

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 1178

**INVESTIGAÇÃO DA IONIZAÇÃO DO SOLO SUBMETIDO A CAMPO  
ELÉTRICO UNIFORME: ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS E  
MODELAGENS**

**Allan Douglas Ferreira Corrêa**

DATA DA DEFESA: 20/02/2020

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**INVESTIGAÇÃO DA IONIZAÇÃO DO SOLO SUBMETIDO A  
CAMPO ELÉTRICO UNIFORME: ANÁLISE DE DADOS  
EXPERIMENTAIS E MODELAGENS**

Allan Douglas Ferreira Corrêa

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.

Orientador: Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte – MG

Fevereiro de 2020

C824i

Corrêa, Allan Douglas Ferreira.

Investigação da ionização do solo submetido a campo elétrico uniforme [recurso eletrônico] : análise de dados experimentais e modelagens / Allan Douglas Ferreira Corrêa. - 2020.

1 recurso online (76 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Silvério Visacro Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 66-76.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Ionização - Teses. 3. Modelagem - Teses. 4. Campos elétricos - Teses. I. Visacro Filho, Silvério. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

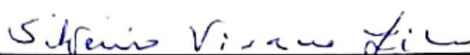
**"Investigação da Ionização do Solo Submetido a Campo Elétrico Uniforme: Análise de Dados Experimentais e Modelagens"**

**Allan Douglas Ferreira Corrêa**

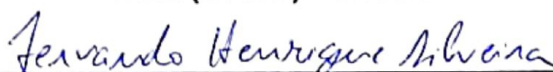
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2020.

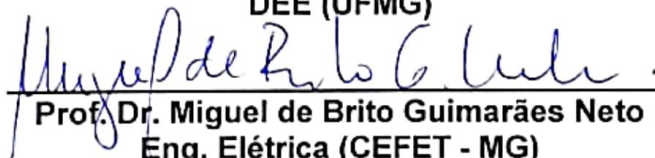
Por:



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



Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Miguel de Brito Guimarães Neto  
Eng. Elétrica (CEFET - MG)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força e consolo por estar longe da minha família em busca de uma carreira profissional melhor.

Agradeço aos meus pais e familiares por terem me apoiado e me dado suporte para trilhar o caminho até aqui.

Ao professor Silvério Visacro Filho por ter me acolhido e me guiado intelectualmente para a concepção desta dissertação de mestrado, bem como a Felipe Eduardo Moreira Cota por todo suporte em relação ao banco de dados do LRC.

Aos grandes amigos de repúblicas que fiz em Belo Horizonte, Humberto Leônidas, Lucas Galvão, Adriano Mendes José Junior, Pedro Augusto, Francisco Sobrinho e todos os outros pelo companheirismo e pelos momentos inesquecíveis.

Aos companheiros de trabalho do LRC e colegas de turma da UFMG pela parceria e ajuda Johnny Souza, Frederico Santos, Maiza Simões, Sany Alves e João Paulo.

## RESUMO

Este trabalho de dissertação de mestrado apresenta os resultados das análises referentes ao banco de dados de solos do LRC no que concerne aos ensaios realizados em cuba plana, sob condição de campo uniforme, com o objetivo de investigar o campo elétrico crítico de ionização do solo quando submetido a correntes características de descargas atmosféricas.

A literatura acerca do tema apresenta alguns valores de campo elétrico para o qual se daria o início do processo de ionização do solo. Alguns autores como (OETTLÉ, 1988) e (MOUSA, 1994) estabelecem os valores de 1 MV/m e 0,3 MV/m respectivamente. Já o (CIGRE, 1991) adota como valor de referência 0,4 MV/m. Tendo em vista a disparidade de valores, esta pesquisa objetiva contribuir com mais informações acerca do tema.

O banco de dados analisado compreende ensaios de alta tensão em amostras de 15 solos de resistividades e umidades diferentes, para condição de campo elétrico uniforme e não uniforme. Para o estudo do campo elétrico crítico é usual utilizar cubas de placas paralelas, que possibilitam a aplicação de campo uniforme nas amostras de solo. Quando esta amostra é submetida a ondas impulsivas, um elevado campo elétrico pode se estabelecer, provocando uma eventual disrupção naquele meio.

As análises mostraram que, na faixa de resistividade considerada no banco de dados (100 a 10.000  $\Omega$ .m), o campo elétrico crítico de ionização do solo varia em torno de 250 a 300 kV/m para solos de até 500  $\Omega$ .m, e de 300 a 400 kV/m para o restante da faixa de resistividade considerada. Desenvolveu-se também metodologias para avaliar a ionização das amostras, uma através da energia acumulada dos impulsos aplicados e a outra baseada em curvas de campo elétrico.

**Palavras-chave:** Ionização do solo, Modelagem, Resistividade do solo, Campo elétrico crítico.

---

## ABSTRACT

This master's thesis presents the results of the analyses related to the LRC soil database with regard to the tests carried out in a flat vat, under uniform field condition, in order to investigate the critical electrical field of soil ionization when subjected to lightning-characteristic currents.

The literature on the topic presents some values of electric field for which the beginning of the process of soil ionization would take place. Some authors such as (OETTLÉ, 1988) and (MOUSA, 1994) establish the values of 1 MV/m and 0.3 MV/m respectively. On the other hand, (CIGRE, 1991) adopts 0.4 MV/m as a reference value. In view of this disparity in values, this research aims to contribute with more information on this topic.

The analyzed database comprises high voltage tests on samples of 15 soils of different resistivities and humidities, for uniform and non-uniform electric field condition. For the study of the critical electric field, it is usual to use parallel plate vats which allow the application of a uniform field in soil samples. When this sample is subjected to impulsive waves, a high electric field can be established, causing a possible disruption in that medium.

The analyzes showed that, in the resistivity range considered in the database (100 to 10,000  $\Omega$ .m), the critical electric field of soil ionization varies around 250 to 300 kV/m for soils up to 500  $\Omega$ .m, and from 300 to 400 kV/m for the rest of the considered resistivity range. Methodologies were also developed to evaluate the ionization of the samples, one through the accumulated energy of the applied impulses and the other based on electric field curves.

**Keywords:** Soil Ionization, Modeling, Soil resistivity, Critical electric field.

---

---

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Relevância e Motivação .....	1
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Metodologia .....	2
1.4 Organização do Texto .....	3
<b>2. O Efeito da Ionização do solo .....</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução .....	5
2.2 Aspectos básicos realçados na Literatura .....	5
2.3 Intensidade e Composição da Corrente Impulsiva.....	7
2.4 Conclusão.....	9
<b>3. O Banco de Dados de Solos do LRC .....</b>	<b>10</b>
3.1 Introdução .....	10
3.2 A concepção do banco de dados .....	10
3.3 Cuba de ensaio .....	11
3.4 Circuito gerador de impulso .....	11
3.5 Tipos de solo .....	12
3.6 Tipos de impulso.....	12
3.6.1 O impulso pleno .....	12
3.7 Estrutura do banco de dados .....	14
3.8 Conclusão.....	15
<b>4. Tratamento dos dados Referente aos Impulsos Aplicados em Cuba Plana</b>	<b>16</b>
4.1 Introdução .....	16
4.2 Aquisição e filtragem do sinal .....	16
4.3 Deslocamento no vetor de tempo.....	20
4.4 Velocidade de aquisição e tratamento dos dados.....	21

---



---

4.5	Conclusão.....	22
<b>5.</b>	<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>23</b>
5.1	Introdução .....	23
5.2	Perfil de tensão e corrente nas amostras .....	23
5.3	Determinação do ponto de ruptura das amostras .....	26
5.4	Avaliação do nível de tensão e corrente para as curvas onde houve ruptura..	27
5.5	Campo elétrico e impedância impulsiva nas amostras .....	30
5.6	Evolução do processo de ionização .....	35
<b>6.</b>	<b>Metodologias de Avaliação da ionização do solo .....</b>	<b>43</b>
6.1	Metodologia para avaliação da ionização através da energia acumulada.....	43
6.1.1	A base do método.....	43
6.1.2	Cálculo do CIEF.....	46
6.1.3	Cálculo da energia acumulada .....	49
6.1.4	Modelo genérico para curvas de referência de energia acumulada .....	51
6.1.5	Exemplo de aplicação .....	54
6.2	Extensão do modelo para o campo elétrico .....	55
6.2.1	Exemplo de aplicação .....	57
<b>7.</b>	<b>Conclusões e Proposta de Continuidade.....</b>	<b>59</b>
7.1	Conclusões .....	59
7.1.1	O campo elétrico crítico em condição de campo uniforme .....	59
7.1.2	Modelos de avaliação da ionização por curva de energia acumulada e por campo elétrico.....	60
7.2	Propostas de Continuidade.....	61
	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>62</b>
	<b>Anexo I – Banco de dados de solos para condição de campo uniforme.....</b>	<b>66</b>
	<b>Anexo II – Curvas CE-T .....</b>	<b>70</b>
	Solo 1 – 1200 $\Omega$ .m.....	70

---

---

Solo 2 - 276 $\Omega$ .m.....	70
Solo 3 – 1450 $\Omega$ .m.....	70
Solo 4 – 400 $\Omega$ .m.....	70
Solo 5 – 700 $\Omega$ .m.....	71
Solo 6 – 720 $\Omega$ .m.....	71
Solo 7 - 100 $\Omega$ .m.....	72
Solo 8 – 440 $\Omega$ .m.....	72
Solo 9 – 500 $\Omega$ .m.....	72
Solo 10 – 100 $\Omega$ .m.....	72
Solo 11 – 750 $\Omega$ .m.....	73
Solo 12 – 5950 $\Omega$ .m.....	73
Solo 13 – 5460 $\Omega$ .m.....	73
Solo 14 – 2500 $\Omega$ .m.....	73
Solo 15 - 10000 $\Omega$ .m.....	73
<b>Anexo III – Curvas de Energia Acumulada .....</b>	<b>74</b>
Solo 1 – 1200 $\Omega$ .m.....	74
Solo 2 - 276 $\Omega$ .m.....	74
Solo 3 – 1450 $\Omega$ .m.....	74
Solo 4 – 400 $\Omega$ .m.....	74
Solo 5 – 700 $\Omega$ .m.....	74
Solo 6 – 720 $\Omega$ .m.....	74
Solo 7 - 100 $\Omega$ .m.....	75
Solo 8 – 440 $\Omega$ .m.....	75
Solo 9 – 500 $\Omega$ .m.....	75
Solo 10 – 100 $\Omega$ .m.....	75
Solo 11 – 750 $\Omega$ .m.....	75
Solo 12 – 5950 $\Omega$ .m.....	75

---

Solo 13 – 5460 $\Omega$ .m.....	76
Solo 14 – 2500 $\Omega$ .m.....	76
Solo 15 - 10000 $\Omega$ .m.....	76

---

# 1. Introdução

## 1.1 Relevância e Motivação

A descarga atmosférica é um fenômeno natural que promove a transferência de cargas positivas ou negativas entre nuvens, entre nuvem e o solo e entre nuvem e ionosfera. Destas, a que mais resulta em danos para o sistema elétrico é a descarga nuvem-solo (VISACRO, 2005).

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição, são provocados por raios. Quando há incidência direta, a elevada amplitude da corrente resulta em sobretensões que podem levar ao desligamento, causando enormes prejuízos aos centros de carga e às concessionárias de energia.

A prática de se aterrar os componentes elétricos apresenta vital importância quanto à segurança de pessoas, animais e equipamentos, tendo em vista que os eventuais surtos que venham a percorrer o sistema elétrico podem ser desviados para a terra. O aterramento é visto pela corrente de descarga como uma impedância. Quanto menor for o valor de tal impedância, menor será a sobretensão resultante no sistema elétrico. Daí a necessidade da busca por técnicas para melhorar o desempenho dos aterramentos em sistemas de potência, aumentando assim a sua confiabilidade.

Um dos aspectos de interesse no comportamento dos aterramentos elétricos frente às descargas impulsivas é a intensidade da corrente de descarga que, ao percorrer eletrodos concentrados, pode provocar a ionização do solo circunvizinho. Tal efeito pode resultar na diminuição do valor da impedância de aterramento (VISACRO, 2007). Atualmente há diversos trabalhos na literatura abordando o tema, porém não há um consenso quanto à caracterização do fenômeno em relação ao campo elétrico crítico para início e sustentação do fenômeno.

Trabalhos como o de Oettlé (OETTLÉ, 1988) e (MOUSA, 1994) estabelecem como campo elétrico crítico para início do fenômeno de ionização os valores de 1 MV/m e 0,3 MV/m respectivamente, porém o trabalho de (LIU, THEETHAYI, *et al.*, 2003) afirma existir uma

resistividade residual no solo quando este é submetido a uma corrente impulsiva, criando um comportamento dinâmico na região de ionização ao redor do eletrodo, o que alteraria o valor do campo elétrico crítico numa faixa de 0,1 a 1,5 MV/m.

Tendo em vista a falta de consenso entre os diversos autores a respeito do tema, há a necessidade de se desenvolver mais pesquisas que complementem a literatura e forneçam novas informações quanto ao início do processo de ionização do solo. Para subsidiar tais pesquisas, foi desenvolvida uma ampla base de dados a partir de ensaios experimentais em diferentes solos para caracterização da condição de sua ionização (COTA e VISACRO, 2017). Os experimentos foram conduzidos no *Lightning Research Center* (LRC), situado na Universidade Federal de Minas Gerais, incluindo ensaios laboratoriais em condições de campo elétrico uniforme, cujos resultados são apresentados nesta dissertação de mestrado.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a análise do efeito de ionização do solo, em condições de campo elétrico uniforme e de magnitude comparável àqueles campos gerados por correntes de descargas atmosféricas nas proximidades do eletrodo de aterramento.

Tal investigação foi realizada a partir da análise de uma vasta base de dados experimentais desenvolvida no LRC, com ensaios de alta tensão realizados em amostras de diferentes solos e diferentes unidades. Foram considerados os resultados de ensaios realizados em campo elétrico uniforme, adquiridos pelo uso de cuba plana, a fim de investigar parâmetros como o campo elétrico crítico e energia acumulada até a ruptura das amostras de solo. Foi avaliada, também, a forma de inclusão do efeito nas modelagens de aterramentos elétricos.

## 1.3 Metodologia

O ponto de partida do trabalho se baseia na análise dos resultados de sistemáticos ensaios experimentais desenvolvidos por (COTA e VISACRO, 2017) que, considerando grande diversidade de solos em diferentes condições de umidade, reproduzem o efeito de ionização em amostras de solo, buscando desenvolver interpretação teórica dos resultados para entendimento dos processos físicos envolvidos, com abordagem macroscópica.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica que contempla os aspectos já discutidos na literatura científica referentes à ionização do solo. Em seguida foram analisados os dados experimentais já desenvolvidos no LRC a partir dos ensaios de alta tensão em amostras de solo. Buscaram-se interpretações e entendimento dos processos físicos envolvidos na ocorrência de ionização do solo e da 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 desta dissertação está estruturado em 7 capítulos e 2 anexos os quais são descritos abaixo.

O **Capítulo 1** é o resumo estrutural da dissertação, apresentando a relevância, objetivo e metodologia abordada na pesquisa.

O **Capítulo 2** aborda especificamente o fenômeno da ionização do solo, abrangendo a literatura da área e algumas considerações.

O **Capítulo 3** é dedicado ao banco de dados do LRC, detalhando o processo de construção do mesmo por (COTA e VISACRO, 2017), além de especificar detalhes referentes aos ensaios em campo uniforme.

O **Capítulo 4** trata da computação utilizada para processamento dos dados referentes aos ensaios em campo uniforme, bem como sua filtragem, alinhamento no tempo e metodologia utilizada para determinação do ponto de ruptura das amostras de solo.

O **Capítulo 5** é o mais extenso dentre os demais e aborda a análise do campo elétrico nas amostras de solo, bem como a evolução do processo de ionização, fazendo o levantamento de características individuais, tais como impedância impulsiva, campo elétrico máximo, corrente máxima, dentre outros.

No **Capítulo 6** é apresentada uma metodologia para avaliação da ionização nas amostras através da energia acumulada das ondas impulsivas aplicadas; uma tentativa de expansão deste modelo para agregar campo elétrico e resistividade do solo também é apresentada. A adaptação do método da curva V-t (IEEE, 1985) para impulsos aplicados no solo é mais uma abordagem deste capítulo.

Finalmente o **Capítulo 7** apresenta as conclusões acerca da pesquisa desenvolvida bem como sugestões para trabalhos futuros.

Posteriormente têm-se uma sessão específica para as **Referências Bibliográficas** e, em seguida, a sessão de **Anexos**. O **Anexo I – Banco de dados de solos para condição de campo uniforme** trata das características individuais de cada resistividade de solo ensaiado. O **Anexo II – Curvas CE-T** ilustra as curvas campo elétrico em função do tempo (CE-T) para todos os solos e suas condições de umidade. E o **Anexo III – Curvas de Energia Acumulada** apresenta as curvas de energia acumulada para os solos analisados em condição de umidade original e impulsos com frente de onda longos.

# 2. O Efeito da Ionização do solo

## 2.1 Introdução

Neste capítulo, não são discutidos os conceitos relacionados ao aterramento elétrico, já que estes foram objeto de vários trabalhos conduzidos no LRC, notadamente os conceitos relacionados ao comportamento do aterramento submetido a correntes de descarga atmosféricas. Para conceitos referentes a aterramento elétrico, sugere-se a leitura do livro *Aterramentos Elétricos - Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento* de (VISACRO, 2002).

O foco deste trabalho está centrado no efeito da ionização do solo, o qual ocorre especificamente na condição de injeção de correntes muito elevadas em aterramento concentrados (comprimento curto de eletrodos). Esta condição ocorre notadamente quando da incidência de descargas atmosféricas em sistemas elétricos e as correspondentes correntes fluem pelos eletrodos de aterramento do sistema.

## 2.2 Aspectos básicos realçados na Literatura

Um dos pontos fundamentais relacionados à ionização do solo consiste no valor a ser adotado como campo elétrico crítico de referência para o fenômeno. Duas abordagens tem sido desenvolvidas na literatura para levantamento desse valor: ensaios em condição de campo elétrico uniforme, com o emprego de cubas planas, e ensaios em condição de campo elétrico com simetria radial, obtido por meio de ensaios em cubas coaxiais preenchidas com solo.

Na década de 20, iniciaram-se os estudos do fenômeno com o trabalho de (TOWN, 1928) no qual foi observado um comportamento não linear do sistema de aterramento quando



este era submetido a esforços impulsivos de corrente. Verificou-se neste o fenômeno da ionização do solo circunvizinho aos eletrodos de aterramento.

Nos anos seguintes, diversos autores desenvolveram trabalhos experimentais para investigação do fenômeno observado por Town. Bellaschi e colaboradores desenvolveram um trabalho que consistia na aplicação de ondas impulsivas em eletrodos de aterramento em campo aberto e chegaram à conclusão de que o campo elétrico para início da ionização estava na faixa de 120 a 420 kV/m (BELLASCHI, 1941), (BELLASCHI, ARMINGTON e SNOWDEN, 1942).

Em 1988, dois trabalhos merecem relevância, (OETTLÉ, 1988) e (VISACRO e PORTELA, 1988). O primeiro trabalho descreve o resultado da aplicação de ondas impulsivas em eletrodos concentrados visando investigar o processo de ruptura total de amostras de solo, bem como sua ionização. Oettlé afirma que a impedância de impulso é governada por um processo complexo que envolve o efeito corona e *streamers*<sup>1</sup> e que o campo elétrico crítico de ionização deve ser tomado como sendo 1 MV/m para todas as condições de solo, corrente e eletrodos. Já no segundo trabalho, Visacro e Portela desenvolveram um trabalho analisando diversos tipos de solo para investigar suas características quanto a sua capacidade dielétrica e de condução na faixa de frequências predominantes para fenômenos transientes em sistemas elétricos de potência. Foi constatado que as correntes de condução e capacitiva no solo variam com o aumento da frequência.

Em 1994, Mousa publicou um trabalho referente aos possíveis mecanismos que levariam à ruptura do solo em condição de ionização, promovida por descargas atmosféricas. O estudo foi baseado em eletrodos concentrados nos quais foi estabelecido o valor de 300 kV/m para início do fenômeno (MOUSA, 1994).

Já em 1995, Visacro e Soares desenvolveram um importante estudo ao analisar a influência da intensidade da corrente de descargas atmosféricas no comportamento de aterramentos elétricos. Os autores basearam sua investigação em experimentos realizados em cuba coaxial preenchidas com solo real de diversos tipos e umidades. A contribuição deste trabalho apresenta o cômputo do fenômeno de ionização do solo através do aumento do raio

---

<sup>1</sup> Canais ionizados formados pela injeção de correntes impulsivas que determinam um acentuado campo elétrico ao seu redor.

---

efetivo dos eletrodos, além de ficar evidente a importância da corrente capacitiva no comportamento do aterramento, para fenômenos rápidos (VISACRO e SOARES, 1995).

Algum tempo mais tarde, em 1996, Loboda e Scuka desenvolveram um trabalho para avaliação do campo elétrico crítico de ionização do solo a partir da injeção de ondas impulsivas de corrente em eletrodos de aterramento. Os valores de campo elétrico crítico foram estimados para três solos diferentes através de dois métodos de cálculo com utilização de cubas coaxiais. Foi constatado que os formatos de onda antes e depois da ruptura de solo eram similares para ambas polaridades de corrente (positiva e negativa) e o campo elétrico para ionização foi estimado na faixa de 200 a 1000 kV/m (LOBODA e SCUKA).

Em 2004, Yaqing Liu desenvolveu um modelo que leva em consideração o efeito da ionização do solo devido a correntes de descargas atmosféricas. Neste modelo, presumiu-se que a região de ionização do solo retenha 7% da sua resistividade de pré-ionização. O modelo proposto pelos autores também é utilizado para estudar o comportamento transitório de eletrodos de aterramento em solo estratificado (LIU, THEETHAYI, *et al.*, 2004).

Em 2013, Jinliang He e Bo Zhang desenvolveram um trabalho muito interessante relacionado à observação do fenômeno da ionização do solo através de imagens obtidas por filmes de raio X. Foi utilizada uma cuba cúbica de material transparente onde foram testados três tipos de misturas, miçanga de vidro umedecidas com água salgada, areia seca e areia molhada. Os autores concluíram que a ionização em areia molhada é muito mais forte do que na areia seca e, o mesmo vale para miçangas de vidro maiores em relação às de tamanho menor, isso devido ao maior espaço de ar entre elas (HE e ZHANG, 2013).

Assim, foi visto nesta sessão uma breve síntese de algumas referências bibliográficas que investigam o fenômeno da ionização do solo, e que tentam avaliar valores de campo elétrico para início de tal fenômeno. O trabalho experimental de (COTA e VISACRO, 2017) no LRC, desenvolveu um banco de dados que agrega ensaios em alta tensão em diversas amostras de solos cuja faixa de resistividade é a maior já vista na literatura, abrangendo solos de 100  $\Omega$ .m a 10000  $\Omega$ .m. Esta massa de dados é a fonte na qual baseou-se as investigações desta dissertação.

### **2.3 Intensidade e Composição da Corrente Impulsiva.**

O efeito da ionização do solo é semelhante ao efeito corona em linhas de transmissão, como já fora observado por Oettlé em 1988. No ar, o efeito da intensidade elevada do campo

---

elétrico da linha, estabelece uma região de corona praticamente homogênea ao redor do condutor, devido à natureza renovável do ar circunvizinho. Já no solo, observam-se canais de plasma conduzindo a corrente impulsiva que percorre o eletrodo de aterramento, conforme mostrado no experimento de (HE e ZHANG, 2013).

Dependendo da área de dissipação do eletrodo e da resistividade do solo, a densidade de corrente que percorre o eletrodo de aterramento será a soma de uma parcela condutiva e uma parcela capacitiva no tempo como mostra a equação (2.1).

$$J_T = J_C + J_D \quad (2.1)$$

Onde  $J_T$  é a densidade de corrente total,  $J_C$  é a parcela condutiva,  $J_D$  é a parcela capacitiva. A densidade de corrente condutiva ( $J_C$ ) pode ser dada pelo produto entre a condutividade elétrica do meio ( $\sigma$ ) e o campo elétrico ( $E$ ), enquanto, a corrente de deslocamento (capacitiva) é dada pela taxa de variação no tempo da densidade do fluxo elétrico ( $dD/dt$ ) assim, a equação (2.1) pode ser reescrita na forma da equação (2.2) no domínio do tempo.

$$J_T = \sigma E + \frac{dD}{dt} \quad (2.2)$$

Uma vez que a densidade do fluxo elétrico ( $D$ ) é diretamente proporcional à permissividade elétrica do meio ( $\epsilon$ ) e ao campo elétrico ( $E$ ) então, pode-se expressar o campo elétrico no solo pela equação (2.3) no domínio da frequência.

$$E = \frac{J_T}{(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (2.3)$$

Onde  $\omega$  é a frequência angular, e  $\sigma$  é a condutividade elétrica do meio. Observando a referida equação, nota-se que um aumento na densidade de corrente injetada no eletrodo de aterramento resultará em um conseqüente aumento do campo elétrico. Este campo pode se tornar tão intenso que pode ionizar o solo circunvizinho. A esse valor mínimo de campo elétrico dá-se o nome de campo elétrico crítico ( $E_C$ ) para início do processo de ionização do solo.

Autores como (BELLASCHI, ARMINGTON e SNOWDEN, 1942) e (OETTLÉ, 1988) propuseram estudos para estimar o campo elétrico crítico para diferentes resistividades de solo. Os valores para o campo elétrico crítico podem ser verificados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Campo elétrico crítico para diferentes resistividades de solo.

Referência	Resistividade ( $\Omega.m$ )	Campo Elétrico Crítico para início do fenômeno (kV/m)
(BELLASCHI, ARMINGTON e SNOWDEN, 1942)	75	220
	85	127
	100	300
	300	425
(MOUSA, 1994)	50-1000	300
(OETTLÉ, 1988)	50-470	1000
(LOBODA e SCUKA)	40-2150	200-1000
(CIGRE, 1991)	todas	400

Considerando-se os resultados obtidos de ensaios laboratoriais apresentados na literatura técnica, e resumidos na Tabela 2.1, valores de campo elétrico crítico em torno de algumas centenas de kV/m são típicos para a faixa de resistividade considerada. É usual adotar-se 300 kV/m (MOUSA, 1994) e 400 kV/m (CIGRE, 1991) como valores de referência para ionização do solo.

## 2.4 Conclusão

O presente capítulo abordou aspectos relacionados à ionização do solo com breve literatura e parâmetros de interesse. A análise da literatura mostra que não há um consenso ainda sobre um valor fixo do campo elétrico crítico para início do processo de ionização. Uma análise mais detalhada evidencia um comportamento dinâmico do fenômeno. Os capítulos subsequentes desta dissertação analisam formas de quantificar esse fenômeno.

# 3. O Banco de Dados de Solos do LRC

## 3.1 Introdução

No laboratório de alta tensão do LRC, (COTA e VISACRO, 2017) desenvolveram um banco de dados que reúne solos de diversas resistividades e umidades. Ensaios com ondas impulsivas foram realizadas em condições de campo uniforme e não-uniforme resultando em um massivo conjunto de dados a serem analisados. Neste capítulo, são vistos alguns detalhes deste banco.

## 3.2 A concepção do banco de dados

O banco de dados de solos do LRC foi construído por (COTA e VISACRO, 2017) através de ensaios experimentais realizados em 15 tipos de solos de resistividades e características diferentes, com o objetivo de investigar a evolução do efeito de ionização do solo. A síntese do processo de construção é descrita abaixo.

- Extração das amostras: a busca pelos solos foi feita de forma visual e em diferentes regiões de João Monlevade/MG. A resistividade do solo era medida pelo Método de Frank-Wenner antes da extração das amostras. Um total de 15 solos de diferentes resistividades foram coletados totalizando uma massa de 6000 kg;
- Preparação das amostras: Os solos eram armazenados em recipientes hermeticamente fechados. Utilizou-se água destilada para fazer a variação da umidade das amostras em 5 % e 10 % em relação a sua massa;

- Ajuste do tempo de frente das ondas impulsivas: o gerador de impulso do LRC tem capacidade para 600 kV. Para cada tipo de solo e de umidade, era configurado um tempo de frente de 1,2  $\mu$ s e 4,5  $\mu$ s;
- Realização dos ensaios: duração média de 6 horas para realização dos ensaios em cada amostra de solo;
- Estruturação do banco: as medições são realizadas pelo próprio sistema de aquisição de dados do gerador. Este sistema salva os arquivos em formato *.txt* e estes são salvos um a um pelo usuário. O tamanho total do banco é de 33,1 GB.

### 3.3 Cuba de ensaio

O banco de dados desenvolvido, agrega ensaios para campo elétrico uniforme e não uniforme. Nesta dissertação são abordados apenas os ensaios referentes ao campo uniforme. Para prover campo uniforme às amostras de solo, foi utilizada uma cuba de ensaio conforme mostra a Figura 3.1. Os discos têm um raio de 19,5 cm e estão separados por uma distância de 4,5 cm. A cuba é feita de PVC<sup>2</sup>, que configura o cilindro isolante que separa as duas chapas metálicas de faces opostas nas quais é aplicada a tensão para prover campo uniforme entre elas.



Figura 3.1 - Cuba plana (COTA e VISACRO, 2017).

