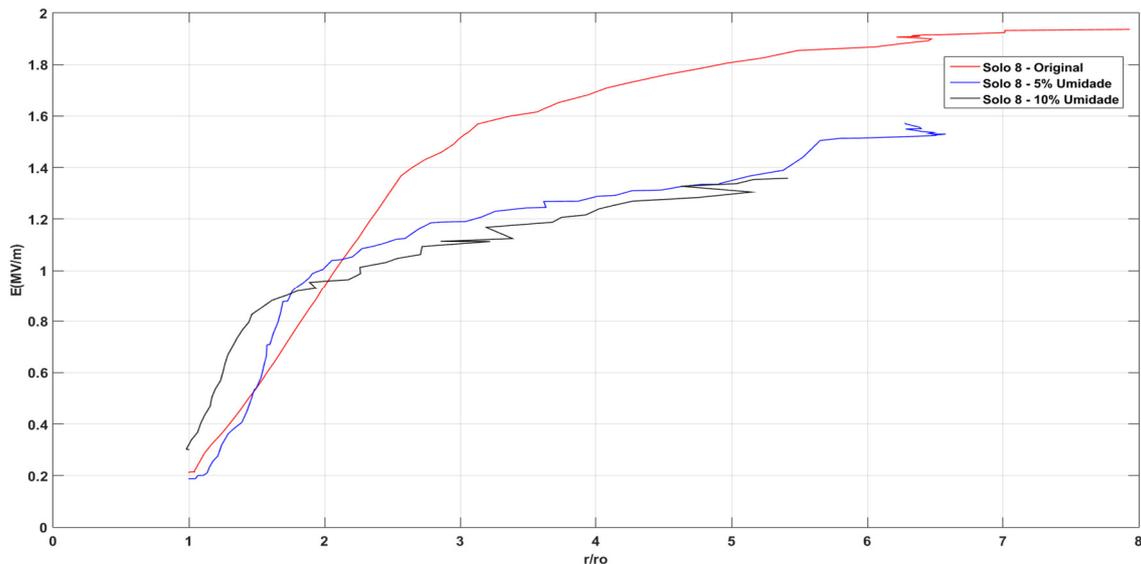


Figura 4-37 - Raio equivalente x Eri (Solo8).

Verifica-se que a tendência natural é que o raio equivalente cresça conforme o campo elétrico aumenta no eletrodo interno até atingir um valor de saturação. Foi observado que a dinâmica deste crescimento apresentou dois padrões de evolução relacionados concentração de umidade no solo.

No primeiro padrão, que englobou a maior parte das amostras analisadas, quando há menor concentração de água no solo o raio equivalente apresenta maior crescimento para campos elétricos intermediários (tipicamente entre 0,4 MV/m e 0,8 MV/m). Uma vez que o campo elétrico supera os 0,8 MV/m, quanto maior a contração de umidade na amostra mais intensa se mostra a evolução do raio equivalente. Esta dinâmica que apresenta maior sensibilidade de Req para condições de menor umidade para campos elétricos intermediário e maior sensibilidade de Req para condições de maior umidade para campos elétricos mais intensos é ilustrada pelo cruzamento das curvas de umidade (Figura 4-34).

Para o segundo padrão de amostras foi observado que para a condição de umidade original, para obter determinada evolução do raio equivalente, é necessário um campo elétrico aplicado consideravelmente superior àquele previsto para condições com maior concentração de água presente. Em média, a condição de umidade original necessita, em média, de um campo elétrico 40% superior à condição de 10% de umidade para se obter a mesma evolução do raio equivalente.

4.4.2 Req x Eri para diferentes umidades – tempo de frente de típico de descarga subsequente

O mesmo tipo de resultado apresentado no tópico 4.4.1 foi desenvolvido para ondas com tempo de frente reduzido e apresentado a seguir.

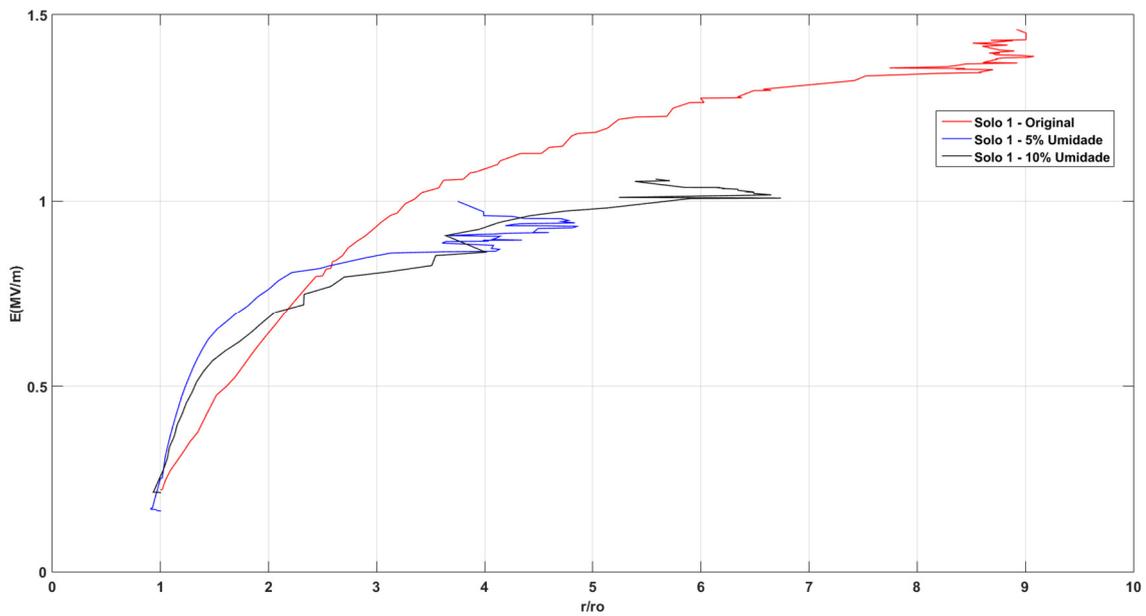


Figura 4-38 - Raio equivalente x Eri (Solo1).

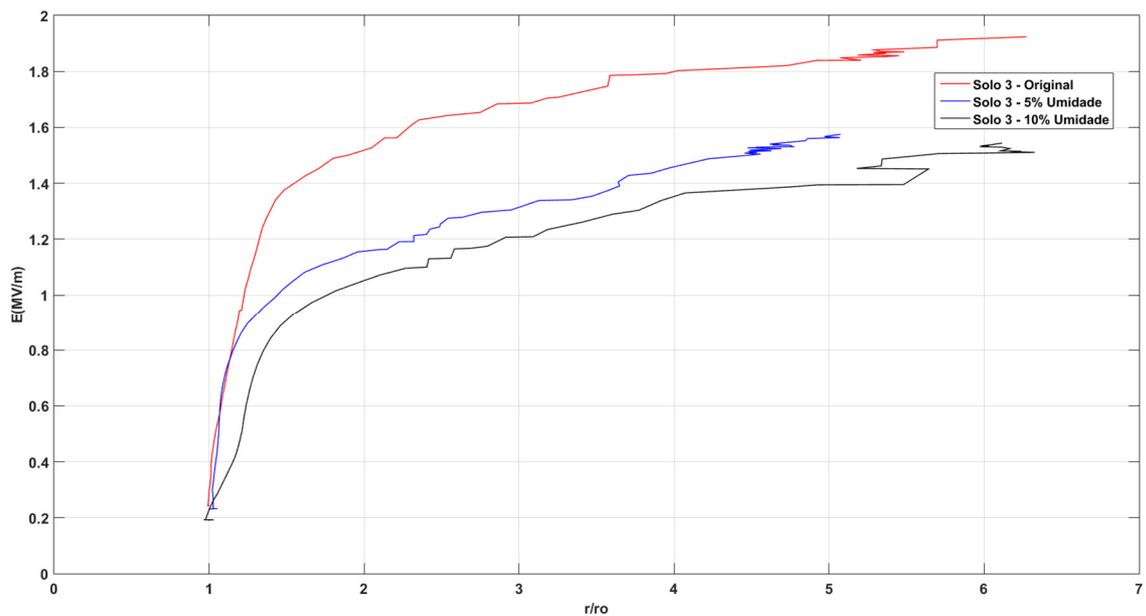


Figura 4-39 - Raio equivalente x Eri (Solo3).

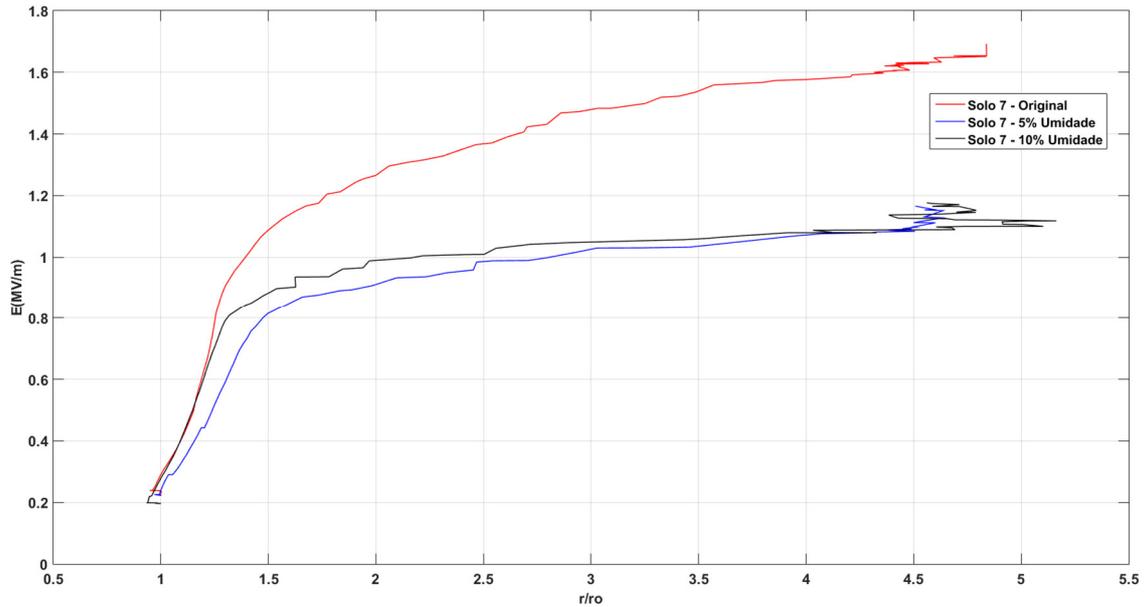


Figura 4-40 - Raio equivalente x Eri (Solo7).

