

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O EFEITO DE  
IONIZAÇÃO DO SOLO DEVIDO À INJEÇÃO DE  
CORRENTES IMPULSIVAS.**

**JOSÉ LUÍS CERQUEIRA LIMA**

**JOSÉ LUÍS CERQUEIRA LIMA**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE O EFEITO DE  
IONIZAÇÃO DO SOLO DEVIDO À INJEÇÃO DE  
CORRENTES IMPULSIVAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE  
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - CPDEE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG  
BELO HORIZONTE  
SETEMBRO – 2008**

Dedico este trabalho ao meu filho Bruno Silveira Cerqueira Lima.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus que é a origem e o sentido da vida.

À minha esposa, Edith Silveira, amiga e companheira. Sem seu estímulo, a sua confiança e exigência, eu não teria dado esse passo.

Ao meu filho Bruno pelo carinho e compreensão.

Aos meus pais, Maria Moreira Conegundes Lima e Cassiano Cerqueira Lima Júnior (*in memoriam*), que sempre me incentivaram a prosseguir com minha formação profissional.

Ao professor, pesquisador e orientador Silvério, pelas ilustres e precisas orientações que sempre me direcionaram para o caminho adequado.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho, em especial aos amigos Lucas, Sérgio, Alisson e Emerson.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>9</b>
1.1	A Relevância do Tema em Investigação.....	9
1.2	Propostas de Desenvolvimento .....	11
1.3	Organização do Texto.....	12
<b>3</b>	<b>O Fenômeno de Ionização do Solo.....</b>	<b>22</b>
3.1	Introdução.....	22
3.2	O Processo de Ionização do Solo.....	22
3.3	Trabalhos sobre a Ionização do Solo Utilizando a Injeção de Ondas Impulsivas de Corrente .....	25
3.4	Considerações Finais .....	29
<b>4</b>	<b>Circuito Experimental e Definição de Casos.....</b>	<b>30</b>
4.1	Introdução.....	30
4.2	Circuito Elétrico Experimental.....	30
4.3	Realizações Experimentais.....	33
4.4	Tipos de Solos Estudados .....	36
4.5	Determinação da Resistividade do Solo e da Água Deionizada.....	38
<b>5</b>	<b>Resultados das Medições .....</b>	<b>40</b>
5.1	Introdução.....	40
5.2	Resultados Referentes à Configuração Cilíndrica.....	41
5.2.1	<i>Ondas de Tensão e Corrente .....</i>	<i>41</i>
5.2.2	<i>Curvas de Impedância Transitória.....</i>	<i>53</i>
5.2.3	<i>Curvas de Tensão versus Corrente (VxI) .....</i>	<i>65</i>
5.3	Resultados Referentes à Configuração de Placas Paralelas.....	88
5.3.1	<i>Ondas de Tensão.....</i>	<i>88</i>
5.3.2	<i>Campo Elétrico Crítico.....</i>	<i>94</i>

<b>6</b>	<b>Análises dos Resultados</b>	<b>95</b>
6.1	Introdução	95
6.2	Análises dos Resultados Referentes à Configuração de Placas Paralelas	95
6.2.1	<i>Determinação do Campo Elétrico Crítico</i>	96
6.2.2	<i>Influência do Valor da Resistividade do Solo</i>	99
6.2.3	<i>Determinação dos Tempos de Ruptura</i>	102
6.2.4	<i>Comparação com os Resultados da Literatura</i>	104
6.3	Análise dos Resultados Referentes à Configuração Cilíndrica	105
6.3.1	<i>Análise pelas Curvas <math>V_{xl}</math></i>	106
6.3.2	<i>Análise da Impedância Transitória</i>	110
6.3.3	<i>Avaliação do Campo Elétrico Crítico Durante a Evolução do Processo de Ionização</i>	113
6.3.4	<i>Aplicação da Formulação Desenvolvida</i>	118
6.3.5	<i>Valores de Referência para Campos Críticos encontrados na Literatura</i>	133
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>135</b>
7.1	Considerações	135
7.2	Conclusões	135
7.3	Propostas de Continuidade	139
<b>8</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>140</b>

## RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de uma investigação experimental sobre o comportamento de amostras de solo frente a correntes impulsivas, representativas de correntes de descargas atmosféricas, com vistas à avaliação da dinâmica do fenômeno de ionização do solo.

O trabalho envolveu uma série de testes laboratoriais, nos quais foram injetadas no solo correntes impulsivas de diferentes intensidades e tempos de frente numa condição de solo variando entre muito seco e encharcado, em quatro tipos de solo, controlando-se a umidade destes para obtenção de diferentes valores de resistividades.

Foram utilizadas duas configurações básicas de cubas para a realização dos ensaios com as amostras de solo. Na configuração de placas paralelas, obteve-se uma condição de campo elétrico uniforme na amostra. Na configuração coaxial, obteve-se uma condição de campo não-uniforme, com redução da intensidade de campo com o inverso do raio, a partir do eletrodo interno.

Os valores de campo crítico, que indicam o início do processo de ionização, encontrados para cada configuração têm a ordem de grandeza dos valores indicados na literatura. Na condição de campo uniforme, os valores são muito superiores àqueles do campo de configuração cilíndrica.

O diferencial deste trabalho é que, ao contrário de outros trabalhos encontrados na literatura, que realizam a avaliação do campo elétrico crítico apenas para uma das configurações (placas paralelas ou coaxial), neste trabalho as duas configurações foram avaliadas para a mesma amostra de cada solo. Isto possibilitou obter o resultado original da investigação que consiste na identificação do caráter dinâmico do campo crítico decorrente da não-uniformidade da distribuição do campo elétrico. O valor deste evolui de um limiar bastante reduzido (de 2 a 3 kV/cm), quando o processo de ionização se inicia próximo ao eletrodo interno, e vai aumentando à medida que a ionização se expande no entorno do eletrodo até atingir a ordem de grandeza típica de campo uniforme (em torno de 9 kV/cm).

O cômputo deste resultado tende a diminuir a importância do processo de ionização na redução da impedância de aterramento, em relação às hipóteses comumente indicadas na literatura, que assumem um valor constante de campo crítico, em torno de 3 kV/cm.

## ABSTRACT

This work presents the results of an experimental research on the behavior of soil samples subjected to lightning-patterned impulsive currents, with a view to assessing the dynamics of ionization soil phenomenon.

The work involved a series of laboratorial tests, where impulsive currents of different intensities and front times were impressed to samples of soils at humidity condition varying from very dry to very wet. Four soil types and at least three moisture contents were used to obtain different values for resistivity.

Two basic configurations of recipients were used to carry out the tests with the soil samples. In the configuration of parallel disks, a uniform electric field distribution was applied to the sample. In the coaxial configuration, a non-uniform field distribution was applied in the gap between the cylindrical conductors, with the field varying with the inverse of the distance to the axis of the internal electrode.

The values of critical field  $E_c$ , which are considered the onset of the ionization process, found for each configuration, have the order of magnitude indicated in literature, although they are much higher in the uniform-field condition than in the cylindrical configuration of field.

The differential aspect of this work is that the critical fields were evaluated for each soil sample in two field-distribution conditions (given by the parallel disks and by coaxial cylinders), unlike the other works presented literature that carried out the assessment of  $E_c$  only for one of such conditions. This led to the original result of this research that is the identification of a dynamic behavior for the critical field, resulting from the influence of field non-uniformity. The value of this field evolves from a very low threshold (2 to 3 kV/cm), when the ionization process begins near the internal electrode. It increases while the ionization zone expands around the electrode, and reaches the typical order of magnitude of this field for uniform distribution (around 8 to 9 kV / cm).

Thus, the process of ionization tends to start with low values of critical field. But, with its development, higher values are required for  $E_c$  to ensure the process evolution.

Taken this dynamic profile of  $E_c$  into account leads to reducing the relevance of ionization effect in relation to the usual assumption of a constant value parameter, around 3.0 kV/cm.

# 1 Introdução

## 1.1 A Relevância do Tema em Investigação

As descargas atmosféricas constituem uma freqüente fonte de distúrbios nos sistemas de energia elétrica. Sua influência é particularmente importante no caso de incidência direta em linhas de transmissão, onde a injeção de correntes, com elevadas amplitudes, determina o estabelecimento de sobretensões que podem levar ao desligamento das linhas e causar danos em componentes do sistema. Este fenômeno se torna especialmente crítico nos dias atuais, em que se exige um alto grau de confiabilidade cada vez maior na operação dos sistemas elétricos. Com isso, ganham importância ações de engenharia que possam minimizar os efeitos danosos das descargas atmosféricas.

Dentre os diversos componentes de um sistema elétrico, os aterramentos elétricos se destacam como um elemento capaz de contribuir significativamente para a limitação dos valores das sobretensões geradas quando da incidência de uma descarga. Para realizar esta contribuição, o aterramento deve apresentar baixo valor de impedância. Tal fato justifica a pesquisa de técnicas para melhoria do aterramento, de forma a maximizar seus efeitos positivos.

Dentre os aspectos de interesse no estudo do comportamento dos aterramentos elétricos frente a descargas atmosféricas, destaca-se a influência da intensidade da corrente de descarga, ou seja, a variação do comportamento do aterramento em função da amplitude da corrente de descarga. Quando tal corrente é muito elevada, é comum a ocorrência do fenômeno de ionização do solo circunvizinho aos eletrodos de aterramento, cujo efeito pode resultar na redução da impedância destes.

---

---

Este fenômeno é especialmente importante no caso de aterramentos concentrados, onde a densidade de corrente no solo é mais elevada na região próxima aos eletrodos. Os campos elétricos associados atingem valores muito elevados, podendo ultrapassar o limiar requerido para ionizar o solo.

Neste contexto, a compreensão do comportamento do aterramento frente a correntes impulsivas de amplitudes elevadas, considerando a ocorrência do efeito de ionização do solo, é de vital importância no estudo dos efeitos causados pela incidência de descargas atmosféricas em sistemas de energia elétrica. Embora sejam encontrados na literatura vários trabalhos que abordem esse tema, percebe-se uma significativa controvérsia sobre diversos aspectos envolvidos no início e na evolução do processo de ionização do solo, sobretudo no que diz respeito ao estabelecimento de referências quantitativas para modelagem do fenômeno.

Tal aspecto motivou a realização de um trabalho experimental sobre o fenômeno de ionização do solo no LRC<sup>1</sup>. Explorando os recursos do Laboratório de Alta Tensão, o trabalho, desenvolvido na forma de uma dissertação de mestrado, busca contribuir para a evolução do conhecimento dos parâmetros quantitativos determinantes do processo de ionização do solo.

---

<sup>1</sup> LRC – Lightning Research Center (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da UFMG) – UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais.

---

---

## 1.2 Propostas de Desenvolvimento

O objetivo deste trabalho é investigar o comportamento de amostras de solo frente a ondas de corrente impulsivas representativas de descargas atmosféricas, tendo como foco o efeito não-linear de ionização do meio. Como objetivo específico, busca relacionar os parâmetros associados à da onda de corrente impulsiva injetada, com parâmetros relacionados ao fenômeno de ionização como, por exemplo, o campo elétrico crítico.

O trabalho consiste basicamente em realizações laboratoriais, baseadas na injeção de correntes impulsivas de diferentes intensidades e tempos de frente em amostras de solo colocadas em cubas com formato e dimensões adequados à reprodução de situações similares àquelas a que o solo no entorno do aterramento fica submetido quando da injeção de correntes de descargas no meio. Por meio da medição das ondas de corrente e de tensão resultante e da determinação das intensidades de campo elétrico geradas no solo, são avaliadas as potenciais correlações existentes entre os parâmetros de corrente e os parâmetros do processo de ionização.

Para atender a estes objetivos, o trabalho foi estruturado em um conjunto de realizações, listadas a seguir:

- Revisão bibliográfica;
  - Montagem do circuito de teste e de medição;
  - Seleção dos tipos de solo;
  - Preparação das amostras;
  - Realização dos testes;
  - Análise dos resultados.
-

---

### 1.3 Organização do Texto

Este texto de dissertação de mestrado compõe-se de 6 capítulos, conforme descrito a seguir.