### 3.4 Circuito gerador de impulso

As descargas atmosféricas são simuladas em escala reduzida a partir de geradores de alta tensão comerciais. O equipamento disponível para ensaio consiste no gerador Haefely de 600

---

<sup>2</sup> O policloreto de vinila é o tipo de plástico mais comum no dia-a-dia.

kV do Laboratório de Ensaios e Desenvolvimento de Produto - LDP do LRC, capaz de gerar ondas com tempos de frente representativos de descargas atmosféricas. A Figura 3.2 ilustra o circuito simplificado do gerador e esquema de medição.

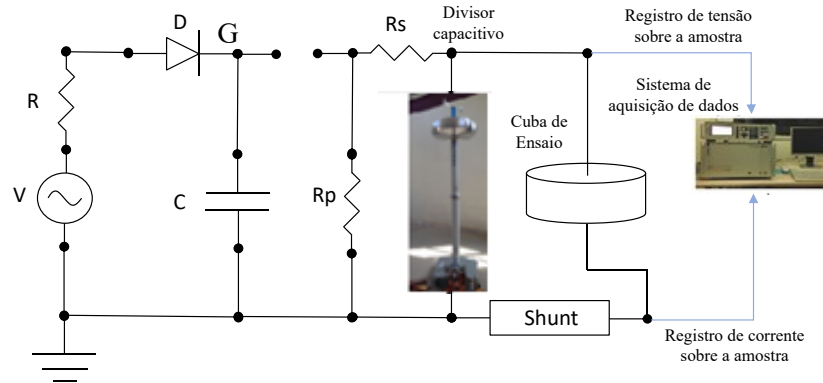


Figura 3.2 - Circuito simplificado do gerador de impulso. Adaptado de (COTA e VISACRO, 2017)

Onde:

- $V$  = Fonte de tensão;
- $R$  = Resistor série;
- $C$  = Capacitor;
- $D$  = Retificador;
- $G$  = Centelhador (*Gap*);
- $R_p$  = Resistor de cauda;
- $R_s$  = Resistor de frente.

### 3.5 Tipos de solo

A resistividade das amostras dos 15 tipos de solo, compreende uma faixa que vai desde 100  $\Omega.m$  até 10000  $\Omega.m$  com variação de umidade, sendo elas a natural do solo coletado, 5% e 10 % (porcentagem de água adicionada em relação a massa da amostra de solo). A descrição dos solos referentes ao campo uniforme e sua organização no banco de dados pode ser consultada no Anexo I – Banco de dados de solos para condição de campo uniforme.

### 3.6 Tipos de impulso

#### 3.6.1 O impulso pleno

O impulso pleno é utilizado para simular descargas atmosféricas, geralmente incidentes em linhas de transmissão, que se propagam por longos caminhos. Este impulso causa grandes

oscilações de tensão devido a sua maior duração. No LRC, este tipo de onda foi utilizado para investigação do fenômeno da ionização nos solos constantes no Anexo I – Banco de dados de solos para condição de campo uniforme.

A Figura 3.3 exemplifica os parâmetros de um impulso pleno.  $T_1$  é o tempo de frente,  $T_2$  é o tempo de meia onda (tempo necessário para a onda atingir 50% da sua amplitude) e  $T'$  é o tempo necessário para o impulso atingir 30 % da sua amplitude ( $T_{30}$ ).

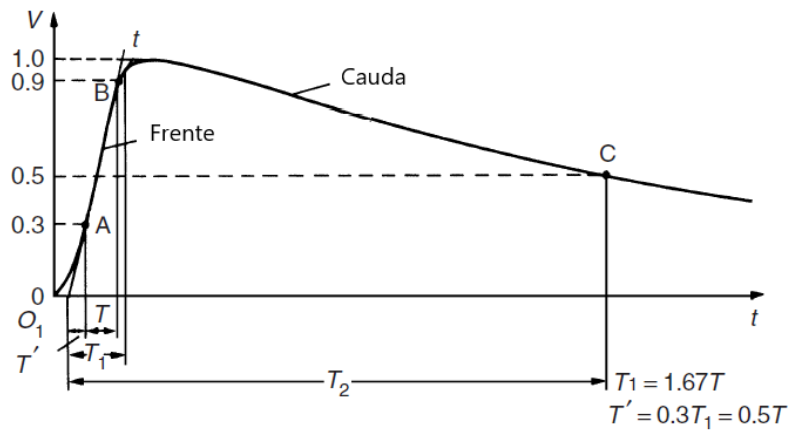


Figura 3.3 - Impulso pleno. Adaptado de (KUFFEL, ZAENGL e KUFFEL, 2000).

Na tabela de dados do Anexo I – Banco de dados de solos para condição de campo uniforme, encontram-se todos os tempos de frente utilizados nos ensaios em cuba plana. Foram analisadas nesta dissertação tanto as ondas rápidas, como as ondas lentas. Essas ondas são exemplificadas na Figura 3.4, onde  $t_f$  é o tempo de frente.

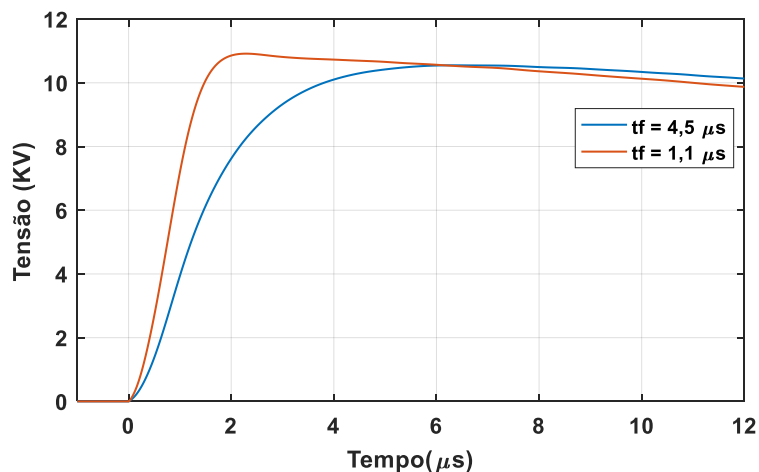


Figura 3.4 – Exemplo de impulso aplicado nas amostras de solo.



### 3.7 Estrutura do banco de dados

Os arquivos do banco de dados estão organizados em diretórios e subdiretórios de acordo com o número do solo e umidade. A Figura 3.5 exemplifica esta estrutura.

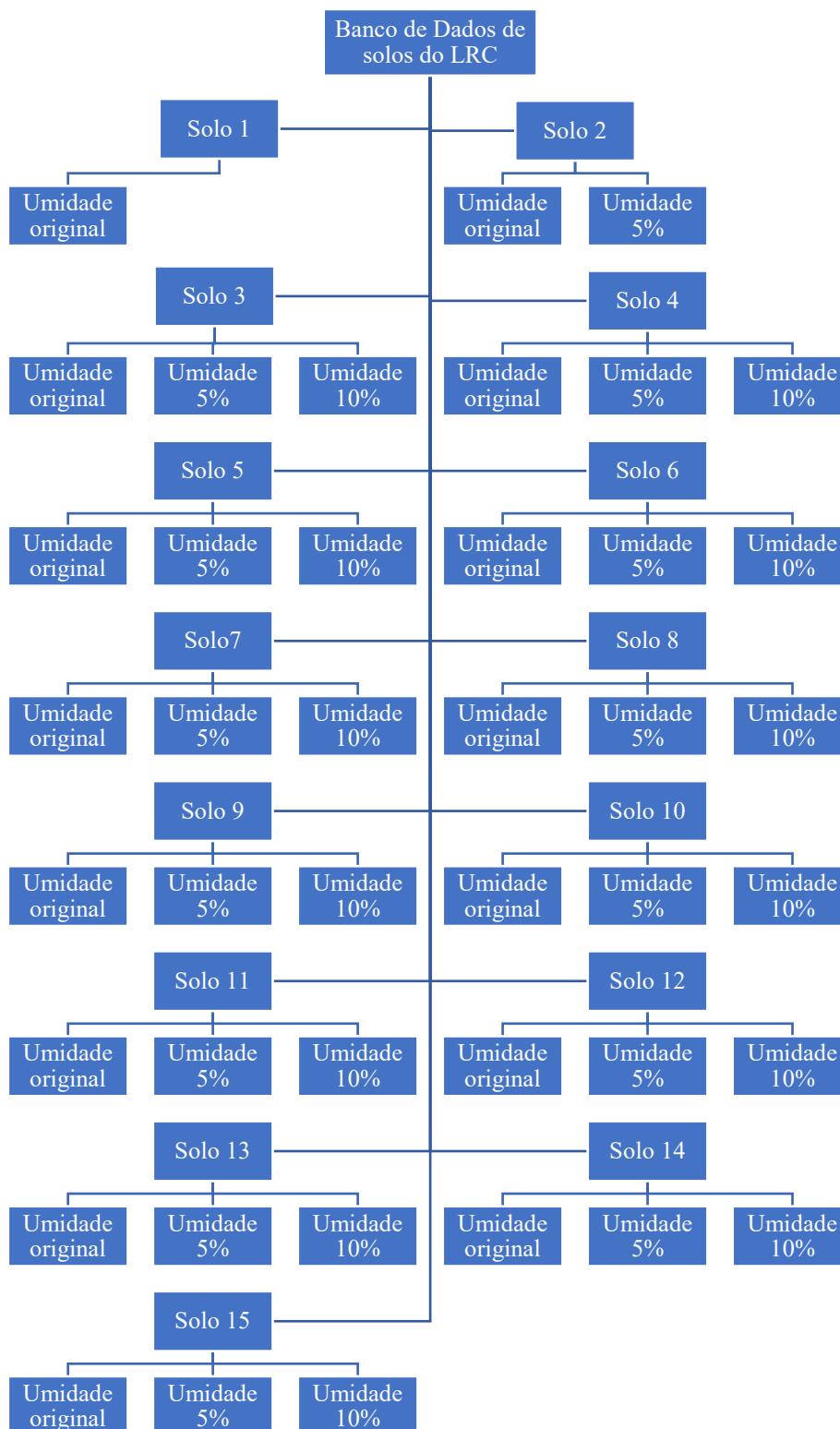


Figura 3.5 – Diretórios do banco de dados.

### **3.8 Conclusão**

Neste capítulo, foram vistos detalhes referentes ao banco de dados de solo do LRC e algumas considerações sobre o circuito gerador de impulso e detalhes referentes às ondas impulsivas de descarga aplicadas nas amostras de solo.

Uma lista de diretórios foi construída a fim de se visualizar a estrutura e organização dos dados. Observando-se a Figura 3.5, um adendo deve ser feito em relação aos solos 1 e 2 onde, para o primeiro solo, estão faltando os dados referentes às umidades 5% e 10% e, para o solo 2, estão faltando os dados referentes à umidade 10%. A falta destes dados deve-se a problemas técnicos enfrentados durante os ensaios para estas amostras. Segundo informações do idealizador do banco (COTA e VISACRO, 2017), uma falta de energia elétrica provocou a perda destes dados.

No próximo capítulo são abordados a mineração e o refinamento dos dados deste banco.

# 4. Tratamento dos dados Referente aos Impulsos Aplicados em Cuba Plana

## 4.1 Introdução

Muitos são os trabalhos na literatura que abordaram a ionização do solo, alguns dos mais relevantes foram mencionados no Capítulo 2. Porém, nenhum destes possui um banco de dados tão diversificado e extenso em ensaios, tal qual o do LRC, que compreende um vasto volume de conjuntos de ondas de tensão e corrente para fins de investigação do fenômeno da ionização do solo. Neste capítulo, são tratados os dados do banco referente ao campo uniforme e todo o seu processamento computacional.

## 4.2 Aquisição e filtragem do sinal

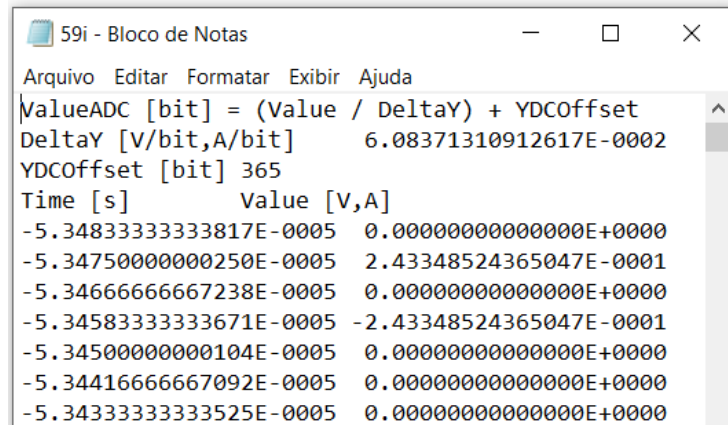
O sistema de aquisição do gerador de impulso coleta os dados de tensão e corrente amostrados a uma taxa de 120 MHz, o que significa uma amostra de tensão e corrente a cada 8,333 ns. Um arquivo com extensão *.txt* é gerado para cada grandeza medida.

A Figura 4.1 exemplifica o formato dos dados gerados pelo sistema de aquisição. Começando pelo nome do arquivo, a estrutura é:

*Número do ensaio + v ou i + .txt*

onde *v* e *i* correspondem à sinalização do arquivo de dados como tensão ou corrente respectivamente.

O arquivo de dados é formado basicamente por duas colunas principais, sendo a primeira coluna o tempo e a segunda a grandeza medida. O tempo é dado em *segundos* e a tensão ou corrente dada em *Volt* ou *Ampere* respectivamente.



```
59i - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
ValueADC [bit] = (Value / DeltaY) + YDCOffset
DeltaY [V/bit,A/bit]      6.08371310912617E-0002
YDCOffset [bit] 365
Time [s]      Value [V,A]
-5.34833333333817E-0005  0.00000000000000E+0000
-5.34750000000250E-0005  2.43348524365047E-0001
-5.34666666667238E-0005  0.00000000000000E+0000
-5.34583333333671E-0005  -2.43348524365047E-0001
-5.34500000000104E-0005  0.00000000000000E+0000
-5.34416666667092E-0005  0.00000000000000E+0000
-5.34333333333525E-0005  0.00000000000000E+0000
```

Figura 4.1 - Arquivo de dados de corrente no formata *.txt*.

As colunas da tabela de dados da Figura 4.1 são dadas em notação científica de formato longo e compreendem cerca de 30400 linhas de informação. Cada ensaio produz um par de curvas de tensão e corrente, cujo arquivo de texto possui esta quantidade de linhas e colunas. Cada solo e sua respectiva umidade, é ensaiado cerca de 50 vezes para cada frente de onda empregada (rápida e lenta). Essas pequenas subdivisões tornaram o banco de dados consideravelmente robusto, tendo um tamanho de armazenamento em disco de 33,2 GB.

Devido ao elevado número de arquivos a serem processados e a extensa quantidade de dados presentes em cada arquivo de texto, além da familiaridade do autor, optou-se por utilizar o MATLAB® como software de processamento. Previamente, tentou-se utilizar o Microsoft Office Excel®, porém, sucessivos travamentos e lentidão do programa inviabilizaram sua utilização para este fim.

No ambiente Matlab, escreveu-se o código para realizar a aquisição dos arquivos *.txt* e processá-los conforme a necessidade. Durante este processo, notou-se que tanto as ondas de tensão como as de corrente estavam contaminadas com ruídos de alta frequência. A Figura 4.2 exemplifica o estado original da curva de tensão e corrente após aquisição. Vale ressaltar que a janela de tempo dos vetores de tensão e corrente possui um comprimento total de 250  $\mu$ s, onde 50  $\mu$ s são contabilizados anteriormente ao disparo na amostra, gerando assim um tempo negativo na visualização do vetor, como é visto na mesma figura.

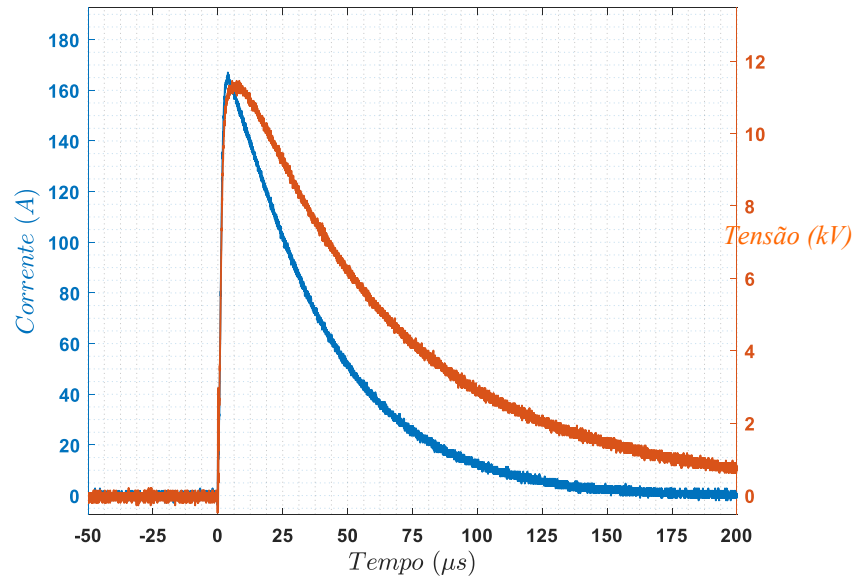


Figura 4.2 - Impulso sem filtragem.

O curto tempo de frente de onda da descarga impulsiva está associada a elevadas frequências e, para as aplicações usuais, a faixa de interesse de frequência é até 1 MHz. Com o auxílio do Matlab, analisou-se o espectro de frequências do sinal de tensão para verificar as amplitudes das componentes de frequência associadas ao ruído presente no sinal. A Figura 4.3 ilustra o resultado obtido.

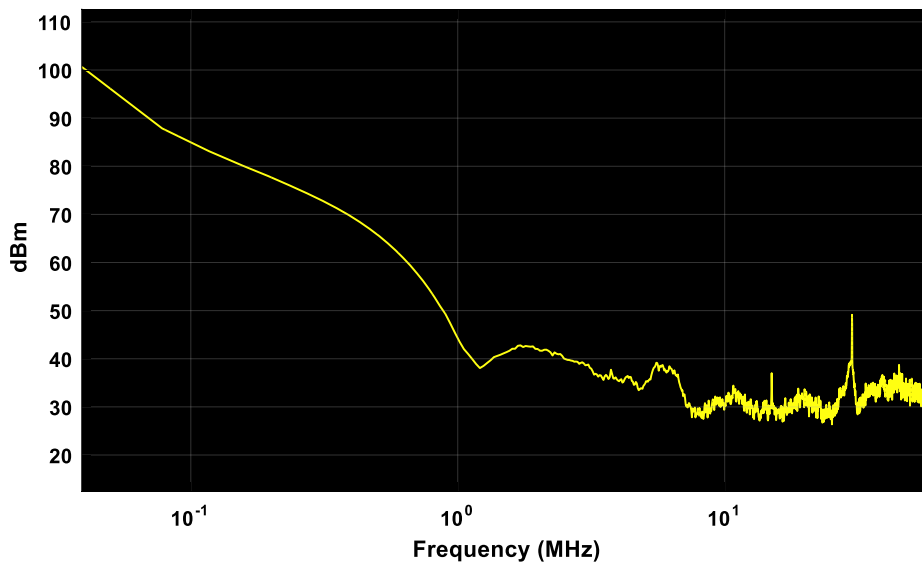


Figura 4.3 – Componentes de frequência do sinal de tensão.

A Figura 4.3 ilustra as maiores amplitudes na faixa de frequência até 1 MHz e, ao final do espectro, estão as componentes associadas ao ruído presente no sinal, que são caracterizados pelos sucessivos picos de mais alta frequência. Assim, fez-se necessário construir um filtro digital com banda passante na faixa de interesse, cuja frequência de corte é 1 MHz. Utilizou-se

um filtro digital do tipo *Butterworth* de 3º ordem para remover o ruído do sinal de tensão e corrente. O resultado da filtragem pode ser visto na Figura 4.4.

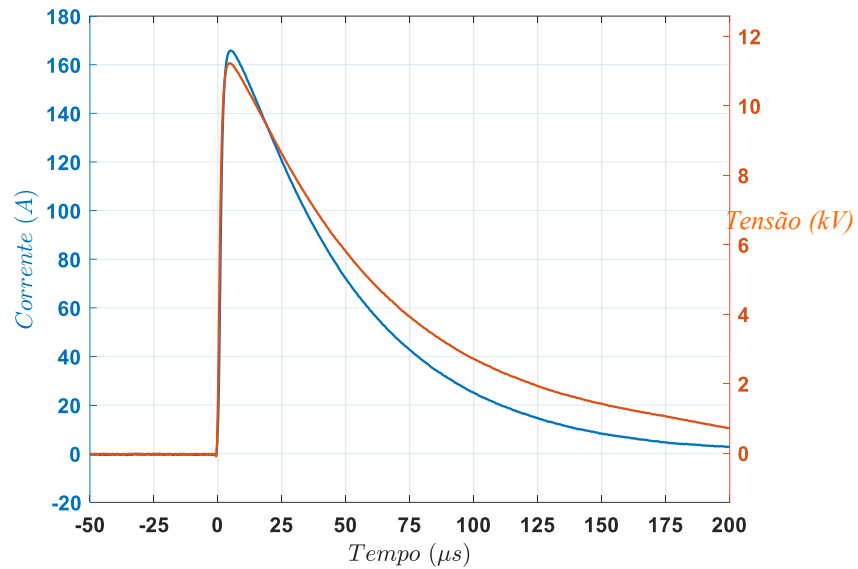


Figura 4.4 - Impulso filtrado.

Um filtro *Butterworth* é um tipo de filtro desenvolvido de modo a ter uma resposta em frequência o mais plana possível na banda passante, e a atenuação se aproxima de zero na banda de rejeição. Este filtro está implementado no Matlab pela função *butter*, que recebe como parâmetros a ordem do filtro e a frequência de corte. A função retorna os coeficientes da função de transferência de acordo com os parâmetros especificados pelo usuário. Optou-se por utilizar um filtro de 3º ordem pois este apresenta a melhor relação entre atenuação das frequências indesejáveis e a amplitude do sinal de saída.

Um problema recorrente na utilização de filtros digitais é a defasagem causada no sinal filtrado. Além disto, a remoção de frequências do sinal original pode também influenciar na amplitude do sinal filtrado. Para resolver o problema do defasamento, utilizou-se a função *filtfilt* do Matlab, que utiliza como parâmetros de entrada os coeficientes do filtro digital (que neste caso é o *Butterworth*) especificado pelo usuário. Quanto à questão da amplitude, verificou-se que a remoção das frequências superiores a 1 MHz não causou efeitos danosos em relação às amplitudes das ondas de tensão e corrente.

### 4.3 Deslocamento no vetor de tempo

A escala de tempo utilizada pelo sistema de aquisição de dados do gerador atribui um tempo morto (*delay*) de 50  $\mu\text{s}$  antes do disparo do impulso na amostra de solo, que corresponderia ao tempo zero no eixo das abcissas. Esse tempo negativo é computado na medição como sendo parte do impulso aplicado, adquirindo o formato visto na Figura 4.2. Devido ao ruído, é notada amplitudes diferentes de zero tanto para a tensão quanto para a corrente medida nos instantes anteriores à real aplicação do impulso. Na realidade, essas amplitudes só deveriam existir após o instante de tempo tomado como zero. Tal condição poderia ser confundida com um sistema não causal, que é aquele em que a saída do sistema responde antes mesmo da aplicação na entrada, o que é fisicamente impossível (LATHI, 2007)

Para fins de análise do sinal e para as demais aplicações, é necessário corrigir as amplitudes das ondas de tensão e corrente relacionadas ao tempo negativo. A Figura 4.5 ilustra, em tracejado, as ondas de tensão e corrente em seu estado original após filtragem. No instante de tempo igual a zero, a amplitude da onda de tensão vale 1,5 kV e da corrente 11 A, o que evidencia um deslocamento de ambas as curvas no tempo. Assim, optou-se por deslocar as ondas para que, no instante de tempo igual a zero, ambas iniciassem com amplitude igual a zero e, a partir deste, o impulso tomasse a sua forma.

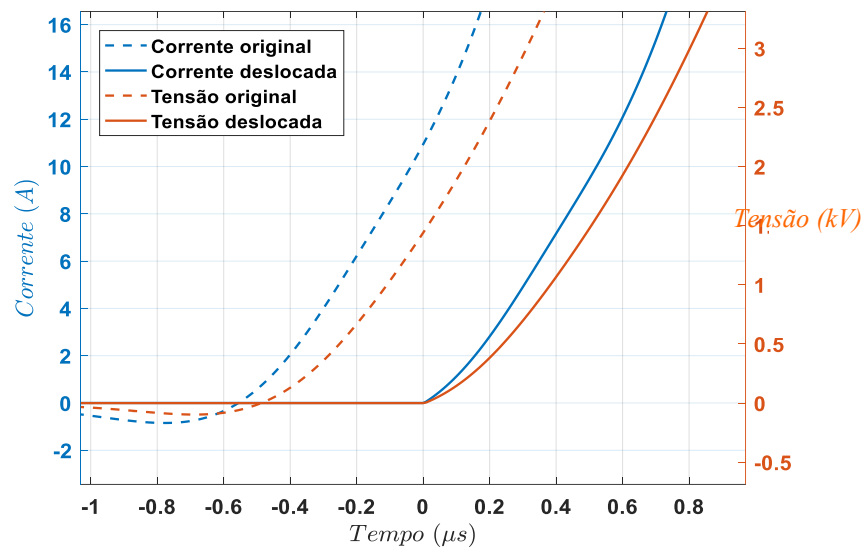


Figura 4.5 - Impulsos deslocados no tempo.

#### 4.4 Velocidade de aquisição e tratamento dos dados

A estruturação do banco de dados em diretórios foi vista no item 3.7 desta dissertação. Cada subdiretório, é composto por diversos arquivos *.txt* que são carregados na memória RAM<sup>3</sup> pelo programa criado no ambiente Matlab. A quantidade de arquivos carregados pelo programa pode chegar a Gigabytes o que demanda certa quantidade de memória e processamento da máquina.

Os computadores do LRC dispõem de máquinas com 6 GB de memória RAM, processador Intel Core i5 de oitava geração, além de um SSD<sup>4</sup> dedicado para o sistema operacional e um HD<sup>5</sup> dedicado para armazenamento de dados diversos. Com esta configuração, o tempo de execução do código é de aproximadamente 7 segundos. O fluxograma da Figura 4.6 ilustra o esquema de execução do código desenvolvido.

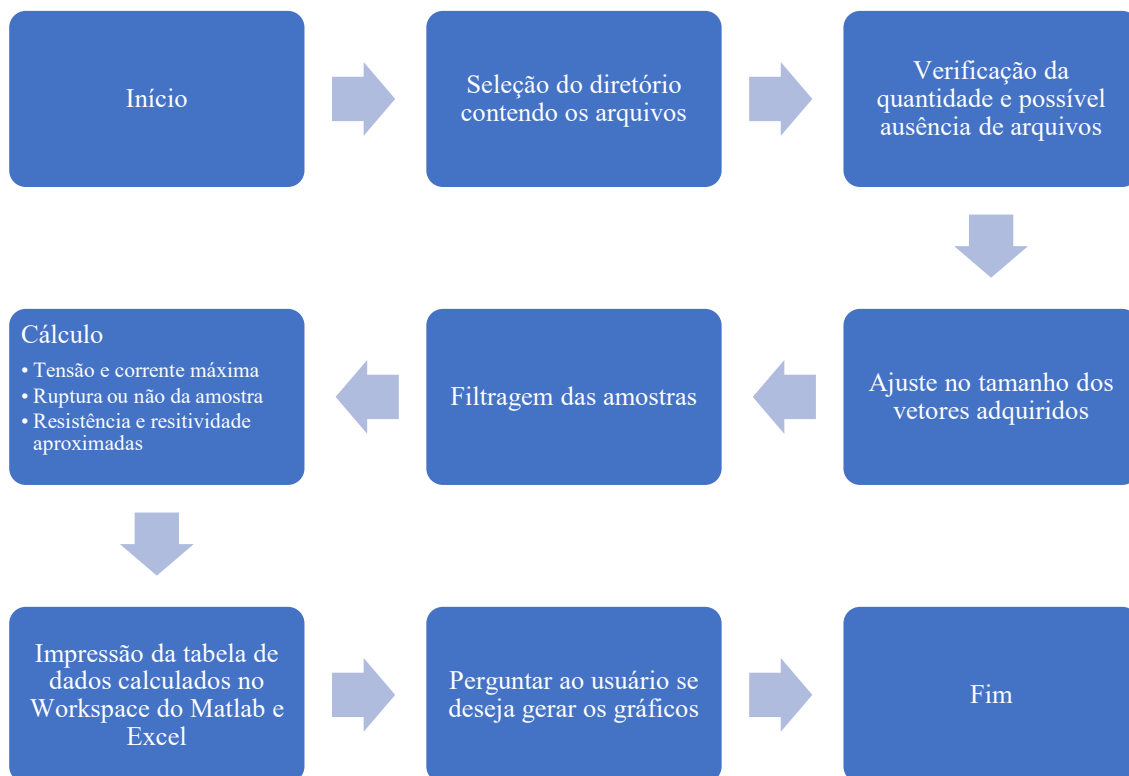


Figura 4.6 - Fluxograma do código para aquisição de dados.

---

<sup>3</sup> Memória de Acesso Aleatório (do inglês *Random Access Memory*).