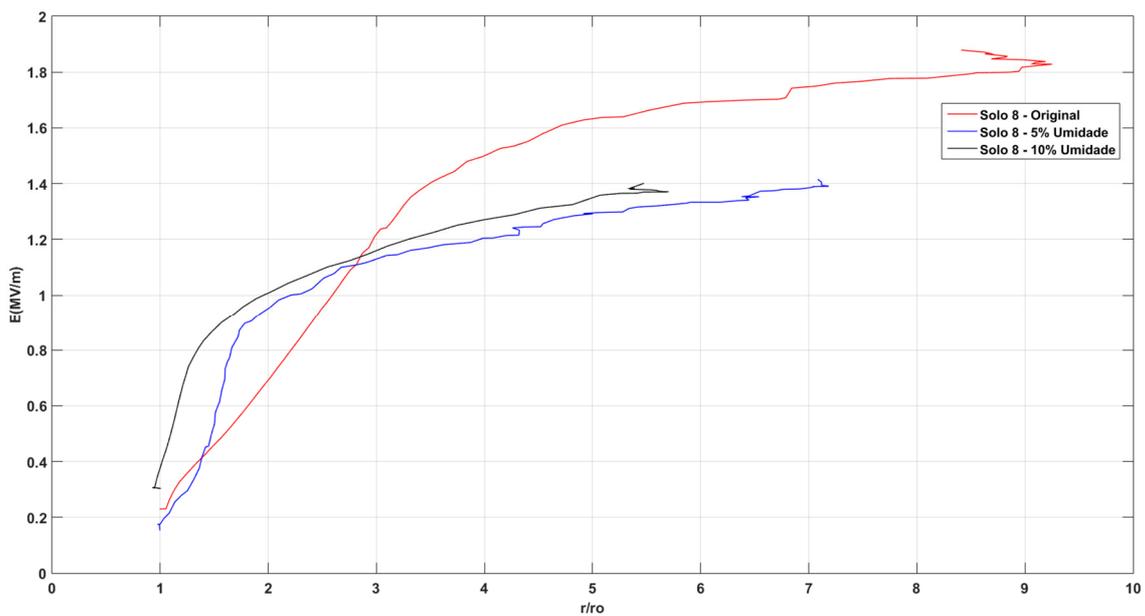


Figura 4-41 - Raio equivalente x Eri (Solo8).

Nota-se em alguns casos a variação do raio equivalente nas extremidades da curva. Esta variação se deve ao padrão dos ensaios, que foram realizados em steps de 5 kV até a ocorrência da ruptura. Quando era constatada a ruptura do solo, o valor da tensão aplicada era reduzido para o step anterior, e o novo passo adotado era de 1 kV. Este padrão de ensaios promoveu uma alteração na curva próximo ao limiar de ruptura devido à alteração da resolução do sinal aplicado.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Relação entre intensidades de campo elétrico e ionização

A intensidade de ionização do solo pode ser medida pela redução da impedância transitória. Os resultados de redução dessa impedância indicaram que efetivamente é a amplitude da tensão aplicada que condiciona a intensidade de ionização e, por conseguinte, a intensidade do campo elétrico na amostra, proporcional a tal tensão. Todas as tentativas de associação com outras grandezas ou conjunto de grandezas que a incluíssem, por exemplo a resistividade do solo, não se mostraram consistentes.

Nesta perspectiva, foi adotada a análise da variação da impedância transitória Z_t (10 μ s) em função do campo elétrico na superfície do cilindro interior da amostra E_{r_i} . Complementarmente, decidiu-se considerar o campo médio aplicado na amostra [$E_{med} = (V_{r_i} - V_{r_e}) / (r_e - r_i)$] para prevenir a possível influência de eventuais efeitos associados à granulometria do solo no início da ionização. Nessa abordagem, para os 10 tipos de solo que de comportamento mais regular, foram desenvolvidos gráficos similares aos das Figura 5-1 e Figura 5-2, que mostram a variação de Z_t em pu (valores calculados para Z_{t_0} , $0,9 \cdot Z_{t_0}$, $0,75 \cdot Z_{t_0}$, $0,6 \cdot Z_{t_0}$, $0,45 \cdot Z_{t_0}$ e $0,3 Z_{t_0}$, onde Z_{t_0} corresponde à impedância transitória relativa à menor tensão aplicada, onde o efeito de ionização é desprezível). Os valores mínimos registrados para Z_{t_0} nos ensaios estão compreendidos entre $0,45 \cdot Z_{t_0}$ e $0,3 \cdot Z_{t_0}$. A partir daí já havia a ruptura plena do solo da amostra, com o colapso da tensão.

Os resultados desenvolvidos para as diversas condições de umidade e de tempo de frente de corrente mostraram que, basicamente, as curvas dos gráficos com E_{r_i} e E_{med} tinham a mesma forma para a mesma condição de teste, variando apenas as amplitudes absolutas dos campos. Isto indicava que a condição de granulometria não era fator relevante nos resultados. A amplitude relativa era preservada, como mostram as Figura 5-1 e Figura 5-2. Assim, decidiu-se considerar-se resultados apenas em função de E_{r_i} .

Também, em figuras similares às Figura 5-1 e Figura 5-2, verificou-se que as curvas de diferentes solos seguiam um mesmo comportamento básico, embora os valores de Z_t e a variação desta em função da corrente (ou correspondente intensidade de ionização) fossem diferentes para diferentes solos.

Isto sugeriu a construção de curvas com valores médios de campo associado a cada nível de redução, considerando os diferentes solos, com indicação dos valores mínimo e máximo de E_{ri} para cada nível de redução de impedância transitória. Tais resultados são mostrados nas curvas 51 a 56.

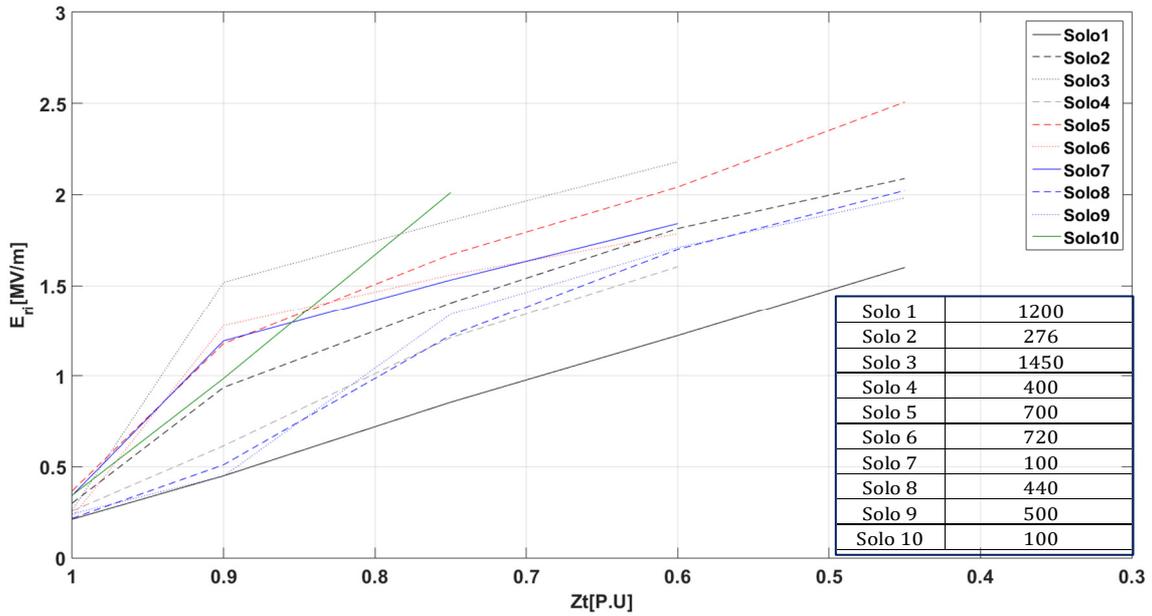


Figura 5-1 - Campo elétrico em ri (Original).

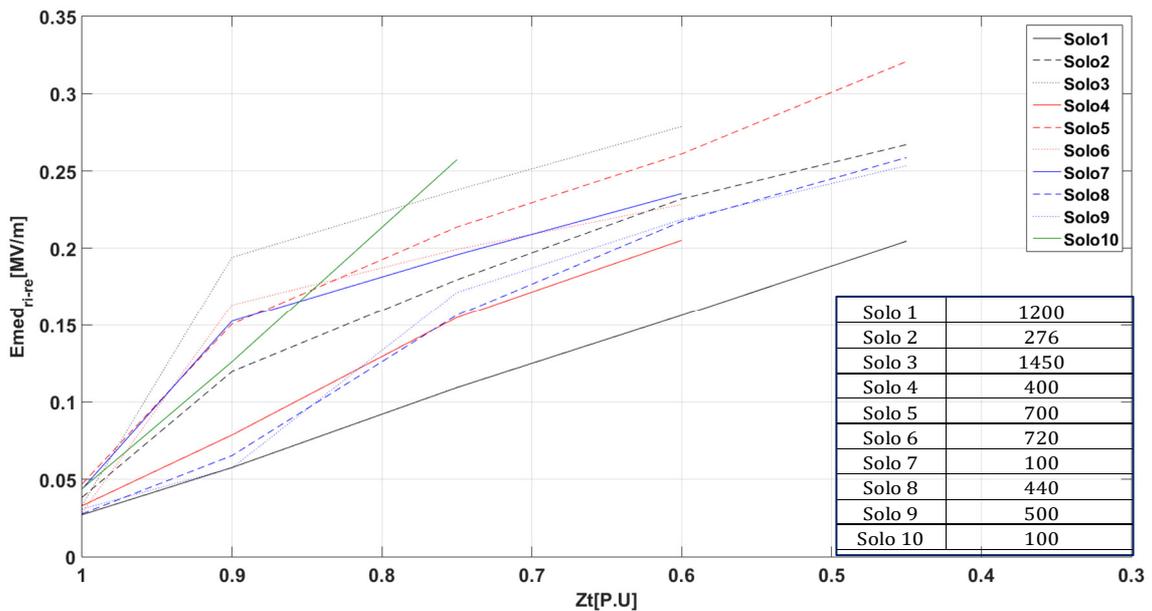


Figura 5-2 - Campo elétrico médio entre ri e re (Original).