No presente capítulo, *Introdução*, são realçados a importância do tema em investigação, a motivação ao trabalho.

No capítulo 2, *Aspectos Básicos dos Aterramentos Elétricos*, apresenta-se uma visão geral dos diversos aspectos associados aos aterramentos elétricos, tema no qual o presente trabalho se insere. É dado um maior foco aos aspectos mais proximamente associados à dissertação, como os conceitos de impedância impulsiva e resistividade do solo.

O mecanismo básico de ionização do solo causado pela passagem de uma corrente de alta intensidade, normalmente associada à incidência de uma descarga atmosférica, é descrito no capítulo 3, *O Fenômeno de Ionização do Solo*, onde são concentrados todos os aspectos teóricos necessários para o melhor entendimento e análise dos resultados experimentais oriundos da aplicação, em laboratório, de ondas impulsivas de tensão e corrente em amostras de solo.

No capítulo 4, *Circuito Experimental e Definição de Casos*, abordam-se os aspectos técnicos relacionados à realização dos experimentos. Em primeiro lugar, são explicitados os detalhes acerca dos vários grupos de experimentos realizados. Em seguida, são apresentados os aspectos associados ao gerador de tensão impulsiva, assim como os seus parâmetros que foram ajustados de forma a permitir a geração de ondas com formato de interesse.

No capítulo 5, *Resultados das Medições*, são apresentados os resultados primários do trabalho, que consistem nas formas de ondas de tensão e corrente obtidas nos ensaios para os diversos casos considerados. São realizadas avaliações preliminares nos resultados obtidos, para subsidiar as análises desenvolvidas no capítulo seguinte.

---

No capítulo 6, *Análises dos Resultados*, faz-se uma análise mais elaborada dos resultados apresentados no capítulo 5, sendo desenvolvidos vários conjuntos de resultados secundários. Estes possibilitam a realização de análises que relacionam os diversos parâmetros envolvidos no processo de ionização do solo.

Com base nas análises desenvolvidas, evolui-se para as conclusões finais do trabalho e propostas para desenvolvimentos futuros, que são apresentadas no último capítulo, *Conclusões*.

---

# 2 Aspectos Básicos dos Aterramentos Elétricos

## 2.1 Introdução

Para um melhor desempenho dos sistemas de energia elétrica, é essencial a existência de um bom aterramento elétrico. O presente capítulo apresenta, de forma simplificada, aspectos associados ao desempenho dos aterramentos elétricos. Esta apresentação tem como base o livro de Visacro (2002), que aborda o tema segundo uma visão de engenharia.

## 2.2 Conceitos Básicos

Um aterramento elétrico *consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo.*

Basicamente, um aterramento é composto por três componentes: (i) condutores metálicos que conectam um ponto do sistema aos eletrodos, (ii) os eletrodos e (iii) a terra que os envolve. O último componente é aquele de maior relevância, conforme se explica mais adiante.

Para se avaliar o comportamento dos aterramentos, deve-se considerar que, em geral, uma conexão à terra apresenta efeitos resistivos, capacitivos e indutivos. Um circuito equivalente, mostrado na Figura 2.1, representa tais efeitos para uma porção do aterramento, considerando um certo comprimento de eletrodo e o volume de terra que o envolve.

---

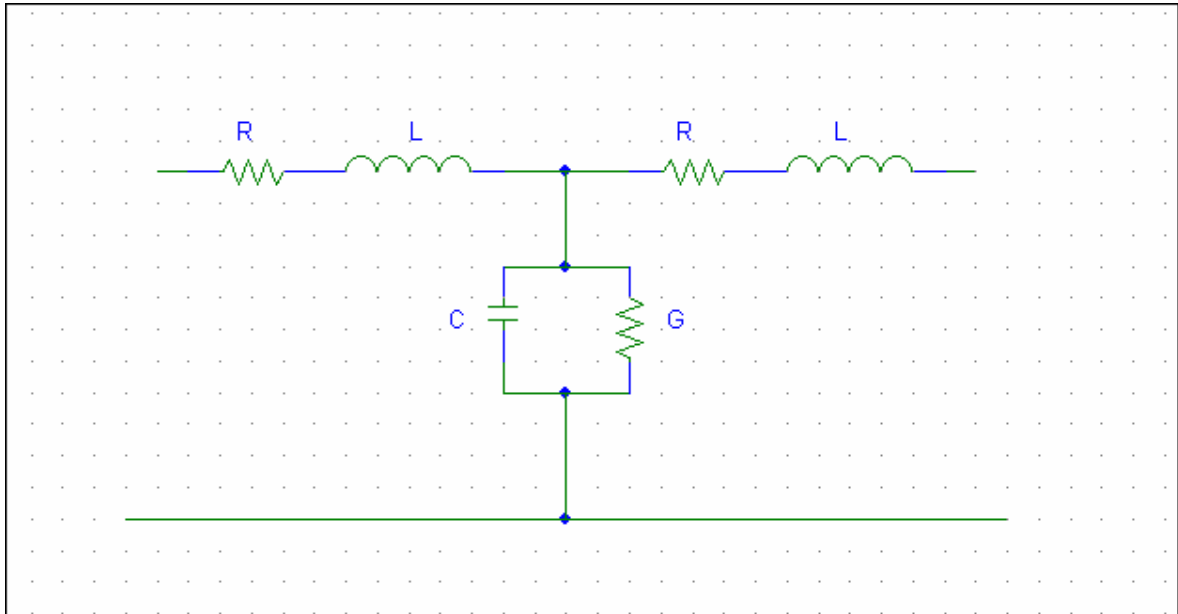


Figura 2.1 – Circuito que representa os efeitos resistivo, indutivo e capacitivo de uma porção do aterramento.

Com base nessa representação por parâmetros concentrados, verifica-se que a corrente injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo (corrente transversal), sendo que a parcela restante é transferida para o comprimento do eletrodo (corrente longitudinal).

A corrente longitudinal está associada às perdas internas ao condutor, além de determinar o campo magnético na região interior e exterior do mesmo. Em termos do circuito equivalente da Figura 2.1, o cômputo das energias associadas é feito por meio da resistência (R) e da indutância (L) em série.

Por outro lado, a corrente transversal está associada diretamente ao campo elétrico estabelecido no solo (um meio de resistividade  $\rho$  e permissividade  $\epsilon$ ). Isto determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre tais correntes não depende da geometria dos eletrodos, mas somente da relação “ $\sigma/\omega\epsilon$ ”, onde  $\sigma$  refere-se a condutividade do solo e  $\omega$  a frequência angular. A energia associada ao fluxo dessas correntes transversais é computada por meio de uma condutância (G) e uma capacitância (C) colocadas em paralelo no circuito equivalente, também mostrado na Figura 2.1.

Vale notar que se aplica somente a uma pequena porção do sistema de aterramento. Se for considerada a configuração total do aterramento, os efeitos mútuos (capacitivos, condutivos e indutivos) entre os diversos troços dos eletrodos de aterramento devem também ser computados. Para eletrodos longos, o equacionamento apresenta certa complexidade, pois inclui ainda o cômputo dos efeitos de propagação no solo.

## 2.3 Funções de um Aterramento

Um aterramento pode assumir configurações bastante diversificadas, em termos do posicionamento dos seus eletrodos no solo e de suas dimensões, consoante a função que deve desempenhar em cada aplicação específica.

De uma forma geral, um aterramento necessita ser capaz de dispersar certa intensidade de corrente para o solo, sem, contudo, permitir que os potenciais na superfície do mesmo atinjam níveis comprometedores à segurança pessoal, por ocasião do evento de solicitação dos eletrodos.

As principais funções de um aterramento são:

- Proporcionar um caminho de escoamento para a terra de descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno de corrente num circuito elétrico;
- Limitar os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de patamares seguros;
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Para realizar adequadamente essas funções, um aterramento deve apresentar basicamente três características:

- Capacidade de condução de corrente;
  - Segurança (configuração de eletrodos que possibilite o controle do gradiente de potencial);
-

- Estabilidade (invariabilidade no valor da resistência de aterramento).

## 2.4 Conceitos de Interesse

Em geral, a resposta que um aterramento oferece quando seus eletrodos são submetidos à injeção de uma determinada corrente tem a forma de uma impedância complexa,  $Z(\omega)$ .

Tal impedância expressa, no domínio da frequência, a relação entre a tensão resultante nos terminais de entrada de uma seqüência de circuitos como o da Figura 2.1, interligados segundo a topologia de conexão dos eletrodos (tendo em conta os efeitos mútuos), e a corrente injetada entre os dois terminais.

$$Z(\omega) = \frac{V_1(\omega)}{I_1(\omega)}$$

Note-se que, o terminal correspondente à barra inferior no circuito representa o terra remoto, que tem potencial nulo.

### Impedância Impulsiva de Aterramento ( $Z_p$ )

Quando se analisa o desempenho de um sistema de aterramento frente à injeção de ondas de corrente impulsivas como aquelas associadas à descargas atmosféricas, é bastante usual representar a resposta desse sistema diretamente no domínio do tempo, por meio da impedância impulsiva  $Z_p$ . Esse parâmetro é definido como a relação entre os valores de pico da tensão ( $V_p$ ) e da corrente ( $I_p$ ) resultantes no sistema.

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}$$

Apesar da usual não-simultaneidade de ocorrência dos valores de pico de tensão e corrente, essa representação permite obter a tensão máxima no ponto de injeção de corrente, simplesmente, efetuando o produto de  $Z_p$  pelo valor de pico

---

da corrente injetada. A impedância impulsiva é dependente da forma de onda da corrente e do seu tempo de frente.

### Resistência de Aterramento ( $R_t$ )

Na maioria das aplicações envolvendo aterramentos elétricos não se faz referência à impedância impulsiva, mas sim à resistência do aterramento. Isso se deve a maior facilidade com que se pode medir a resistência de aterramento em condições práticas. A representação de um aterramento por meio de sua resistência é válida para fenômenos lentos, nos quais apenas baixas frequências estão envolvidas. Esse é o caso, por exemplo, dos curto-circuitos em sistemas de energia elétrica.

No caso em questão (fenômenos lentos), a configuração resultante para o circuito equivalente da Figura 2.1 se aproxima de um conjunto de condutâncias colocadas em paralelo, conforme mostra a Figura 2.2. Em outras palavras, perdem a importância os elementos de circuito reativos, representados pelas indutâncias e capacitâncias, e por consequência o parâmetro  $R$ , o qual tem efeito consideravelmente menor que o parâmetro  $G$ .

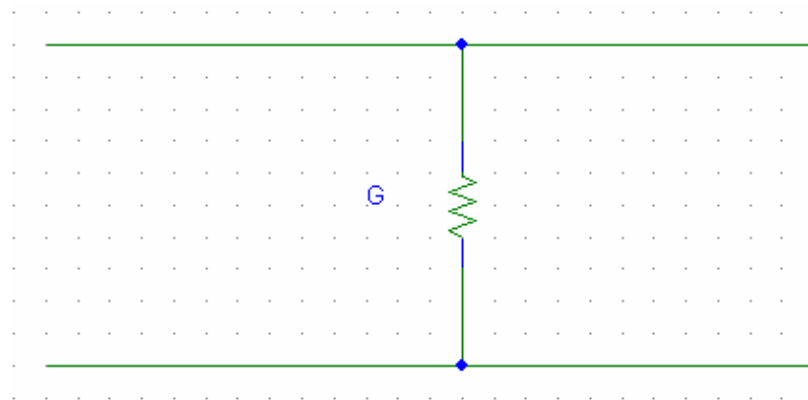


Figura 2.2 – Circuito equivalente do aterramento para fenômenos lentos.