<sup>4</sup> Memória de Estado Sólido (do inglês *Solid State Drive*).

<sup>5</sup> Disco Rígido (do inglês *Hard Disk*)

---



## **4.5 Conclusão**

Este capítulo abordou o tratamento dos sinais de tensão e corrente que foram adquiridos pelo sistema de aquisição de dados do gerador de impulso. Estes dados apresentavam grande quantidade de ruídos assim, fez-se uma rápida análise no domínio da frequência através do analisador de espectro do Matlab. Esta análise possibilitou a construção de um filtro digital para eliminação das frequências que excediam a faixa de interesse. O tratamento descrito é de suma importância para as análises que se seguem. Um tempo considerável foi gasto para realizar este tratamento.

# 5. Resultados e Discussões

## 5.1 Introdução

Neste capítulo são considerados os desenvolvimentos aplicados à configuração de placas planas que promovem um campo elétrico aproximadamente uniforme na cuba de ensaio. Para o estabelecimento de campo uniforme na amostra, faz-se necessária a utilização de um meio homogêneo entre as placas por toda a sua área de contato, porém, sabe-se que o solo natural não é propriamente homogêneo e sim um agregado de compostos orgânicos e inorgânicos (VISACRO, 2002) que acabam por promover pequenas deformidades no campo elétrico.

Neste capítulo será apresentado o procedimento adotado para computar o tempo de ruptura nas ondas de tensão e corrente, além de exemplificar a forma de reconstrução dessas curvas rompidas a partir de uma curva de referência sem ruptura. Este procedimento de reconstrução é necessário para as metodologias de avaliação da ionização do solo apresentadas neste capítulo.

## 5.2 Perfil de tensão e corrente nas amostras

Para aplicação dos impulsos nas amostras de solo, (COTA e VISACRO, 2017) empregaram o método *up and down* que consiste na aplicação de impulsos de tensão  $V_0$  a partir do qual variações de tensão  $\Delta V$  são aplicadas acima ou abaixo do valor de referência, de acordo com a ruptura ou não da amostra em teste (KUFFEL, ZAENGL e KUFFEL, 2000). A Figura 5.1 ilustra esse método.

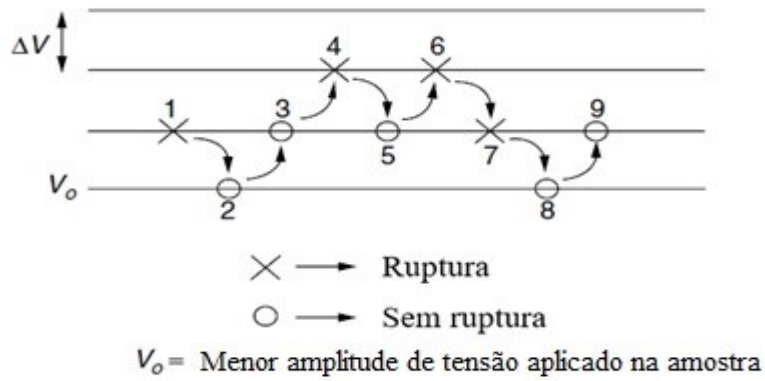


Figura 5.1 – Método *up and down* para aplicação de impulsos nas amostras de solo. Adaptado de (KUFFEL, ZAENGL e KUFFEL, 2000).

A Figura 5.2 exemplifica o perfil de um par de ondas de tensão e corrente para o qual não ocorreu (a) e ocorreu (b) ruptura da amostra.

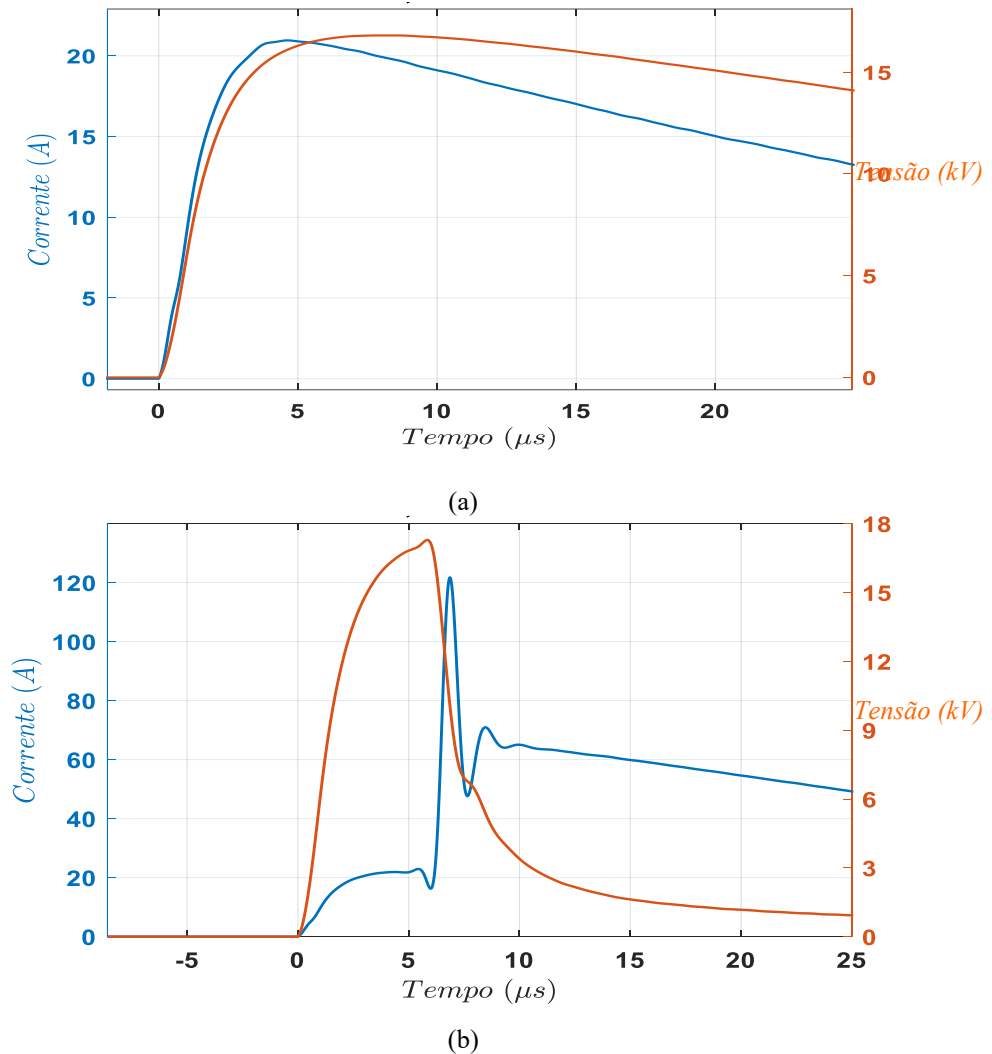
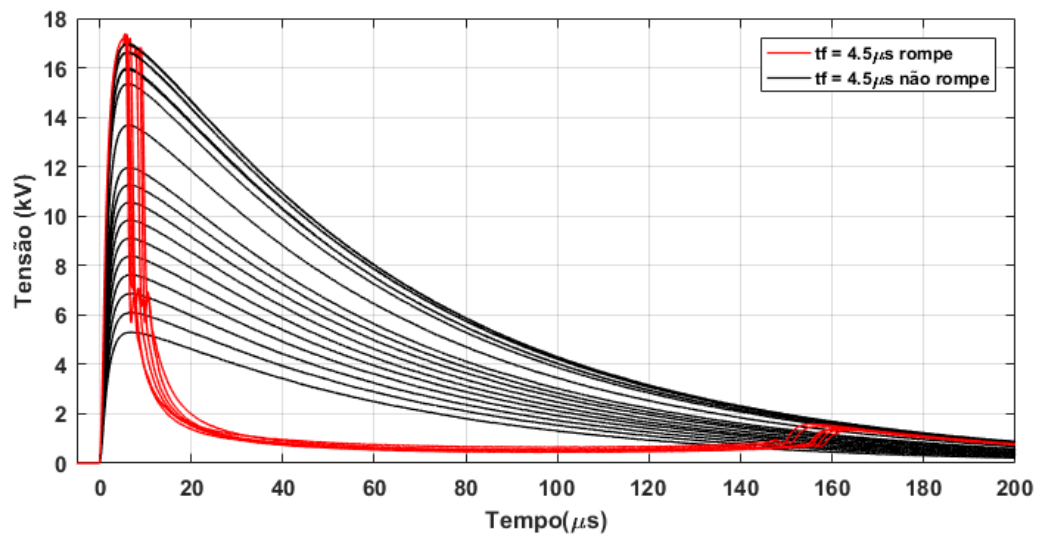
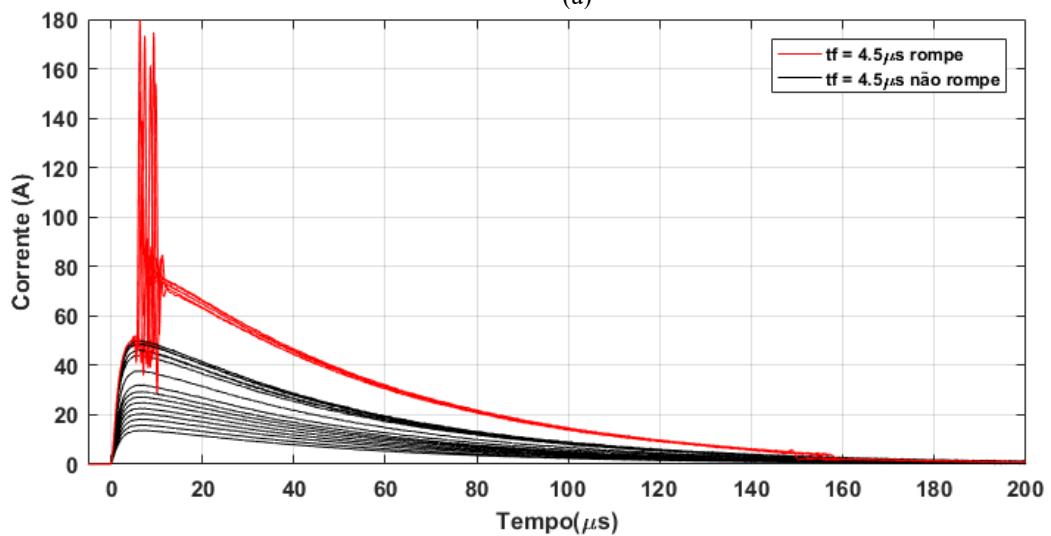


Figura 5.2 – Exemplo de ondas de tensão e corrente na qual não há ruptura da amostra de solo (a) e onde há ruptura (b).

Devido à grande quantidade de solos testados e a variação da umidade destes, nem todos os perfis de tensão e corrente são mostrados na dissertação. A seguir, a Figura 5.3 ilustra o perfil de tensão e corrente ao se aplicar o método *up and down* em um solo de  $1200 \Omega.m$  (Solo 1), umidade original. Foram aplicados sucessivos impulsos, variando-se a amplitude destes, o que possibilitou configurar perfis completos por amostra, como aquele mostrado na Figura 5.3. Em vermelho são marcadas as ondas completas de tensão e corrente para as quais houve ruptura, enquanto as ondas em linha preta representam curvas nas quais a amostra não rompeu. Neste ensaio, foram utilizadas ondas com tempo de frente de  $4,5 \mu s$ .



(a)



(b)

Figura 5.3 – Ondas de tensão desenvolvidos na amostra de solo (a); em (b) têm-se a respectiva corrente desenvolvida.

### 5.3 Determinação do ponto de ruptura das amostras

Para se determinar o ponto de ruptura, é necessário observar o que ocorre nas ondas de tensão e corrente ao se superar o campo elétrico crítico. Na onda de corrente, a ruptura provoca um abrupto aumento de amplitude, enquanto que na onda de tensão nota-se um decaimento de amplitude.

Observando mais atentamente o ponto da ruptura na Figura 5.4, nota-se que há uma pequena oscilação, tanto na onda de tensão quanto na de corrente, sendo que este comportamento foi observado para todos os solos analisados, independente da sua resistividade ou umidade. A Figura 5.4 exemplifica esse comportamento.

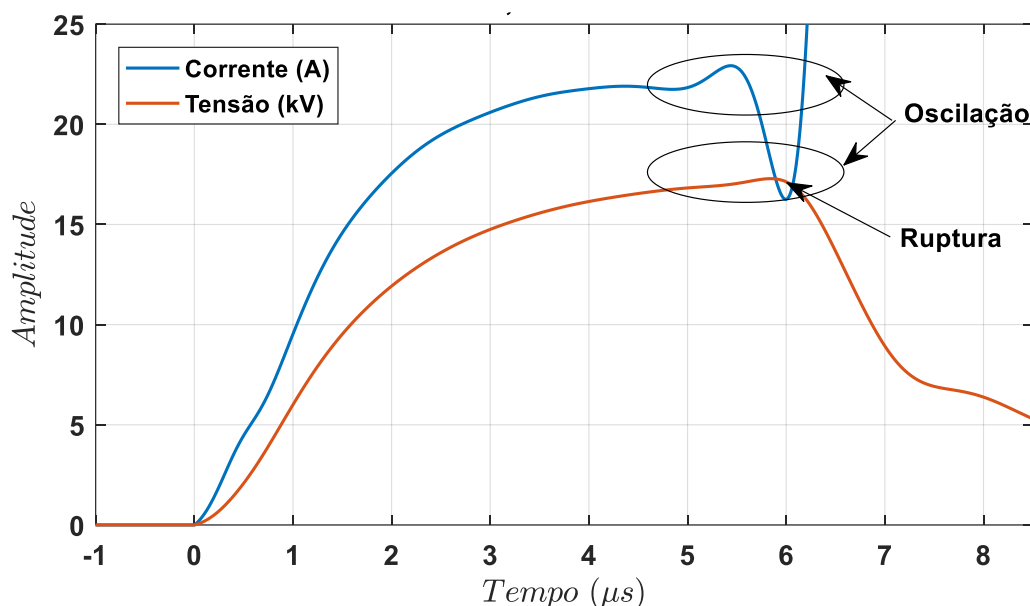


Figura 5.4 - Oscilação e ponto de ruptura da onda impulsiva na amostra.

Observa-se que a oscilação é mais acentuada na onda de corrente do que na onda de tensão. Na onda de corrente, esta oscilação é caracterizada por um pico de amplitude pouco superior à amplitude da corrente antes da ruptura, e um vale com uma descida acentuada por cerca de meio microssegundo. Logo em seguida, tem-se uma brusca elevação de amplitude, que caracteriza a efetiva ruptura da amostra. Já na onda de tensão, o mesmo comportamento ocorre, porém, só há um pico e este é mais discreto em relação ao da corrente. Em seguida, há o decaimento abrupto da tensão acompanhando de forma oposta o crescimento da corrente.

A oscilação dura cerca de  $1,5 \mu s$  e foi contabilizada utilizando a curva de tensão como referência. Um código em Matlab foi implementado para cálculo expedito do ponto de ruptura, de acordo com o comportamento descrito.

## 5.4 Avaliação do nível de tensão e corrente para as curvas onde houve ruptura

Para analisar os impulsos que levaram à ruptura da amostra, fez-se necessário compará-los com uma curva de referência para a qual não se identifica ruptura. Este procedimento permite reconstruir a curva nos instantes posteriores à ruptura e assim analisar seu perfil caso esta não houvesse rompido.

O Solo 2, de resistividade ( $\rho$ ) igual a  $276 \Omega.m$  e umidade original é utilizado para exemplificar o procedimento. A Figura 5.5 mostra a faixa de tensão de pico aplicada nas amostras de solo tanto para ondas rápidas quanto para ondas lentas.

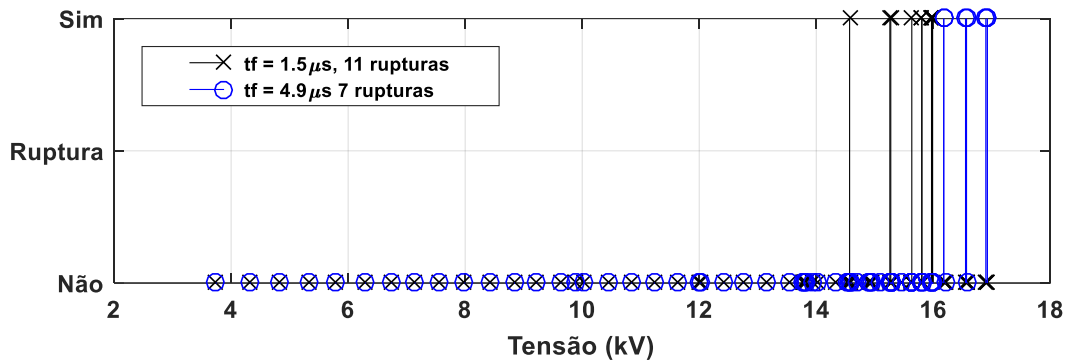


Figura 5.5 - Faixa de tensão aplicada no Solo 2 com evidência à faixa de ruptura.

Observando a Figura 5.5, na faixa onde ocorrem as rupturas, pode-se notar que alguns impulsos de tensão não foram capazes de causar a ruptura da amostra. Isso já fora observado por (MOUSA, 1994) e (IEEE, 1985). Atribui-se tal comportamento à aleatoriedade do fenômeno da ionização. Portanto, há uma probabilidade de ruptura associada a cada impulso na amostra de solo que é tanto maior quanto maior for a amplitude do impulso aplicado. Para investigar o valor de campo crítico, é necessário separar os impulsos para os quais foi observada ruptura na amostra. A Figura 5.6 ilustra as curvas correspondes à ocorrência de ruptura em separado.

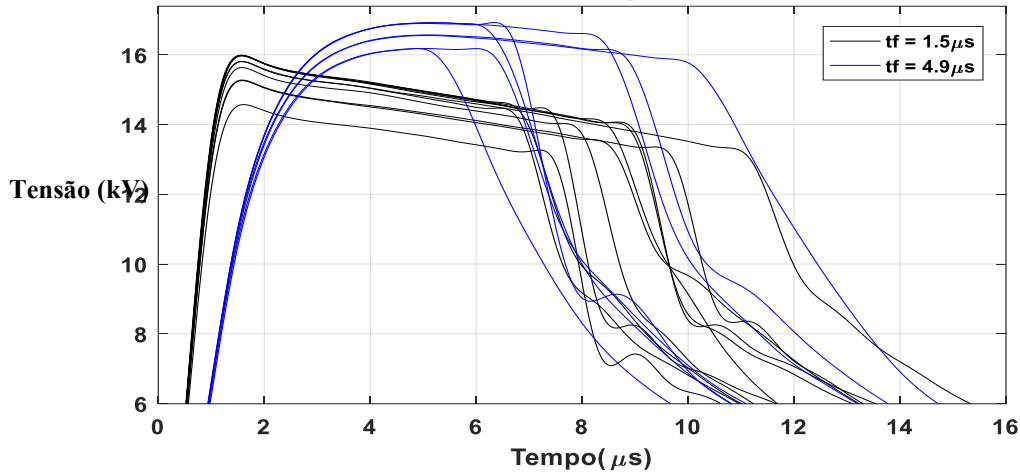


Figura 5.6 – Separação dos impulsos rápidos e lentos para os quais houve ruptura para o Solo 2, umidade original.

As curvas onde há ruptura indicam presença intensa de ionização na amostra de solo. Para construção de um perfil de ionização, as curvas de tensão aplicada correspondentes à ruptura da amostra foram substituídas pelas curvas esperadas para aquela amplitude de tensão caso não houvesse ocorrido a ruptura. Nestas curvas esperadas foram demarcados os pontos relativos à ocorrência de ruptura, correspondentes ao tempo e amplitude da ruptura conforme Figura 5.7.

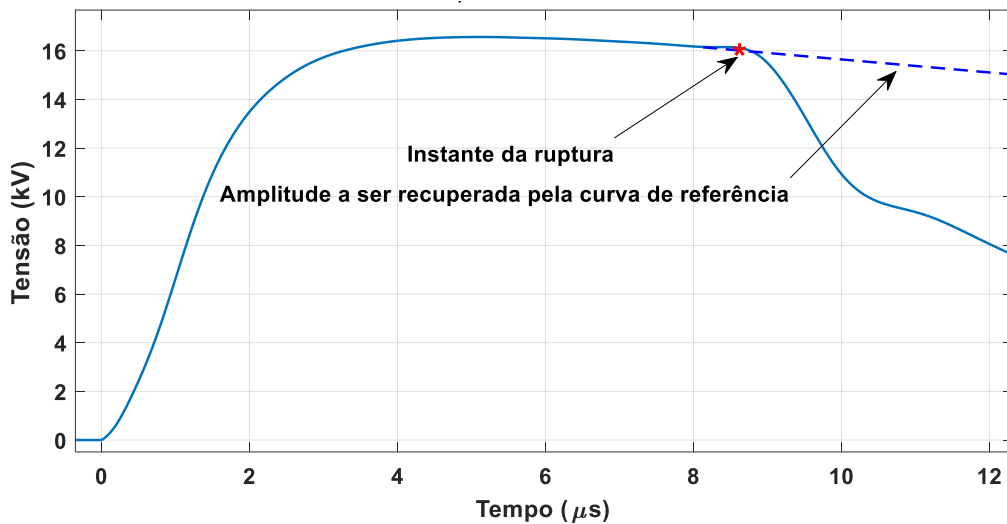


Figura 5.7 - Recuperação de uma curva rompida.

Para construir tais curvas esperadas foi tomada como referência, em cada caso, uma curva de tensão plena (sem ruptura) dentre as curvas onde houve ruptura. Esta curva tinha sua amplitude multiplicada por um fator  $K$ , de forma que seu valor de pico igualasse àquele da onda correspondente à ruptura. Este procedimento gerava uma onda sem a indicação de ruptura, cujos

valores coincidiam com a onda rompida, até o instante de ocorrência desta. O mesmo procedimento foi aplicado às ondas de corrente.

O cálculo do fator  $K$  leva em consideração o procedimento visto na sessão 5.3 para o cômputo do ponto de ruptura, ou seja, o valor de  $K$  dependerá do instante onde houve ruptura. A Figura 5.8 ilustra o resultado da aplicação do procedimento descrito no parágrafo anterior. Em (a) é mostrada uma ampliação da parte das ondas de tensão recuperadas a partir das ondas correspondentes à condição de ruptura. Em (b) é mostrado a onda de corrente recuperada numa escala de tempo dez vezes maior.

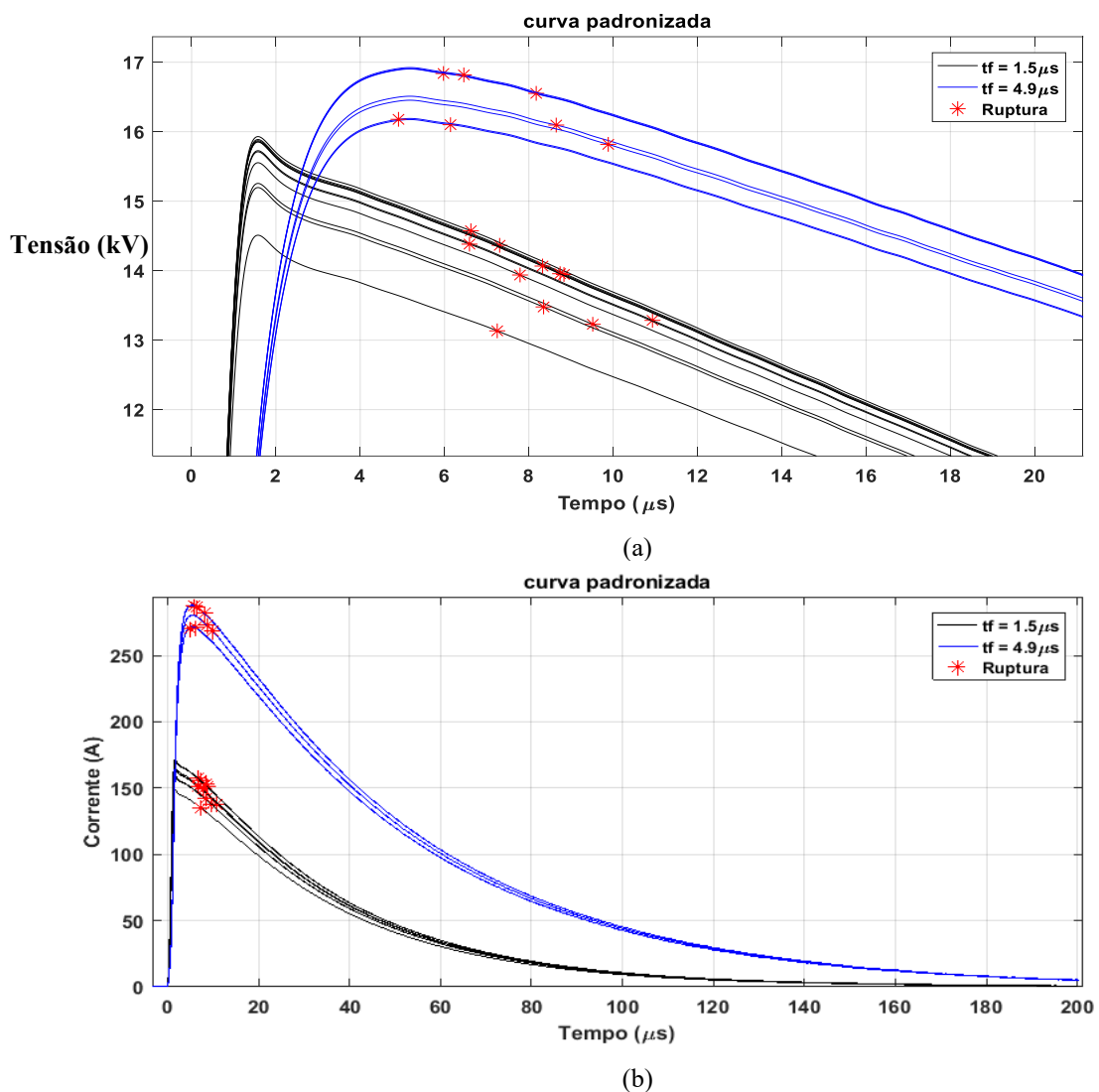


Figura 5.8 - Curvas padronizadas de ruptura para tensão (a) e corrente (b), Solo 2, 276  $\Omega\cdot\text{m}$ , unidade original.

As curvas padronizadas pelo método visto nesta sessão fornecem informações essenciais quanto às amplitudes de tensão e corrente das ondas com ruptura. A informação do ponto de ruptura no tempo e as amplitudes recuperadas posteriores a este ponto, foram



essenciais para os desenvolvimentos relativos às metodologias propostas de avaliação da ionização que são apresentadas no Capítulo 6.

## 5.5 Campo elétrico e impedância impulsiva nas amostras

A partir da análise da impedância transitória nas amostras de solo em cuba plana, é possível verificar a ocorrência ou não da ionização no mesmo. Algumas expressões utilizadas para caracterização de grandezas e parâmetros envolvidos na análise das condições de ionização são apresentadas neste tópico.