5.1.1 Resultados de Z_t versus campo elétrico para ondas com frente lenta

As Figura 5-3 a Figura 5-5 apresentam o os resultados para dez dos solos estudados para frente de onda de corrente aplicada com perfil de primeira descarga. As duas últimas se referem ao acréscimo de umidade de 5 % e 10%.

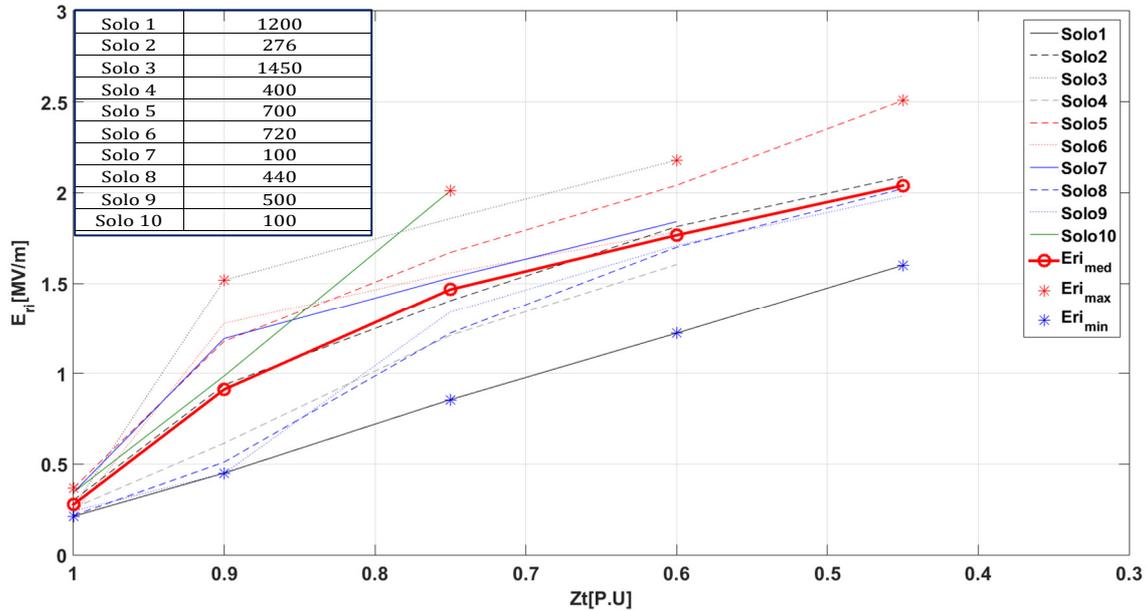


Figura 5-3 - Campo elétrico em ri (Original).

A Figura 5-3 ilustra a redução da impedância da amostra em função da intensidade do campo aplicado (referido ao valor em “ri”) destacando-se os pontos correspondentes à intensidade média, máxima, e mínima de campo medidos em cada um dos marcos (cada nível de redução de impedância).

Os resultados indicam que o valor da resistividade do solo não é um parâmetro de influência na intensidade de campo elétrico requerida para ocorrência de ionização nos diferentes níveis. Por exemplo, o solo de resistividade 1220 Ωm apresenta as menores intensidades de campo elétrico requerido para ionização nos diversos níveis, enquanto o de 100 Ωm apresenta as maiores intensidades. Por outro lado, o solo de 1450 Ωm , apresenta intensidades de campo requerido para ionização relativamente próximas às do solo de 100 Ωm . Isto contraria a hipótese da necessidade de campos mais elevados para causar ionização em solos de maior resistividade.

A Tabela 5-1 apresenta o campo elétrico Eri calculado nos marcos de Z_{t0} para as dez amostras de solo estudadas. São destacados os valores Máximo, Mínimo e Médio além do desvio padrão (DP) que foi calculado para verificar o grau de uniformidade do conjunto de amostras que compuseram cada marco. Foi observado que o desvio padrão aumentou conforme o processo de ionização evoluiu permanecendo, todavia, sempre próximo de 0 caracterizando a condensação dos dados em relação à média. Este comportamento demonstra que a curva média ($E_{ri_{med}}$) é uma boa aproximação do comportamento de Z_t em relação ao campo elétrico Eri independentemente da resistividade do solo sob análise.

Tabela 5-1 - Campo elétrico em "ri" em MV/m registrado nos marcos Z_{t0} , $0,9Z_{t0}$, $0,75Z_{t0}$, $0,6Z_{t0}$ e $0,45Z_{t0}$.

Amostra	Z_{t0}	$0,9Z_{t0}$	$0,75Z_{t0}$	$0,6Z_{t0}$	$0,45Z_{t0}$
Solo 1	0,21	0,44	0,82	1,17	1,32
Solo 2	0,22	0,71	1,04	1,33	1,54
Solo 3	0,20	1,22	1,46	1,69	-
Solo 4	0,25	0,61	1,17	1,54	-
Solo 5	0,28	0,92	1,29	1,61	1,90
Solo 6	0,20	1,16	1,40	1,57	-
Solo 7	0,32	1,11	1,41	1,66	-
Solo 8	0,21	0,49	1,22	1,63	1,89
Solo 9	0,22	0,41	1,23	1,56	1,81
Solo 10	0,23	0,68	1,43	-	-
Máximo	0,32	1,22	1,46	1,69	1,90
Mínimo	0,20	0,41	0,82	1,17	1,32
Médio	0,23	0,78	1,25	1,53	1,69
DP	0,04	0,29	0,19	0,16	0,22

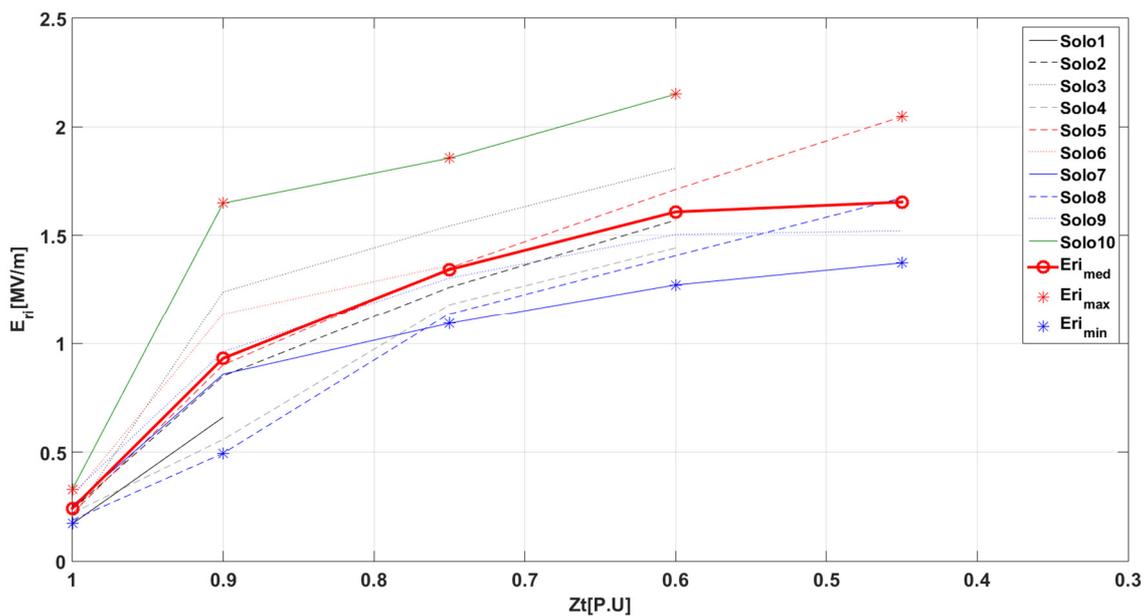


Figura 5-4 - Campo elétrico em ri (5%).

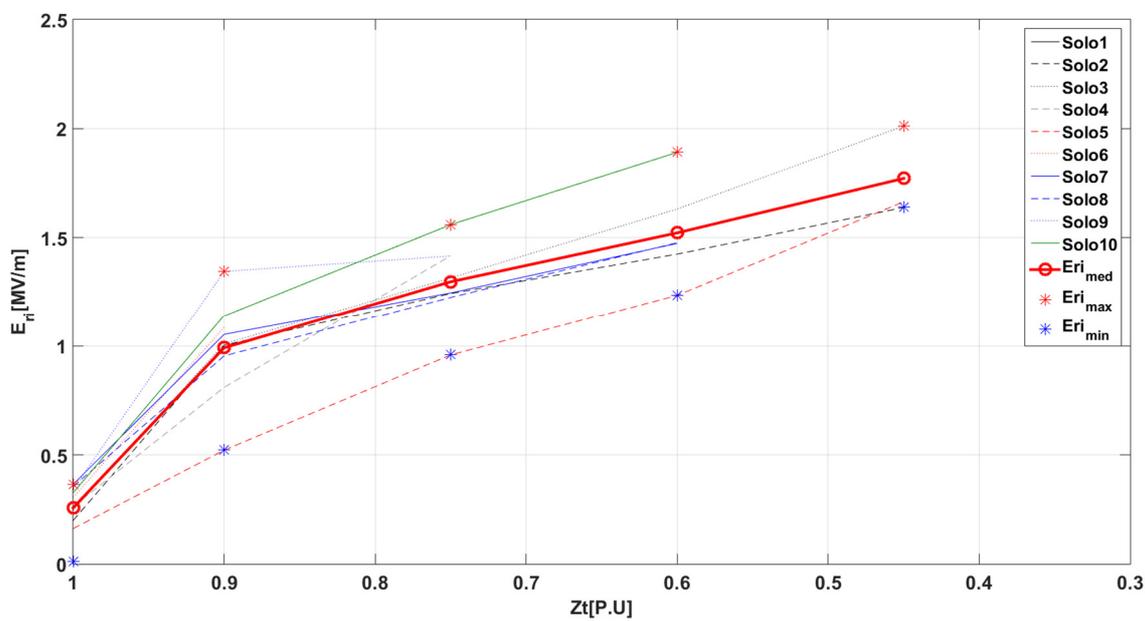


Figura 5-5 - Campo elétrico em ri (10%).

5.1.2 Relação entre Z_t e Campo elétrico para ondas com frente rápida

As Figura 5-6 a Figura 5-8 apresentam o os resultados para dez dos solos estudados para frente de onda de corrente aplicada com perfil de descarga subsequente. As duas últimas se referem ao acréscimo de umidade de 5 % e 10%.