O valor da resistência de aterramento,  $R_t$ , pode ser quantificado pela relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante no mesmo:

$$R_t = \frac{V}{I}$$

É interessante notar que, segundo (Visacro, 1994), para determinadas configurações de aterramentos de linhas de transmissão e distribuição existe uma relação entre  $Z_p$  e  $R_t$  próxima de 0,65, ou seja,  $Z_p/R_t = 0,65$ . Isso sugere uma forma rápida de se estimar, em uma análise de sensibilidade, o valor da impedância impulsiva de aterramento a partir da resistência  $R_t$  medida.

## 2.5 Fatores que Influenciam o Comportamento do Aterramento

A resistência de aterramento, conceito discutido na seção anterior, é influenciada por vários fatores. Entretanto, de forma genérica, estes podem ser agrupados em dois grupos:

- Resistividade do solo;
- Geometria dos eletrodos (dimensão e forma).

### Resistividade do Solo ( $\rho$ )

A resistividade do solo ( $\rho$ ) é um parâmetro o qual pode ser obtido indiretamente através da resistência elétrica ( $R$ ) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias ( $L \times L \times L$ , sendo  $L = 1\text{ m}$  e  $A = 1\text{ m}^2$ ) preenchido com uma porção homogênea do solo que se deseja investigar:

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad (\Omega.m)$$

A resistividade do solo pode determinar comportamentos diferentes para os sistemas de aterramento. No caso específico de aterramentos que fazem parte do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, o tipo de solo pode influenciar diretamente no projeto do sistema.

---

Usualmente, não há uma distinção clara, em termos de resistividade, para diferenciar os diversos tipos de solo. Não é possível atribuir um valor específico de resistividade para cada um deles. De maneira geral, são encontrados diferentes valores para esse parâmetro para uma mesma variedade de solo de localidades distintas. Tal fato se deve à natural heterogeneidade existente nos solos, mesmo que do mesmo tipo, em termos da real proporção entre seus elementos constituintes. A despeito disso, pode-se proceder a uma caracterização aproximada de faixas de valores usuais de resistividade, para os diversos tipos de solo, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Faixa de valores usuais de certos tipos de solo (Visacro, 2002).

Tipos de Solo	Resistividade ( $\Omega.m$ )
LAMA	5 a 100
HÚMUS	10 a 150
LIMO	20 a 100
ARGILAS	80 a 330
TERRA DE JARDIM	140 a 480
CALCÁRIO FISSURADO	500 a 1.000
CALCÁRIO COMPACTO	1.000 a 5.000
GRANITO	1.500 a 10.000
AREIA COMUM	3.000 a 8.000
BASALTO	10.000 a 20.000

O Estado de Minas Gerais caracteriza-se por possuir solos associados a formações antigas, de alta resistividade, com valores típicos da ordem de  $2500 \Omega.m$ .

A seguir, são considerados os principais parâmetros que influenciam no valor da resistividade de um tipo de solo:

Umidade do solo: Quanto maior a umidade, menor será a resistividade. O eletrólito formado pela água, no solo, é o principal elemento de condução de corrente no mesmo.

Concentração e tipos de sais dissolvidos na água: Quanto maior a concentração de sais dissolvidos na água, menor será a resistividade do solo. Isso acontece pelo fato da maior concentração de sais proporcionar uma maior disponibilidade de íons, no solo, para condução de corrente.

---

Compacidade do solo: A compacidade define uma melhor ou pior continuidade física. Quanto mais compacto o solo, maior será a sua continuidade física, sendo assim, menor a sua resistividade.

Granulometria do solo: A granulometria influencia em dois aspectos: capacidade de retenção de água e continuidade física. Quanto maior o tamanho dos grãos, maior será a resistividade. Isso acontece porque, neste caso, haverá um menor contato entre os grãos adjacentes.

Temperatura do solo: A influência da temperatura na resistividade do solo pode ser explicada, fundamentalmente, sobre dois aspectos. O primeiro mostra que o aumento da temperatura local tende a aumentar a resistividade do solo, uma vez que provoca o aumento da evaporação, diminuindo a umidade. O segundo considera que a resistividade do solo é sensivelmente influenciada pela água nele contida. Sabendo-se que a água possui alto coeficiente negativo de temperatura, é razoável supor que a resistividade tende a crescer para uma diminuição da temperatura. Os dois aspectos possuem efeitos opostos, sendo que o resultado final será a combinação dos mesmos.

---

# 3 O Fenômeno de Ionização do Solo

## 3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos relativos ao fenômeno de ionização do solo devido à passagem de correntes impulsivas oriundas de descargas atmosféricas.

Optou-se por uma divisão do capítulo em duas seções, sendo que a primeira aborda o tema segundo um enfoque mais genérico a segunda enfoca aspectos mais específicos, incluindo análises de artigos técnicos.

## 3.2 O Processo de Ionização do Solo

O fenômeno de ionização do solo nas proximidades do eletrodo de aterramento pode ser importante quando são analisadas situações em que correntes intensas estão envolvidas. Dependendo da área de dissipação do eletrodo e da resistividade do solo ( $\rho$ ), a densidade de corrente total ( $J_T$ ), constituída pela soma da parcela condutiva ( $J_C$ ) e da parcela capacitiva ( $J_D$ ), no domínio do tempo, é dada por:

$$J_T = J_C + J_D = J_C + \frac{\partial D}{\partial t}$$

onde  $D$  é a densidade de fluxo elétrico.

---

Como a área de dissipação do eletrodo de aterramento é fixa, o aumento da amplitude da onda de corrente injetada ( $I_T$ ) promove um aumento na mesma proporção em  $J_C$ ,  $J_D$  e, conseqüentemente  $J_T$ . Sabendo que o campo elétrico  $E$  no solo está diretamente relacionado a  $J_T$  por meio da expressão  $E = \frac{J_t}{(\sigma + j\omega\epsilon)}$ , onde  $\sigma$  é condutividade do meio,  $\omega$  a freqüência angular e  $\epsilon$  a permissividade elétrica do solo, tem-se que um aumento em  $J_T$  leva a um proporcional aumento em  $E$ .

Quando a intensidade deste campo elétrico ultrapassa determinado valor crítico, específico para uma condição particular de tipo de solo, umidade, compactação etc., ocorre o fenômeno de ionização do solo. Este valor de campo elétrico crítico, designado ( $E_C$ ), constitui, assim, o limiar do processo de ruptura.

Quando o valor de  $E_C$  é excedido, são constituídos canais de descarga (de plasma) nas proximidades do eletrodo. Como esses canais possuem resistividade muito reduzida em relação à resistividade natural do solo, eles facilitam a dissipação de corrente do eletrodo para esse meio, contribuindo para a redução da impedância de aterramento. Para aterramentos concentrados, o processo de ionização pode determinar uma redução muito significativa da impedância de aterramento.

Cabe comentar que esse processo guarda certas semelhanças com o efeito corona que ocorre no entorno de condutores de linhas de transmissão aéreas. Entretanto, no caso do fenômeno de ionização do solo, a ocorrência dos canais disruptivos tem distribuição muito menos uniforme. Isso ocorre porque na prática, o solo não é um meio homogêneo e é composto por várias partículas de tamanhos e materiais (orgânicos e inorgânicos) diferentes. Tal fato acaba por gerar um campo elétrico não uniforme na região vizinha ao eletrodo. Essas características heterogêneas do solo podem causar uma alteração na distribuição do campo elétrico, fazendo com que pontos juntos à superfície do eletrodo fiquem submetidos a diferentes valores de intensidade de campo. Assim, o campo elétrico crítico pode ser atingido primeiramente em determinados pontos do solo dando início ao

processo de ionização, enquanto em outros pontos próximos, esse processo não é verificado.

Podem ser encontradas na bibliografia internacional (Mousa, 1994), duas diferentes hipóteses que tentam explicar o processo de disrupção no solo.

Na primeira dessas hipóteses supõe-se que o processo de ionização se inicia nos espaços de ar entre os grãos do solo. Neste caso, a constante dielétrica do solo ( $\epsilon_{solo}$ ) deve ser relativamente alta para provocar uma elevação do campo elétrico nesses espaços de ar e iniciar a disrupção. Isso ocorre porque a condição de fronteira para campo elétrico normal à interface impõe que a densidade de fluxo elétrico na fronteira seja contínua (desconsiderando-se a presença de cargas acumuladas na interface), de modo que  $\epsilon_{solo} E_{solo} = \epsilon_{ar} E_{ar}$ . Sendo assim, os níveis de campo para provocar disrupção no solo devem ser semelhantes aos níveis de campo para provocar este fenômeno no ar.

Segundo o outro mecanismo, o processo de disrupção no solo ocorreria por efeito térmico. Quando o impulso de corrente é aplicado, a corrente que flui no solo é conduzida principalmente pela água nele dissolvida. Quando a temperatura da água aumenta, por dissipação da energia associada à circulação da corrente, a resistividade da água diminui. Na verdade, poucas explicações adicionais foram encontradas com relação a este mecanismo. Segundo alguns autores (Oettlé, 1988b), a corrente fluindo por estes estreitos canais de baixa resistividade cria uma instabilidade que leva à evaporação e, conseqüentemente, à disrupção nas regiões de campo elevado.

Segundo certos autores, dentre os mecanismos acima, a teoria da vaporização da água tem validade questionável, pois envolve muitas simplificações (Mousa, 1994). Por outro lado, a hipótese de ionização dos espaços de ar parece ser consistente.

---

Embora seja interessante o conhecimento sobre a origem do processo, neste trabalho há maior interesse na verificação das condições macroscópicas que podem levar ao processo.

### 3.3 Trabalhos sobre a Ionização do Solo Utilizando a Injeção de Ondas Impulsivas de Corrente

O fenômeno de ionização do solo tem sido estudado por vários pesquisadores ao longo dos anos. Nesta seção apresenta-se uma breve revisão sobre trabalhos dedicados à investigação do fenômeno de ionização do solo e à determinação do campo elétrico crítico  $E_c$  associado a aplicação de correntes impulsivas representativas de descargas atmosféricas.

Nos anos 40, Bellaschi (1941) publicou um trabalho experimental na qual apresentava resultados da aplicação de ondas de tensão senoidais (60Hz) e impulsivas em diferentes hastes de aterramento com tamanhos e raios distintos enterradas verticalmente no solo, com tempos de frente entre 6  $\mu$ s e 12  $\mu$ s. Os resultados experimentais foram analisados com foco no cálculo da resistência impulsiva por meio da relação  $V_{pico}/I_{pico}$ . Pouco depois, Bellaschi (1942) apresentou um trabalho no qual foram aplicadas ondas impulsivas de correntes de 400 A a 15.5 kA com as seguintes formas de ondas: 20/50  $\mu$ s, 8/125  $\mu$ s e 25/65  $\mu$ s, em 12 eletrodos de aterramento. Foi observado que o grau de redução da resistência impulsiva depende do tipo de solo e do arranjo dos eletrodos, porém não depende do tempo de frente da corrente. O fenômeno de ionização do solo foi desenvolvido a partir da variação da impedância de aterramento em função do valor máximo da onda de corrente impulsiva injetada. Valores de campo elétrico crítico de ionização do solo foram obtidos na faixa de 1.2 a 4.2 kV/cm.

Algumas décadas mais tarde, em 1974 Liew e Darveniza publicaram, um trabalho dedicado à avaliação do comportamento dinâmico de eletrodos de aterramento enterrados verticalmente no solo mediante a injeção de correntes impulsivas (Liew, 1974). O fenômeno de ionização do solo foi modelado por meio de uma redução da resistividade do solo em torno de 15%. Foram utilizados três

tipos de solo com resistividades variadas e duas configurações de aterramento (semi-hemisférica e haste vertical). O campo elétrico crítico de ionização do solo foi tratado como uma variável ajustável que foi fixada assim que o modelo proposto se mostrou capaz de reproduzir os resultados experimentais. O valor obtido foi de 3 kV/cm.