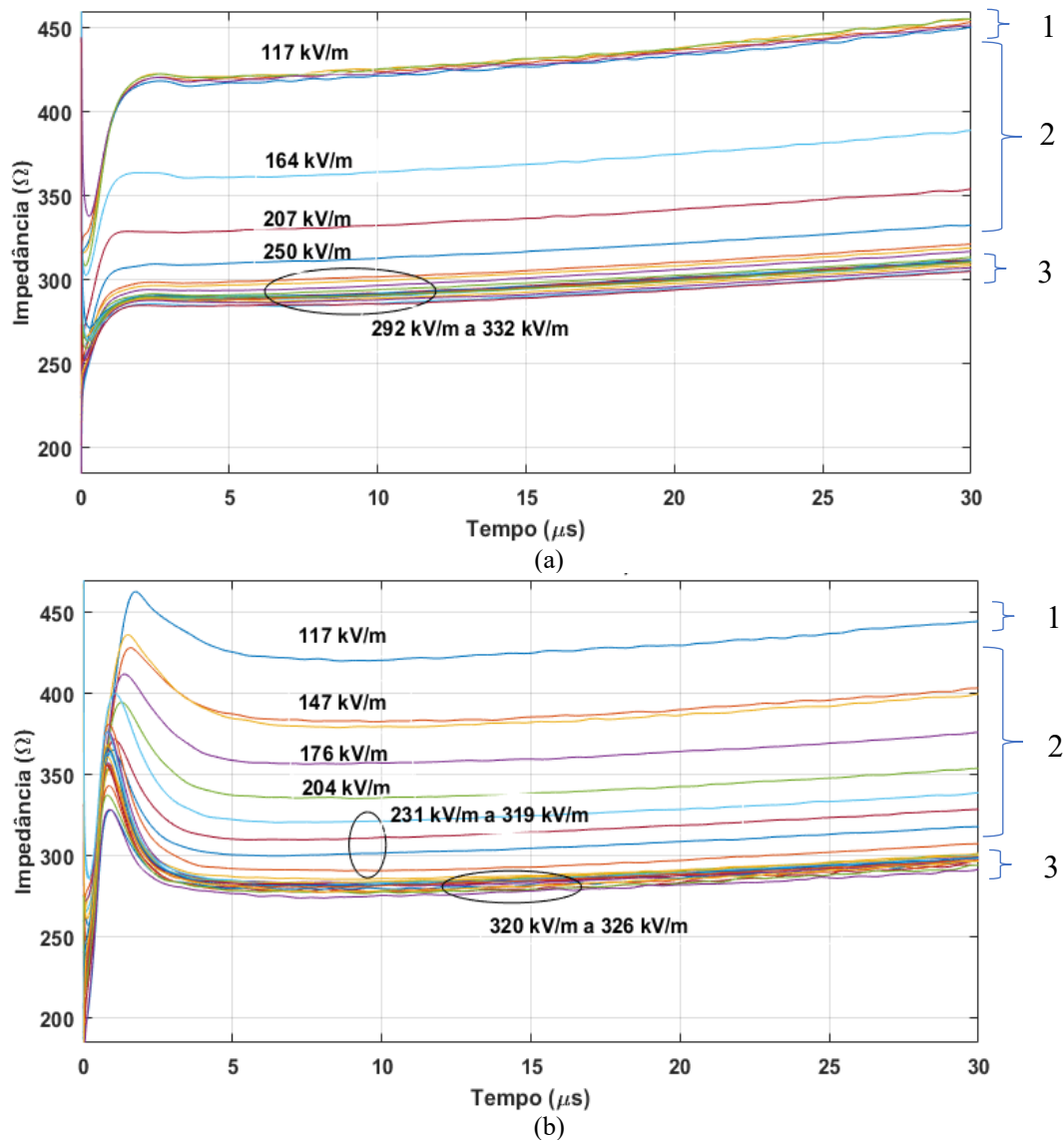
A resistividade ( $\rho$ ) do solo pode ser obtida a partir do valor medido de resistência em baixa frequência,  $R$ . Esta resistência foi mensurada por (COTA e VISACRO, 2017) através do método de Frank Wenner para todas os solos constantes no banco de dados. A equação (5.1) possibilita determinar a resistividade do solo ensaiado em cuba plana. Na expressão,  $d$  é a distância entre as placas (em metros) e  $S$  é a área das placas dada em metros quadrados.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{d} (\Omega \cdot m) \quad (5.1)$$

O banco de dados construído por (COTA e VISACRO, 2017) não apresenta diretamente as informações da resistência medida em baixa frequência para os solos analisados, mas sim a informação de resistividade obtida pela equação (5.1). Os valores instantâneos do campo elétrico uniforme entre as placas da cuba plana pode ser determinado pela equação (5.2) onde  $v$  é o valor instantâneo da onda de tensão impulsiva aplicada (em kV).

$$E = \frac{v}{d} (kV/m) \quad (5.2)$$

A impedância transitória na amostra de solo é dada pelo quociente entre os valores instantâneos das ondas de tensão e corrente impulsivas. A Figura 5.9 ilustra o comportamento de tal impedância para diferentes amplitudes de onda de tensão aplicadas na amostra, num caso específico. O campo elétrico visto nesta figura foi tomado como sendo o quociente entre o valor de pico do impulso de tensão aplicado pela distância entre as placas planas.



Legenda: 1 - zona sem ionização, 2 – zona com ionização, 3 - zona crítica de ionização (rupturas de amostra de solo).

Figura 5.9 - Comparação de impedância transitória para o Solo 4 (400 Ω.m), umidade original, tempo de frente 1,2 μs (a) e 4,3 μs (b).

A partir dos sucessivos impulsos aplicados no solo, três zonas podem ser definidas: a zona sem ionização, caracterizada pela não diminuição do valor da impedância transitória; a zona com ionização, caracterizada pela diminuição do valor de impedância transitória e, a zona crítica de ionização que é a região onde se constata as rupturas da amostra de solo e pouca redução do valor da impedância transitória (vista pelas curvas da Figura 5.9 que não romperam nesta mesma zona).

Em se tratando das curvas da Figura 5.9, nota-se como o tempo de frente influencia o formato de onda da impedância transitória. Para a faixa de tensão de ensaio considerada na Figura 5.9, quanto maior a amplitude do impulso de tensão aplicado, menor é a amplitude da

impedância transitória desenvolvida, indicando presença de ionização na amostra. Este comportamento vale tanto para ondas com rápido tempo de frente quanto para tempos mais longos.

Em (a), as primeiras curvas situadas mais acima, iniciam com campo elétrico em 117 kV/m sem a presença de ionização, evidenciado pela não diminuição da impedância. Porém, ao se aumentar o campo elétrico até 250 kV/m, há sucessivas diminuições na impedância transitória, caracterizando um aumento no processo de ionização das amostras, mas sem ruptura. A partir deste último valor de campo elétrico, há ruptura, e a elipse na figura ilustra a faixa de campo elétrico apurada para as ondas que não romperam na zona crítica de ionização.

Em (b), as primeiras curvas situadas mais acima na figura, também iniciam em 117 kV/m, mas nota-se que este valor de campo para ondas mais lentas já é o suficiente para promover ionização na amostra de solo. O valor máximo de campo elétrico antes de haver ruptura foi de 319 kV/m. A elipse que ilustra a faixa de campo elétrico entre 320 e 328 kV/m, representa os impulsos que não romperam na zona de ionização.

Os resultados descritos nos dois parágrafos anteriores são muito interessantes, pois denotam a significativa ocorrência de ionização do solo submetido a campo elétrico uniforme, muito antes da ocorrência da ruptura da amostra (a aproximadamente 50% do valor da tensão de ruptura da amostra, a impedância transitória mostra uma redução da ordem de 25% em relação aos valores correspondentes à condição de não ocorrência de ionização).

Considera-se que a ionização das amostras de solo antes da ruptura, decorre da não homogeneidade do solo no interior da cuba de ensaio. O campo elétrico na região é distorcido pela presença de partículas e grãos de diferentes dimensões dos materiais que compõem o solo da amostra. Tais distorções podem intensificar o campo elétrico localmente junto a tais partículas, gerando disrupções internas. Estas acabam por diminuir a distância elétrica entre as placas, promovendo a redução da impedância.

A seguir, é apresentada uma tabela com resumo de alguns dados referentes aos solos ensaiados. Os parâmetros a seguir constam em tal tabela:

- $E_{max}$  é o máximo campo elétrico, em kV/m, desenvolvido no solo ensaiado incluindo àquelas amostras onde houve ruptura;
- $I_{max}$  é a máxima corrente, em Ampère (A), desenvolvida no solo ensaiado incluindo aquelas onde houve ruptura;

- $Z_p$  é a impedância impulsiva média das amostras da zona de ionização que não romperam, dada em Ohm ( $\Omega$ ) -  $Z_p = V_p/I_p$  ;
- $tf$  é o tempo de frente da onda aplicada em microssegundos ( $\mu s$ );
- $E_{r\_min}$  é o menor campo elétrico na amostra para o qual foi detectada uma ruptura, em kV/m;
- $tr$  é o tempo, em  $\mu s$ , gasto até a ruptura em relação ao  $V_{r\_min}$ .

Tabela 5.1 - Resumo de dados quanto a  $Z_p$  e  $V_{r\_min}$ .

Solo	Umidade	$E_{max}(kV/m)$	$I_{max}(A)$	$Z_p(\Omega)$	$tf(\mu s)$	$E_{r\_min}(kV/m)$	$tr(\mu s)$
1 (1200 $\Omega.m$ )	original	405,13	231,80	353,38	1,10	388,05	4,62
		386,17	180,55	377,66	4,50	369,85	8,61
2 (276 $\Omega.m$ )	original	355,26	231,33	98,80	1,50	323,77	7,25
		376,09	526,62	76,30	4,90	359,50	4,91
	5%	300,65	320,13	49,54	1,40	281,56	9,97
		287,75	254,78	89,98	4,30	283,17	10,43
3 (1450 $\Omega.m$ )	original	474,82	251,50	598,39	1,30	406,06	4,03
		403,62	148,22	832,83	4,90	372,92	6,27
	5%	450,82	259,42	649,98	1,20	304,15	4,21
		293,36	181,71	289,46	4,00	272,76	9,76
	10%	1371,80	452,49	286,19	1,30	337,99	2,48
		340,28	99,89	421,91	5,30	335,94	9,67
4 (400 $\Omega.m$ )	original	457,67	117,64	316,96	1,20	316,29	8,97
		330,92	175,11	304,05	4,30	315,71	7,74
	5%	324,78	155,05	115,37	1,20	274,53	22,72
		321,42	567,96	112,84	5,00	309,27	23,48
	10%	278,04	149,69	95,50	1,00	249,07	11,19
		295,79	537,18	91,38	4,80	273,75	14,75
5 (700 $\Omega.m$ )	original	438,13	80,17	451,96	1,30	367,43	14,73
		467,24	563,40	484,57	4,10	325,62	12,17
	5%	542,78	243,62	332,94	1,30	313,18	6,48
		379,05	378,50	355,98	4,30	309,11	9,16
	10%	440,95	144,54	366,83	1,20	293,89	12,22
		327,37	362,93	373,50	4,30	290,69	11,03
6 (720 $\Omega.m$ )	original	390,30	56,13	475,83	1,40	355,02	10,33
		453,13	404,62	477,43	4,20	379,62	14,63
	5%	333,49	111,28	172,96	1,20	317,81	5,28
		357,39	328,04	169,74	4,20	321,56	13,26
	10%	365,63	133,44	180,08	1,20	325,98	12,42
		411,22	678,38	158,89	4,50	313,61	16,44
7 (100 $\Omega.m$ )	original	509,16	73,62	811,51	1,40	331,10	12,63
		519,24	578,94	849,02	4,20	346,33	14,57
	5%	324,96	167,52	99,24	1,50	321,77	18,74
		356,88	663,14	96,27	4,30	322,38	13,99
	10%	283,07	210,37	74,19	1,20	250,88	5,66
		358,68	757,58	66,47	3,90	298,07	12,22
8 (440 $\Omega.m$ )	original	313,52	320,40	64,55	1,10	299,22	5,65
		281,39	12109,49	84,19	4,70	247,29	28,94
		294,41	442,48	52,03	1,10	278,37	13,86
	5%	288,70	266,51	58,56	4,10	270,25	11,91

	10%	283,25	599,65	29,65	1,30	280,79	11,38
		256,05	478,81	32,15	4,50	247,46	10,55
	original	300,81	501,11	39,66	1,60	285,10	9,98
		260,56	272,78	54,40	4,80	241,74	24,14
9 (500 Ω.m)	5%	201,87	630,12	16,12	2,20	--	--
		235,71	755,71	17,49	4,50	230,80	15,35
	10%	193,01	761,56	12,87	2,30	--	--
		197,25	750,35	13,92	4,50	--	--
	original	259,85	613,61	31,74	1,40	246,29	6,87
		286,58	3844,86	32,94	4,00	229,14	19,00
10 (100 Ω.m)	5%	277,69	768,00	18,59	1,40	--	--
		263,40	731,60	18,80	4,50	259,09	15,69
	10%	223,78	808,14	14,94	1,40	--	--
		202,89	779,76	16,66	4,00	200,70	30,48
	original	628,46	80,38	788,47	1,30	616,32	11,12
		790,48	583,98	751,97	4,30	635,25	11,48
11 (750 Ω.m)	5%	502,67	237,59	138,94	1,40	339,01	16,70
		458,09	663,30	139,52	4,10	364,23	14,07
	10%	318,36	189,35	100,68	1,20	300,80	8,23
		325,01	435,20	92,86	5,20	317,92	9,63
	original	660,53	787,96	274,30	1,20	657,26	13,18
		533,73	283,94	355,50	4,60	523,28	9,03
12 (5950 Ω.m)	5%	457,24	663,21	73,68	1,60	424,25	9,27
		485,01	512,19	75,84	4,30	460,59	21,56
	10%	364,06	439,17	90,06	1,50	346,73	14,59
		368,54	273,70	86,20	4,90	357,43	13,68
	original	801,21	789,45	785,28	1,30	783,68	5,14
		715,19	495,19	775,50	4,60	685,40	5,71
13 (5460 Ω.m)	5%	400,54	610,92	127,83	1,40	390,52	7,95
		406,59	334,77	124,18	4,70	377,05	10,68
	10%	406,62	791,74	52,90	1,50	388,96	8,76
		347,69	405,16	59,21	4,60	327,34	11,33
	original	428,05	274,41	259,02	1,20	402,75	19,29
		456,83	425,54	239,15	4,50	445,20	28,04
14 (2500 Ω.m)	5%	333,03	468,72	71,68	1,20	331,33	7,78
		327,34	617,57	68,24	5,10	297,01	16,38
	10%	346,16	778,91	21,01	1,50	345,32	12,36
		339,10	766,12	21,61	4,50	321,77	15,78
	original	580,57	210,61	1282,03	1,40	551,86	2,73
		557,27	427,68	1353,16	4,70	548,66	7,03
15 (10000 Ω.m)	5%	513,50	223,34	781,79	1,30	491,94	3,93
		615,41	508,71	762,66	4,60	497,06	7,95
	10%	501,22	265,87	399,96	1,20	479,34	18,93
		546,47	516,24	390,06	4,60	519,78	7,88

Considerando-se as impedâncias impulsivas indicadas na Tabela 5.1, note-se que tanto para o solo com umidade original, quanto para as demais umidades, a impedância impulsiva tendeu a diminuir com o aumento da umidade do solo. Outro parâmetro importante é o campo elétrico mínimo para o qual foi constatada ruptura de solo, onde nota-se que este valor tende a aumentar com o aumento da resistividade como ilustra a Figura 5.10.

Nota-se também na mesma figura que, em se tratando de ondas rápidas e ondas lentas, o campo elétrico requerido para ruptura do solo é próxima para ambas as ondas e mantém uma diferença relativamente constante. Porém, os valores mínimos de campo elétrico mostrados na Figura 5.10 ainda não podem ser tomados totalmente como referência para definição de campo elétrico mínimo para ruptura do solo pois contabilizam apenas o primeiro impulso que levou à ruptura. Mais ensaios devem ser considerados para um valor mais refinado de referência. Estes dados apenas demonstram que a ruptura devido a ionização do solo pode ocorrer em valores de campo elétrico menores ou maiores do que aqueles indicados na literatura 400 kV/m (CIGRE, 1991) e 300 kV/m (MOUSA, 1994). O refinamento deste resultado é feito mais à frente.

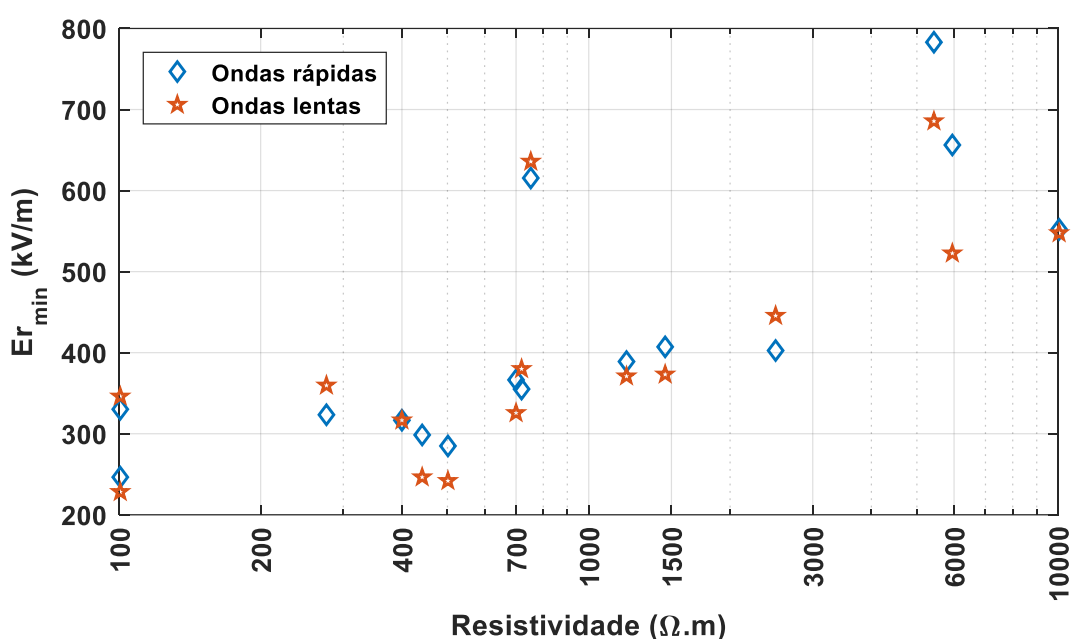


Figura 5.10 - Campo elétrico mínimo para o qual foi constatada uma ruptura de amostra de solo.

Quanto ao tempo de frente, pode-se observar pela Tabela 5.1 que foi demandado um elevado tempo para que houvesse ruptura das amostras de solo e esse tempo é maior para ondas lentas do que para ondas rápidas. Esse comportamento foi observado para quase todos os ensaios realizados, tanto para umidade natural do solo quanto para as demais umidades.

## 5.6 Evolução do processo de ionização

Quando o solo é submetido a ondas impulsivas de baixa intensidade, a densidade de corrente que percorre o solo não é suficiente para ionizar o solo ao redor do eletrodo de aterramento. Porém, à medida que esta corrente aumenta, o campo elétrico ao redor do eletrodo

também aumenta, podendo atingir níveis que ionizam o solo circunvizinho. Esse processo foi observado também nos experimentos utilizando cuba plana.

A evolução do processo de ionização do solo pode ser acompanhada através da relação entre os impulsos de tensão e corrente aplicados no solo (curva V-I). A curva da Figura 5.11, correspondente a resultados de ensaios com cubas cilíndricas coaxiais separadas por amostra de solo. Ela ilustra como o solo se comporta na ausência de ionização. A curva tem formato de *loop* e inicia pela parte de baixo, indo em direção ao pico e depois retornando reta, representando a resistência em baixa frequência ( $R_{bf}$ ) (VISACRO, 2007). O início desta curva é ditado pelas componentes de alta frequência da onda injetada e, devido à parcela capacitiva da corrente ser maior na frente de onda, há uma leve curvatura da curva V-I. Esta curvatura tende a diminuir até alcançar o pico de onda, onde a parcela capacitiva da corrente começa a se tornar menos expressiva, fazendo com que a relação  $\Delta V/\Delta I$  torne-se praticamente constante, caracterizando a região de baixa frequência representada pela reta.

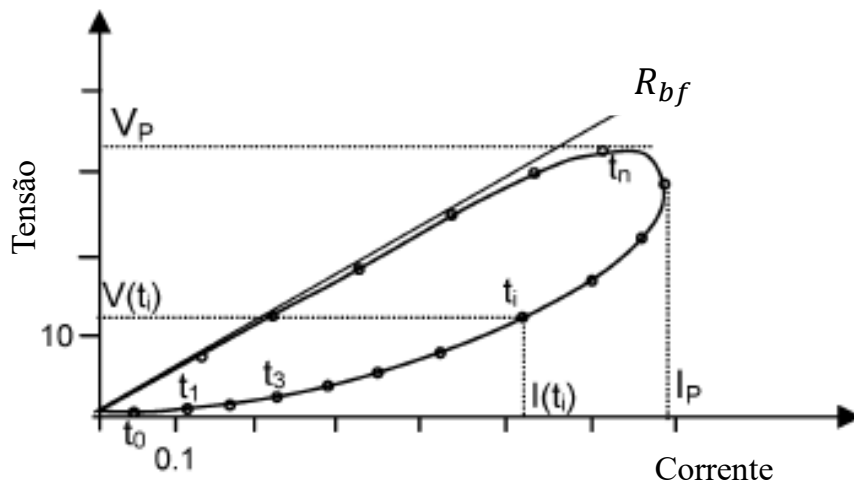


Figura 5.11 – Curva V-I para solo sem ionização (resultado de ensaio em cubas cilíndricas coaxiais). Adaptado de (VISACRO, 2007).

Quando o impulso de tensão aplicado na amostra de solo é intenso o suficiente para promover uma zona de ionização considerável, a curva V-I estreita-se. Para tensões ainda mais intensas a curva tende a formar uma figura semelhante a um ‘8’ inclinado. Quanto mais intensa é a região ionizada, maior a semelhança.

Comumente na literatura, a curva V-I é levantada para ensaios em cubas coaxiais, porém, este procedimento é raro para cubas planas. A fim de se investigar tal comportamento da ionização, aplicou-se a análise da curva V-I para os ensaios em cuba plana levantados por

(COTA e VISACRO, 2017). A seguir são apresentadas as curvas V-I de cada solo analisado. A figura da esquerda representando a menor amplitude de um par de impulsos de tensão e corrente aplicados na amostra e a figura da direita representando a maior amplitude de um par de ondas de tensão e corrente que não rompeu na zona crítica de ionização. Essa zona foi caracterizada no item 5.5.

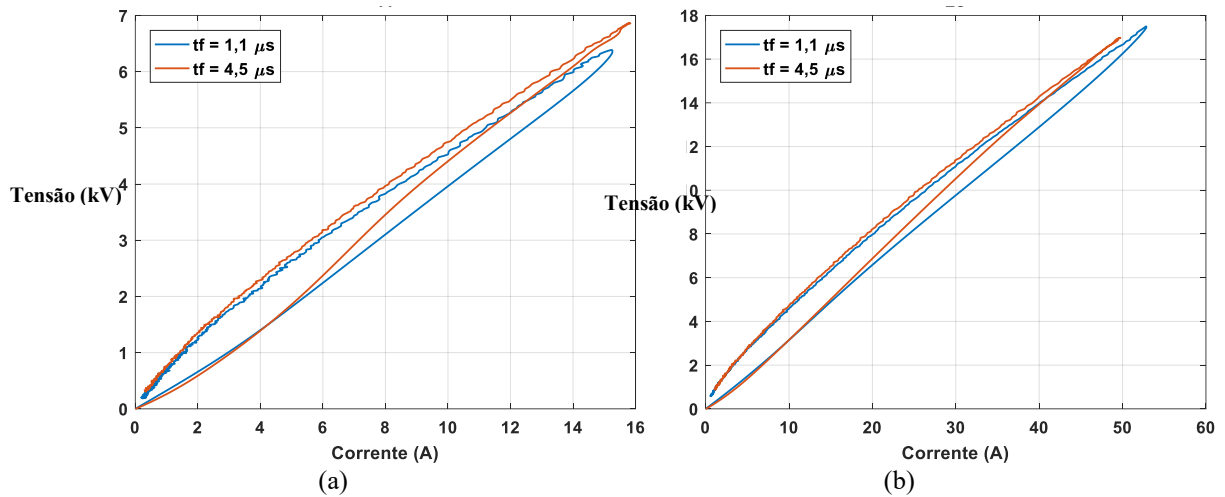


Figura 5.12 – Curva V-I para Solo 1 - 1200  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

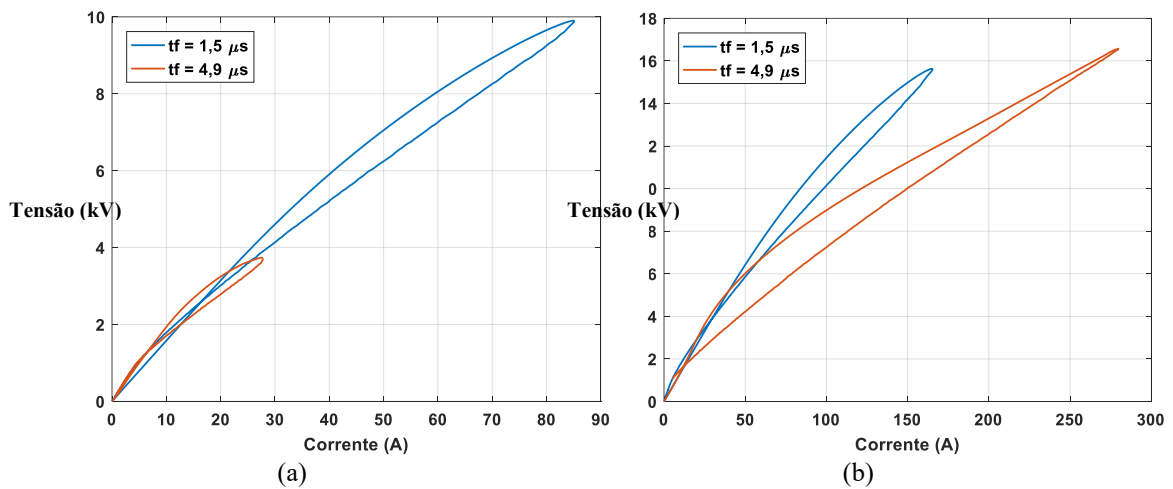


Figura 5.13 - Curva V-I para Solo 2 - 276  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).



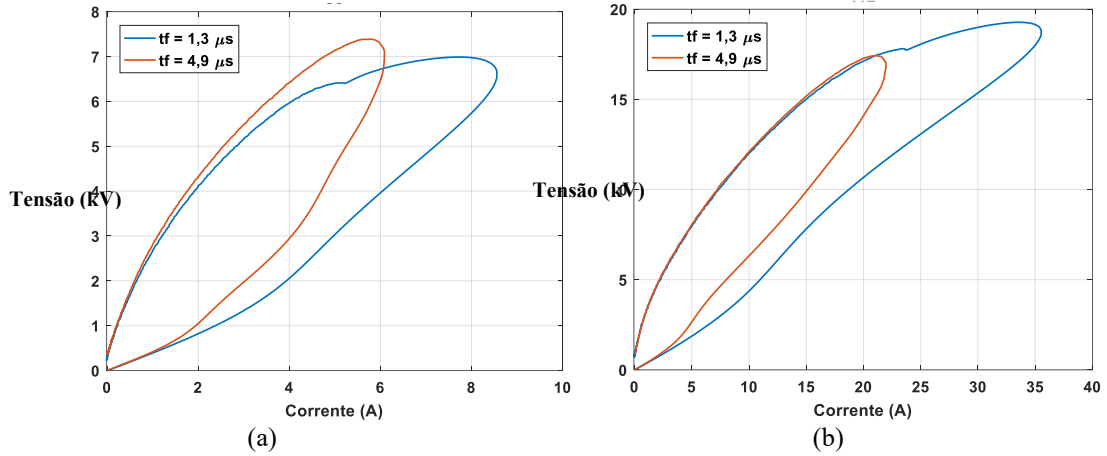


Figura 5.14 - Curva V-I para Solo 3 – 1450  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

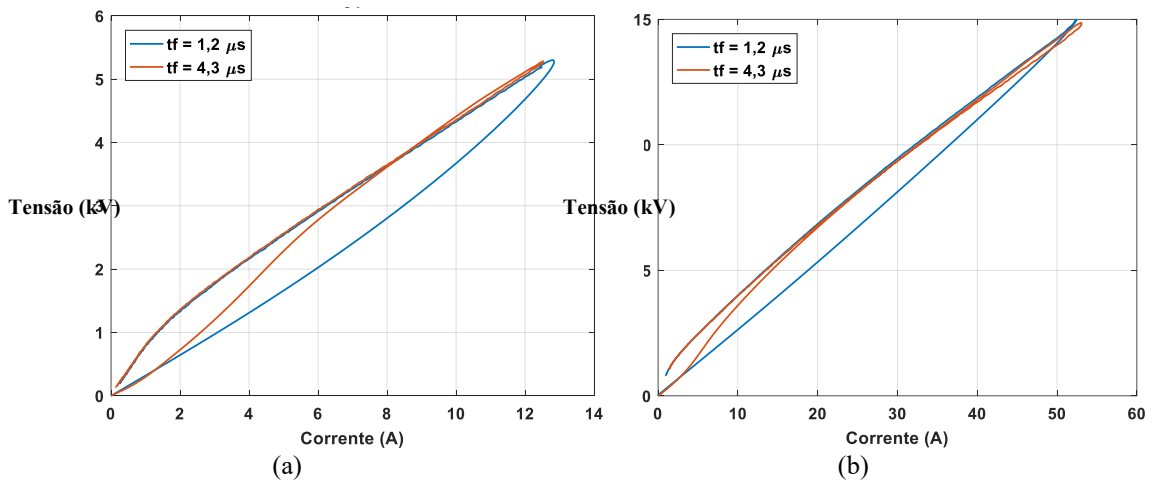


Figura 5.15 - Curva V-I para Solo 4 – 400  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

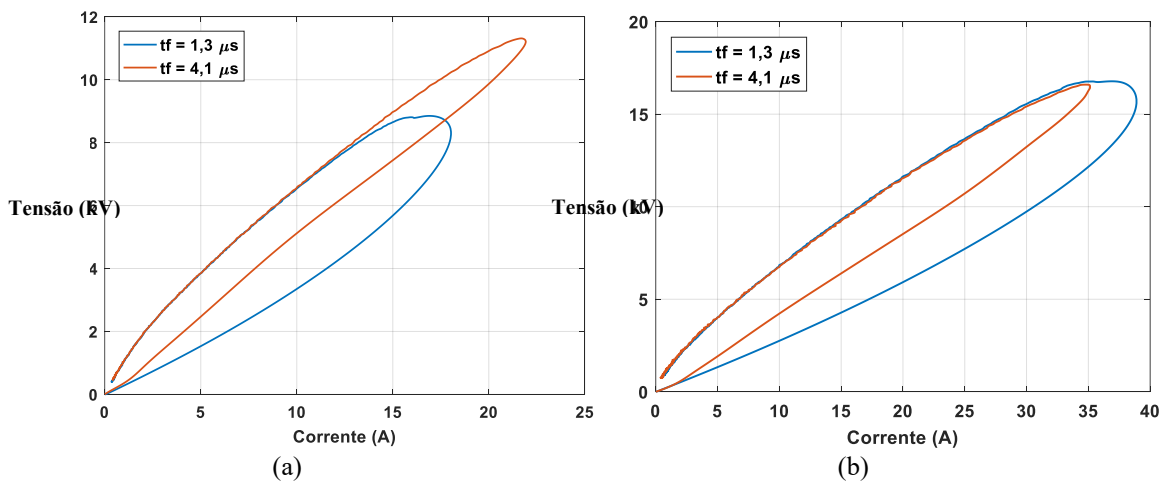


Figura 5.16 - Curva V-I para Solo 5 – 700  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