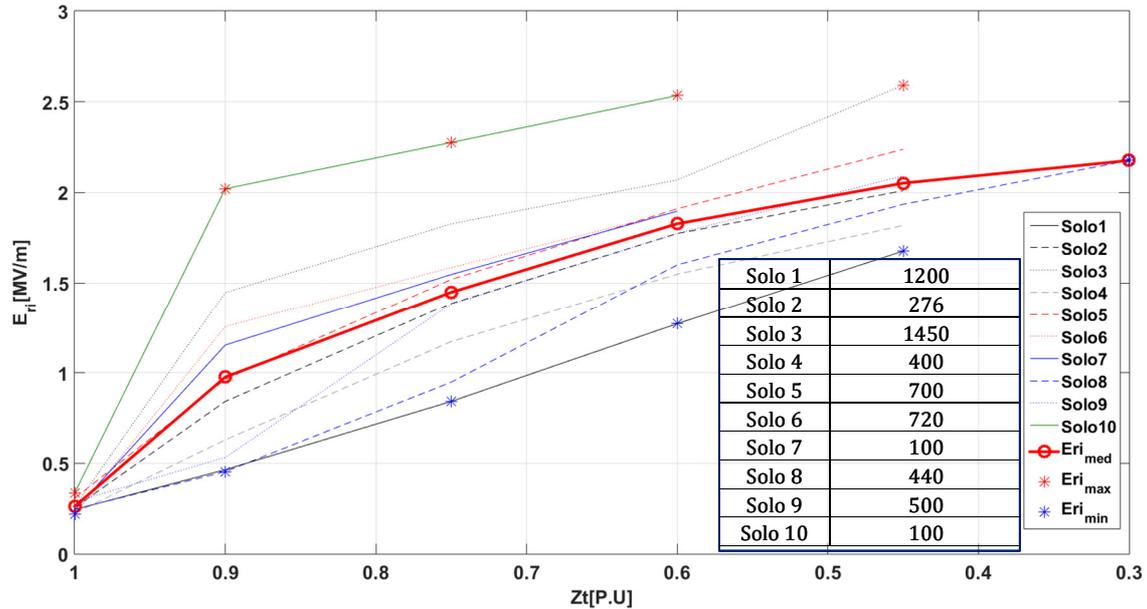


Figura 5-6 - Campo elétrico em ri (Original).

A Figura 5-6 ilustra o campo elétrico em “ri” destacando-se os pontos máximo, médio e mínimo medidos em cada um dos marcos mencionados. Assim como para os ensaios com frente de onda lenta, o comportamento de Z_t em relação ao aumento do campo elétrico E_{ri} indica que a resistividade do solo não é o parâmetro relevante no que concerne à intensidade de campo requerida para ionização.

Bem como mencionado na análise para frente de onda lenta, para descargas com frente de onda rápida o desvio padrão (DP) entre amostras para os marcos analisados demonstraram que a curva média ($E_{ri_{med}}$) é uma boa aproximação do comportamento de Z_t em relação ao campo elétrico E_{ri} independentemente da resistividade do solo. A Tabela 5-2 traz os campos elétricos medidos e o desvio padrão calculado para os ensaios realizados para frente de onda rápida.

Tabela 5-2 - Campo elétrico em "ri" em MV/m registrado nos marcos Zt0, 0,9Zt0, 0,75Zt0, 0,6Zt0, 0,45Zt0 e 0,3Zt0.

Amostra	Zt0	0,9Zt0	0,75Zt0	0,6Zt0	0,45Zt0	0,30Zt0
Solo 1	0,22	0,42	0,77	1,06	1,26	-
Solo 2	0,21	0,70	1,17	1,45	1,61	-
Solo 3	0,24	1,32	1,61	1,77	1,90	-
Solo 4	0,21	0,60	1,09	1,33	1,46	-
Solo 5	0,28	0,89	1,40	1,73	1,97	-
Solo 6	0,20	1,15	1,35	1,54	-	-
Solo 7	0,22	1,05	1,33	1,56	-	-
Solo 8	0,23	0,42	0,87	1,46	1,67	1,82
Solo 9	0,27	0,50	1,30	1,62	1,87	-
Solo 10	0,22	1,37	1,55	1,76	-	-
Máximo	0,28	1,37	1,61	1,77	1,97	-
Mínimo	0,20	0,42	0,77	1,06	1,26	-
Médio	0,23	0,84	1,24	1,53	1,68	1,82
DP	0,02	0,35	0,26	0,21	0,24	-

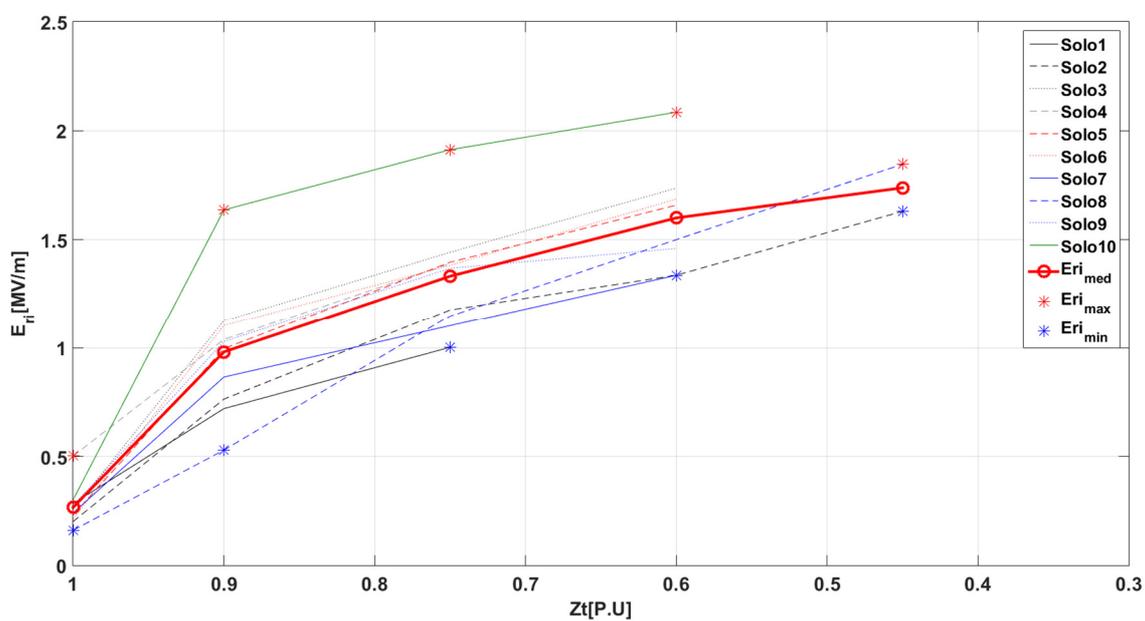


Figura 5-7 - Campo elétrico em ri (5%).

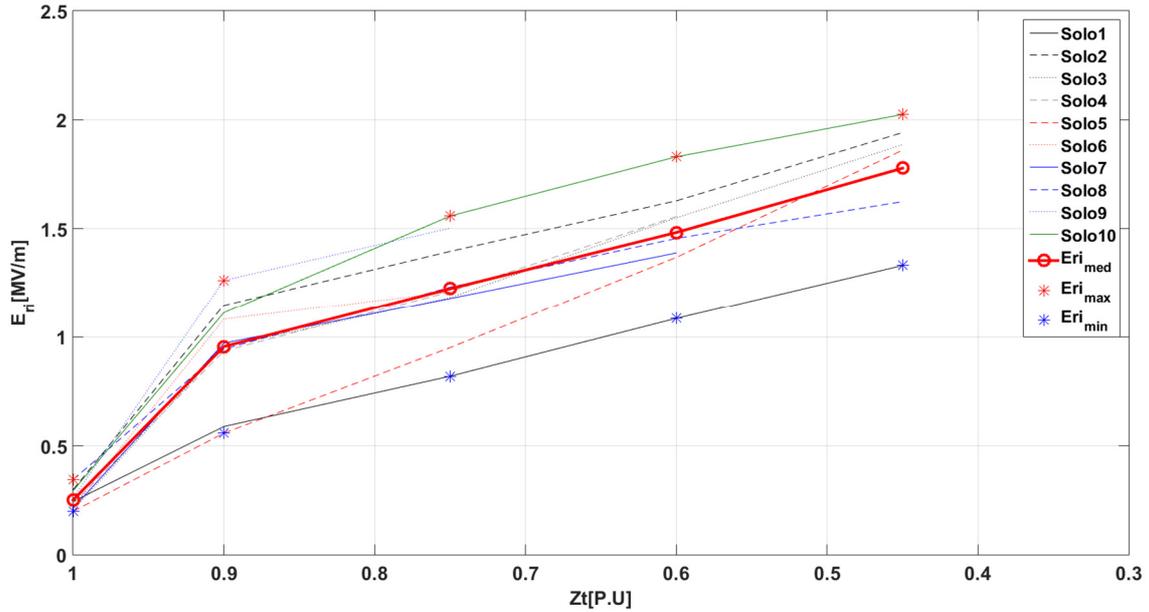


Figura 5-8 - Campo elétrico em ri (10%).

A Tabela 6 apresenta as intensidades máximas, mínimas e médias do campo elétrico de pré-ruptura (quando Zt está entre $0,45 \cdot Zt_0$ e $0,3 \cdot Zt_0$) calculado em $10 \mu s$, entre todas as amostras de solo estudadas para corrente impulsivas com perfil de primeira descarga. A finalidade é estabelecer uma faixa de valores padrão de campo elétrico que cause ruptura total da amostra solo. A análise foi realizada para os três cenários de umidade (original, 5% e 10%).

Tabela 5-3 – Valores Máximo, Mínimo e Médio de campo elétrico para ruptura plena das amostras para umidade original, 5% e 10% para correntes impulsivas de primeira descarga e subsequente.

Eri pré-ruptura	Primeira Descarga			Descarga Subsequente		
	Original	5%Umid.	10%Umid.	Original	5%Umid.	10%Umid.
Máximo [MV/m]	1,90	1,65	1,55	1,97	1,41	1,62
Mínimo [MV/m]	1,32	1,16	1,30	1,26	1,32	1,05
Médio [MV/m]	1,69	1,44	1,41	1,68	1,37	1,34

5.1.3 Análises

Os resultados anteriores traduzem algumas conclusões importantes de carácter genérico quanto à intensidade do efeito de ionização do solo, que é medida pela redução relativa de sua impedância transitória (pu).

1. Quando se consideram diferentes solos, há uma dispersão significativa do campo elétrico requerido para ocorrência de intensidades específicas de ionização do solo (medidas pela redução da impedância transitória). A Figura 5-9 ilustra tal aspecto.