Em 1988, Oettlé publicou um trabalho descrevendo o resultado da operação de tensões impulsivas em eletrodos concentrados, visando à investigação dos processos de ruptura total e ionização do solo (Oettlé, 1988b). Para tal, foram utilizados diferentes tipos de solos, empregados em duas configurações distintas. Na primeira, as amostras de solo foram misturadas, peneiradas e colocadas entre dois eletrodos com forma predominantemente plana na região de interesse. Nessa condição, o campo elétrico é considerado uniforme. Oettlé, com intuito de comparar o processo de ruptura total em solos com características distintas, aplicou impulsos de tensão com tempo de frente de 3  $\mu$ s e diferentes amplitudes. O campo elétrico que pode levar a disrupção no solo está compreendido entre os valores de 6 a 18 kV/cm. O segundo arranjo experimental consistia em dois eletrodos hemisféricos concêntricos preenchidos com solo. As análises realizadas por Oettlé indicaram um campo elétrico crítico de aproximadamente 8,0 kV/cm.

Na década de 90, Mousa apresentou um importante trabalho onde uma série de testes em campo foi conduzida para averiguar as teorias existentes sobre o tema (Mousa, 1994). Desenvolveu realizações experimentais nas quais foram aplicadas ondas impulsivas de corrente em duas configurações de aterramento (semi-hemisférica e haste vertical), calculando o valor da resistência impulsiva, designação atribuída pelo autor à relação entre os valores instantâneos das ondas de corrente e tensão. Chamam atenção algumas análises de erros cometidos na estimativa do campo elétrico crítico pela medição da resistência impulsiva. O erro encontrado se deve à não-homogeneidade do solo, que causa uma variação no campo elétrico crítico e na resistividade em diferentes pontos do solo. O valor do campo crítico de ionização do solo estimado por Mousa foi de 3 kV/cm.

Em 1994, Visacro e Soares avaliaram o efeito de ionização do solo em termos da redução da impedância de aterramento de condutores horizontais

---

longos, a partir de resultados experimentais que desenvolveram para a aplicação de ondas impulsivas em amostras de solo colocadas em cubas coaxiais (Visacro, 1994). A avaliação não se baseou no valor do campo crítico, mas sim em curvas  $V_{xl}$  construídas a partir de valores instantâneos das ondas de corrente e tensão aplicadas na amostra. À medida que o processo de ionização se ampliava no entorno do condutor cilíndrico interior com o crescimento da corrente submetida à amostra de solo, a inclinação da curva  $V_{xl}$  era reduzida. Os autores determinaram qual seria o aumento equivalente do raio do eletrodo que seria capaz de causar a mesma diminuição e relacionava este raio expandido a densidade linear de corrente dispersa pelo eletrodo. A partir daí tornou-se possível modelar um aumento equivalente do raio em função da amplitude desta densidade no caso de eletrodos enterrados no solo para se estimar a redução impulsiva de aterramento. O aspecto interessante desta abordagem se baseava na densidade linear de corrente em vez do campo elétrico crítico.

Em 1996, Loboda e Scuka apresentaram uma investigação experimental na qual foram injetadas correntes impulsivas em três tipos de solos (arenoso, argiloso e rico em material orgânico) tendo sido obtidos valores do campo elétrico crítico, com base em dois diferentes métodos (Loboda, 1996). O primeiro (método A) considera um modelo de ionização uniforme em torno do eletrodo e o segundo (método B) leva em conta uma resistividade residual não linear de zonas ionizadas. Os ensaios impulsivos foram realizados para cada tipo de solo, utilizando duas polaridades (positiva e negativa) e tempos de frente distintos. A configuração utilizada foi coaxial cilíndrica. Os valores de campo elétrico crítico de ionização do solo obtidos neste trabalho variaram na faixa de 2 a 10 kV/cm.

Em 2000, Nor. e outros publicaram um trabalho com o intuito de avaliar o fenômeno de ionização do solo sob a aplicação de ondas de correntes impulsivas, em duas quantidades de solo arenoso com tamanhos de grãos diferentes (Nor, 2000). A fim de verificar a influência da umidade, diferentes volumes de água (1,3,5,7 e 10%) foram adicionados em cada amostra. A configuração utilizada foi semi-hemisférica. Por meio dos registros de tensão e corrente obtidos, o campo elétrico crítico foi determinado e a tensão de ruptura total foi estimada via ensaios estatísticos (método Up and Down – U50%). Para o campo elétrico crítico de

---

ionização do solo foi obtido um valor de 5.6 kV/cm, valor este independente do conteúdo de água acrescido em cada amostra.

Em 2003, Yaqing Liu e outros publicaram um trabalho que investiga a existência de uma resistividade residual do solo, na região de ionização, quando ocorre o fenômeno de ionização do solo (Liu, 2003). Esse artigo é dividido em duas partes, onde são mostrados, primeiramente, os percentuais de resistividade residual do solo encontrados na literatura. Então, por meio de um estudo experimental, os autores apresentam os resultados obtidos. Uma série de testes foi realizada em amostras de solo com diferentes resistividades até a ocorrência da ruptura total. O campo elétrico crítico foi determinado quando se percebeu uma grande diferença nas formas de onda da tensão e corrente aplicados na amostra. Contudo, o campo elétrico crítico apresenta um comportamento estatístico, e por isso o valor médio do campo elétrico estimado imediatamente antes da ocorrência da ionização do solo foi escolhido como o campo elétrico crítico. Os valores encontrados do campo elétrico crítico para as resistividades de 174, 356, 579 e 827  $\Omega\text{m}$  foram, respectivamente, de 3,28, 9,85, 4,81 e 5,16 kV/cm. A resistividade residual encontrada na região de ionização ficou em torno de 7% da resistividade original.

Em 2004, Gonos e Stathopulos apresentaram um trabalho que, constituído de uma parte experimental e uma parte analítica mostrou por meio de curvas, a variação do campo elétrico crítico em função da resistividade do solo e a influência da adição de água em solos secos (Gonos, 2004). Utilizando um gerador, ondas impulsivas de tensão e corrente foram aplicados em dois tipos de solos com resistividades variando entre 1300  $\Omega\text{m}$  e 1000  $\Omega\text{m}$ . O processo foi repetido com a adição de uma certa quantidade de água de torneira. A configuração utilizada foi coaxial cilíndrica e o campo elétrico crítico foi determinado na disrupção total. Foi obtido um valor de campo elétrico crítico na faixa de 3.5 kV/cm até 13 kV/cm para os solos secos. Porém, com o acréscimo de água, o campo elétrico crítico caiu para aproximadamente de 35% do valor correspondente para os solos secos.

Em 2006, Nor publicou uma revisão abrangente sobre o comportamento do solo sob a injeção de correntes impulsivas. Seu trabalho foi dividido em três

---

categorias: testes de campo, testes laboratoriais e modelos computacionais (Nor, 2006). Para cada item, o comportamento não-linear do solo foi considerado. Em seu trabalho também são descritos os dois principais mecanismos de condução no solo, o processo térmico e o processo de ionização. Após analisar resultados de vários autores que já publicaram sobre o tema, o campo elétrico crítico foi determinado na faixa entre 1.3 a 20 kV/cm.

Recentemente, Nor. e outros apresentaram um trabalho contribuindo para o entendimento da ocorrência do fenômeno de ionização em solos de alta resistividade (Nor, 2007). Por meio de um gerador de impulsos foram aplicadas ondas de tensão e corrente de ambas polaridades (positiva e negativa) em amostras de solo seco. A configuração utilizada foi coaxial cilíndrica. Com a obtenção dos registros de tensão e corrente e dos cálculos dos valores das resistências impulsivas, foram feitas observações acerca da diferenciação entre os processos de disrupção no solo (térmico e ionização). O campo elétrico crítico foi estimado em 5.6 kV/cm. Nesse trabalho, os autores revelam suas preocupações para maiores investigações do efeito da polaridade do impulso nas características do solo sob aplicação de correntes impulsivas.

### **3.4 Considerações Finais**

Deve-se observar que, na revisão bibliográfica realizada ao longo deste capítulo, preocupou-se em destacar os valores obtidos para o campo elétrico crítico. Tal procedimento não é casual. Foi realizado para permitir comparações deste parâmetro com os resultados neste trabalho.

---

# 4 Circuito Experimental e Definição de Casos

## 4.1 Introdução

Conforme apresentado no Capítulo 1, o objetivo deste trabalho constitui-se na investigação do comportamento de amostras de solo frente a correntes impulsivas representativas de correntes de descargas atmosféricas, com vistas à avaliação da dinâmica do fenômeno de ionização do solo.

Para alcançar esse objetivo foi realizada uma série de experimentos, nos quais utilizaram um gerador de impulsos para aplicação de ondas impulsivas em diferentes amostras de solo, acomodados em cubas com duas geometrias distintas. O presente capítulo tem como objetivo caracterizar a configuração utilizada do gerador, as cubas de medição e os solos ensaiados.

## 4.2 Circuito Elétrico Experimental

Visando a investigação da ionização do solo na região circunvizinha ao eletrodo, foi utilizado um gerador de impulsos do Laboratório de Extra-Alta Tensão da EEUFMG para gerar ondas de tensão e corrente impulsivas, as quais foram aplicadas em amostras de solo.

A finalidade do gerador de impulsos é simular experimentalmente tensões e correntes que sejam representativas das respectivas correntes de descargas

---

atmosféricas. As tensões e correntes produzidas pelos geradores de impulsos devem satisfazer algumas condições impostas por normas (no caso, “Técnicas de Ensaio Elétrico de Alta-Tensão”, NBR 6936, 1992), tais como:

- **Tempo de Frente** ( $T_1$ ) – parâmetro virtual definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo  $T$  entre os instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de crista (Figura 4.1).
- **Tempo de Cauda** ( $T_2$ ) - parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a tensão atinge a metade do valor de crista, na cauda (Figura 4.1).

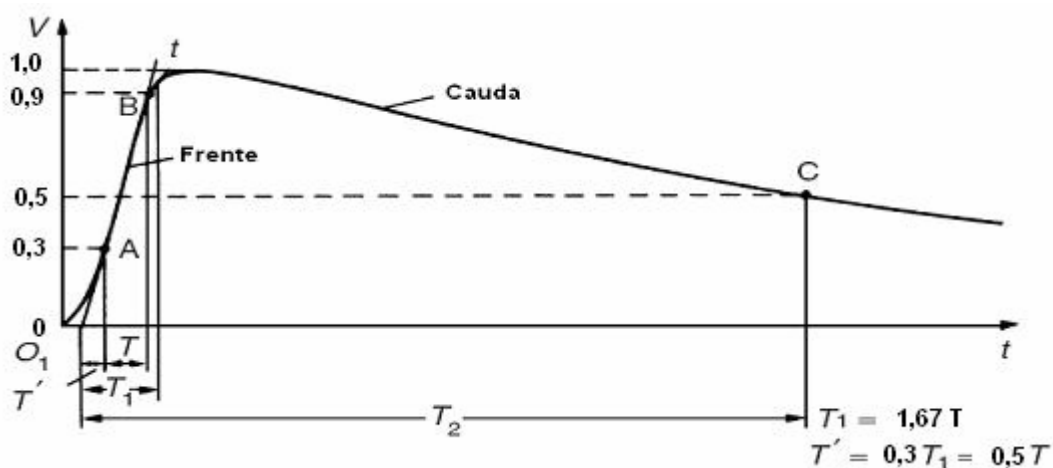


Figura 4.1 - Representação de um impulso atmosférico.

A Figura 4.2 apresenta o circuito básico do gerador de impulsos juntamente com o sistema de medição.