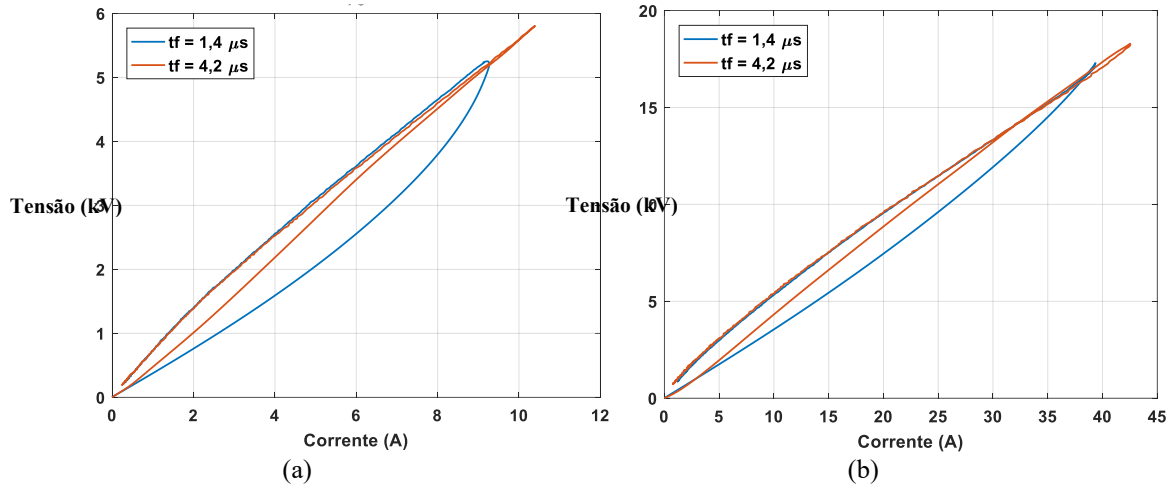


Figura 5.17 - Curva V-I para Solo 6 – 720  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

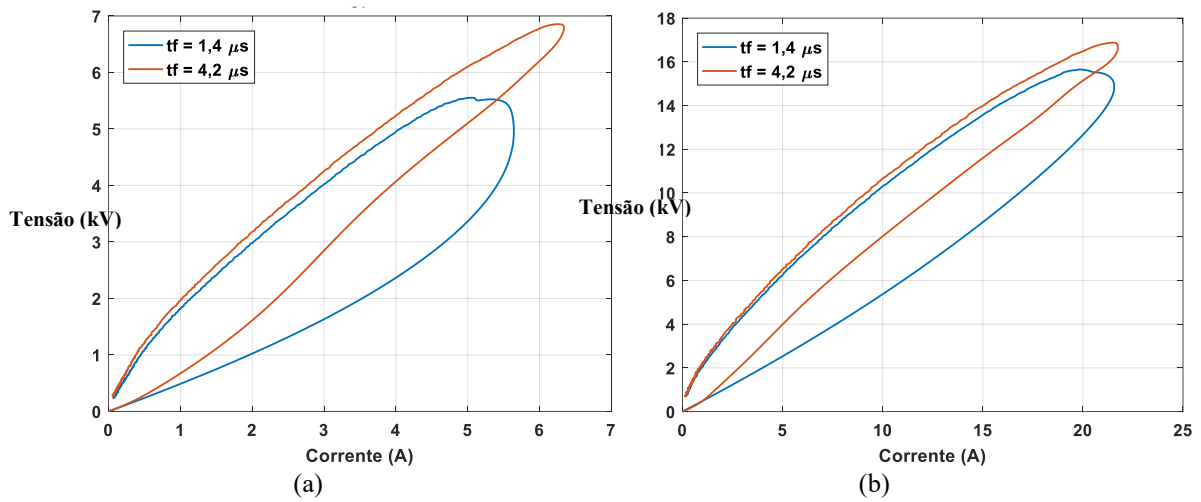


Figura 5.18 - Curva V-I para Solo 7 - 100  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

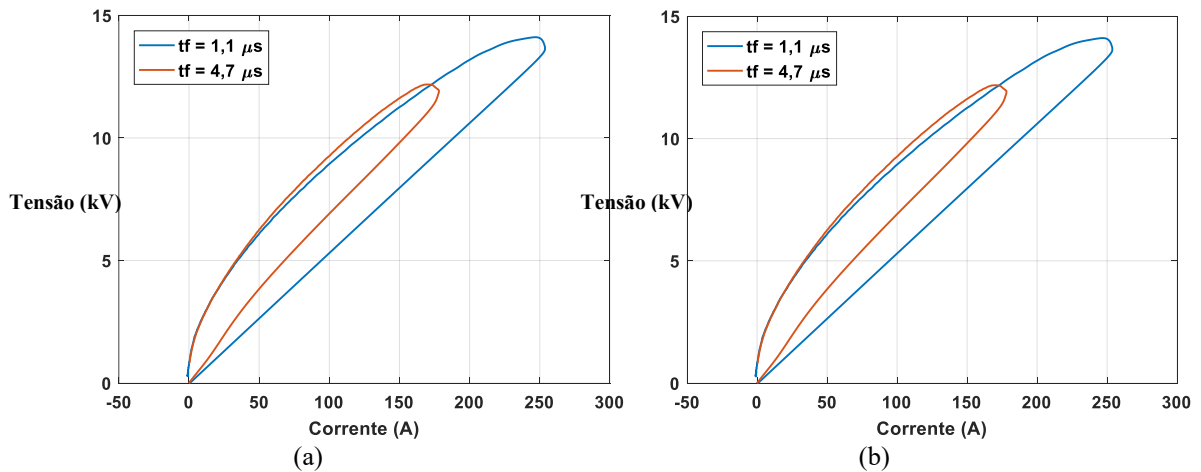


Figura 5.19 - Curva V-I para Solo 8 – 440  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

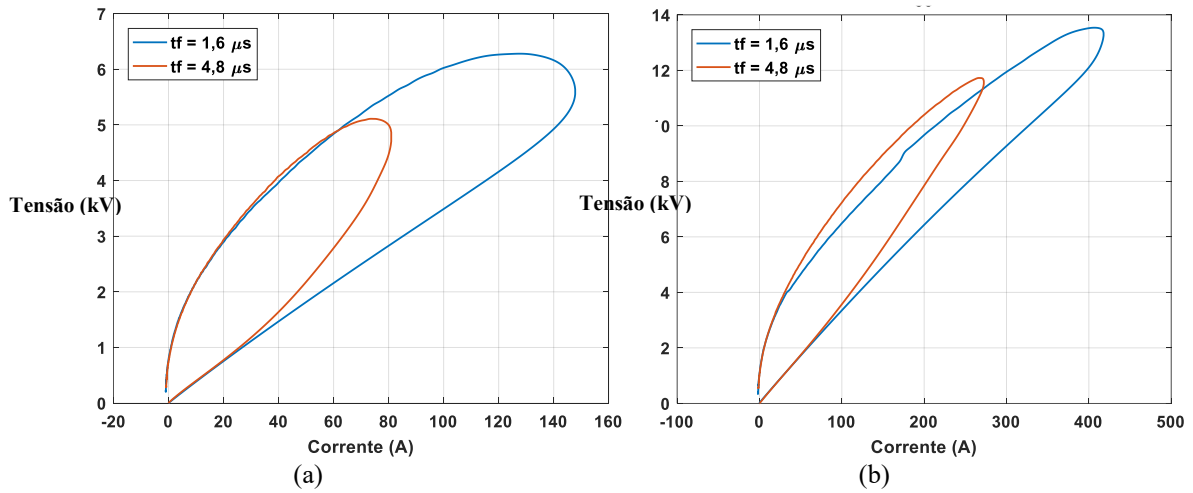


Figura 5.20 - Curva V-I para Solo 9 – 500  $\Omega.m$  sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

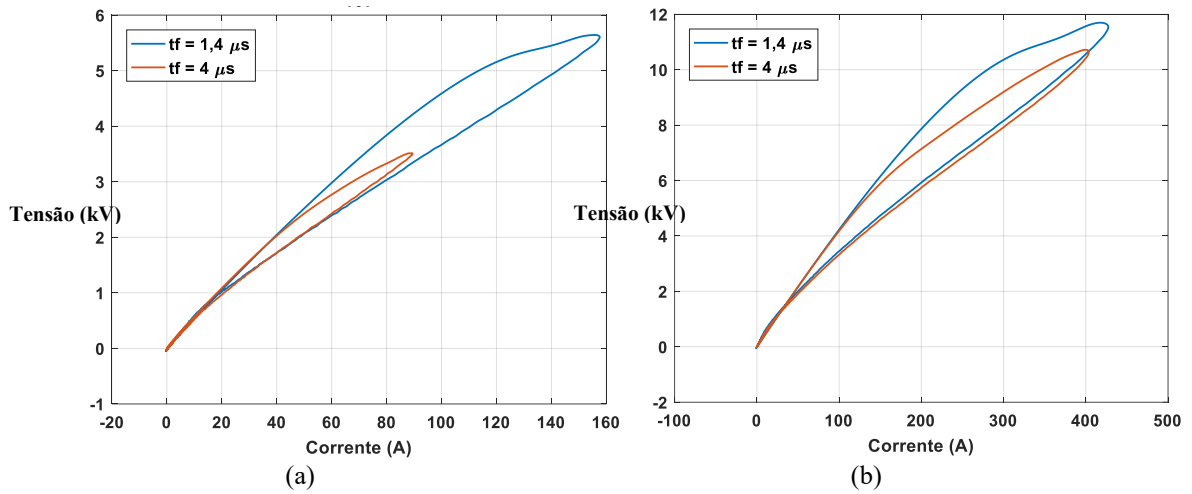


Figura 5.21 - Curva V-I para Solo 10 – 100  $\Omega.m$  sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

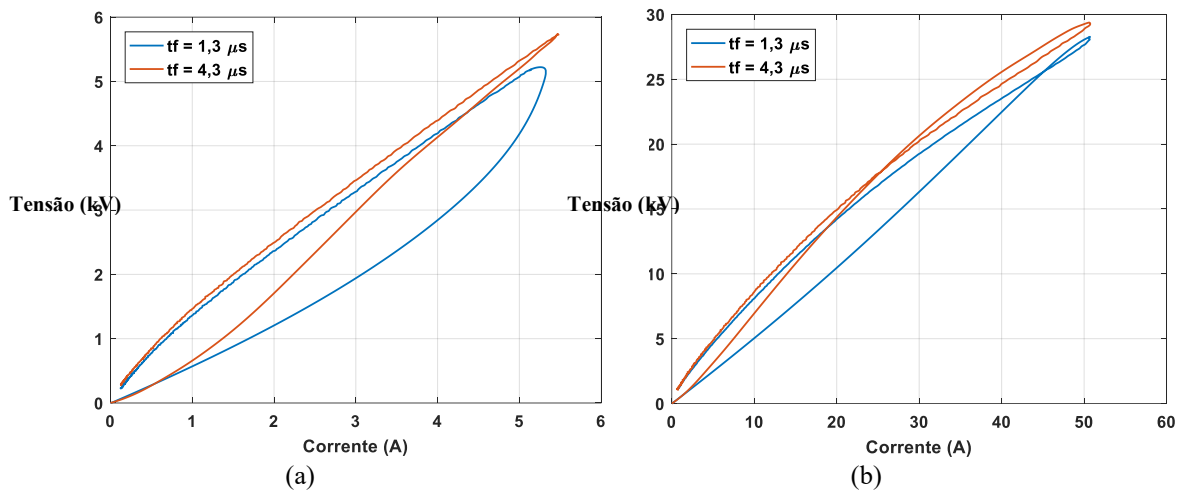


Figura 5.22 - Curva V-I para Solo 11 – 750  $\Omega.m$  sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

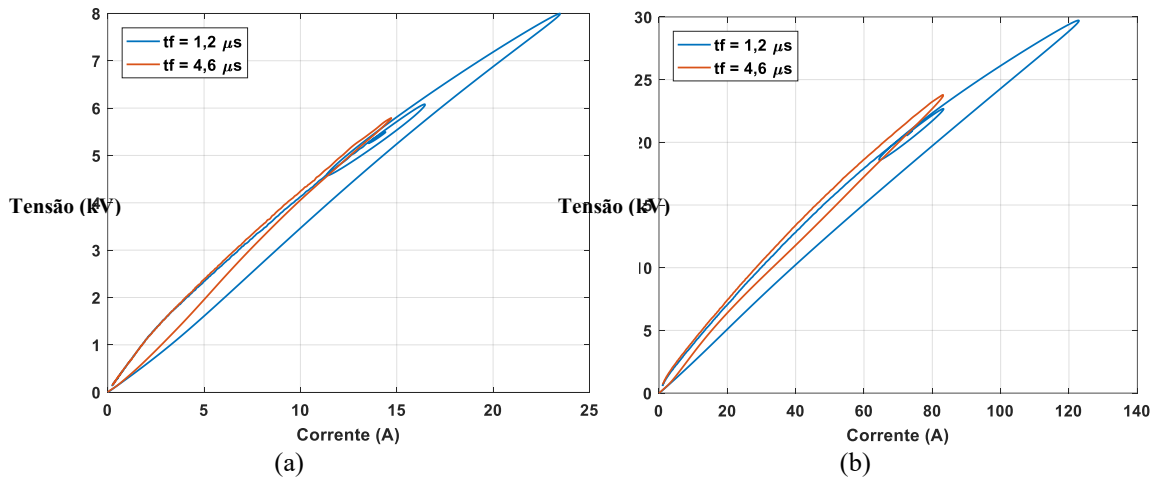


Figura 5.23 - Curva V-I para Solo 12 – 5950  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

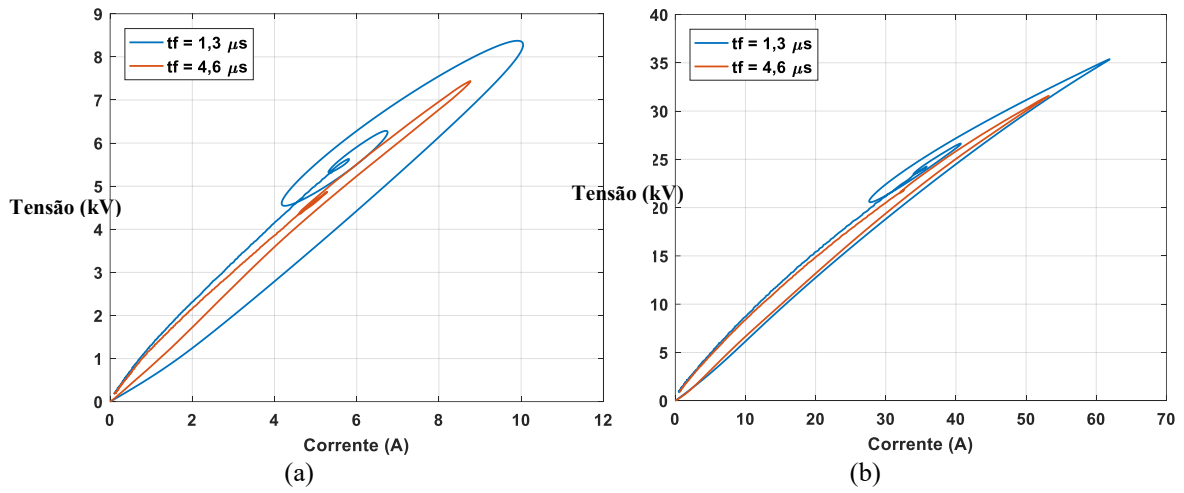


Figura 5.24 - Curva V-I Solo 13 – 5460  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

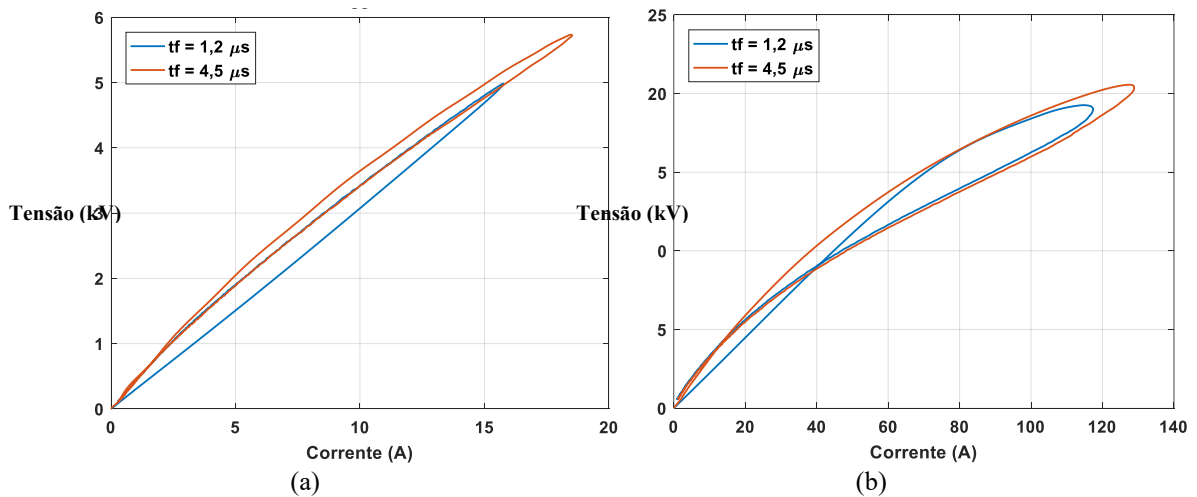


Figura 5.25 - Curva V-I Solo 14 – 2500  $\Omega$ .m sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

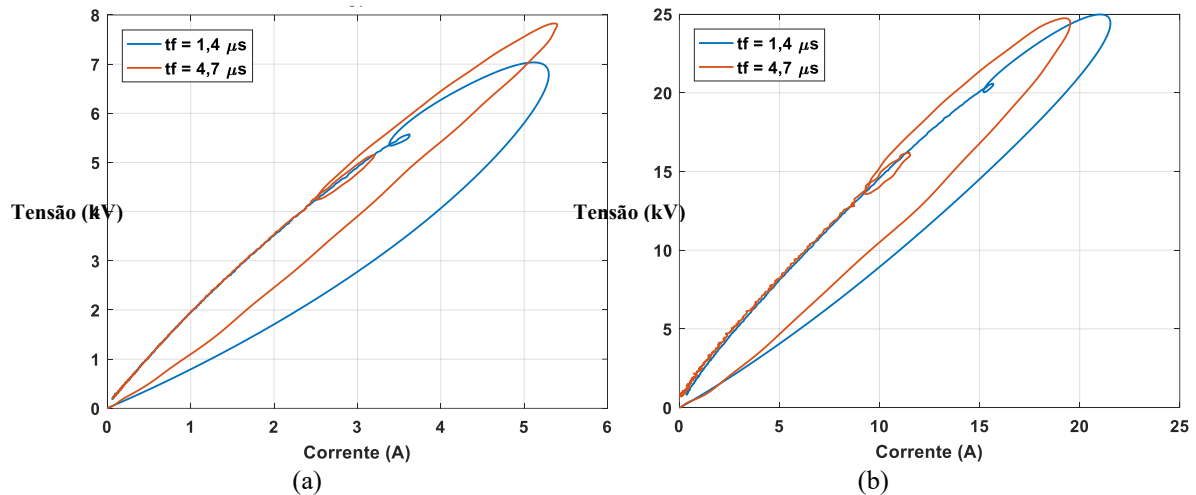


Figura 5.26 - Curva V-I Solo 15 - 10000  $\Omega.m$  sem ionização (a) e na zona de ionização (b).

O item 5.6 traz as ilustrações da evolução do processo de ionização das amostras de solo em cuba plana através da utilização de curva V-I. O processo de ionização descrito como semelhante a um ‘8’ inclinado pode ser observado discretamente na figura (b) dos solos 1, 2, 4, 6, 10, 11 e 14. Estas figuras destacam que, embora a cuba plana promova um campo uniforme, é notada uma evolução do processo de ionização do solo antes mesmo de haver ruptura total da amostra. Essa ionização é atribuída a granulometria e não homogeneidade das amostras que distorce o campo elétrico em diferentes pontos da amostra.

A figura (a) dos solos 2, 4, 6 e 10 embora se refiram à menor amplitude dos impulsos aplicados no solo, nota-se que já apresentavam uma leve ionização da amostra indicando que a amplitude do impulso escolhido por (COTA e VISACRO, 2017) para iniciar os ensaios já era capaz de promover a sua ionização.

# 6. Metodologias de Avaliação da ionização do solo

## 6.1 Metodologia para avaliação da ionização através da energia acumulada

Na literatura acerca da ionização do solo, é comum se parametrizar o fenômeno a partir do campo elétrico crítico. Porém, como foi visto no capítulo de introdução desta dissertação, não há um consenso sobre o valor de referência a adotar para início do processo, sendo 1 MV/m sugerido por (OETTLÉ, 1988) e 0,3 MV/m por (MOUSA, 1994).

Os resultados do Capítulo 5 mostram que, mesmo na condição de solo submetido a campo elétrico uniforme, o valor de campo de ruptura pode variar significativamente para diferentes solos. Além disto, verificou-se que o processo de ionização teve início para valores médios de campo bem inferiores (da ordem de 150 kV/m) àquele de ruptura.

Tal quadro ensejou, nesta dissertação, a busca de metodologia mais robusta para equacionar a questão da ionização, que não fosse baseada apenas num valor de campo crítico.

Neste sentido, este capítulo explora alternativas de metodologias de equacionamento do fenômeno de ionização, que têm como referência métodos tradicionais de estabelecimento de arcos elétricos de contornamento de isoladores de linhas aéreas (IEEE, 1985). É derivada uma metodologia capaz de computar a energia acumulada dos impulsos aplicados no solo, bem como a elaboração de um modelo genérico envolvendo como parâmetros o campo elétrico e resistividade do solo.

### 6.1.1 A base do método

A brochura *A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines* (IEEE, 1985) descreve os procedimentos para estimar a performance de linhas de transmissão. Um dos procedimentos adotados consiste na utilização das curvas características

de tensão-tempo dos isoladores da linha de transmissão. Para os ensaios de suportabilidade destes isoladores, são adotados impulsos padronizados de tensão para simular sobretensões na cadeia de isoladores. São empregados ensaios padronizados do tipo 1,2/50  $\mu$ s, onde 1,2 corresponde ao tempo de frente desta onda e 50 corresponde ao tempo de meia onda. O valor de pico desse impulso é apresentado como uma função do tempo de ruptura do isolador. Assim, a aplicação de sucessivos impulsos de amplitudes diferentes tem como objetivo descrever o comportamento das eventuais rupturas de isolação através de uma curva resultante, denominada V-t.

A forma de obtenção da curva V-t consiste em aplicar sucessivos impulso padronizados (1,2/50  $\mu$ s) conforme ilustra a Figura 6.1. Cada impulso tem sua amplitude aumentada de  $\Delta V$ , até que se possa notar os arcos de contornamento no isolador, indicando a sua ruptura. Na Figura 6.1 estão exemplificados o emprego de 4 impulsos para construção da curva V-t. O procedimento resume-se em marcar o instante de ocorrência da ruptura em relação ao pico da onda que levou à ruptura. Se o instante desta ruptura ocorrer após o pico da onda, cruza-se o instante de ocorrência com o pico da respectiva onda. Se a ruptura ocorre antes do pico da onda, marca-se apenas este instante. Através de métodos numéricos, é traçada uma curva que passe com o menor desvio pelos pontos considerados (A, B, C e D na Figura 6.1).

O primeiro impulso da Figura 6.1, contado de baixo para cima, causa uma ruptura de isolação em 16  $\mu$ s assim, cruza-se este instante de ruptura com o pico da respectiva onda gerando o ponto D. Mesmo procedimento é adotado para o ponto C, que tem ruptura em 6  $\mu$ s. Ambos os pontos C e D ocorrem após o pico de onda. Os pontos A e B são demarcados no instante da ruptura pois estes ocorrem antes mesmo do impulso atingir seu pico máximo.

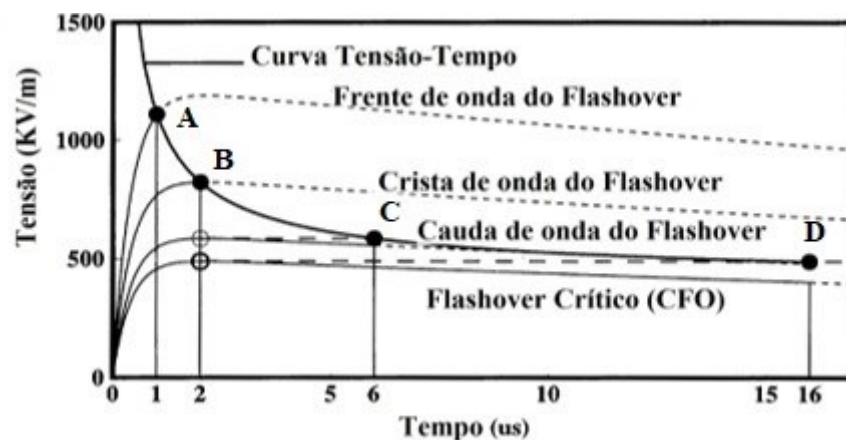


Figura 6.1 - Procedimento de obtenção da curva V-t. Adaptado de (IEEE, 1997).

A ruptura de isolamento analisada a partir da curva V-t leva em consideração a tensão disruptiva para a ocorrência da ruptura e pode ser calculada através da equação (6.1) onde  $V_d$  é a tensão disruptiva,  $t$  é o tempo e,  $L$  é o comprimento da cadeia de isoladores.

$$V_d = \left( 400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) \cdot L \quad (6.1)$$

A Figura 6.2 ilustra curvas V-t da equação (6.1) para diferentes comprimentos de cadeias de isoladores.

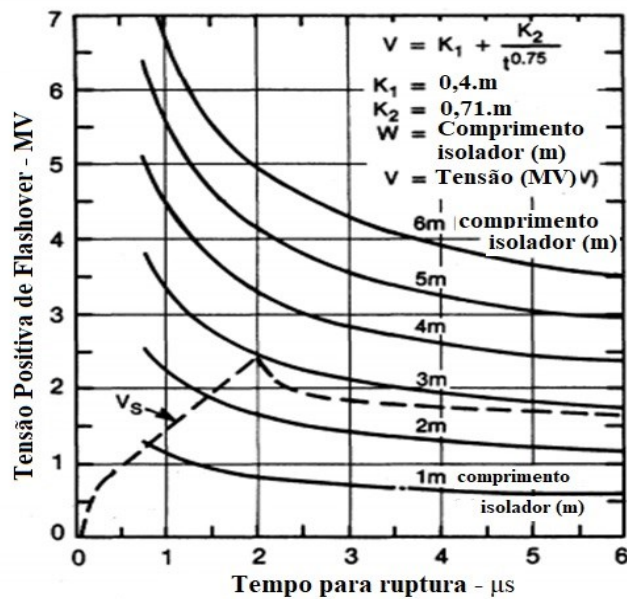


Figura 6.2 - Curva V-t IEEE. Adaptado de (IEEE, 1985).

Através do método “up and down”, a curva V-t é obtida para determinar o nível de suportabilidade de isoladores de linhas de transmissão. O nível de suportabilidade da linha de transmissão é mensurado a partir do chamado CFO (*Critical Flashover Voltage*) que coincide com o valor de amplitude de tensão em 16  $\mu$ s na curva V-t (CHISHOLM, 2010). O CFO corresponde ao valor da crista de onda de um impulso padrão para o qual há 50% de probabilidade de haver ruptura de isolamento (IEEE, 1997).

A adoção da curva V-t para determinar a ruptura de isolamento de linhas de transmissão frente a surtos impulsivos de tensão associados a correntes de descargas atmosféricas pode apresentar limitações quanto à sua utilização, pois esta tem sua origem baseada no impulso padrão cujo formato de onda é significativamente diferente daquele das ondas reais de corrente de descarga (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020). Para contornar este problema, foi proposto na literatura o método *DE* (*disruptive effect model*), que considera, além da amplitude da sobretensão, o efeito integral (acumulado) da solitação de tensão ao longo do tempo.



Com base nos procedimentos descritos para construção da curva V-t, adaptou-se o mesmo para os impulsos aplicados em amostras de solo. A partir desta adaptação, analisou-se o campo elétrico crítico para ionização do solo (CIEF) com base nos dados de ruptura das amostras no banco de dados. Este procedimento é descrito a seguir.

### 6.1.2 Cálculo do CIEF

O cálculo do CIEF (*Critical Ionization Electric Field*) é baseado na brochura do (IEEE, 1985) para construção de curvas V-t, portanto, o procedimento indicado no item 6.1.1 foi repetido e adaptado para todos os solos em análise para ondas com tempo de frente rápido.

Primeiramente, as ondas nas quais houve ruptura são recuperadas a partir da curva de referência e tem sua ruptura marcada na curva com um asterisco conforme Figura 6.3. Em seguida, se esses pontos de ruptura ocorrem posteriores à crista de onda, faz-se a interseção destes pontos com a crista da respectiva onda, gerando os pontos de projeção vistos na Figura 6.3. Se esse o ponto de ruptura ocorre antes da crista, então marca-se apenas este instante.