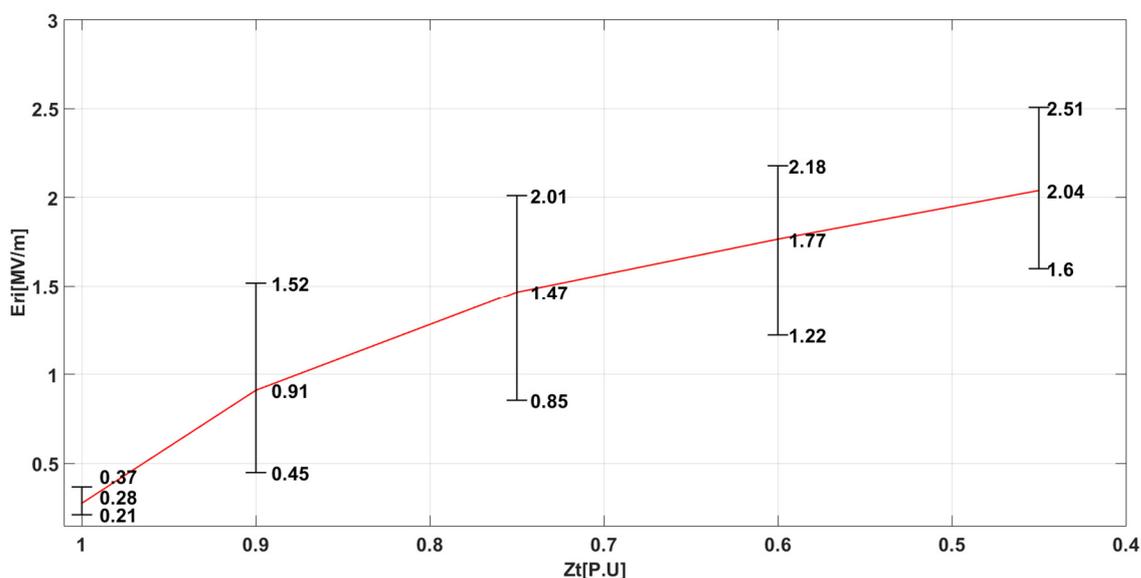


Figura 5-9 – Curva do campo médio requerido para promover reduções específicas da impedância Z_t e sua dispersão quando se consideram solos testados (umidade original – tempo de frente de primeira descarga).

2. A análise dos resultados obtidos para os diferentes solos mostra que não existe relação entre o valor da resistividade do solo e a intensidade de ionização do meio.
3. Com relação ao início do processo de ionização no cilindro interior, verifica-se que este ocorre numa faixa entre 0,2 e 0,32 MV/m com valor médio de 0,23 MV/m para os solos testados com umidade natural. Note que tais valores são muitíssimos inferiores àqueles encontrados para o

campo elétrico crítico a partir de ensaios com cubas de placas paralelas, os quais tendem para a ordem de 1 MV/m (CORRÊA, 2020).

4. Embora se verifique dispersão significativa na relação entre a intensidade de ionização e o campo elétrico aplicado quando se consideram diferentes solos, a curva média do campo elétrico requerido nesses solos para promover as diferentes intensidades de ionização (dadas pela respectiva redução em pu da impedância transitória) traduz bem, de forma aproximada, o comportamento dos diferentes solos no que concerne à ionização (vide a curva em vermelho na Figura 5-9).

Assim, tendo em conta o efeito favorável da ionização do solo traduzido pela diminuição da impedância de aterramentos, esta curva acrescida de um grau de conservadorismo (do tipo acréscimo de 10% nos valores de campo elétrico) pode descrever com aproximação razoável o efeito de ionização de solos genéricos no entorno de condutores cilíndricos.

5. Também o tempo de frente não afeta a intensidade do efeito de ionização em termos da curva média determinada para os diferentes solos testados.

A Figura 5-10 comprova que as curvas médias para os tempos de frente típicos de correntes de descarga primeira e subsequente são praticamente coincidentes.

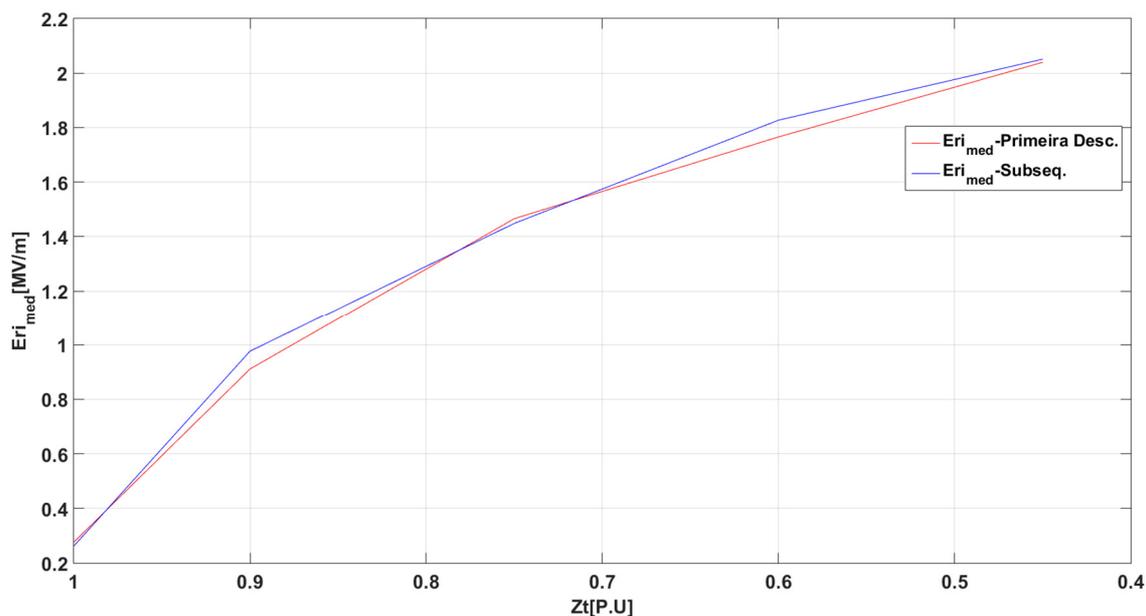


Figura 5-10 – Campo elétrico médio em ri (para unidade original e tempos de frente de primeira descarga e descarga subsequente) requerido para redução de Z_t em diferentes níveis.

- Os resultados também indicam a influência relativamente reduzida do efeito da umidade do solo na intensidade de ionização do meio.

Verifica-se que, para graus reduzidos ou moderados de ionização (redução de menos de 10% da impedância transitória), o campo elétrico em ri requerido para determinado nível de redução de Z_{t0} praticamente não se altera em função da umidade.

A partir daí, o campo requerido tende a se reduzir com o aumento da umidade, como mostra a Figura 5-11, mas ainda de forma discreta. Para reduções de 30% a 50% da impedância transitória, a intensidade de campo elétrico requerida para promover a correspondente intensidade de ionização se reduz menos de 20% para um aumento muito significativo da umidade.

Assumir-se a curva média para o solo em condição natural, corresponde a uma aproximação ainda razoável, com um grau de conservadorismo.

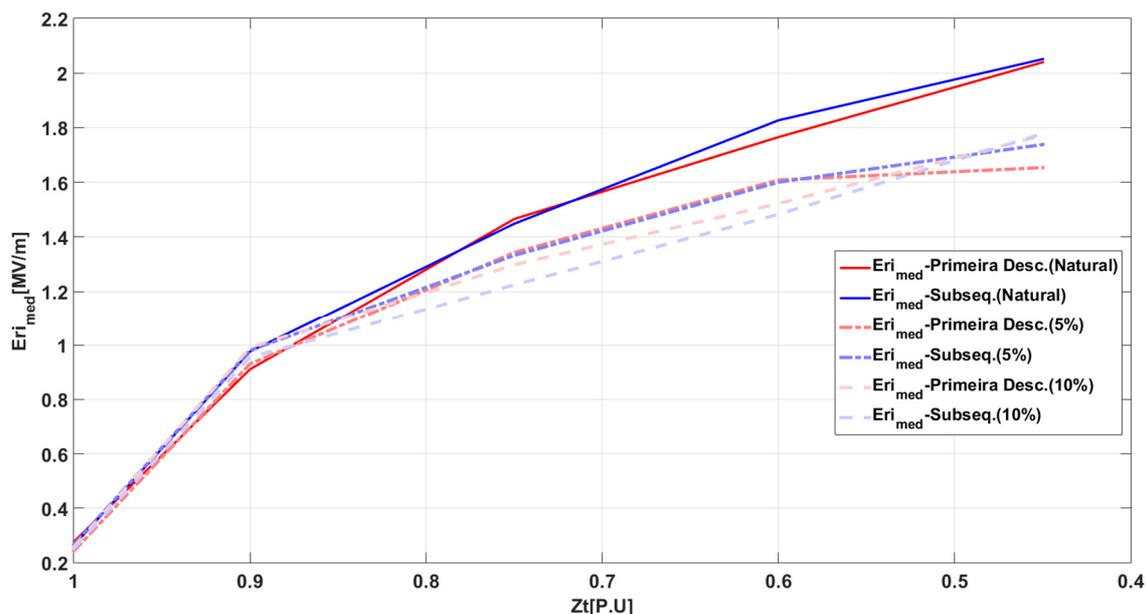


Figura 5-11 - Campo elétrico médio em ri (médio considerando diferentes solos) para diferentes umidades (original, 5% e 10%) e tempos de frente de primeira descarga e descarga subsequente.

5.1.4 Ajuste dos resultados para aplicação em aterramentos

Como indicam as análises anteriores, curvas como aquelas da Figura 5-10, são capazes de descreverem relativamente bem o comportamento médio de solos genéricos no que concerne à relação entre a intensidade de ionização no meio e o campo elétrico aplicado, referenciado na sua intensidade na superfície do cilindro interior da cuba de medição.

Para aplicação em aterramentos elétricos, considerando o formato aproximadamente cilíndrico dos eletrodos, é possível expressar o conteúdo destas curvas em função de um aumento equivalente do raio do condutor. Nas curvas correspondentes, a redução da impedância transitória na abscissa seria substituída pelo quociente entre o raio equivalente do eletrodo e o raio original que resultaria naquela redução. Assim, a Figura 5-10 poderia ser substituída pela Figura 5-12, preservando a validade das relações expressas pelas curvas.