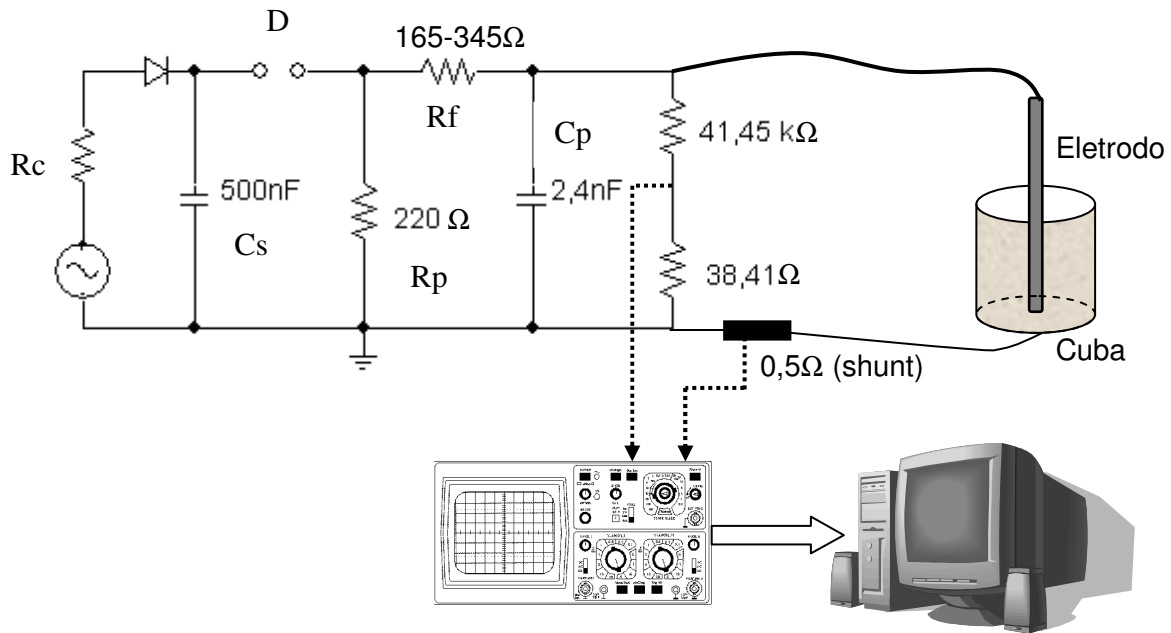


Figura 4.2 - Circuito equivalente do gerador de impulsos.

O princípio de funcionamento do gerador de impulsos é baseado na utilização de uma fonte de tensão contínua (constituída por um transformador e um retificador) que carrega o capacitor de choque ( $C_s$ ) através de um resistor de carga ( $R_c$ ) de elevado valor. A tensão nos terminais do capacitor de choque sobe lentamente, de acordo com a elevada constante de tempo  $R_c C_s$ , até um valor de tensão  $V$ , definido pela distância ajustável entre as esferas do centelhador. Quando a tensão no capacitor é suficientemente elevada para causar a disrupção no centelhador de esferas ( $D$ ), o capacitor de choque começa a se descarregar sobre o corpo de prova.

Durante esse fenômeno transitório a tensão no corpo de prova segue a variação temporal indicada na Figura 4.3:

1. A tensão de impulso gerada e aplicada ao corpo de prova cresce exponencialmente com uma constante de tempo  $R_f C_p$  que é relativamente pequena, onde  $R_f$  é o resistor de frente e  $C_p$  é a capacitância do divisor de tensão;

2. Após atingir um valor máximo, a tensão começa a decair também exponencialmente, com uma constante de tempo  $R_p(C_s + C_p)$ , relativa à descarga das capacitâncias em jogo sobre a resistência  $R_p$ ;
3. Tensão impulsiva resultante.

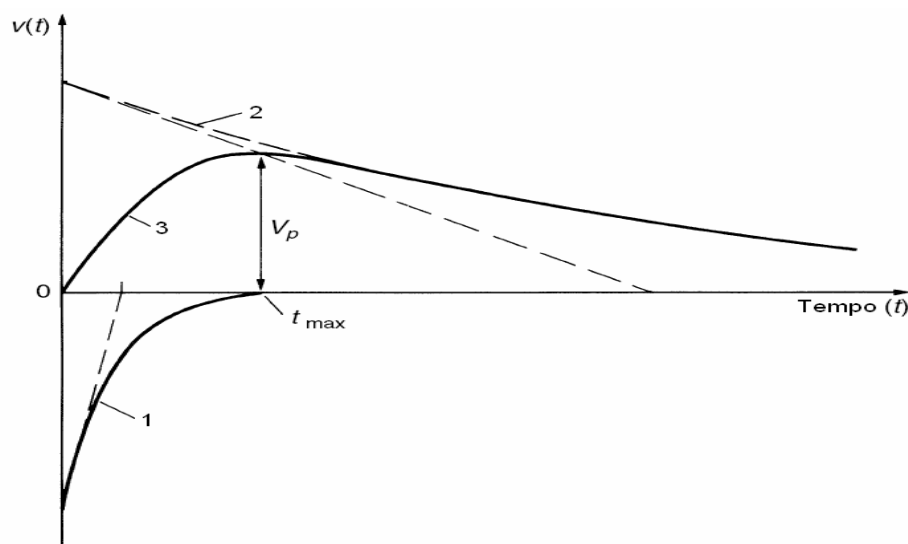


Figura 4.3 – Composição da onda de tensão na saída do gerador de impulsos.

Nos experimentos, a aplicação da tensão no corpo de prova foi realizada por meio de uma cordoalha de cobre, e a medição da corrente foi feita por meio de um resistor de baixo valor ôhmico conectado entre o corpo de prova e a malha de terra do sistema do laboratório, conforme ilustrado na Figura 4.2. As ondas impulsivas de tensão e corrente resultantes, foram medidas por um osciloscópio digital marca Tektronix, modelo TDS-520-500MHz-500MS/s, com base de tempo de  $5 \mu\text{s}/\text{div}$  e taxa de amostragem de  $100 \text{ pontos}/\mu\text{s}$ , e registradas em um computador.

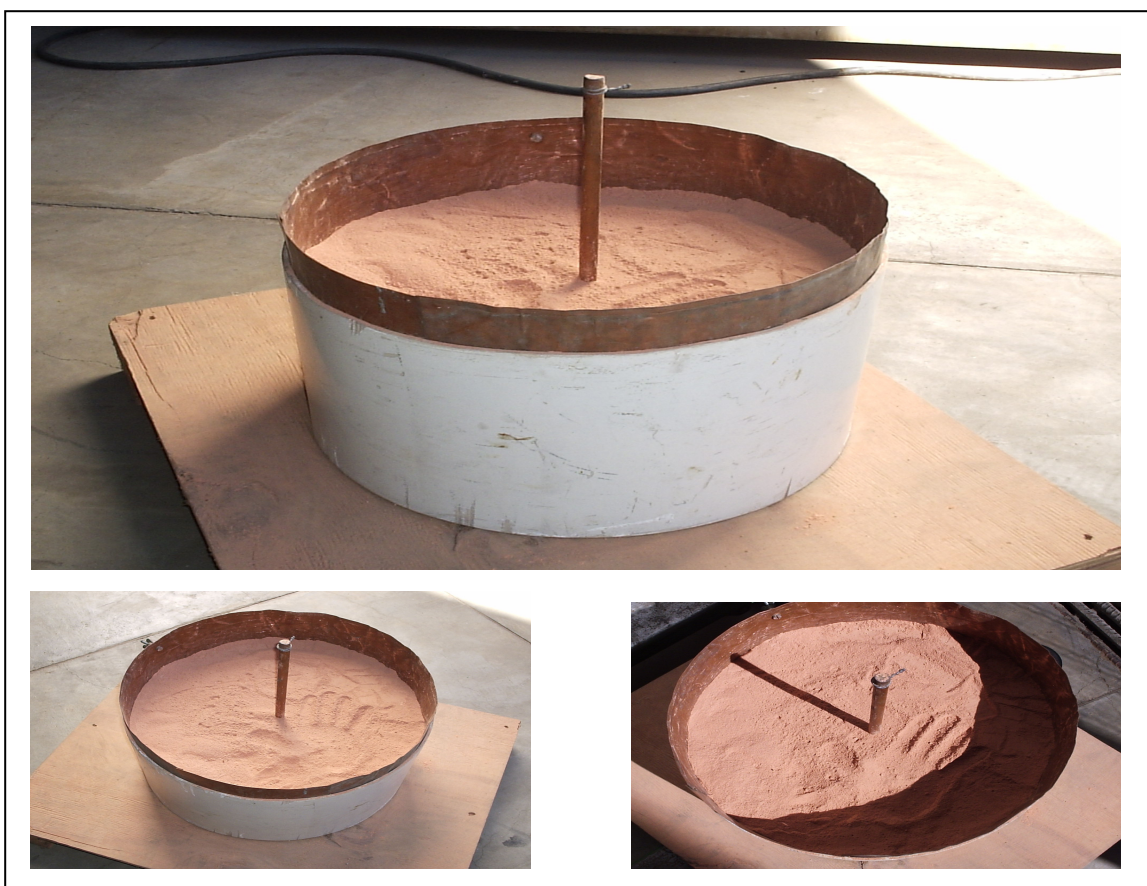
### 4.3 Realizações Experimentais

Para fins de promover a compreensão do fenômeno de ionização do solo, análises considerando diferentes situações foram realizadas. Nesta seção tais situações são caracterizadas.

Todo o conjunto de experimentos foi realizado para cada um dos tipos de solos escolhidos. Ao final do trabalho, constituiu-se um banco de dados relacionando as condições de teste e de solo com sua resposta ao impulso.

Foram utilizadas duas configurações básicas de cubas para a realização dos ensaios com as amostras de solo.

Na primeira configuração, mostrada na Figura 4.4 e chamada de configuração cilíndrica, dois eletrodos metálicos foram dispostos em forma coaxial, sendo o interno formado por uma haste de cobre e o externo por chapas de cobre colocadas formando uma casca com espessura desprezível. A região entre os dois eletrodos foi preenchida pela amostra de solo a qual se desejava investigar. As dimensões da cuba cilíndrica são: 1,44 cm de diâmetro do eletrodo interno, 44,5 cm de diâmetro do eletrodo externo e 19,5 cm de comprimento em contato com o solo.



**Figura 4.4 – Cuba de configuração cilíndrica.**

A segunda configuração, mostrada na Figura 4.5, era constituída por duas placas paralelas de alumínio, sendo o espaço interior preenchido com a amostra de solo investigada. Os discos de alumínio da cuba paralela possuíam diâmetro de 19,3 cm e a distância entre as placas de 2.0 cm.



**Figura 4.5 – Cuba de configuração de placas paralelas.**

Existe uma diferença importante no que concerne à ocorrência do processo de ionização no solo contido nessas duas cubas.

No caso da cuba de placas paralelas, o campo elétrico é aproximadamente uniforme entre as placas. Portanto quando se inicia o processo de disrupção, por ter sido alcançado o valor  $E_C$ , verifica-se a ruptura total no espaço entre as placas.

Por outro lado, no caso da cuba cilíndrica, o campo elétrico é não-uniforme, sendo mais intenso na região junto ao eletrodo interno e decrescendo aproximadamente com o inverso da distância radial. Com isso, quando se alcança

$E_c$  junto ao eletrodo interno, o processo de ionização se inicia nessa região e fica restrito a ela. Com o aumento da tensão aplicada e, por conseguinte, do campo radial, o processo evolui em direção à casca externa.

Em função de seus diferentes comportamentos quando submetidos a tensões e correntes impulsivas, as duas configurações possibilitam identificar o campo crítico (cuba paralela), e a evolução do processo de ionização em função do aumento do campo para análise de sua dinâmica (cuba cilíndrica).

#### 4.4 Tipos de Solos Estudados

Quatro tipos diferentes de solo foram escolhidos para a realização da investigação, sendo nomeados Solo I, Solo II, Solo III e Solo IV. Para cada tipo de solo e de cuba, foram variados os seguintes parâmetros:

- Tempo de frente da onda de tensão aplicada: 1  $\mu$ s e 3  $\mu$ s;
- Umidade da amostra de solo: 0% (seco), 5%, 10%, etc;
- Amplitude da onda de tensão aplicada: iniciando em 5 kV com passos crescentes de 5 kV por estágio.