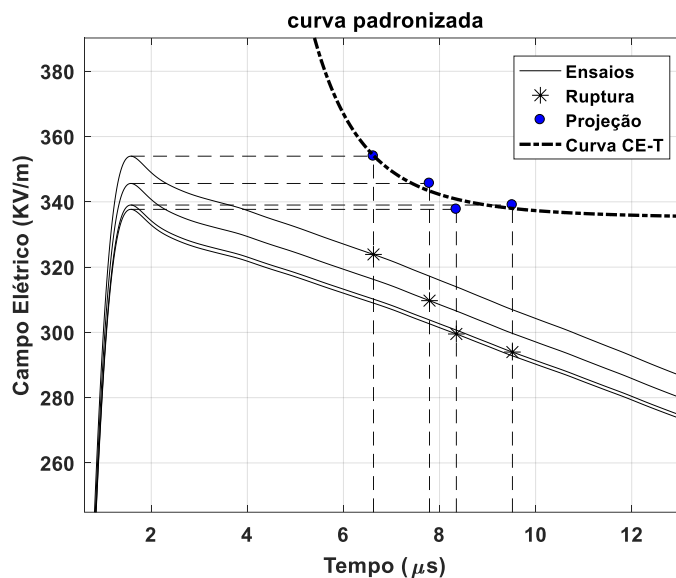


Figura 6.3 - Curva CE-T para o Solo 2 – 276 Ω.m, umidade original.

Através do Matlab, investigou-se diferentes modelos matemáticos que pudessem resultar em uma curva de aproximação dos pontos considerados. O modelo que apresentou menor desvio é aquele apresentado na equação (6.2), cujos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  são calculados pelo algoritmo, e é denominada Curva CE-T. O algoritmo do Matlab utiliza o método dos mínimos quadrados não linear para cálculo dos coeficientes.

$$f(t) = a \cdot t^b + c \quad (6.2)$$

A curva CE-T relaciona o campo elétrico no solo em função do tempo para ruptura. O CIEF é tomado como sendo a amplitude do campo elétrico na curva em 16  $\mu$ s, pois a partir deste instante a probabilidade de ocorrência de rupturas é muito pequena, além de ser o ponto cuja decaimento da curva CE-T é mínimo (*flat*). A seguir são apresentados os modelos para gerar as curvas CE-T para cada solo e umidade. O perfil de cada curva pode ser verificado no Anexo II – Curvas CE-T.

Tabela 6.1 - Resumo dos modelos para gerar curvas CE-T

Solo	Resistividade	Umidade	tf ( $\mu$ s)	Modelo (Coeficientes com limites de confiança de 95%)
1	1200 $\Omega$ .m	original	1,1	$E(kV/m) = 333,005 \cdot t^{-2,510} + 387,598$
		5%	-	Não há dados suficientes
		10%	-	Não há dados suficientes
2	276 $\Omega$ .m	original	1,5	Não há dados suficientes
		5%	1,4	Não há dados suficientes
		10%	-	Não há dados suficientes
3	1450 $\Omega$ .m	original	1,3	$E(kV/m) = 373,342 \cdot t^{-1,660} + 368,665$
		5%	1,2	$E(kV/m) = 271,314 \cdot t^{-2,986} + 310,114$
		10%	1,3	$E(kV/m) = 124,625 \cdot t^{-1,465} + 332,519$
4	400 $\Omega$ .m	original	1,2	$E(kV/m) = 392,109 \cdot t^{-2,267} + 318,177$
		5%	1,2	$E(kV/m) = 351,047 \cdot t^{-0,905} + 254,460$
		10%	1,0	$E(kV/m) = 794,628 \cdot t^{-2,328} + 255,183$
5	700 $\Omega$ .m	original	1,3	$E(kV/m) = 657,053 \cdot t^{-2,979} + 366,322$
		5%	1,3	$E(kV/m) = 266,463 \cdot t^{-1,003} + 288,804$
		10%	1,2	$E(kV/m) = 364,626 \cdot t^{-1,341} + 289,180$
6	720 $\Omega$ .m	original	1,4	$E(kV/m) = 487,761 \cdot t^{-1,816} + 347,402$
		5%	1,2	Não há dados suficientes
		10%	1,2	$E(kV/m) = 9905,092 \cdot t^{-3,675} + 321,634$
7	100 $\Omega$ .m	original	1,4	$E(kV/m) = 165,789 \cdot t^{-0,841} + 321,027$
		5%	1,5	Não há dados suficientes
		10%	1,2	$E(kV/m) = 1228,312 \cdot t^{-2,075} + 257,718$
8	440 $\Omega$ .m	original	1,1	$E(kV/m) = 1574,652 \cdot t^{-3,473} + 294,618$
		5%	1,1	$E(kV/m) = 468,203 \cdot t^{-1,762} + 274,812$
		10%	1,3	Não há dados suficientes
9	500 $\Omega$ .m	original	1,6	Não há dados suficientes
		5%	2,2	Não há dados suficientes
		10%	2,3	Não há dados suficientes
10	100 $\Omega$ .m	original	1,4	Não há dados suficientes
		5%	1,4	Não há dados suficientes
		10%	1,4	Não há dados suficientes
11	750 $\Omega$ .m	original	1,3	$E(kV/m) = 3063,535 \cdot t^{-3,368} + 620,616$
		5%	1,4	$E(kV/m) = 308,341 \cdot t^{-1,496} + 338,605$
		10%	1,2	$E(kV/m) = 141,562 \cdot t^{-0,848} + 287,948$
12	5950 $\Omega$ .m	original	1,2	Não há dados suficientes
		5%	1,6	Não há dados suficientes
		10%	1,5	Não há dados suficientes
13	5460 $\Omega$ .m	original	1,3	Não há dados suficientes

		5%	1,4	Não há dados suficientes
		10%	1,5	Não há dados suficientes
		original	1,2	$E(kV/m) = 208,325 \cdot t^{-0,748} + 379,053$
14	2500 $\Omega.m$	5%	1,2	Não há dados suficientes
		10%	1,5	Não há dados suficientes
		original	1,4	Não há dados suficientes
15	10000 $\Omega.m$	5%	1,3	$E(kV/m) = 2804,735 \cdot t^{-4,241} + 488,201$
		10%	1,2	$E(kV/m) = 104,305 \cdot t^{-1,322} + 477,327$

Os modelos apresentados acima utilizam o número de rupturas totais para o cálculo do modelo. Quanto maior o número de rupturas, maior o número de pontos considerados para cálculo dos coeficientes do modelo, melhorando assim a sua precisão. O CIEF pode ser verificado de maneira rápida e prática a partir do coeficiente  $c$  dos modelos propostos na Tabela 6.1. Essa escolha é eficiente, pois as curvas tendem a uma assíntota a partir de 16  $\mu s$  e o coeficiente  $c$  pode representar este valor cujo decrescimento é extremamente baixo.

Observando, então, o CIEF para cada solo na Tabela 6.1, nota-se que há um decrescimento do campo elétrico crítico de ionização a medida em que é aumentada a umidade da amostra. Isso decorre da diminuição da resistividade do solo devido a injeção de água na amostra. A Tabela 6.2 indica os valores de campo elétrico (CIEF) a partir da Tabela 6.1.

Tabela 6.2 – Campo elétrico crítico para cada resistividade de solo.

Resistividade	Umidade	$E_c(kV/m)$	Resistividade	Umidade	$E_c(kV/m)$
100 $\Omega.m$	original	321	720 $\Omega.m$	original	347
	10%	257		10%	321
276 $\Omega.m$	original	335	750 $\Omega.m$	original	620
	original	318		5%	338
400 $\Omega.m$	5%	254	1200 $\Omega.m$	10%	287
	10%	255		original	387
440 $\Omega.m$	original	294	1450 $\Omega.m$	original	368
	5%	274		5%	310
700 $\Omega.m$	original	366	2500 $\Omega.m$	10%	332
	5%	288		original	379
	10%	289	10000 $\Omega.m$	5%	488
				10%	477

Pode-se notar, também na Tabela 6.1, que nem todas as amostras de solo resultaram em um número de rupturas suficientes para o cálculo dos coeficientes do modelo ou simplesmente não existiam, sendo representadas então na tabela pela inscrição “*Não há dados suficientes*”. Na Tabela 6.2 os valores de CIEF apresentam a tendência de redução conforme diminui a

resistividade do solo ou aumento da umidade do mesmo. Esta tendência de redução é explorada através de um modelo particular na sessão 6.2.

### 6.1.3 Cálculo da energia acumulada

A metodologia a seguir, propõe a análise da ionização do solo a partir da energia acumulada no processo de aplicação de ondas impulsivas. Desta forma, com o auxílio da curva proposta, pode-se avaliar a ionização utilizando-se apenas a anergia acumulada durante o processo, bem como estimar um ponto de ruptura no tempo, da mesma forma proposta pela curva V-t (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020).

Primeiramente, faz-se a separação das curvas onde foi detectada ruptura da amostra, tanto para a onda de tensão quanto para onda de corrente. Seleciona-se uma curva de referência para poder reconstruir as curvas que foram rompidas. A reconstrução dessas curvas pode ser revista na Figura 5.8 do item 5.4.

Feita a reconstrução das curvas, utiliza-se a equação (6.3) para calcular a energia acumulada durante o processo de aplicação das ondas impulsivas na amostra de solo. Esta equação é dada pela integral no tempo (janela de observação dos vetores de tensão e corrente) do produto entre as ondas de tensão e corrente (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020).

$$W_{acm} = \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (6.3)$$

Onde:

- $W_{acm}$  é a energia acumulada em Joules (J) ou Watt vezes segundo (W.s);
- $v(t)$  é a onda de tensão impulsiva reconstruída a partir da curva de referência de tensão em Volt (V);
- $i(t)$  é a onda de corrente impulsiva reconstruída a partir da curva de referência de corrente em Ampère (A);
- $T$  é o tempo de integração dos vetores de tensão e corrente em segundos (s).

Após o cálculo da energia acumulada, procede-se à marcação do instante de tempo na onda em que foi verificada a ruptura da amostra e faz-se a interseção deste ponto com a máxima amplitude alcançada pela curva de energia acumulada. Este procedimento diferencia-se um pouco do procedimento da curva V-t pois, no caso das energias, não é necessário verificar se a

ocorrência da ruptura é antes ou depois da crista de onda da tensão (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020). A Figura 6.4 ilustra o procedimento utilizando como base o Solo 1 – 1200  $\Omega$ .m, umidade original para ambos os tempos de frente disponíveis.

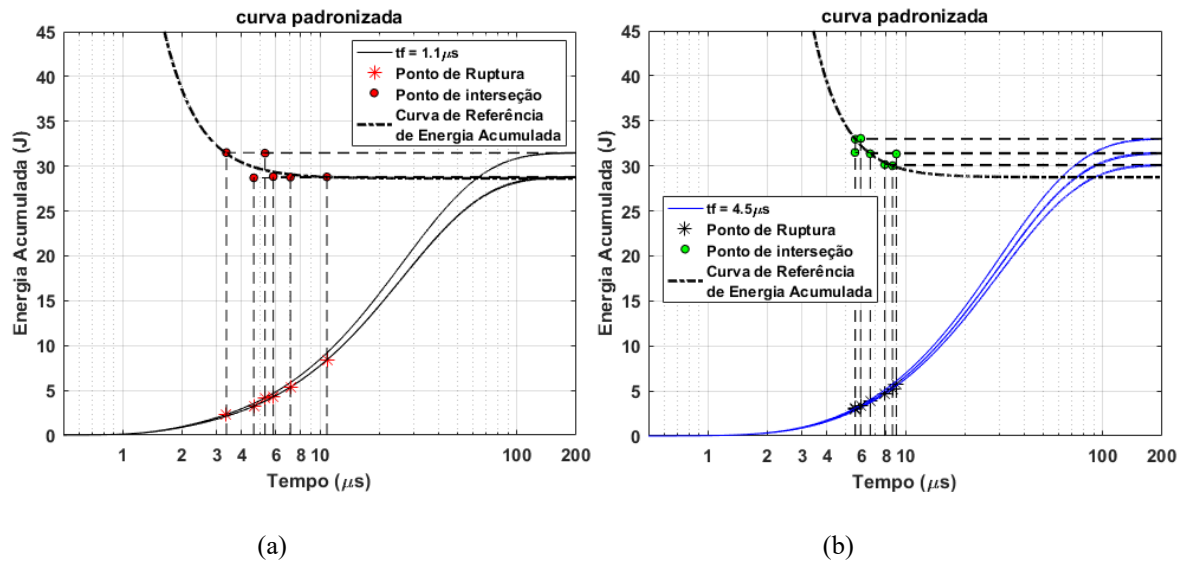


Figura 6.4 - Curva de energia acumulada para o Solo 1 – 1200  $\Omega$ .m, umidade original, tempo de frente 1,1  $\mu$ s (a) e 4,5 $\mu$ s (b).

Há uma grande similaridade entre as duas figuras apresentadas acima. A curva de energia acumulada de referência é muito parecida com a curva V-t, tanto para as curvas com rápido tempo de frente, quanto para aquelas mais longas. Objetivando investigar o fenômeno da ionização para ondas diferentes do impulso padrão, optou-se por continuar a investigação utilizando apenas as curvas de energia acumulada vistas na Figura 6.4 (b). As ilustrações completas para os solos com ondas lentas podem ser consultadas no Anexo III – Curvas de Energia Acumulada.

A curva de referência de energia acumulada vista na Figura 6.4 é baseada no mesmo modelo da equação (6.2) cujos coeficientes são calculados a partir dos pontos de interseção entre as máximas amplitudes das curvas de energia acumulada e seus respectivos pontos de ruptura.

A seguir, são apresentados na Tabela 6.3 os modelos de curva de referência de energia acumulada para os solos analisados em relação às ondas lentas.

Tabela 6.3 - Modelos de curva de referência de energia acumulada para ondas lentas.

Solo	Resistividade	Umidade	tf ( $\mu$ s)	Modelo (Coeficientes com limites de confiança de 95%)
1	1200 $\Omega$ .m	original	4,5	$W_{ref}(t) = 492,411 * t^{-2,767} + 28,738$
2	276 $\Omega$ .m	original	4,9	Não há dados suficientes
3	1450 $\Omega$ .m	original	4,9	$W_{ref}(t) = 699,554 * t^{-3,535} + 10,591$
4	400 $\Omega$ .m	original	4,3	$W_{ref}(t) = 33,209 * t^{-1,399} + 27,405$
5	700 $\Omega$ .m	original	4,1	$W_{ref}(t) = 961,900 * t^{-2,838} + 17,345$
6	720 $\Omega$ .m	original	4,2	$W_{ref}(t) = 285,488 * t^{-1,868} + 24,817$
7	100 $\Omega$ .m	original	4,2	$W_{ref}(t) = 863,339 * t^{-2,904} + 8,462$
8	440 $\Omega$ .m	original	4,7	$W_{ref}(t) = 364,680 * t^{-1,345} + 48,379$
9	500 $\Omega$ .m	original	4,8	Não há dados suficientes
10	100 $\Omega$ .m	original	4,0	$W_{ref}(t) = 590214,737 * t^{-0,974} + 82,821$
11	750 $\Omega$ .m	original	4,3	$W_{ref}(t) = 481,081 * t^{-1,645} + 43,312$
12	5950 $\Omega$ .m	original	4,6	$W_{ref}(t) = 18,286 * t^{-0,887} + 52,196$
13	5460 $\Omega$ .m	original	4,6	Não há dados suficientes
14	2500 $\Omega$ .m	original	4,5	Não há dados suficientes
15	10000 $\Omega$ .m	original	4,7	Não há dados suficientes

Na Tabela 6.3 estão apresentados os modelos das curvas de referência de energia acumulada baseados na equação (6.2). A partir destes modelos, é possível retirar com facilidade a energia crítica de ionização do solo a partir do coeficiente *c*. Esta energia pode ser interpretada como o limiar de energia a ser alcançado para haver ruptura nas amostras de solo. A seguir, são apresentados na Tabela 6.4, os solos com os melhores resultados referentes ao modelo desenvolvido para prosseguir com as análises.

Tabela 6.4 – Energia acumulada mínima de referência para os solos escolhidos.

Solo	Resistividade	Energia acumulada mínima de referência
7	100 $\Omega$ .m	8 J
5	700 $\Omega$ .m	17 J
1	1200 $\Omega$ .m	28 J
12	5950 $\Omega$ .m	52 J

#### 6.1.4 Modelo genérico para curvas de referência de energia acumulada

Procurando-se estabelecer um modelo que pudesse representar mais genericamente os solos analisados, escolheram-se os modelos da Tabela 6.3 referentes aos Solos 7, 5, 1 e 12

abrangendo, assim, uma faixa de resistividade compreendida entre 100  $\Omega.m$  a 5950  $\Omega.m$ . A Tabela 6.5 e a Figura 6.5 resumem as características dos solos retirada da publicação do autor (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020).

Tabela 6.5 – Características da amostra de solo. Fonte: (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020).

Tipo de solo	$\rho$ ( $\Omega.m$ )	Umidade (% de água destilada)	Tempo de frente ( $\mu s$ )
I	100	0	1,4/ 50 e 4,2/ 50
		5	1,5/ 50 e 4,3/ 50
		10	1,2/ 50 e 3,9/ 50
II	700	0	1,3/ 50 e 4,1/ 50
		5	1,3/ 50 e 4,3/ 50
		10	1,2/ 50 e 4,3/ 50
III	1200	0	1,3/ 50 e 4,9/ 50
		5	----
		10	----
IV	5950	0	1,2/ 50 e 4,6/ 50
		5	1,6/ 50 e 4,3/ 50
		10	1,5/ 50 e 4,9/ 50

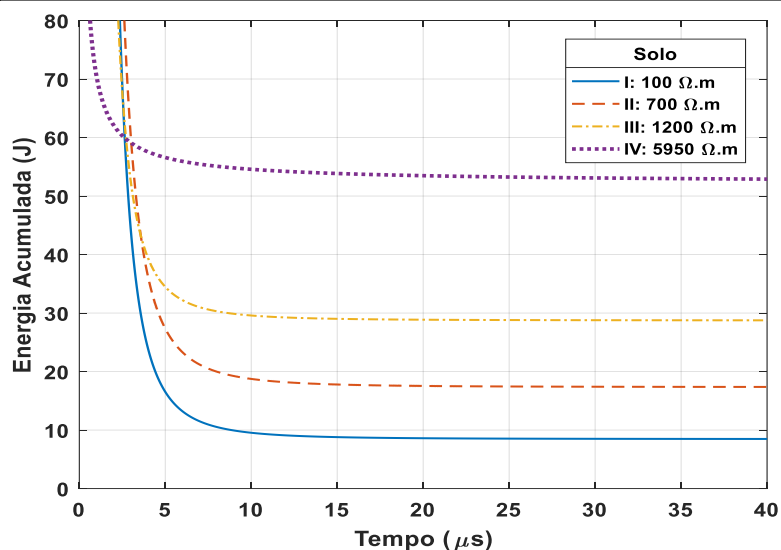


Figura 6.5 - Curvas de referência de energia acumulada para os Solos 7, 5, 1 e 12 (I, II, III e IV respectivamente). Fonte: (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020).

A curva de referência de energia acumulada para o Solo IV vista na Figura 6.5 é ligeiramente deslocada para a esquerda em relação às demais curvas. Isso deve-se ao fato da pouca quantidade de pontos de ruptura disponíveis nesta resistividade de solo fazendo com que houvesse perda de precisão no modelo. Entretanto, acredita-se que o comportamento desta curva siga a tendência das demais.

As curvas retratadas tanto na Figura 6.5 como as da Tabela 6.3, suprimem o parâmetro resistividade do solo, portanto, fazendo-se uma investigação das energias mínimas para início do processo de ionização, a equação (6.2) passa a ser escrita na forma da equação (6.4).

$$W_{ref}(t) = a \cdot t^b + c \cdot \rho^d + e \quad (6.4)$$

Os novos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $e$  são as novas constantes a serem calculadas para formar a equação geral para curva de referência de energia acumulada com função explícita da resistividade do solo e do tempo. O mesmo código utilizado para calcular as constantes da equação (6.2) foi reutilizado com adaptações para calcular as constantes da equação (6.4), cujo resultado é mostrado na equação (6.5).

$$W_{ref}(t) = 350 \cdot t^{-2,2} + 1,285 \cdot \rho^{0,432} + 1,286 \quad (6.5)$$

A Figura 6.6 ilustra a equação (6.5) em comparação com as curvas individuais que a geraram. Há uma boa semelhança entre o modelo proposto e as demais curvas, com exceção da curva referente ao Solo IV por motivo já explicado.

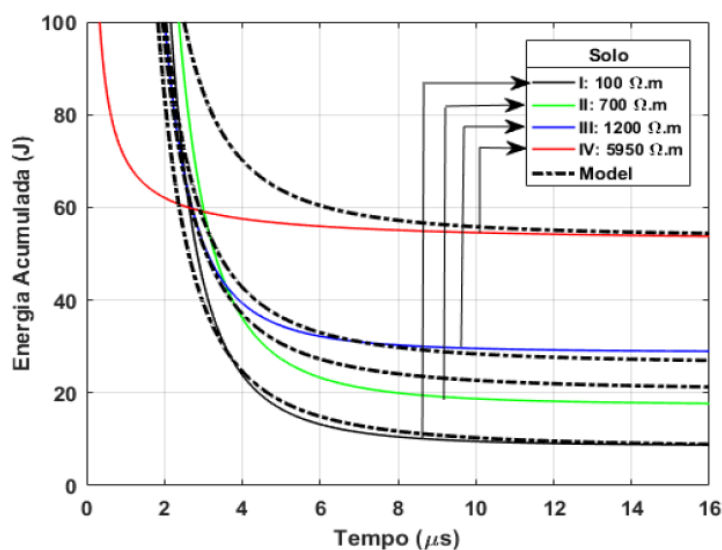


Figura 6.6 – Modelo de curva de referência de energia acumulada testada para algumas resistividades de solo. Fonte: (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020).

A Tabela 6.6, extraída de (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020), mostra os resultados publicados referentes ao modelo proposto. Esta tabela apresenta a comparação do modelo para ondas com diferentes tempos de frente. A maioria dos solos testados com o modelo apresentaram bons resultados com baixa margem de erro. No caso do Solo II, um elevado erro foi encontrado para o ensaio com tempo de frente rápido, o que pode ter sido motivado pela adoção desta curva em específico cujo tempo de ruptura foi maior do que o esperado para a



amplitude do impulso empregado. Quanto ao Solo IV, tempo de frente curto, não houve ensaios a serem testados com o modelo.

Tabela 6.6 – Resultados referentes ao modelo. Fonte: (CORRÊA, COTA e VISACRO, 2020).

Solo	Tempo de frente (µs)	Ruptura Real/Calculada	Energia Real/Calculada	Erro relativo (%) Ruptura/Energia
I	4,2	3,925    4,033	0,982    1,063	2,76    8,24
	1,4	10,342    9,167	2,935    2,608	-11,36    -11,16
II	4,1	4,867    5,075	1,964    2,154	4,28    9,69
	1,3	9,525    15,025	5,262    8,042	57,74    52,84
III	4,5	6,642    6,817	3,841    3,988	2,63    3,82
	1,1	6,950    6,725	5,743    5,534	-3,24    -3,63
IV	4,6	11,275    12,908	14,459    17,016	14,49    17,68
	1,2	--    --	--    --	--    --

### 6.1.5 Exemplo de aplicação

Este exemplo será conduzido a partir dos ensaios tomados para o solo 7, 100 Ω.m, umidade original.

Deseja-se saber se a aplicação de um certo impulso de tensão/corrente levará a ruptura de uma amostra de solo com resistividade de 100 Ω.m. Com o auxílio da equação (6.3), integre-se o produto entre as ondas de tensão e corrente durante o período de observação da onda, que, neste caso, vale 200 µs.

$$W_{acm} = \int_0^{200 \cdot 10^{-6}} v(t) \cdot i(t) dt = 23,65 \text{ Joules} \quad (6,6)$$

O tempo utilizado na integração deve estar no S.I assim, os 200µs deve ser substituído por  $2 \cdot 10^{-4} s$ . Com este valor de energia, utiliza-se o modelo proposto na equação (6.5) para verificar se ao final de 16 µs, a energia acumulada ultrapassa o mínimo requerido para ruptura nesta resistividade de solo. Proceda-se:

$$W_{Ref}(16) = 350 \cdot 16^{-2,2} + 1,285 \cdot 100^{0,432} - 1,286 = 8,8944 J \quad (6,7)$$

Na equação (6,7), o tempo deve ser utilizado diretamente em  $\mu\text{s}$ . Uma vez que a energia acumulada dos impulsos de tensão e corrente, ao final de  $200 \mu\text{s}$  é maior do que a energia acumulada de referência em  $16 \mu\text{s}$ , logo, é provável que haja ruptura da amostra, Para estimar o tempo em que houve esta ruptura, substitui-se o resultado da equação (6,6) na equação (6,7), Proceda-se:

$$23,65 = 350 * t^{-2,2} + 1,285 * 100^{0,432} - 1,286 \quad (6,8)$$

$$t = 4,1192 \mu\text{s}$$

Para calcular a energia acumulada até o tempo de ruptura, substitui-se o resultado da equação (6,8) na equação (6,6), procede-se:

$$W_{acm} = \int_0^{4,1192 \cdot 10^{-6}} v(0 \rightarrow 4,1192 \cdot 10^{-6}) * i(0 \rightarrow 4,1192 \cdot 10^{-6}) dt = 1,09 J \quad (6,9)$$

A comparação do resultado medido em relação ao calculado com o método pode ser verificado na Figura 6.7. A ruptura real da amostra para o impulso aplicado ocorre em  $3,942 \mu\text{s}$  com uma energia de  $0,961 J$  enquanto que o modelo estimou uma ruptura em  $4,125 \mu\text{s}$  com uma energia acumulada de  $1,095 J$ . A diferença percentual foi de  $4,65 \%$  para o tempo de ruptura e  $13,96 \%$  para a energia.

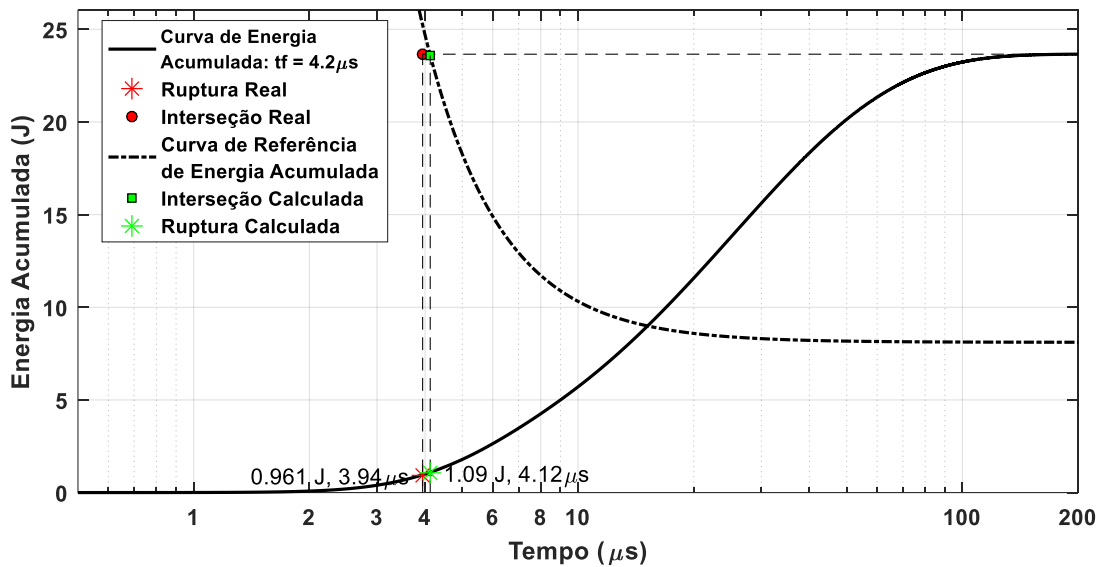


Figura 6.7 – Exemplo de aplicação do modelo de energia acumulada para um solo de  $100 \Omega.m$ .

## 6.2 Extensão do modelo para o campo elétrico

Visto que é possível realizar a análise da ionização do solo a partir da energia acumulada, tentou-se expandir o modelo para relacionar o campo elétrico com a resistividade

do solo utilizando-se como base os mesmos 4 Solos utilizados anteriormente, e indicados na Tabela 6.5. A seguir, verifica-se o comportamento do campo elétrico para estes solos considerando-se apenas as ondas lentas.