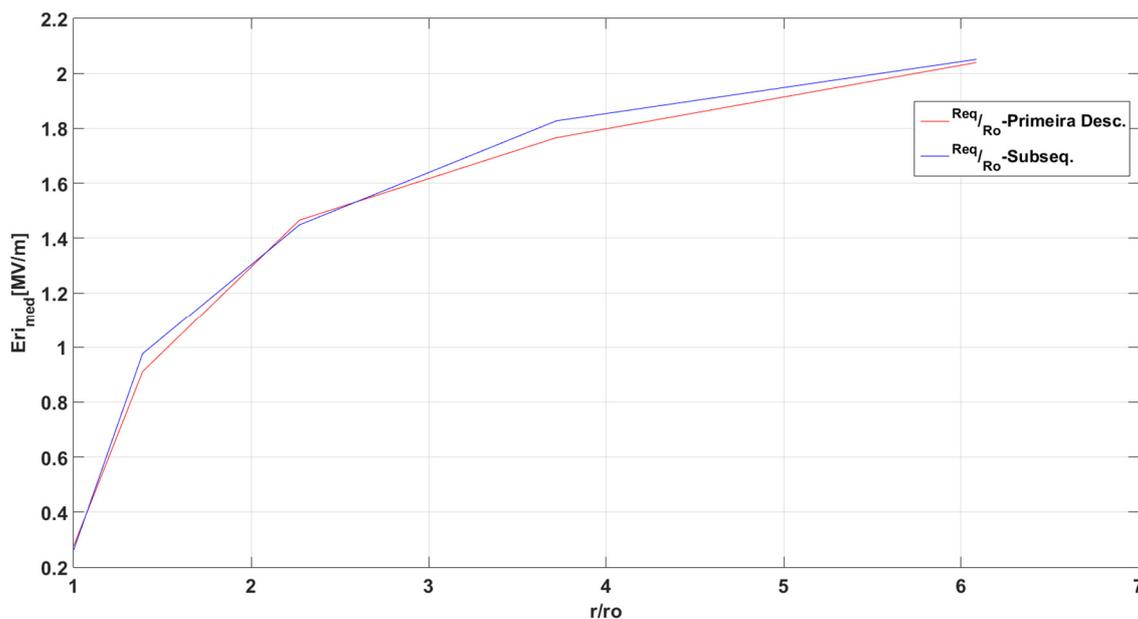


Figura 5-12 – Campo elétrico médio em ri (para umidade original e tempos de frente de primeira descarga e descarga subsequente) associado a um aumento do raio equivalente do eletrodo (r/r_o) requerido para redução de Zt nos níveis indicados na figura 5-10.

Seria possível desta forma, a partir da estimativa da distribuição intensidade de campo elétrico resultante na superfície do eletrodo ao longo deste, decorrente da impressão de uma corrente impulsiva de descarga, determinar-se qual seria a ampliação requerida do raio do eletrodo nos níveis definidos pela distribuição de intensidade de corrente, para ter em conta a ocorrência do processo de ionização. No reprocessamento do cálculo da resposta transitória do aterramento seria utilizada a nova distribuição de raios equivalentes ampliados determinados ao longo do eletrodo.

No caso específico do aterramento, este tipo de abordagem de ampliação de raio para se ter em conta o efeito de ionização parece ser o mais adequado, pelo fato dos canais ionizados terem valor de resistividade milhares de vezes inferior àquele do solo circundante, funcionando efetivamente como parte estendida do eletrodo. Diferentemente do efeito corona no ar, onde as perdas de energia ao longo dos canais são relevantes, no caso dos aterramentos, as perdas ficam concentradas no solo.

Por outro lado, este tipo de abordagem que se refere à condição de intensidade de ionização num instante específico ($10 \mu s$) não observa a dinâmica do efeito no tempo. Efetivamente a intensidade de ionização pode variar do instante em que for excedida o valor crítico de campo elétrico para a configuração cilíndrica até um instante bem posterior a $10 \mu s$. Por outro lado, considerando-se a forma muito distinta desta dinâmica

para os diferentes tipos de solo (vide as figuras $Z_t \times t$ para os diferentes tipos de solo apresentadas no capítulo 4) parece impossível ter em conta esta dinâmica ao longo de todo o tempo para solos genéricos. Adicionalmente, nota-se nessas mesmas curvas que a redução de Z_t em $10 \mu s$ é de certa forma representativa da redução ao longo da faixa de 4 a $20 \mu s$, embora seja um pouco superior ao valor em $4 \mu s$, que corresponde ao tempo de frente de primeiras descargas. Assim, parece razoável usar este tipo de abordagem para considerar o efeito da ionização quando associado a correntes de primeira descarga se for adotado um aumento da ordem de 10% dos valores dos campos na curva para, considerando o efeito favorável da ionização, ter em conta a dispersão de comportamento para os diferentes solos (Figura 5-13).

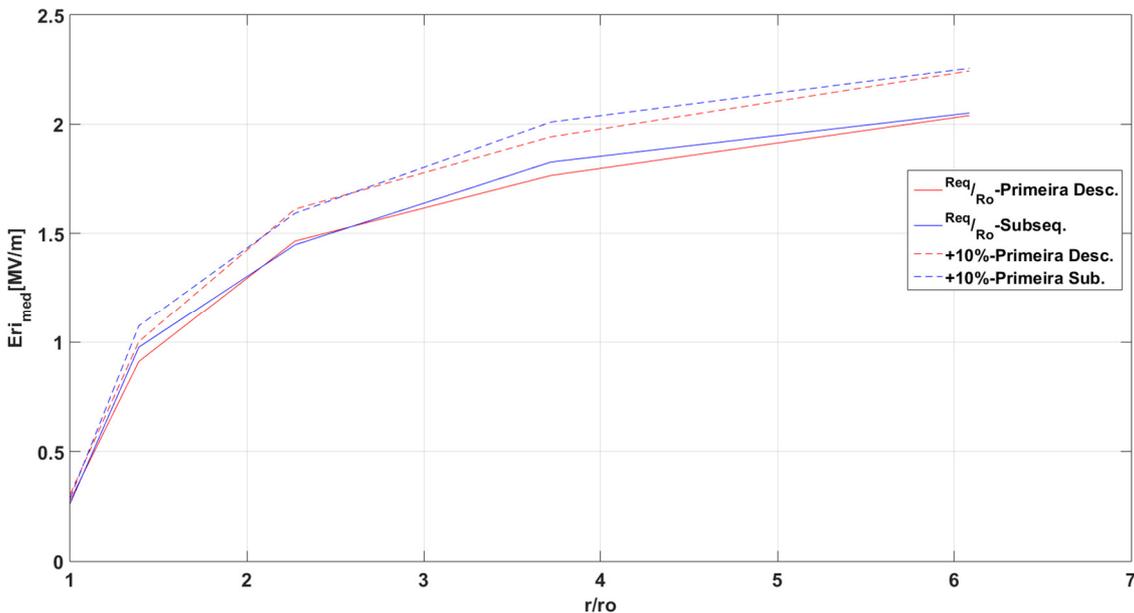


Figura 5-13 – Campo elétrico médio em r_i com grau de 10% de conservadorismo (para unidade original e tempos de frente de primeira descarga e descarga subsequente) associado a um aumento do raio equivalente do eletrodo (r/ro) requerido para redução de Z_t nos níveis indicados na figura 5-10.

Nas aplicações em aterramentos, há interesse em se equacionar o efeito de ionização tendo como referência o parâmetro “parcela real da densidade linear de corrente” I_{Tr} (parcela real da corrente transversal dispersa para o solo por unidade de comprimento de eletrodo A/m). Considerando a propriedade macroscópica da matéria “ $J = (1/\rho) E$ ” e que, no caso do condutor cilíndrico, “ $J = I_{Tr} / (2\pi r_i)$ ”, pode-se expressar a densidade linear de corrente I_{Tr} em função dos valores de campo E_{ri} da curva média para um solo qualquer, como “ $I_{Tr} = [(2\pi r_i)/\rho] \cdot E_{ri}$ ”.

Assim, para um par de valores específicos de resistividade de baixa frequência do solo e raio de eletrodo é possível derivar uma curva semelhante à da Figura 5-12, mas que expresse a relação entre o valor de pico da densidade linear de corrente dispersa para o solo e a ampliação requerida do raio equivalente do eletrodo para ter em conta a respectiva intensidade do efeito de ionização do solo no entorno do eletrodo, como ilustra a Figura 5-14. Nesse gráfico o valor da corrente I_{Tr} para cada valor específico da resistividade do solo em baixa frequência ρ é dado pelo produto do valor indicado na abscissa por “1000/ ρ ”. Por exemplo para ρ igual a 1000 Ωm , multiplica-se o valor da abscissa por 1. Para ρ igual a 100 Ωm deve se multiplicar por 10. Para a ρ igual a 10.000 Ωm , deve se multiplicar por 0,1.

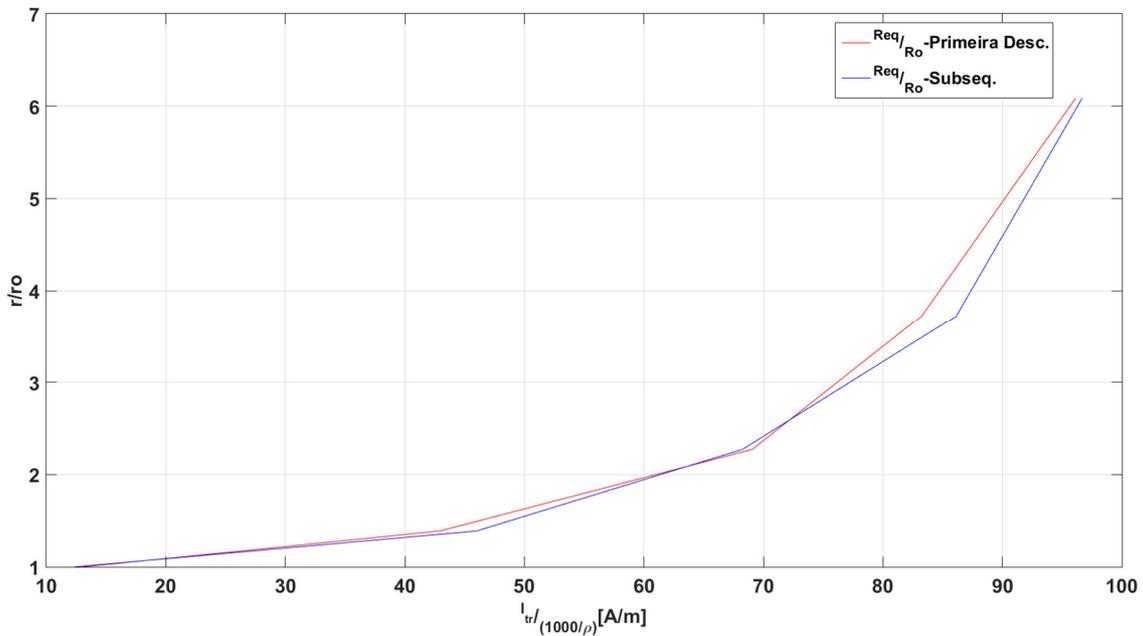


Figura 5-14 – Relação entre a parcela real da densidade linear de corrente I_{Tr} e o aumento do raio equivalente do eletrodo (r/r_o) para ter em conta o efeito de ionização do solo nos níveis indicados na figura 5-10, especificamente para umidade original do solo e raio físico do eletrodo de 0,75 cm.