A Tabela 4.1 apresenta com maiores detalhes os valores de resistividades e umidades dos solos empregados nos ensaios laboratoriais. Os procedimentos adotados para se alcançar os valores indicados de umidade do solo são apresentados a seguir:

- a. Realizou-se a secagem total da amostra de solo;
- b. Mediu-se o peso da amostra em questão;
- c. Adicionou-se o percentual (%) adequado de água deionizada em relação ao peso medido;
- d. Lacrou-se a embalagem que continha a amostra de solo umedecida;
- e. A amostra foi cuidadosamente misturada até que fosse observada a sua homogeneidade;

- f. Finalmente, colocou-se essa amostra na cuba, sendo os testes realizados em seguida;
- g. O processo foi repetido para uma nova porcentagem de água.

Tabela 4.1 – Valores de resistividades e umidades dos solos estudados.

<b>Tipos de Solo</b>	<b>Resistividade (<math>\rho</math>)</b> <b>[<math>\Omega.m</math>]</b>	<b>Umidade</b> <b>[%]</b>
<b>Solo I</b>	600	0
	350	5
	250	10
<b>Solo II</b>	1090	0
	600	3
	240	6
	80	12
<b>Solo III</b>	10000	5
	7000	10
	2000	15
<b>Solo IV</b>	10000	20
	5000	25
	3000	30

Com o objetivo de melhor caracterizar os solos utilizados nos testes, foi realizada uma análise de granulometria que indicou os percentuais de areia grossa, areia fina, silte e argila correspondentes a cada amostra analisada. Os resultados obtidos estão ilustrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Análise de granulometria.

<b>Identificação da Amostra</b>	<b>Areia Grossa (%)</b>	<b>Areia Fina (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>
<b>Solo I</b>	3,80	63,74	31,16	1,30
<b>Solo II</b>	9,20	21,76	67,84	1,20
<b>Solo III</b>	26,80	32,12	38,92	2,16
<b>Solo IV</b>	29,20	17,26	21,54	32,00

## 4.5 Determinação da Resistividade do Solo e da Água Deionizada

Essa seção tem como objetivo descrever os métodos utilizados na determinação dos valores das resistividades das amostras de solo e da água utilizada nos testes laboratoriais.

- **Determinação da Resistividade do Solo**

Considerando-se uma cuba cilíndrica de comprimento  $L$  e raio interno  $r_i$  e externo  $r_e$ , algumas formulações derivadas da teoria eletromagnética clássica (Visacro, 1996), fornece:

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}$$

Como:

$$\frac{G}{C} = \frac{\sigma}{\epsilon} \rightarrow G = \frac{C\sigma}{\epsilon} = \frac{2\pi\epsilon L\sigma}{\epsilon \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} = \frac{2\pi L}{\rho \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}$$

Deriva-se:

$$\frac{1}{R} = \frac{2\pi L}{\rho \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \rightarrow \rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}$$

onde:

R = Valor da resistência do solo medida em baixa frequência.

- **Determinação da Resistividade da Água Deionizada**

A medição da resistividade da água deionizada foi efetuada em uma cuba eletrolítica com forma de paralelepípedo ( $A = 0,01 \text{ m}^2$  e  $L = 0,3 \text{ m}$ ) de paredes de vidro que tinha placas metálicas de área  $A$  em duas faces opostas. Como a medição foi realizada em baixa frequência, a corrente se distribuía uniformemente na área atravessada, o que permite calcular a resistividade pela fórmula:

$$\rho = \frac{R.A}{L}$$

Considerando os valores da tensão aplicada entre as placas metálicas ( $V=140 \text{ V}$ ), a corrente medida ( $I = 0,73 \text{ mA}$ ) e a relação  $R$  ( $V/I = 188,425 \text{ } \Omega$ ), obteve-se o valor da resistividade:

$$\rho = \frac{R.A}{L} = \frac{188,425 \times 0,01}{0,3} \approx 6,28k \text{ } \Omega.m$$

Vale comentar que o processo de deionização consiste na remoção total dos íons presentes na água, fazendo com que a mesma tenha sua carga elétrica neutralizada pela remoção ou adição de elétrons. De forma geral, esse processo elimina da água nitratos, cálcio e magnésio, além de cádmio, bário e chumbo.

# 5 Resultados das Medições

## 5.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das montagens experimentais descritas no capítulo 4.

Para cada tipo de solo e para cada umidade deste foram avaliadas as condições necessárias para a ocorrência do processo de ionização, tanto no caso da cuba de placas paralelas (campo uniforme) quanto no caso da cuba cilíndrica.

Inicialmente, são apresentados no item 5.2.1 os resultados primários que consistem nas ondas de tensão e corrente impulsivas medidas na cuba cilíndrica para todos os solos estudados. A partir desses resultados, foram construídos diversos resultados secundários, apresentados nos itens 5.2.2 e 5.2.3, visando à investigação do fenômeno de ionização do solo.

De forma complementar, no item 5.3.1 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação de ondas impulsivas de tensão na cuba de placas paralelas, para os diversos tipos de solo.

É importante salientar que para minimizar a oscilação observada nas ondas de corrente medidas, e associadas a ruídos na medição, foi utilizado um filtro *butterworth* digital de 5ª ordem, dentro da função *filtfilt* do *software* matlab ( filtro não-causal ). Na aplicação foi usada uma frequência de corte de 1.8 MHz e

---

freqüência de amostragem de 10 MHz. O aspecto interessante deste filtro reside no fato de que este não promove o defasamento das ondas.

## 5.2 Resultados Referentes à Configuração Cilíndrica

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais obtidos com a configuração cilíndrica descrita no capítulo 4. Para essa configuração, os testes foram realizados por meio da aplicação de ondas impulsivas de tensão (com tempo de frente de 1  $\mu\text{s}$  e 3  $\mu\text{s}$ ), partindo do valor de pico mínimo de 5 kV por estágio, com passos crescentes de 5 kV. Vale mencionar que os valores de tensão evidenciados nas legendas das figuras correspondem aos níveis de tensão aplicados por estágio, ou seja, não representam os valores reais de pico. Os valores de resistividades encontrados para os diversos tipos de solo, com os devidos percentuais de umidade, podem ser encontrados na Tabela 4.1. As análises referentes aos resultados de medições apresentados a seguir são realizadas no próximo capítulo.

### 5.2.1 Ondas de Tensão e Corrente

#### 1. Solo I

- Tempo de Frente: 1  $\mu\text{s}$

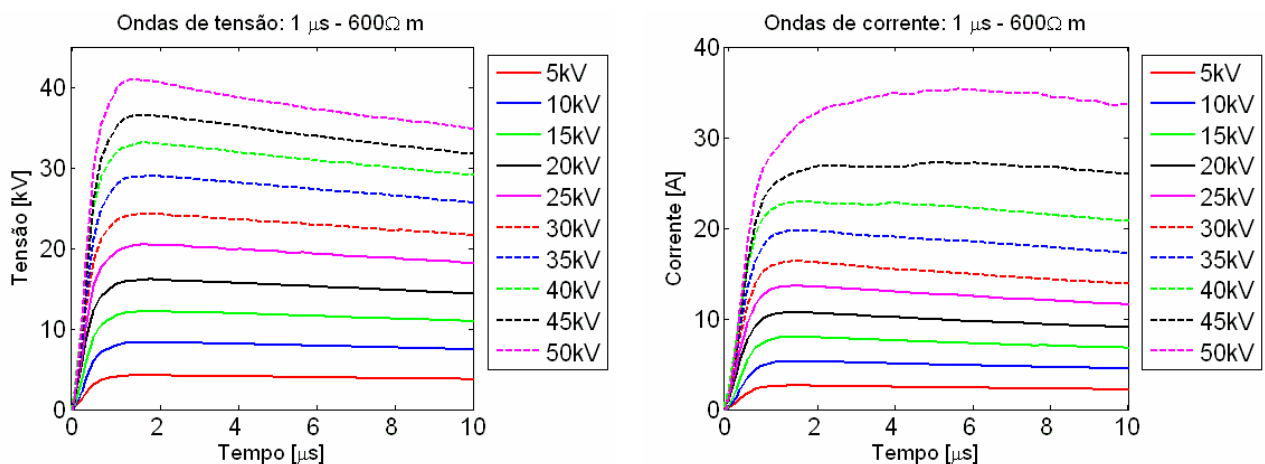


Figura 5.1 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=600 \Omega \cdot \text{m}$ .

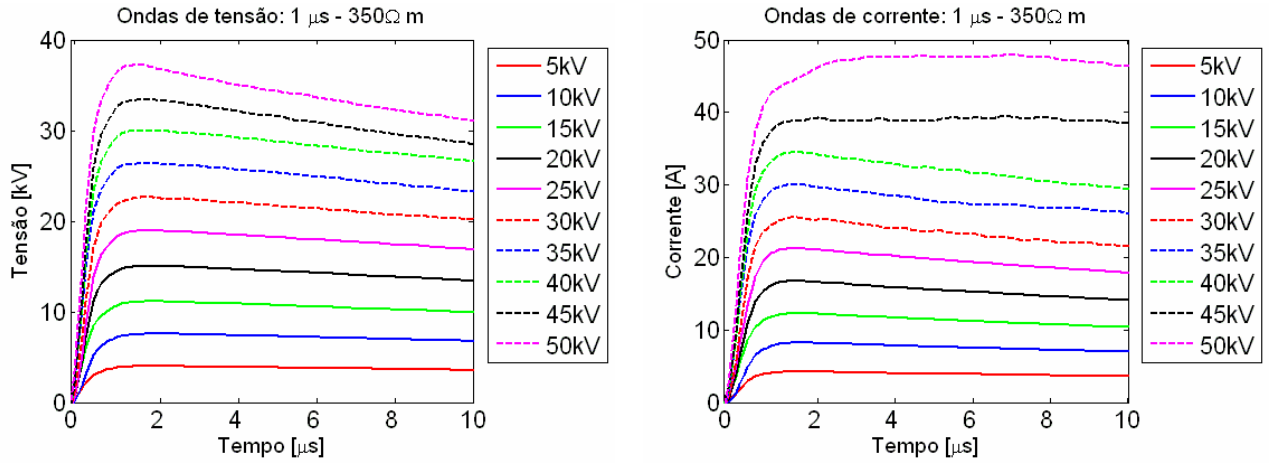


Figura 5.2 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=350 \Omega.m$ .

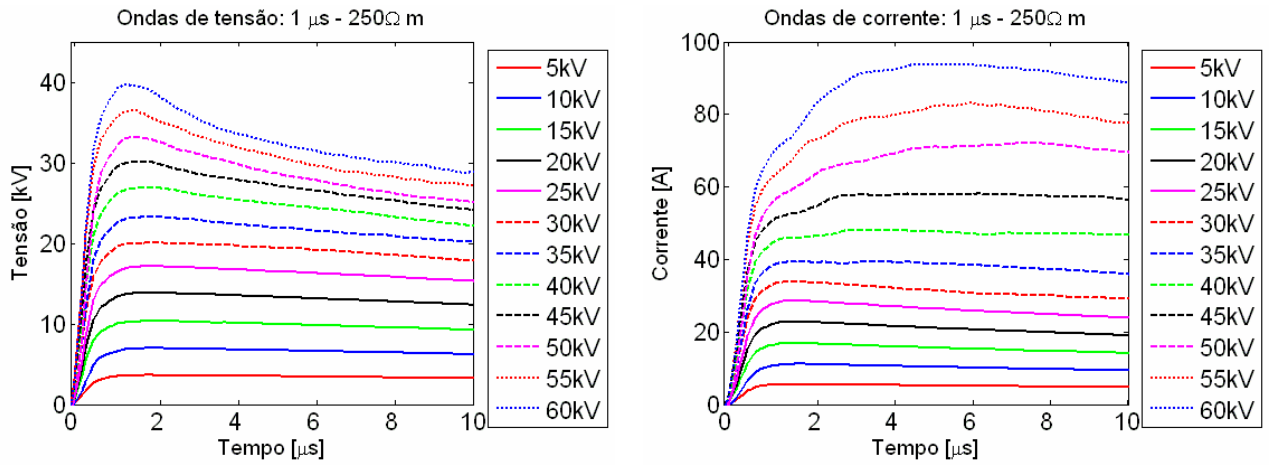


Figura 5.3 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=250 \Omega.m$ .