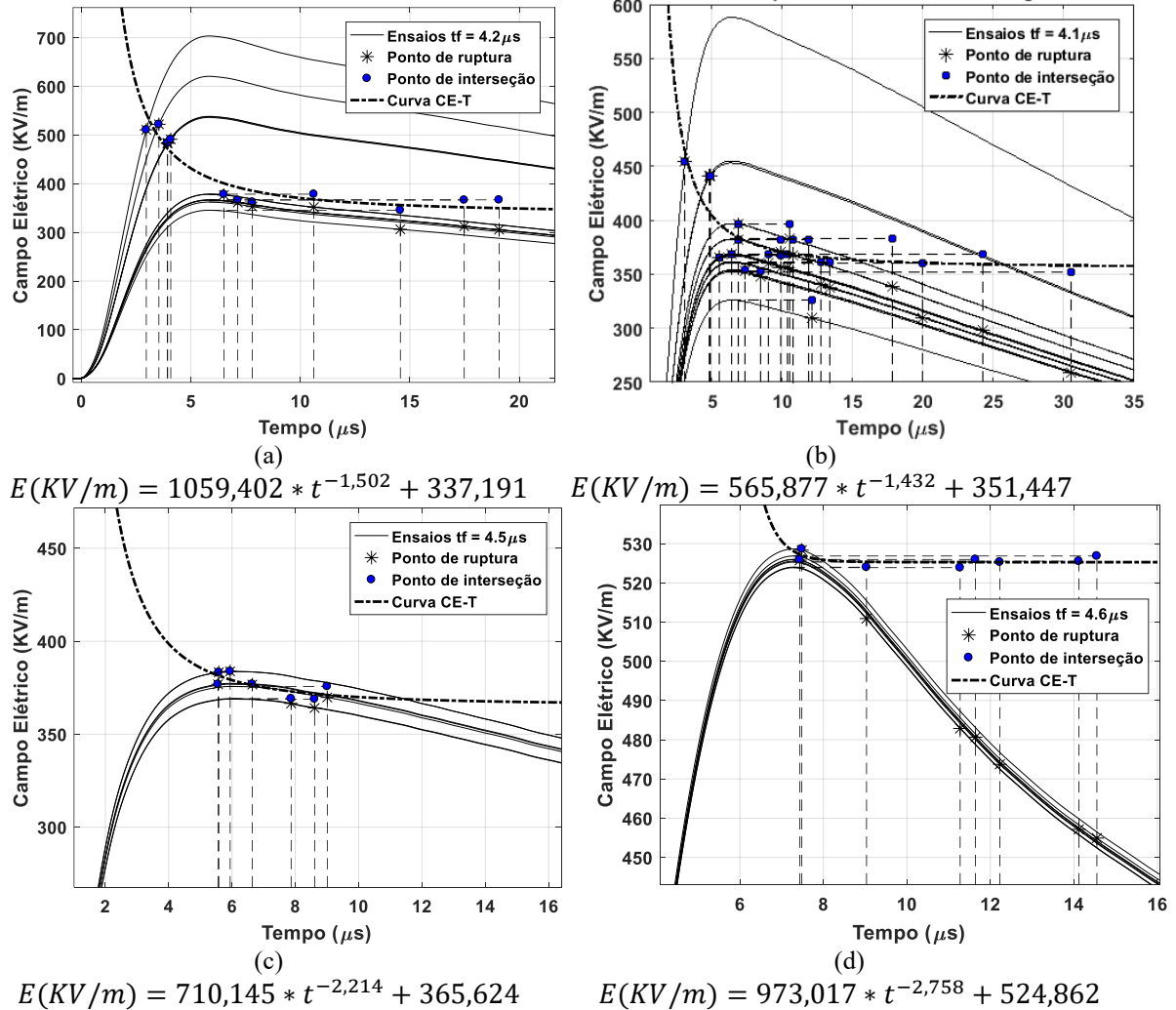


Figura 6.8 – Campo elétrico para os solos da Tabela 6.5, ondas lentas. Solo I (a), Solo II (b), Solo III (c), Solo IV (d).

A partir dos 4 solos vistos na Figura 6.8, procedeu-se à construção do modelo baseado na equação (6.4) usando os mesmos procedimentos descritos anteriormente. O modelo resultante pode ser visto na equação (6.10),

$$E(kV/m) = 722,148 \cdot t^{-1,741} + 0,008744 \cdot \rho^{1,149} + 335,4 \quad (6.10)$$

A Figura 6.9 ilustra a comparação do modelo obtido com as demais curvas CE-T para o caso de ondas lentas. Nota-se que o modelo apresenta maior similaridade para os solos II e III do que para os demais. No caso do solo I, o modelo apresenta certa divergência para tempos inferiores a 25μs e, para o solo IV a divergência ocorre para tempos inferiores a 20μs. A inclinação das curvas é um dos fatores que contribuem para esta divergência,

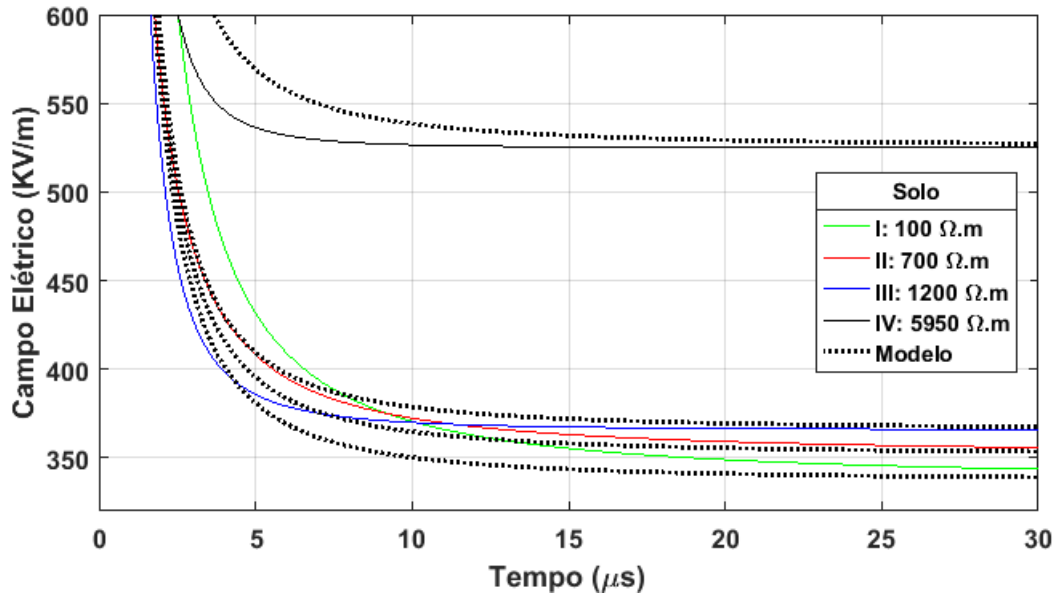


Figura 6.9 – Comparação do modelo de curva CE-T em função da resistividade.

### 6.2.1 Exemplo de aplicação

Deseja-se saber se a aplicação de um certo impulso de tensão/corrente levará a ruptura de uma amostra de solo com resistividade de 1200 Ω.m. A onda de campo elétrico resultante do impulso tem amplitude máxima de 383,76 kV/m no solo com tempo de frente de 4,5 μs. Com o auxílio da equação (6.10), substitui-se a resistividade do solo que se quer analisar para se obter a curva CE-T do solo em função do tempo. Proceda-se:

$$E(kV/m) = 722,148 \cdot t^{-1,741} + 0,008744 \cdot 1200^{1,149} + 335,4 \quad (6,11)$$

$$E(kV/m) = 722,148 \cdot t^{-1,741} + 365,57$$

Em seguida, procede-se com o cálculo do CIEF em 16 μs fazendo-se a devida substituição na equação (6,11).

$$E(kV/m) = 722,148 \cdot 16^{-1,741} + 365,57 = 371,35 \quad (6,12)$$

Compara-se o resultado da equação (6.12) com a amplitude da onda de campo elétrico na amostra. Nota-se que a onda de campo elétrico alcançou um pico que excede o valor delimitado pelo CIEF, o que indica alta probabilidade de ruptura devido ionização do solo. Para estimar o tempo desta ruptura, substitui-se o valor do pico da onda de campo elétrico na equação (6,11) na forma da equação (6.13).

$$383,76 = 722,148 \cdot t^{-1,741} + 365,57 \quad (6,13)$$

$$t = 8,28 \mu s$$

Assim, uma onda de campo elétrico de tais características aplicada em um solo de 1200  $\Omega.m$ , levá-lo-ia à condição de ionização e consequente ruptura em um tempo estimado de 8,28  $\mu s$ . A Figura 6.10 ilustra a aplicação real do impulso na amostra de solo. O asterisco vermelho marca a ruptura real da amostra enquanto que o verde marca o ponto calculado pelo modelo.

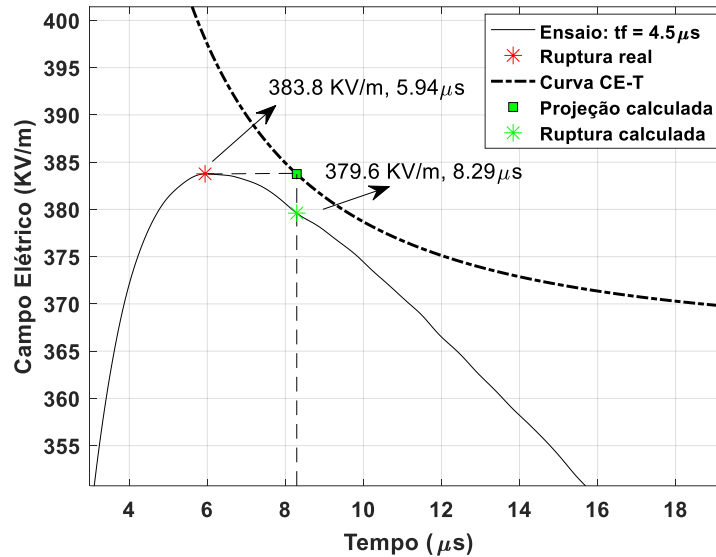


Figura 6.10 - Exemplo de aplicação da curva CE-T.

No caso exemplificado na figura acima, a ruptura real na amostra ocorre na crista da onda (5,94 $\mu s$ ) porém, o modelo calculou um tempo posterior ao pico (8,29 $\mu s$ ). Essa diferença de cerca de 40% deve-se ao fato do deslocamento da curva CE-T em relação àquela original vista na Figura 6.9 para esta resistividade de solo.

Este exemplo demonstra que é possível analisar o comportamento do solo segundo o modelo proposto porém, há a necessidade de explorar melhor a construção dos coeficientes, não só das curvas CE-T originais de cada resistividade de solo, mas também aqueles do modelo genérico em função da resistividade (equação (6.10)).

# 7. Conclusões e Proposta de Continuidade

## 7.1 Conclusões

As análises desenvolvidas nesta dissertação de mestrado permitem a elaboração de um conjunto principal de conclusões desenvolvidas nos seguintes tópicos:

- O campo elétrico crítico em condição de campo uniforme;
- Modelos de avaliação da ionização por curva de energia acumulada e por campo elétrico.

### 7.1.1 *O campo elétrico crítico em condição de campo uniforme*

Na análise do campo elétrico uniforme submetido às amostras de solo, três parâmetros principais foram explorados: determinação do campo crítico, influência da umidade na ionização do solo e tempo para ruptura da amostra.

Quanto à determinação do campo crítico, as tabelas 5.1 e 6.2 são fundamentais e mostraram o quanto o campo elétrico pode variar à medida em que se aumenta ou diminui a resistividade da amostra e ao se modificar a sua umidade natural. Comparando com os resultados obtidos por (MOUSA, 1994) e (CIGRE, 1991) os quais definem o campo elétrico crítico de ionização do solo como sendo 300 kV/m e 400 kV/m respectivamente, nota-se que os valores de campos obtidos nesta dissertação ficaram em torno desta faixa. Porém, notou-se que para os solos de mais baixa resistividade (na faixa de 500  $\Omega$ .m e abaixo), os campos elétricos mínimos para o qual foi detectado a primeira ruptura de amostra ficaram bem abaixo daquele sugerido por Mousa, tendo em média o valor de 250 kV/m para início do processo de acordo com a Tabela 5.1.

Se considerarmos a Tabela 6.2, que computa todas as rupturas das amostras com um modelo mais apurado e robusto, pode-se observar que esta tendência também se concretiza,

Para solos até a faixa de 500  $\Omega$ .m, o campo elétrico requerido para início do processo aproxima-se de 300 kV/m enquanto que para solos de mais alta resistividade o campo elétrico aproxima-se de 400 kV/m.

A umidade é outro fator relevante a ser considerado na análise do campo elétrico crítico. Os ensaios mostraram que quanto mais umidade há no solo, menor é o valor de campo elétrico requerido para ionização devido à diminuição da resistividade. Para os solos com umidade em 5 %, a redução percentual média no valor do campo elétrico mínimo ficou em torno de 14 % enquanto que para os solos com umidade em 10 %, a redução percentual ficou em média 23 %,

Quanto ao tempo de ruptura das amostras, verificou-se que esta ocorre de forma aleatória. Porém, para sucessivos ensaios com um impulso de mesma amplitude, há uma variação de cerca de 1 a 2  $\mu$ s em torno de um valor médio. As rupturas totais podem ocorrer numa ampla faixa de valores tendo maior probabilidade de ocorrência quanto maior for a sua amplitude do impulso em relação ao valor de referência (CIEF), naquela resistividade de solo.

Um resultado relevante do trabalho consiste na forma de evolução do processo de ionização do solo sob campo uniforme. Era esperado que, sob tais condições, a impedância transitória da amostra de solo não se modificasse até que se atingisse o CIEF, quando haveria ruptura total da amostra. Porém, com as figuras mostradas no item 5.6, pode-se constatar a ocorrência de ionização do solo, mesmo em um pequeno *gap* sob campo uniforme, a partir de campos cujos valores têm a ordem da metade do valor do campo de ruptura (aproximadamente 150 kV/m contra cerca de 300 kV/m para o Solo 4, 400  $\Omega$ .m). Atribui-se esse comportamento à distorção de campo elétrico decorrente dos grãos e partículas do solo da amostra.

### ***7.1.2 Modelos de avaliação da ionização por curva de energia acumulada e por campo elétrico***

O modelo apresentado nesta dissertação para avaliação da ionização das amostras de solo através da energia acumulada mostrou-se bem eficiente, embora não se tenha utilizado para sua concepção todos os modelos levantados na Tabela 6.3. Esta é uma nova ferramenta para tratar da avaliação da ionização do solo, considerando campo uniforme, que pode ser mais explorada em trabalhos futuros.

Quanto ao modelo de avaliação da ionização utilizando o campo elétrico e a resistividade do solo, é necessário explorar outras formas de construção do mesmo para

---

melhorar sua precisão na faixa de interesse (até  $16\mu\text{s}$ ). Porém, o modelo da equação (6.10) apresentado para construção da curva CE-T, demonstra-se apto a representar de maneira geral a variação do campo elétrico com a resistividade do solo. Talvez, utilizar um número maior de curvas CE-T individuais que abranjam mais resistividades de solo possa melhorar os coeficientes do modelo genérico e, assim, aumentar a correlação desta com as curvas que lhe deram origem. A aparente não correlação entre campo elétrico e resistividade do solo, já fora notada também por Mousa em 1994 (MOUSA, 1994).

## 7.2 Propostas de Continuidade

Sugere-se como proposta de continuidade deste trabalho de dissertação os seguintes tópicos:

- Análise do banco de dados dos ensaios referentes à cuba cilíndrica para comparação dos resultados aqui apresentados;
- Refinamento do modelo para a curva de referência de energia acumulada
- Melhoria dos coeficientes do modelo para análise do campo elétrico em função da resistividade do solo (curva CE-T).



# Referências Bibliográficas

BELLASCHI, P. L. Impulse and 60-cycle Characteristics of Driven Grounds. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, 60, n. 3º, March 1941. 123 - 128.

BELLASCHI, P. L.; ARMINGTON, R. E.; SNOWDEN, A. E. Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds - II. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, 61, n. 6º, June 1942. 349 - 363.

CALDWELL, R. O.; DARVENIZA, M. Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, July 1973. 1420 - 1428.

CHEN, H.; DU, Y. Lightning Grounding Grid Model Considering Both the Frequency-Dependent Behavior and Ionization Phenomenon. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 61, n. 1º, 12 January 2018. 157 - 165.

CHISHOLM, W. A. New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, 26, n. 2º, 10 June 2010. 14 - 25.

CIDRAS, J.; OTERO, A. F.; GARRIDO, C. Nodal frequency analysis of grounding systems considering the soil ionization effect. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 15, n. 1º, January 2000. 103 - 107.

CIGRE. **Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines**. [S.l.]. 1991.

CORRÊA, A. D. F.; COTA, F. E. M.; VISACRO, S. Metodologia para Avaliação da Ionização do Solo Frente a Descargas Atmosféricas. **XIV Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia Elétrica – ENEEEL**, Belém, Pará, 3 - 7 Fevereiro 2020. 1-6.

COTA, F. E. M.; VISACRO, S. Experimental Investigation on the Evolution of the Soil Ionization Effect. **XIV International Symposium on Lightning Protection**, Natal, Brazil, 2nd – 6th October 2017.

FILIPOVIĆ-GRČIĆ, D.; FILIPOVIĆ-GRČIĆ, B.; UGLEŠIĆ, I. Lightning Critical Flashover Voltage of High Voltage Insulators: Laboratory Measurements and Calculations. **International Review of Electrical Engineering**, 7, March-April 2012. 4321-4328.

GRCEV, L. Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements. **18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility**, Munich, Germany, Germany, 24-28 Sept 2007. 325-328.

HE, J.; ZHANG, B. Soil ionization phenomenon around grounding electrode under lightning impulse. **Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)**, Melbourne, VIC, Australia, 20-23 May 2013.

HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systemns**. Raleigh, North Carolina: Taylor & Francis Group, 1999.

IEEE. **A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines**. [S.l.], p. 918 - 932. 1985. (0018-9510).

IEEE. Review of research on nonstandard lightning voltage waves. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 9, October 1994. 1972 - 1981.

IEEE. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. **IEEE Standards Board**, 16 December 1997. 1 - 44.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering. Fundamentals**. 2°. ed. [S.l.]: Newnes, 2000. 534 p. ISBN 0 7506 3634 3.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. Tradução de Gustavo Guimarães Parma. 2°. ed. São Paulo: Bookman, 2007. 856 p. ISBN 8560031138.

LIEW, A. C.; DARVENIZA, M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, n. 2°, February 1974. 123 - 135.

LIU, Y. et al. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results. **2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.03CH37446)**, Boston, MA, USA, 18-22 Aug. 2003. 794-799.

LIU, Y. et al. An improved model for soil ionization around grounding system and its application to stratified soil. **Journal of Electrostatics**, 60, n. 2º - 4º, March 2004. 203-209.

LOBODA, M.; SCUKA, V. On the Transient Characteristics of Electrical Discharges and Ionization Processes in Soil. **23. International Conference on Lightning Protection**, Florence, Italy. 539-544.

MOKHTARI, M.; ABDUL-MALEK, Z.; SALAM, Z. The effect of soil ionization on transient grounding electrode resistance in non-homogeneous soil conditions. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, 26, n. 7º, July 2016. 1462-1475.

MOUSA, A. M. The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 9, July 1994. 1669-1677.

OETTLÉ, E. E. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 3, n. 4, October 1988. 2020 - 2029.

TOWN, H. M. Impulse characteristics of driven grounds. **General Electric Review**, 31, November 1928. 605-609.

VISACRO, S. **Aterramentos Elétricos - Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**. 1º. ed. São Paulo: Artlieber, 2002. 159 p. ISBN 8588098121.

VISACRO, S. A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 22, n. 1, January 2007. 381 - 386.

VISACRO, S. Resposta dos Aterramentos Elétricos Frente a Correntes de Descargas Atmosféricas. **SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Rio de Janeiro, 14 a 17 Outubro 2007.

VISACRO, S. et al. The Impulse Coefficient of Short Grounding Electrodes. Notas de sala de aula.

VISACRO, S.; PORTELA, C. M. Investigation of soil as a lossy dielectric. **Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**, Beijing, China, 12-16 September 1988. 515-518.

VISACRO, S.; ROSADO, G. Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility** , 51, n. 1º, 18 February 2009. 161 - 164.

VISACRO, S.; SOARES, A. Análise do Efeito da Intensidade de Corrente de Descarga no Comportamento Transitório de Aterramentos Elétricos. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Florianópolis, 1995.

WITZKE, R. L.; BLISS, T. J. Co-ordination of Lightning Arrester Location with Transformer Insulation Level. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, 69, n. 2º, January 1950. 964 - 975.

## Anexo I – Banco de dados de solos para condição de campo uniforme

Tabela de dados de solos do LRC para campo uniforme,

Solo 1 – 1200 $\Omega.m$									
Umidade	Quantidade de Ensaio Realizados	Ensaio Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,1/ 50 $\mu s$		4,5/ 50 $\mu s$					
	65	22	36-58	26	9-35	22	36-58	26	9-35
Solo 2 – 276 $\Omega.m$									
Umidade	Quantidade de Ensaio Realizados	Ensaio Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,5/ 50 $\mu s$		4,9/ 50 $\mu s$					
	96	33	10-43	38	137-175	33	10-43	38	137-175
5%	Tempo frente	1,4/ 50 $\mu s$		4,3/ 50 $\mu s$					
	142	44	1-43	61	90-151	44	1-43	61	90-151
Solo 3 – 1450 $\Omega.m$									
Umidade	Quantidade de Ensaio Realizados	Ensaio Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,3/ 50 $\mu s$		4,9/ 50 $\mu s$					
	124	52	126-178	40	85-125	52	126-178	40	85-125
5%	Tempo frente	1,2/ 50 $\mu s$		4,0/ 50 $\mu s$					
	167	66	1-66	58	183-241				
10%	Tempo frente	1,3/ 50 $\mu s$		5,3/ 50 $\mu s$					
	146	41	179-220	67	8-67	41	179-220	67	8-67
Solo 4 – 400 $\Omega.m$									
Umidade	Quantidade de Ensaio Realizados	Ensaio Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,2/ 50 $\mu s$		4,3/ 50 $\mu s$					
	126	50	1-50	43	51-94	50	1-50	43	51-94
5%	Tempo frente	1,2/ 50 $\mu s$		5,0/ 50 $\mu s$					
	189	70	1-70	70	71-140	70	1-70	70	71-140
10%	Tempo frente	1,0/ 50 $\mu s$		4,8/ 50 $\mu s$					
	147	55	1-55	54	56-110	55	1-55	54	56-110

ANEXO I – BANCO DE DADOS DE SOLOS PARA CONDIÇÃO DE CAMPO UNIFORME

<b>Solo 5 – 700 Ω.m</b>									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,3/ 50 μs		4,1/ 50 μs					
	122	40	1-40	50	41-90	40	1-40	50	41-90
5%	Tempo frente	1,3/ 50 μs		4,3/ 50 μs					
	136	51	51-102	50	1-50	51	51-102	50	1-50
10%	Tempo frente	1,2/ 50 μs		4,3/ 50 μs					
	135	50	51-100	50	1-50	50	51-100	50	1-50
<b>Solo 6 – 720 Ω.m</b>									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,4/ 50 μs		4,2/ 50 μs					
	176	70	1-70	60	71-130	70	1-70	60	71-130
5%	Tempo frente	1,2/ 50 μs		4,2/ 50 μs					
	136	65	1-65	36	66-101	65	1-65	36	66-101
10%	Tempo frente	1,2/ 50 μs		4,5/ 50 μs					
	216	65	1-65	95	66-160	65	1-65	95	66-160
<b>Solo 7 – 100 Ω.m</b>									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,4/ 50 μs		4,2/ 50 μs					
	189	80	1-80	60	81-140	80	1-80	60	81-140
5%	Tempo frente	1,5/ 50 μs		4,3/ 50 μs					
	134	38	62-100	61	1-61	38	62-100	61	1-61
10%	Tempo frente	1,2/ 50 μs		3,9/ 50 μs					
	203	70	1-70	80	71-150	70	1-70	80	71-150
<b>Solo 8 – 440 Ω.m</b>									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,1/ 50 μs		4,7/ 50 μs					
	162	50	71-120	70	1-70	50	71-120	70	1-70
5%	Tempo frente	1,1/ 50 μs		4,1/ 50 μs					
	182	60	1-60	75	61-135	60	1-60	75	61-135
10%	Tempo frente	1,3/ 50 μs		4,5/ 50 μs					
	122	40	1-40	50	41-90	40	1-40	50	41-90

ANEXO I – BANCO DE DADOS DE SOLOS PARA CONDIÇÃO DE CAMPO UNIFORME

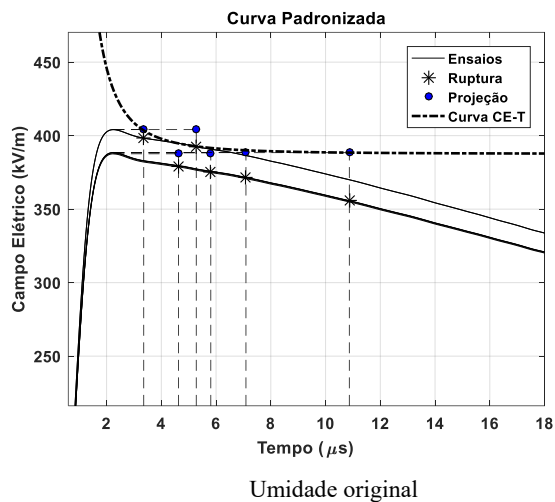
Solo 9 – 500 Ω.m									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,6/ 50 μs		4,8/ 50 μs					
	162	55	66-120	65	1-65	55	66-120	65	1-65
5%	Tempo frente	2,2/ 50 μs		4,5/ 50 μs					
	84	30	1-30	32	31-62	30	1-30	32	31-62
10%	Tempo frente	2,3/ 50 μs		4,5/ 50 μs					
	81	25	1-25	35	26-60	25	1-25	35	26-60
Solo 10 – 100 Ω.m									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,1/ 50 μs		3,0/ 50 μs					
	149	50	1-50	60	51-110	50	1-50	60	51-110
5%	Tempo frente	1,4/ 50 μs		4,5/ 50 μs					
	128	30	1-30	65	31-95	30	1-30	65	31-95
10%	Tempo frente	1,4/ 50 μs		4,0/ 50 μs					
	122	50	1-50	40	51-90	50	1-50	40	51-90
Solo 11 – 750 Ω.m									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,3/ 50 μs		4,3/ 50 μs					
	263	90	1-90	105	91-195	90	1-90	105	91-195
5%	Tempo frente	1,4/ 50 μs		4,1/ 50 μs					
	182	70	1-70	65	71-135	70	1-70	65	71-135
10%	Tempo frente	1,2/ 50 μs		5,2/ 50 μs					
	122	50	1-50	40	51-90	50	1-50	40	51-90
Solo 12 – 5950 Ω.m									
Umidade	Quantidade de Ensaios Realizados	Ensaios Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,2/ 50 μs		4,6/ 50 μs					
	154	54	61-114	60	1-60	54	61-114	60	1-60
5%	Tempo frente	1,6/ 50 μs		4,3/ 50 μs					
	135	50	1-50	50	51-100	50	1-50	50	51-100
10%	Tempo frente	1,5/ 50 μs		4,9/ 50 μs					
	115	40	1-40	45	41-85	40	1-40	45	41-85

Solo 13 – 5460 Ω.m									
Umidade	Quantidade de Ensaio Realizados	Ensaio Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,3/ 50 μs		4,6/ 50 μs					
	176	70	1-70	60	71-130	70	1-70	60	71-130
5%	Tempo frente	1,4/ 50 μs		4,7/ 50 μs					
	135	50	1-50	50	51-100	50	1-50	50	51-100
10%	Tempo frente	1,5/ 50 μs		4,6/ 50 μs					
	122	45	46-90	45	1-45	45	46-90	45	1-45
Solo 14 – 2550 Ω.m									
Umidade	Quantidade de Ensaio Realizados	Ensaio Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,2/ 50 μs		4,5/ 50 μs					
	135	50	1-50	50	51-100	50	1-50	50	51-100
5%	Tempo frente	1,2/ 50 μs		5,1/ 50 μs					
	135	45	1-45	55	46-100	45	1-45	55	46-100
10%	Tempo frente	1,5/ 50 μs		4,5/ 50 μs					
	155	45	1-45	70	46-115	45	1-45	70	46-115
Solo 15 – 10000 Ω.m									
Umidade	Quantidade de Ensaio Realizados	Ensaio Válidos							
		Curvas de Tensão				Curvas de Corrente			
		Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código	Qte	Código
Original	Tempo frente	1,4/ 50 μs		4,7/ 50 μs					
	135	50	1-50	50	51-100	50	1-50	50	51-100
5%	Tempo frente	1,3/ 50 μs		4,6/ 50 μs					
	142	50	1-50	55	51-105	50	1-50	55	51-105
10%	Tempo frente	1,2/ 50 μs		4,6/ 50 μs					
	135	50	1-50	50	51-100	50	1-50	50	51-100