O uso desta aproximação possibilita o cômputo do efeito de ionização nas condições em que o formato da distribuição de campo elétrico no solo preservasse a geometria cilíndrica, o que ocorreria se o eletrodo fosse suficientemente longo. Em outras palavras, tal abordagem não é recomendada no caso de eletrodos muito curtos e correntes impressas muito intensas, de forma que a geometria do campo deixasse de ser basicamente cilíndrica, tornando-se quase esférica, devido ao efeito de ionização

extremamente intenso (por exemplo uma haste de 3 m e correntes de várias dezenas de quilo Ampères). Mas a aplicação desta abordagem é razoável, por exemplo, para os aterramentos de linhas de transmissão, que tipicamente são extensos e resultam em valores de densidade linear de corrente no eletrodo inferiores a 1 kA/m considerando-se a divisão da corrente entre os pés da torre, pico máximo de corrente típico inferior a 45kA e cabo contrapeso maior que 12m.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

6.1 Considerações finais

Neste trabalho recorreu-se a uma base de dados experimentais desenvolvida em realizações anteriores da equipe de pesquisa do LRC, resultante da aplicação de ondas impulsivas de tensão em amostras de solo dispostas em cuba de condutores cilíndricos coaxiais. Para isto, foi utilizado gerador de impulsos de 600kV para o desenvolvimento dos ensaios, onde foram adotados passos progressivos de aplicação de tensão de 5kV para iniciar o processo de ionização do solo e promover a evolução deste.

Tais ensaios eram capazes de reproduzir as condições de campo elétrico nas proximidades de eletrodos de aterramento submetidos a correntes de descargas, em intensidade e forma.

Na abordagem adotada, buscou-se identificar as relações entre grandezas relacionadas à ocorrência do efeito de ionização do solo, como a tensão, o campo elétrico, a densidade de corrente e a resistividade do meio, na perspectiva de desenvolver expressões para predição da intensidade de ionização em função da intensidade de corrente impressa em eletrodos de aterramentos por descargas atmosféricas.

Optou-se pelo desenvolvimento de uma análise baseada na medição da intensidade do efeito da ionização a partir da redução da impedância transitória das amostras de solo em função do aumento da amplitude de corrente.

Verificou-se que a intensidade de campo elétrico na amostra era o parâmetro que efetivamente governava a intensidade do efeito de ionização. Assim, foram exploradas as relações entre a intensidade do campo elétrico aplicado à amostra (tomando como referência o campo no cilindro interno da cuba) e a redução da impedância transitória da amostra (ou do aumento do raio equivalente do eletrodo capaz de gerar igual redução), considerando-se 10 solos distintos em 3 níveis de umidade.

As análises revelaram um conjunto de conclusões sintetizadas no item 6.2 e uma recomendação prática de alternativa para cômputo do efeito de ionização em aterramentos elétricos não concentrados, como indicado no item 6.3.

6.2 Conclusões

Verificou-se que há uma dispersão significativa do campo elétrico requerido para ocorrência de intensidades específicas de ionização do solo (medidas pela redução da impedância transitória), ilustrada pictoricamente na Figura 5-9.

Os resultados para os diferentes solos demonstraram a inexistência de relação entre o valor da resistividade do solo e a intensidade do efeito de ionização do meio.

Caracterizou-se o início do processo de ionização no cilindro interior, numa faixa entre 0,2 e 0,32 MV/m com valor médio de 0,23 MV/m para os solos testados com umidade natural. Tais valores muito inferiores àqueles encontrados para o campo elétrico crítico a partir de ensaios com cubas de placas paralelas, presumivelmente se explicam em função do campo não uniforme na amostra e pela intensificação deste junto ao eletrodo interno devido à heterogeneidade do material da amostra junto ao eletrodo interno, nessa região de campo mais intenso.

Mesmo com a dispersão significativa da intensidade de campo elétrico requerido para se alcançar determinados níveis de ionização do solo das amostras (traduzidos pelos níveis de redução da impedância transitória da amostra) quando se consideram diferentes solos, verificou-se que a curva média desse campo elétrico requerido nesses solos para promover as diferentes intensidades de ionização traduziam de forma aproximada o comportamento dos diferentes solos no que concerne à ionização, como ilustrado na Figura 5-9.

Presumiu-se, que de um lado não seria viável ter uma solução genérica de equacionamento do efeito de ionização do solo, face às dispersões de comportamento dos diferentes solos. Mas seria viável desenvolver uma boa aproximação desse comportamento por meio da curva média do campo elétrico requerido para intensidades definidas do efeito de ionização, acrescida de um grau

de conservadorismo (do tipo acréscimo de 10% nos valores de campo elétrico), tendo em conta o efeito favorável do fenômeno na redução da impedância de aterramento e a necessidade de precaver-se contra a superestimação do efeito.

Verificou-se que o tempo de frente (associado a correntes primeiras e subsequentes de descargas) não afeta a intensidade do efeito de ionização, em termos da curva média determinada para os diferentes solos testados, e que a influência da umidade do solo era muito discreta. Assumir-se a curva média para o solo em condição natural, corresponde a uma aproximação ainda razoável para diferentes umidades do solo, com um grau discreto de conservadorismo.

Os resultados indicaram a viabilidade de adotar-se uma alternativa para cômputo do efeito de ionização em aplicações relacionadas aos aterramentos elétricos, como indicado a seguir.

6.3 Sugestão de alternativa para ter em conta o efeito de ionização do solo em aterramentos elétricos

Para aplicação em aterramentos elétricos extensos, considerando o formato aproximadamente cilíndrico dos eletrodos, mostrou-se viável expressar a relação genérica entre a intensidade de campo elétrico desenvolvido na superfície do eletrodo e o aumento do raio equivalente do eletrodo, capaz de traduzir o efeito de ionização em função da redução da impedância transitória associada à intensidade de campo, como ilustrado na Figura 5-12, repetida a seguir.

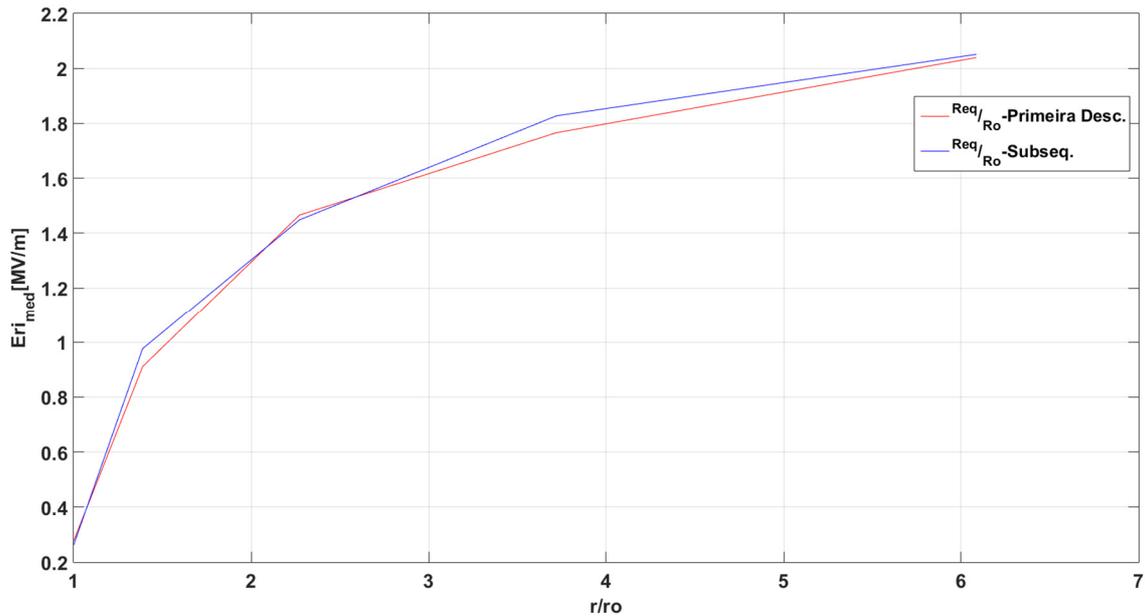
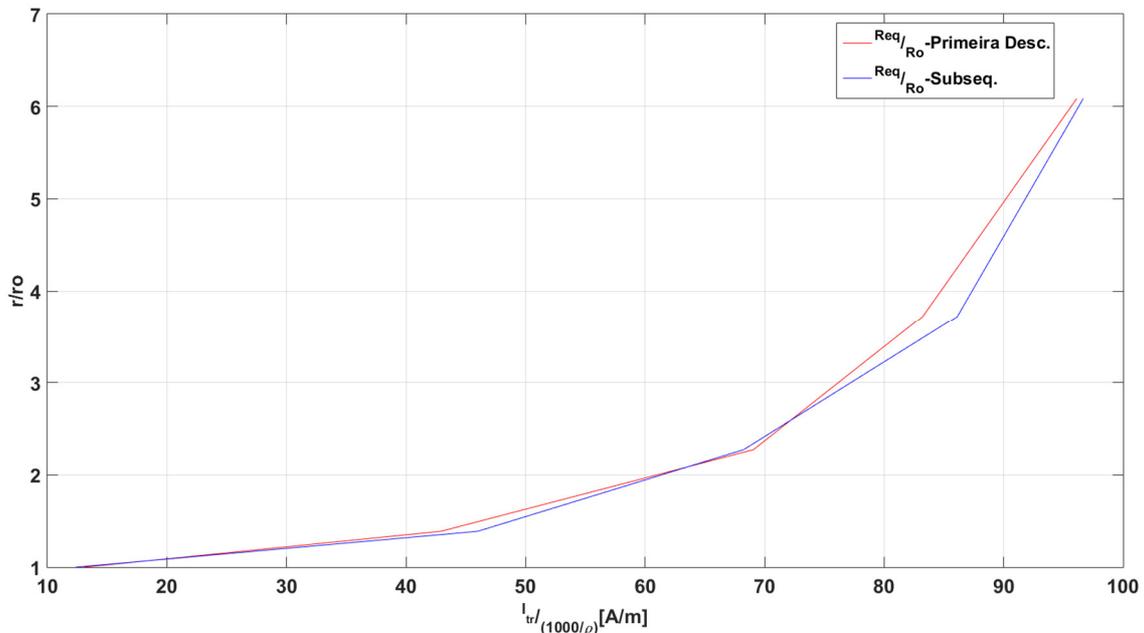


Figura 6-1 – Campo elétrico médio em ri (para unidade original e tempos de frente de primeira descarga e descarga subsequente) associado a um aumento do raio equivalente do eletrodo (r/r_o) requerido para redução de Z_t nos níveis indicados na figura 5-10.