- Tempo de Frente: 3  $\mu$ s

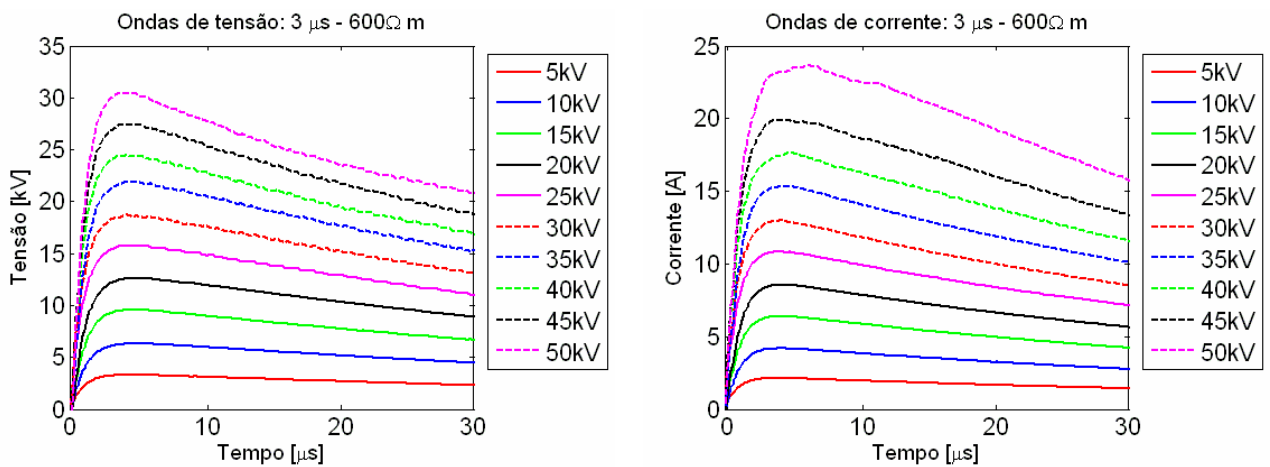


Figura 5.4 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=600 \Omega.m$ .

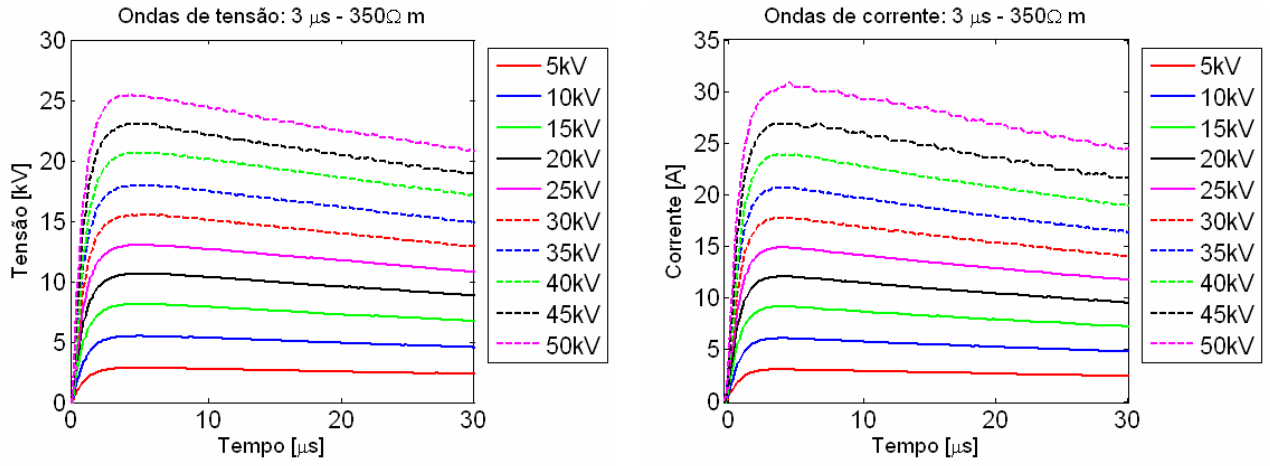


Figura 5.5 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=350 \Omega.m$ .

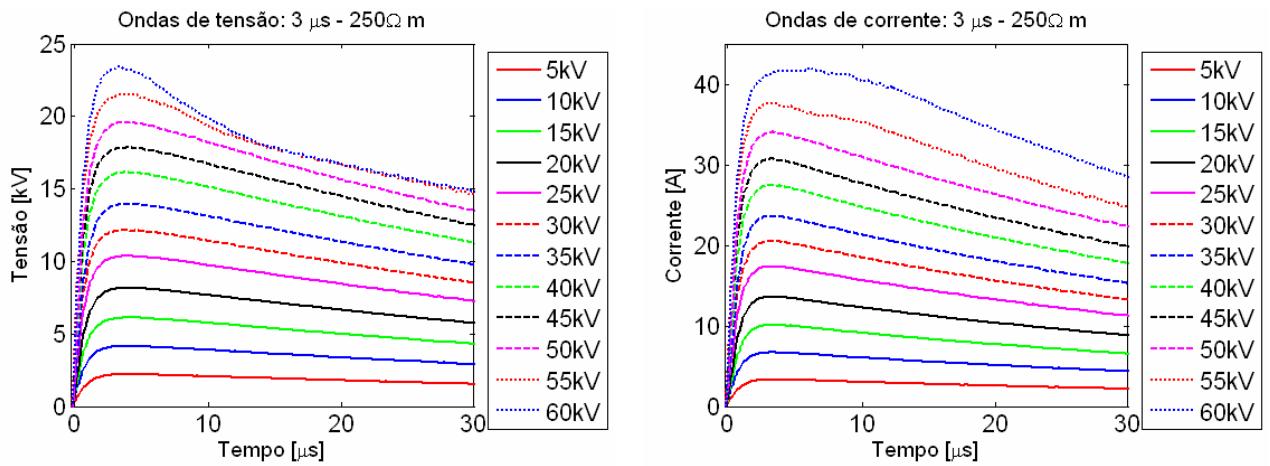


Figura 5.6 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=250 \Omega.m$ .

2. Solo II

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

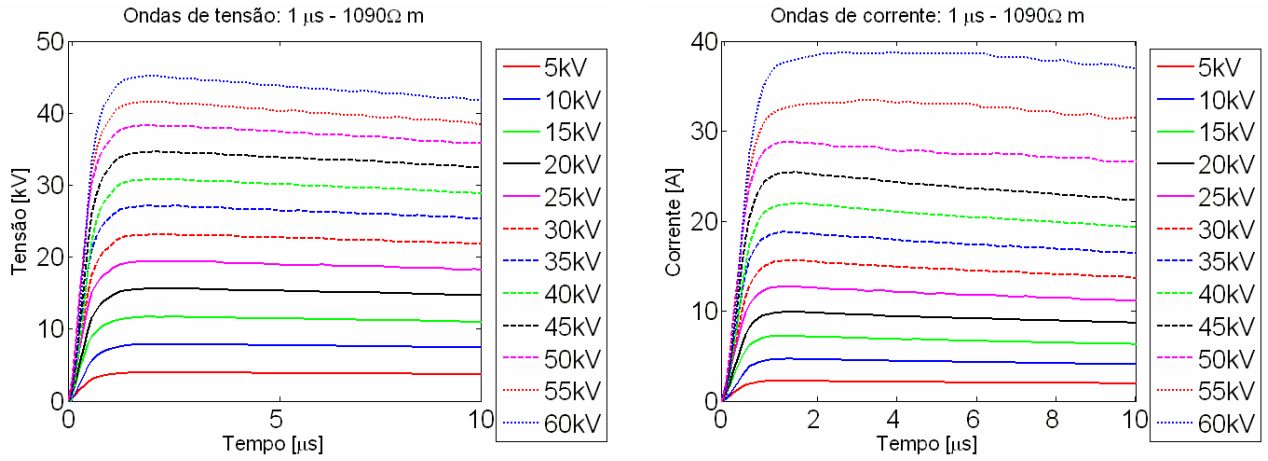


Figura 5.7 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=1090 \Omega.m$ .

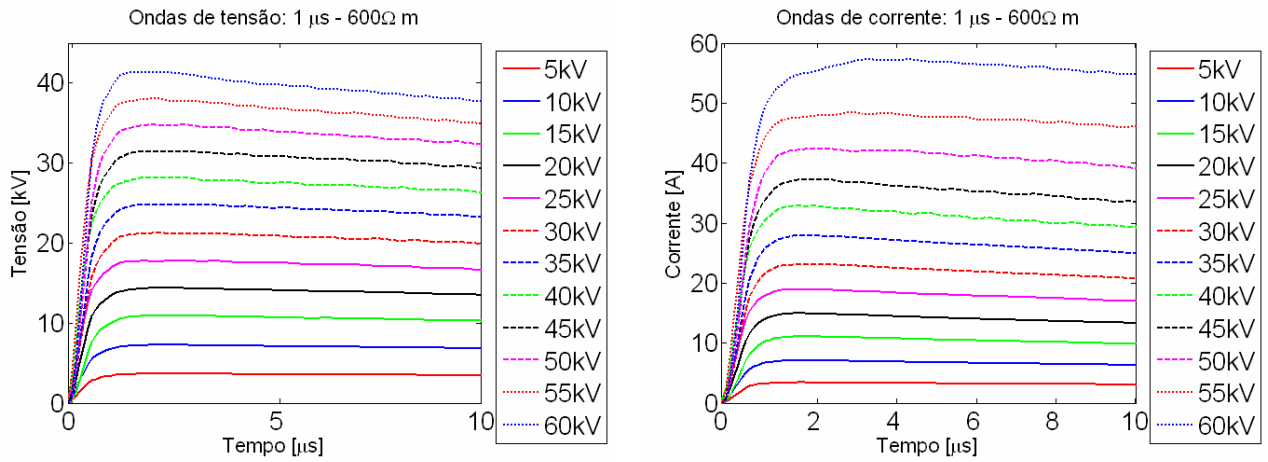


Figura 5.8 – Ondas de Tensão e Corrente –  $\rho=600 \Omega.m$ .

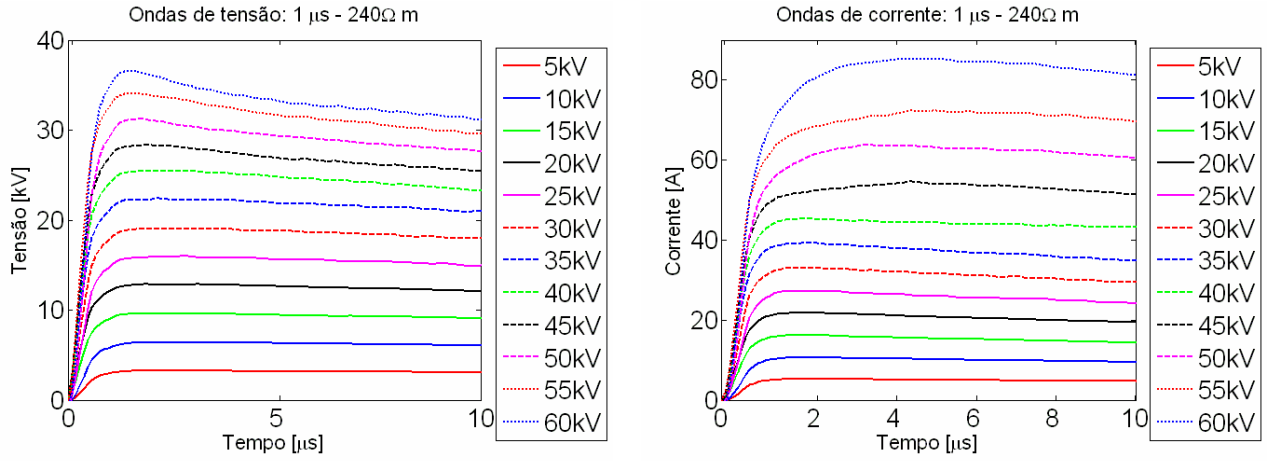


Figura 5.9 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=240 \Omega.m$ .