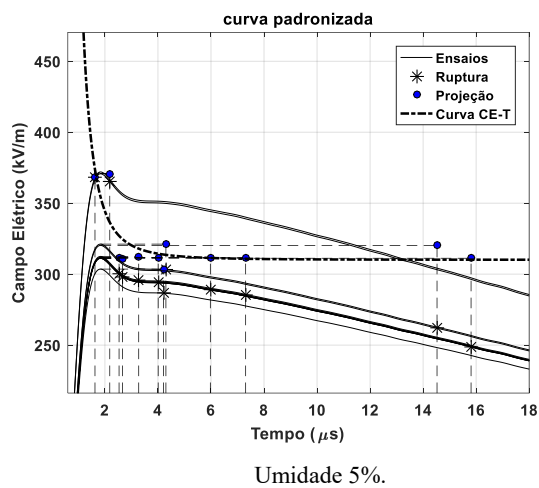


## Anexo II – Curvas CE-T

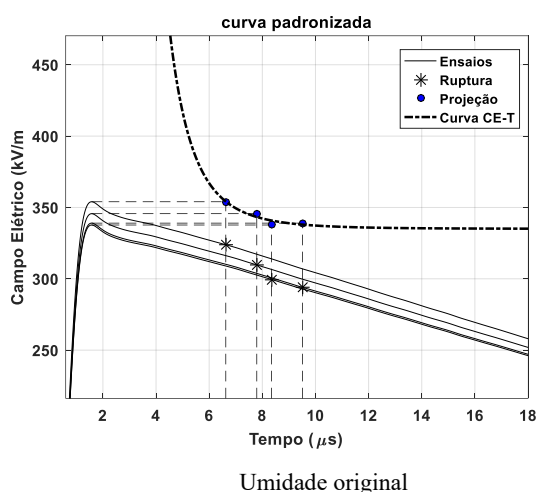
### Solo 1 – 1200 $\Omega.m$



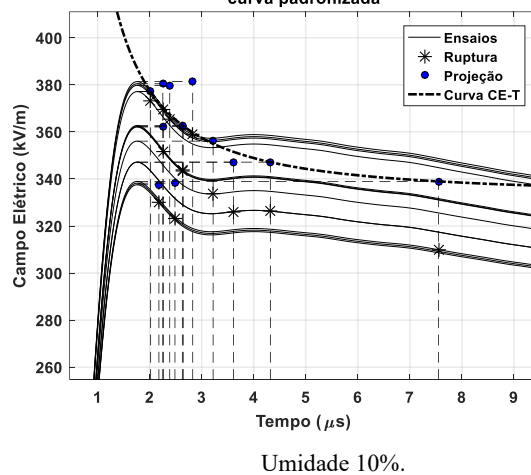
Umidade original



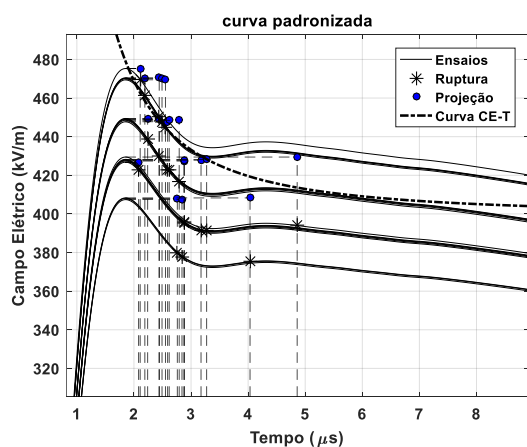
### Solo 2 - 276 $\Omega.m$



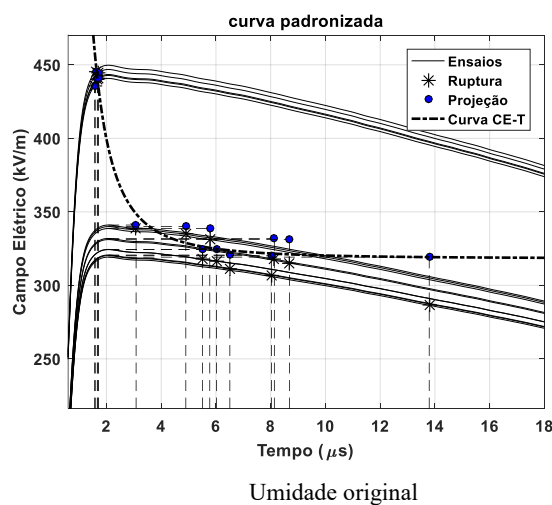
curva padronizada



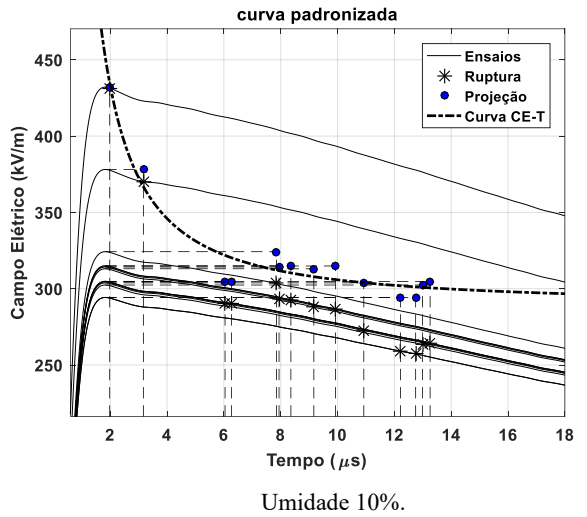
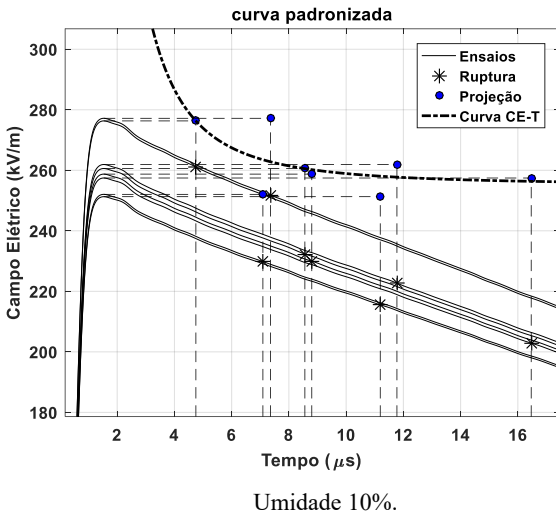
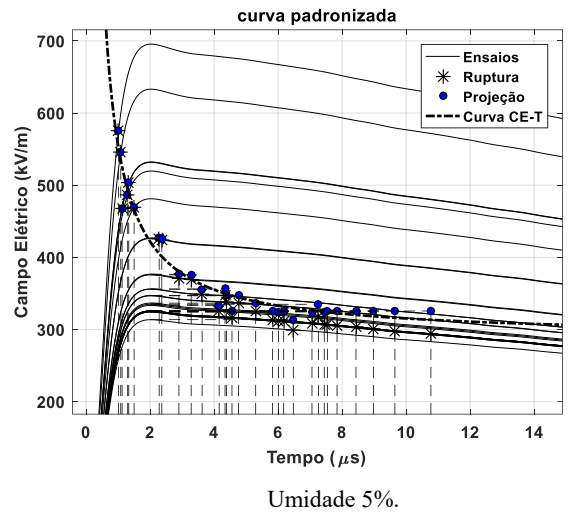
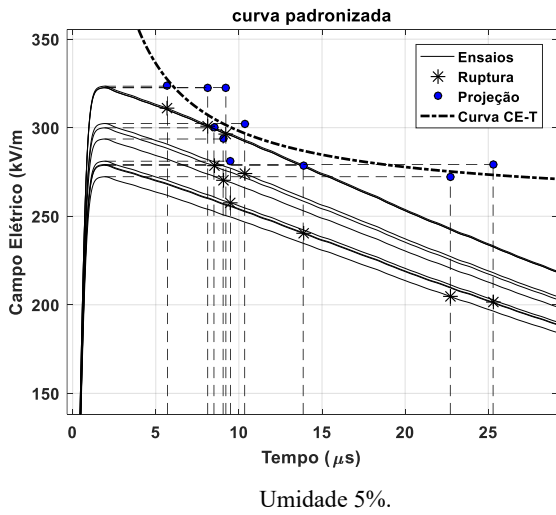
### Solo 3 – 1450 $\Omega.m$



### Solo 4 – 400 $\Omega.m$

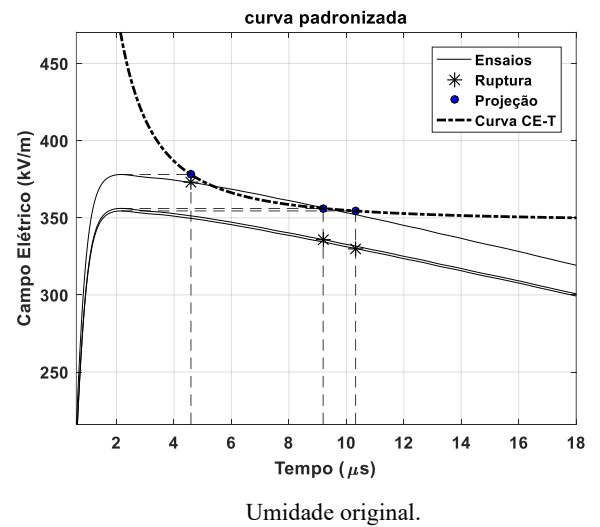
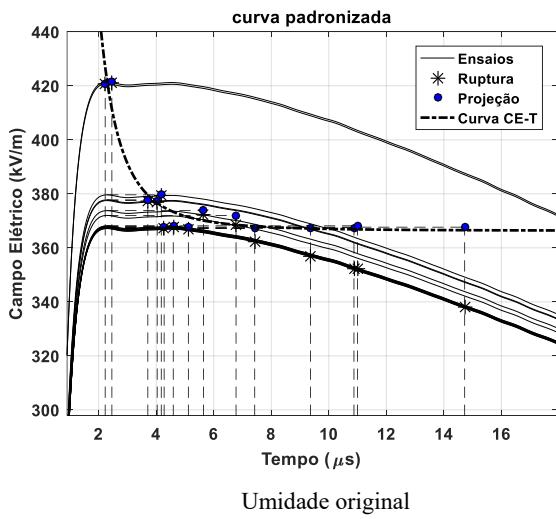


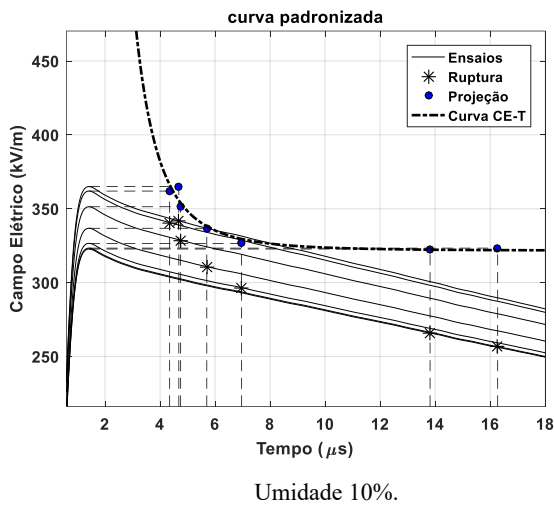
## ANEXO II – CURVAS CE-T



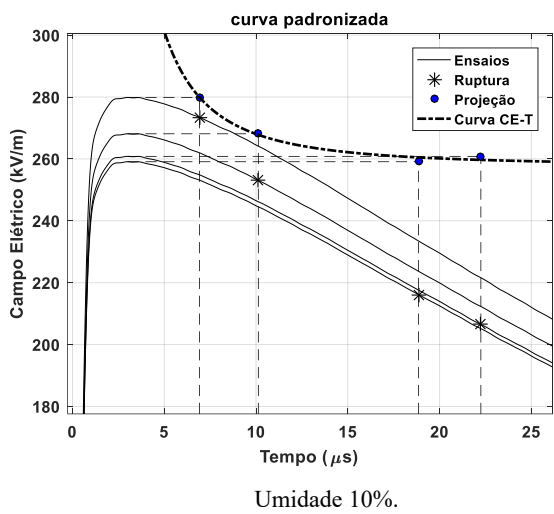
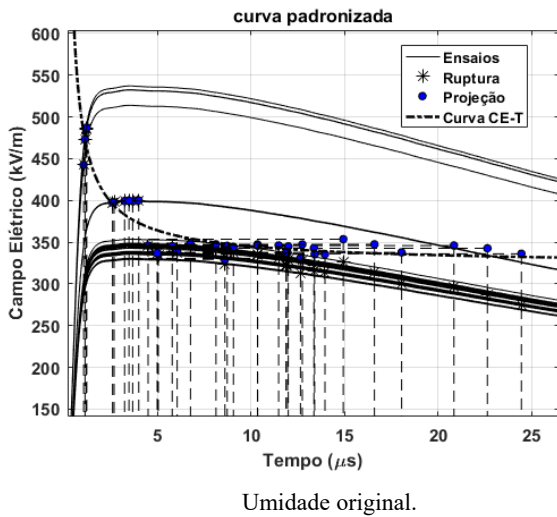
### Solo 5 – 700 Ω.m

### Solo 6 – 720 Ω.m

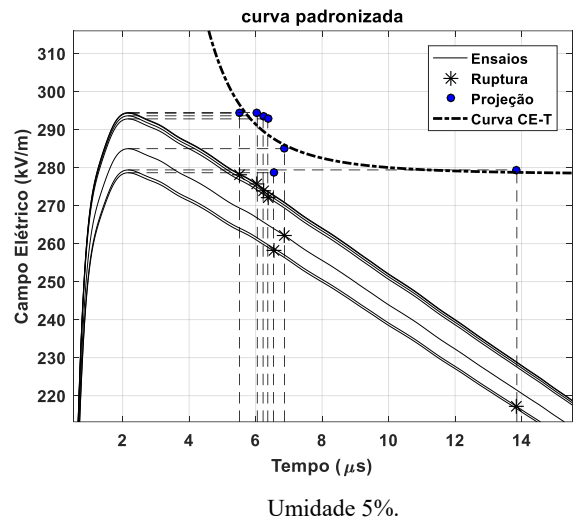
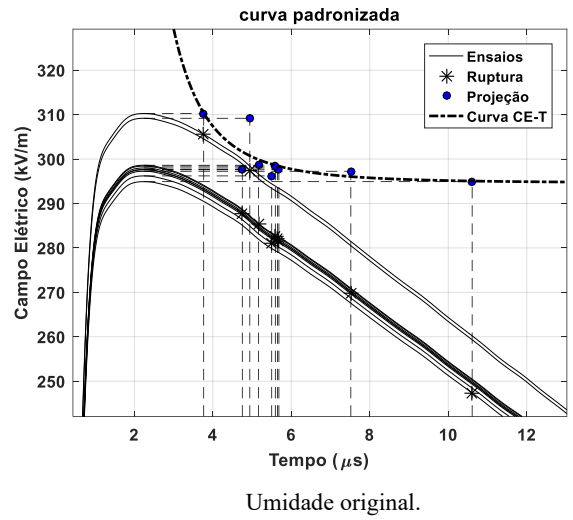




**Solo 7 - 100 Ω.m**



**Solo 8 – 440 Ω.m**



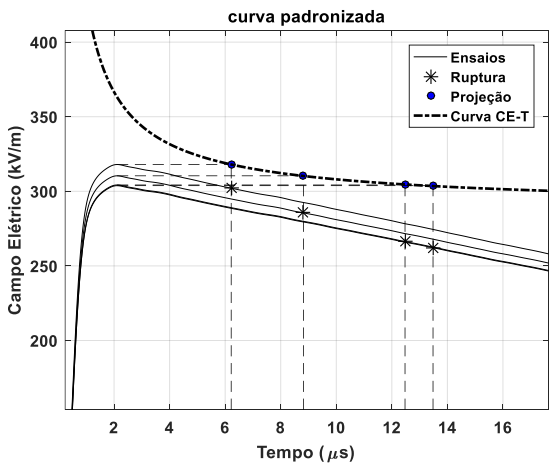
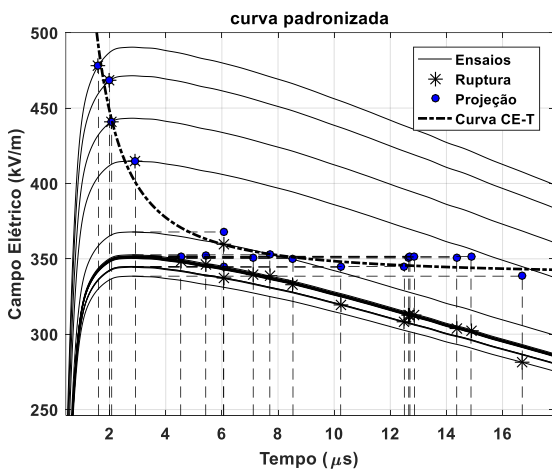
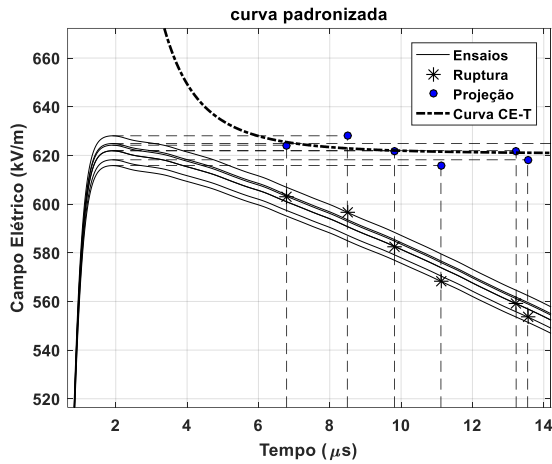
**Solo 9 – 500 Ω.m**

Dados insuficientes

**Solo 10 – 100 Ω.m**

Dados insuficientes

**Solo 11 – 750 Ω.m**



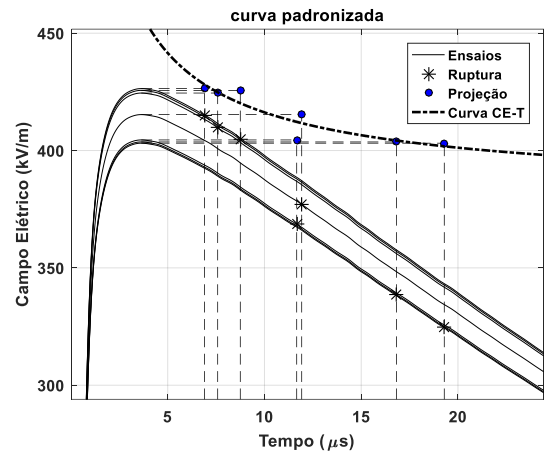
**Solo 12 – 5950 Ω.m**

Dados insuficientes.

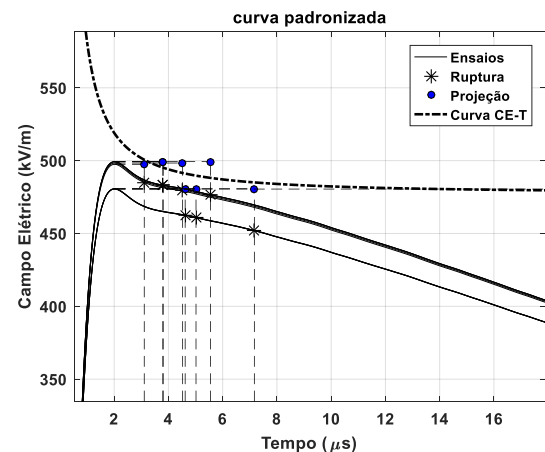
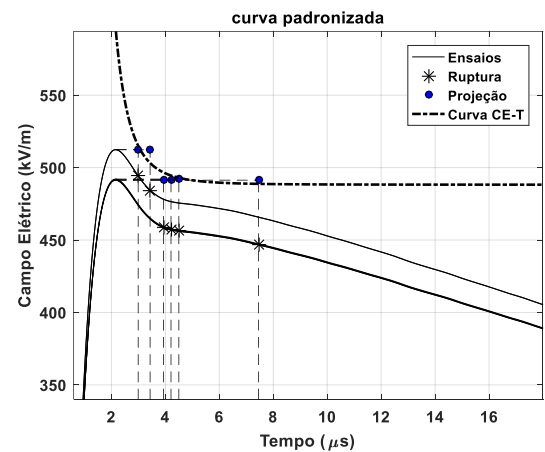
**Solo 13 – 5460 Ω.m**

Dados insuficientes

**Solo 14 – 2500 Ω.m**

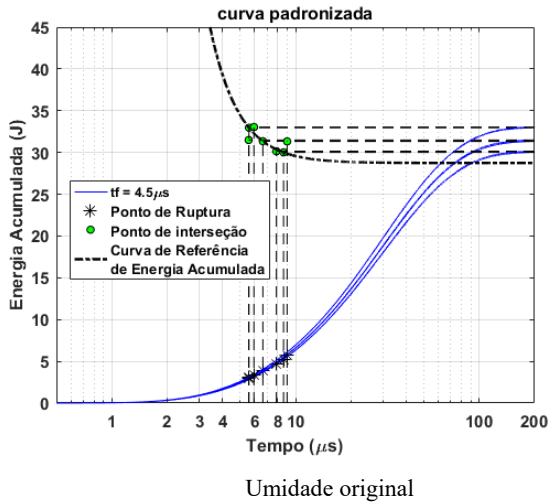


**Solo 15 - 10000 Ω.m**

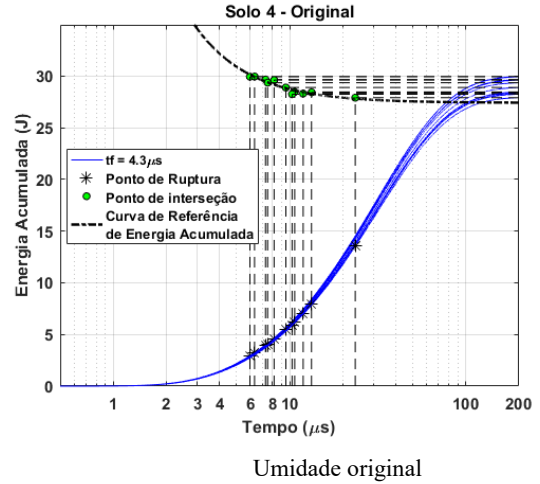


## Anexo III – Curvas de Energia Acumulada

### Solo 1 – 1200 $\Omega.m$



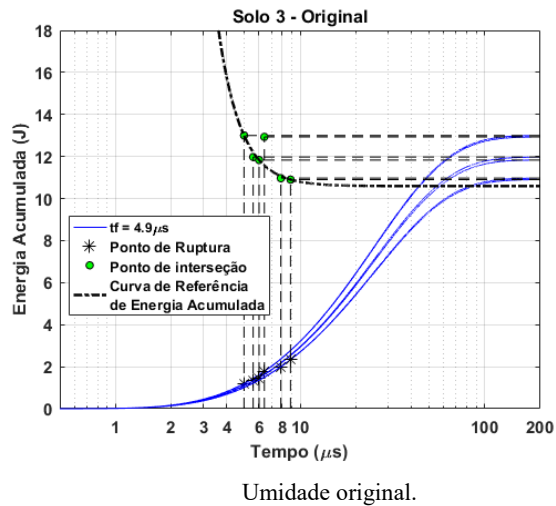
### Solo 4 – 400 $\Omega.m$



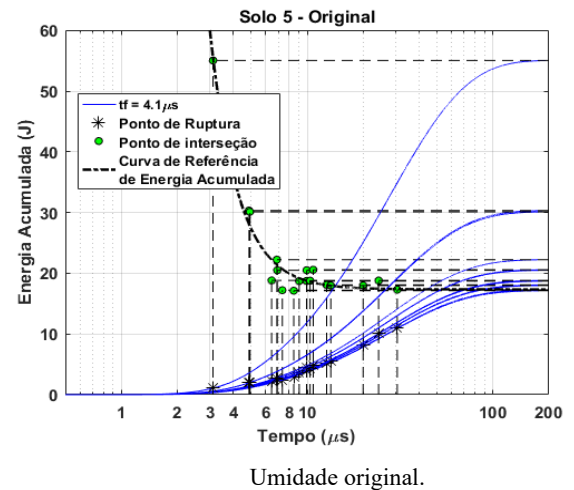
### Solo 2 – 276 $\Omega.m$

Não há dados suficientes.

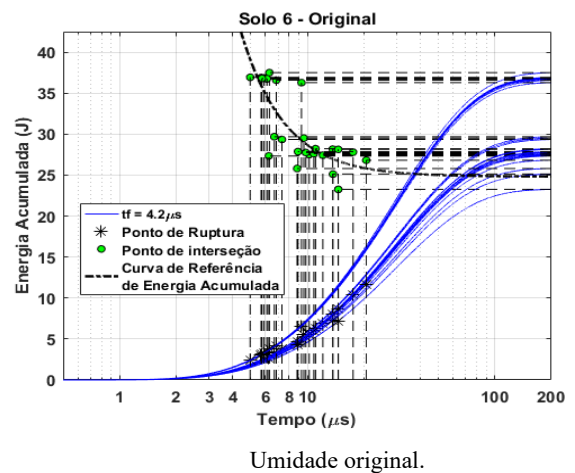
### Solo 3 – 1450 $\Omega.m$



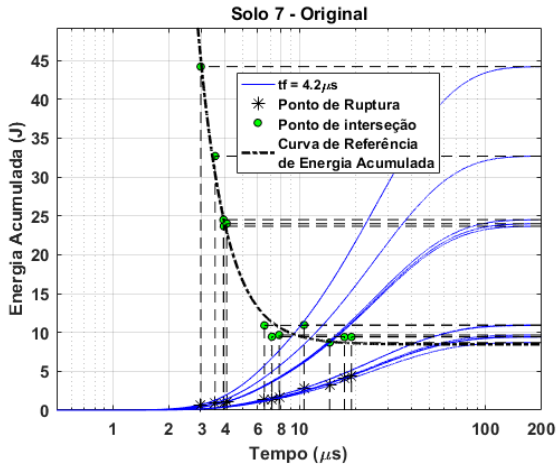
### Solo 5 – 700 $\Omega.m$



### Solo 6 – 720 $\Omega.m$

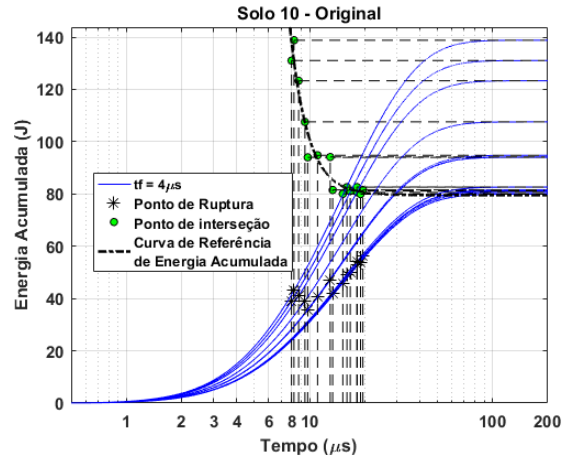


**Solo 7 - 100 Ω.m**



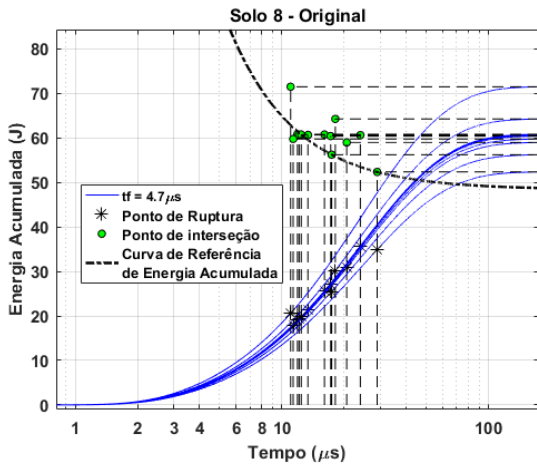
Umidade original.

**Solo 10 – 100 Ω.m**



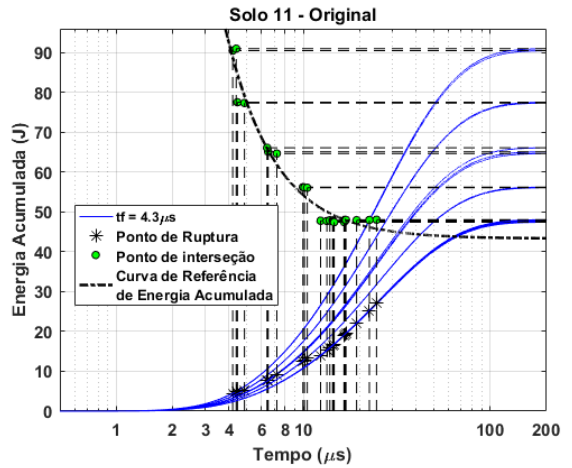
Umidade original.

**Solo 8 – 440 Ω.m**



Umidade original.

**Solo 11 – 750 Ω.m**

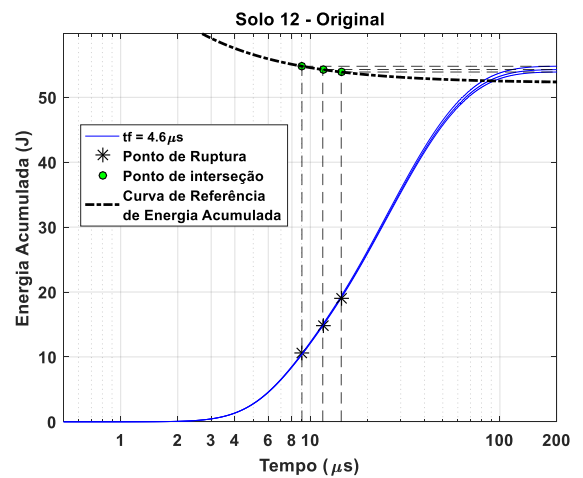


Umidade original.

**Solo 9 – 500 Ω.m**

Não há dados suficientes.

**Solo 12 – 5950 Ω.m**



Umidade original.

**Solo 13 – 5460  $\Omega$ .m**

Não há dados suficientes.

**Solo 14 – 2500  $\Omega$ .m**

Não há dados suficientes.

**Solo 15 - 10000  $\Omega$ .m**

Não há dados suficientes.