Uma evolução da descrição do efeito de ionização do solo na forma da figura anterior consistiu na substituição da intensidade do campo pela associada parcela real da densidade linear de corrente dispersa do eletrodo para o solo, como indicado na Figura 5-14, repetida adiante.



6-2 – Relação entre a parcela real da densidade linear de corrente I_{Tr} e o aumento do raio equivalente do eletrodo (r/r_o) para ter em conta o efeito de ionização do solo nos níveis indicados na figura 5-10, especificamente para unidade original do solo e raio físico do eletrodo de 0,75 cm. Nesse gráfico o valor da corrente I_{Tr} para cada valor específico da resistividade do solo em baixa frequência ρ é dado pelo produto do valor indicado na abscissa por “1000/ ρ ”.

Assim, como resultado do trabalho, foi desenvolvida esta abordagem que possibilita computar o efeito de ionização do solo, com boa aproximação e de forma genérica. Esta recomendação se aplica nas condições em que o formato da distribuição de campo elétrico no solo preserve a geometria cilíndrica, o que ocorre se o eletrodo for suficientemente longo, como no caso de linhas de transmissão.

6.4 Propostas de Continuidade

Os desenvolvimentos deste trabalho foram processados para 10 tipos de solos diferentes com valores de resistividade compreendidos entre 100 e 1450 Ωm , dentre as 15 amostras analisadas.

Um primeiro passo na continuidade do trabalho consistiria na verificação da aplicabilidade da alternativa desenvolvida para cômputo do efeito de ionização aos solos restantes, cuja resistividade alcança o valor de 10.000 Ωm . Em seguida, tal verificação deveria ser estendida a um número maior de casos.

Consolidada a análise gráfica genérica do efeito da ionização do solo, computado na forma do aumento de um raio equivalente do eletrodo, este poderia ser incorporado com relativa facilidade a modelos de cálculo de transitório em aterramentos elétricos. E poderia se processar a análise do impacto da ionização em aplicações de interesse para a engenharia, como no caso da resposta dos aterramentos de linhas de transmissão, submetidas a correntes de descargas atmosféricas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.M. Mousa, " **The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes**", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.3, July, 1994.
- [2] A.C. Liew, B.E. Darveniza, "**Dynamic Model of Impulse Characteristic of Concentrated Earths**", Proc IEEE, Vol 121, No2, Feb. 1974.
- [3] C. Mazzetti e G. M. Veca, "**Impulse Behavior Of Ground Electrodes**," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems , Vols. 1 de PAS-102, nº 9, pp. 3148 - 3156, Sept. 1983.
- [4] E. E. Oettle, "**A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes**," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, pp. 2020-2029, October 1988.
- [5] J. C. S. Filho, "**Efeito Das Descargas Atmosféricas No Desempenho De Linhas De Transmissão - Modelagens No Domínio Do Tempo E Da Frequência**", Rio de Janeiro, 2006.
- [6] J. He e B. Zhang, "**Soil Ionization Phenomenon around Grounding Electrode under Lightning Impulse**," Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2013 May.
- [7] J. L. C. Lima, "**Avaliação experimental sobre o efeito de ionização do solo devido à injeção de correntes impulsivas**", Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) – UFMG. Belo Horizonte, p-9.2008.
- [8] M. Loboda e Z. Pochanke, "**Current and Voltage Distribution in Earthing. A Numerical Simulation Based on the Dynamic Model of Impulse Soil Conductivity**", 20st ICLP Proceedings, Interlaken, Switzerland, p.3.6P, September, 1990.
- [9] M. Loboda e Z. Pochanke, "**A Numerical Identification of Dynamic Model Parameters of Surge Soil Conduction Based on Experimental Data**", 21st ICLP Proceedings, Berlin, p.139-143, September, 1992.

- [10] M. Loboda e V. Scuka, **"On The Transient Characteristics of Electrical Discharges and Ionization Processes in Soil"**, 23st ICLP Proceedings, Italy, p.539-544, September, 1996.
- [11] L. V. Bewley, **"Theory and tests of the counterpoise"**, Electrical Engineering, vol. 53, n^o 8, pp. 1163 - 1172, Aug. 1934.
- [12] P. L. Bellaschi, **"Impulse and 60-cycle characteristics of driven ground,"** AIEE Transactions, Vol.60, pp. 123-128, March, 1941.
- [13] P. L. Bellaschi, **"Impulse and 60-cycle characteristics of driven ground-II,"** AIEE Transactions, Vol.61, pp. 349-363, June 1942.
- [14] P. L. Bellaschi, **"Impulse and 60-cycle characteristics of driven ground-III,"** AIEE Transactions, Vol.62, pp. 334-345, June 1943.
- [15] S. Visacro Filho, **"Aterramentos Elétricos. Conceitos básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento"**, São Paulo: Artliber Ltda, 2002.
- [16] S. Visacro Filho, **"A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents"**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, n^o 1, pp. 381 - 386, Jan. 2017.
- [17] S. Visacro Filho, **"The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity"**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, n^o 2, pp. 401 - 406, May. 2011.
- [18] S. Visacro Filho e J. A. Soares, **"HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems"**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, n^o 2, pp. 1206 - 1208, April 2005.
- [19] S. Visacro, **"Práticas não Convencionais Para a Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão Frente à Descargas Atmosféricas"**, SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 16 a 21 Outubro 2005.

- [20] S. Visacro, **“Resposta dos aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas”**, Anais do XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro de 2007.
- [21] S. Visacro e A. Soares, Jr., **“Análise do efeito da intensidade de corrente de descarga no comportamento transitório de aterramentos elétricos”**, Anais do SNPTEE, 1995.
- [22] S. Visacro e G. Rosado., **“Response of grounding electrodes to impulsive currents: na experimental evaluation”**, accepted for publication on IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Junho, 2008.
- [23] S. Visacro, **“Sensitivity analysis for the effect of lightning current intensity on the behavior of eathing systems”**, XXII-ICLP Proceedings (International conference on lightning protection). Budapest, Setembro, 1994.
- [24] S. Visacro e C. M. Portela, **“Modelagem de aterramentos elétricos para fenômenos rápidos”**, Anais do XII SNPTEE, Recife, PE, Brasil, Outubro de 1993.
- [25] S. Visacro e C. M. Portela, **“Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transiente phenomena in electric power systems”**, in Proc. 1987 Symp.High Voltage Enginnering, Germany.
- [26] K.Liu, X.Qie, J.He, G.Lu e Q.Xia, **“Estimation of critical electric field of soil ionisation vased on tangential electric field method”**, IET Sci. Meas. Technol., pp. 1-7, February, 2015
- [27]V.L.Coelho, L.F.Venturini, A.Piantini, H.A.D.Almaguer, R.A.Coelho, W.C.Boaventura, J.O.S.Paulino, P.L.Nosali **“Soil Resistivity Behavior under High Current Density Values Using the Energy Balance Method”**, XIII SIPDA (International Symposium on Lightning Protection), Balneário Camboriú, Brasil, Setembro, 2015
- [28] Nor, M.N., Srisakot, S., Griffiths, H., Haddad, A., **“Characterisation of soil ionisation under fast impulse”**, 25th International Conference on Lightning Protection, p.417-422, Setembro, 2000.
-

- [29] Nor, M.N., **“Review: Soil electrical characteristics under high impulse currents”**, Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.48, o.826-829, Novembro, 2006.
- [30] Nor, M.N, Idris, N.A., Ahmad H., **“Electrical Properties of dry soil under high impulse currents”**, Journal of Electrostatics, Vol.65, p.500-505, Julho, 2007.
- [31] Nor, M.N., Griffiths, H., Haddad, A., **“Determination of threshold electric field E_c of soil under high impulse currents”**, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL.20, No.3, July, 2005.
- [32] CIGRE Working Group on Lightning, Paris, France, **“Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines”**, in CIGRE, Oct. 1991.
- [33] Korsuntcev, A.V. , **“Application of the theory of similitude to the calculation of concentrated earth electrodes”**, Elektrichestvo, No.5, May 1958, pp 31-35.
- [34] Manna, T.K., Chowdhuri, P, **“Generalised equation of soil critical electric field E_C based on impulse tests and measured soil electrical parameters”**, IET Gener. Transm. Distrib., 2007, pp. 811–817.
- [35] Corrêa, A.D.F., Visacro, S, **“Analysis and modeling of soil ionization under uniform electric field”**, 9th International Conference on Grounding & Lightning Pysics and Effects, June 2021.
- [36] Viana, I.O., Visacro, S, **“Theoretical-experimental analysis of the occurrence of soil ionization by high intensity impulsive currents in order to evaluate the effects on the performance of electrical ground subject to non-uniform electric field”**, 9th International Conference on Grounding & Lightning Pysics and Effects, June 2021.
- [37] F. E. M. Cota e S. Visacro, **“Experimental Investigation on the Evolution of the Soil Ionization Effect”**, XIV International Symposium on Lightning Protection, 2nd – 6th October 2017.

[38] Corrêa, A.D.F., Visacro, S, **“Investigação da ionização do solo submetido a campo elétrico uniforme: Análise de dados experimentais e modelagens”**, Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) – UFMG. Belo Horizonte, 2020.

[39] Berger K, Anderson R. B., and Kroninger H., **“Parameters of Lightning Flashes”**, *Electra*, n.41, pp. 23-37, 1975

[40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60060-1: **Técnicas de ensaios elétricos de alte tensão. Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio.** 2013