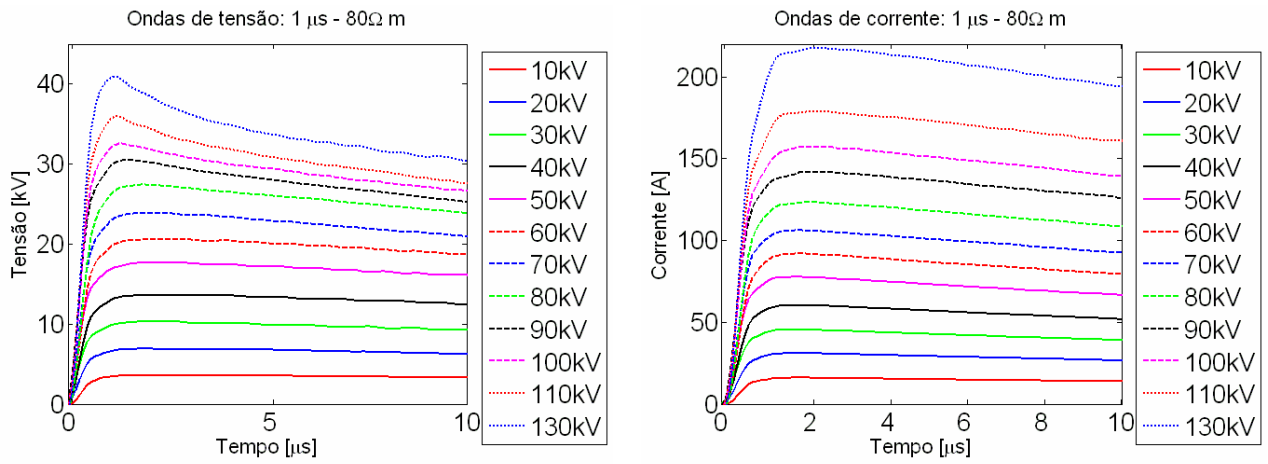


Figura 5.10 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=80 \Omega.m$ .

- Tempo de Frente: 3 µs

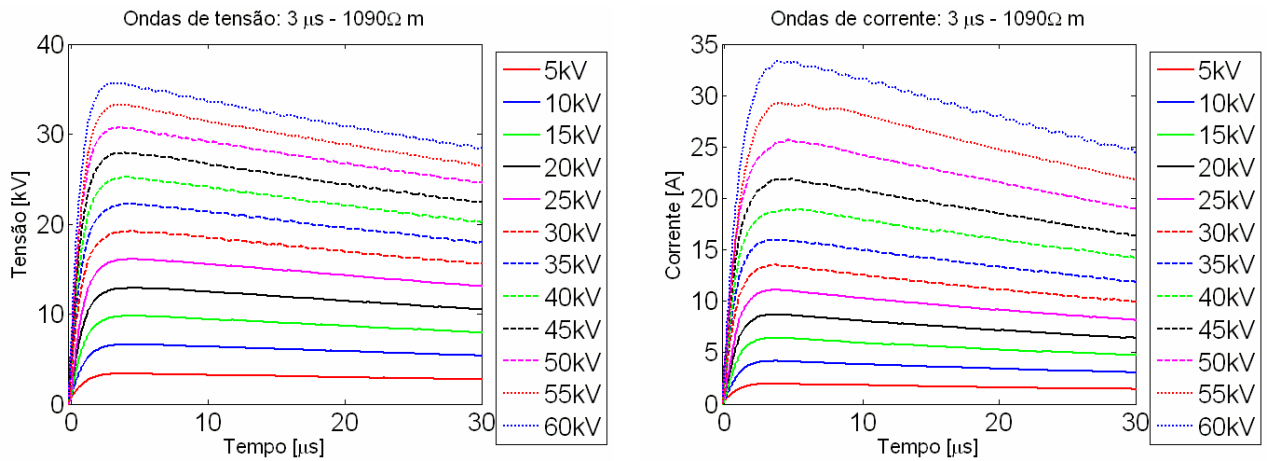


Figura 5.11 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=1090 \Omega.m$ .

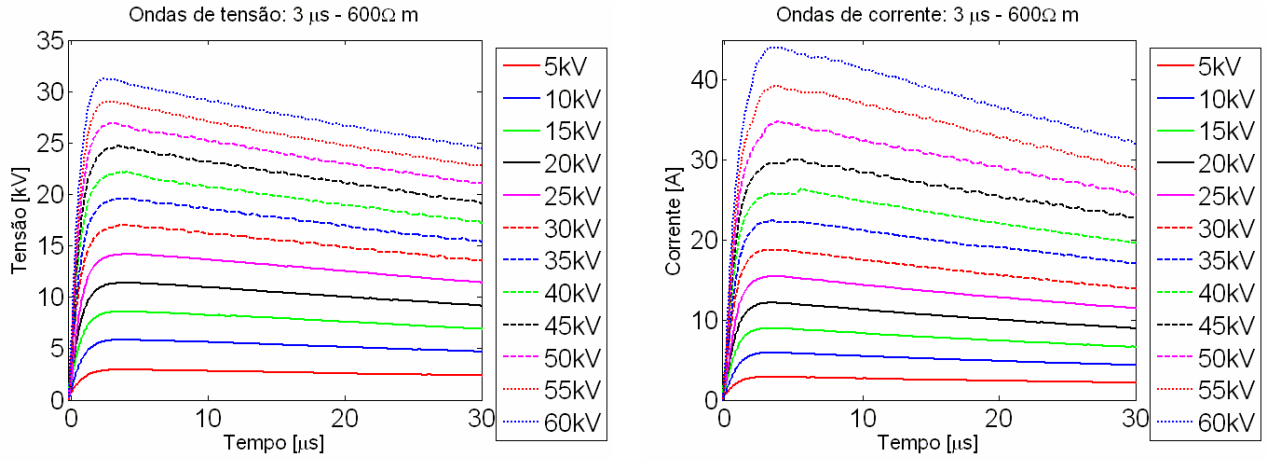


Figura 5.12 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=600 \Omega$ .m.

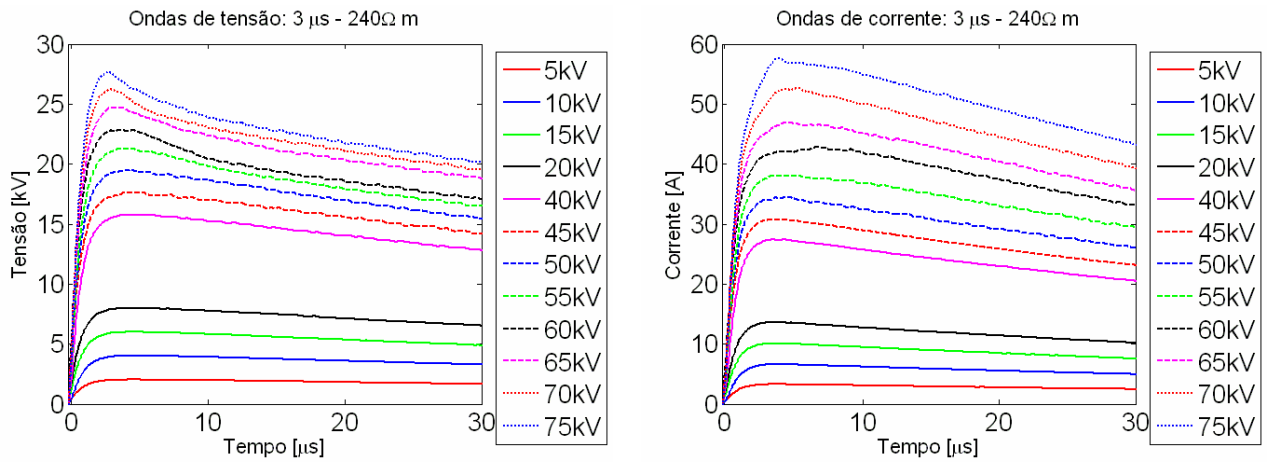


Figura 5.13 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=240 \Omega$ .m.

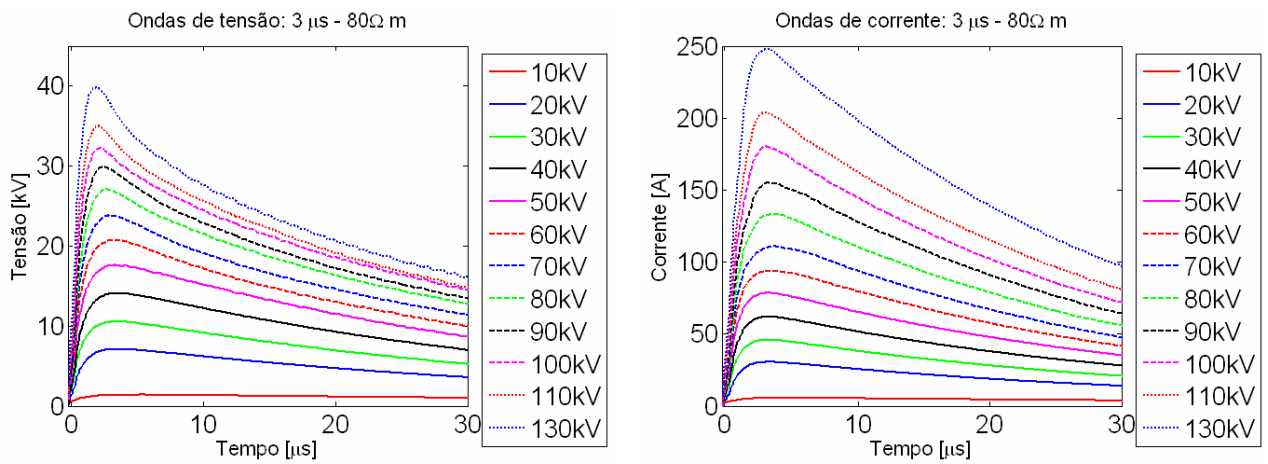


Figura 5.14 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=80 \Omega$ .m.

3. Solo III

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

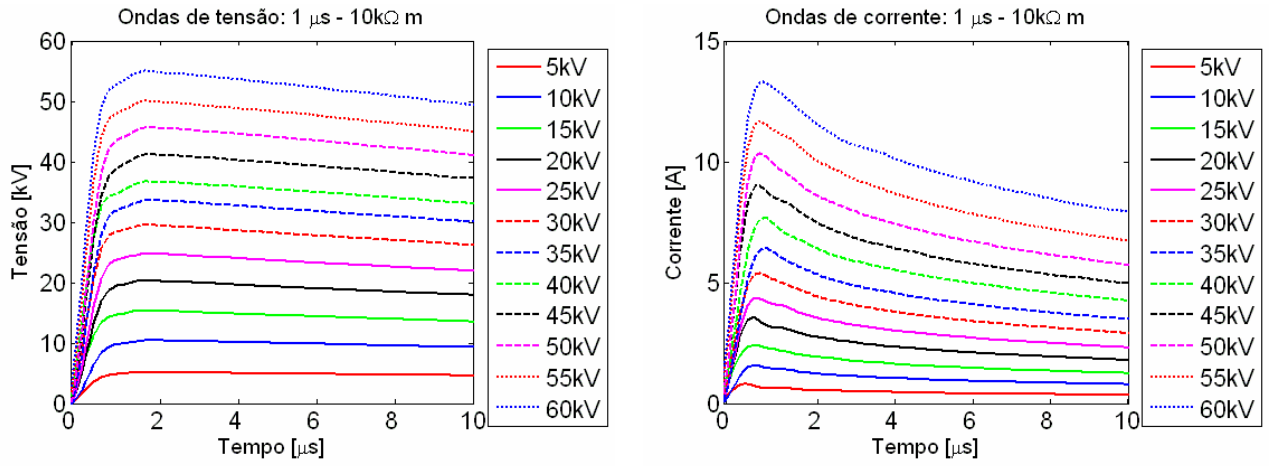


Figura 5.15 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

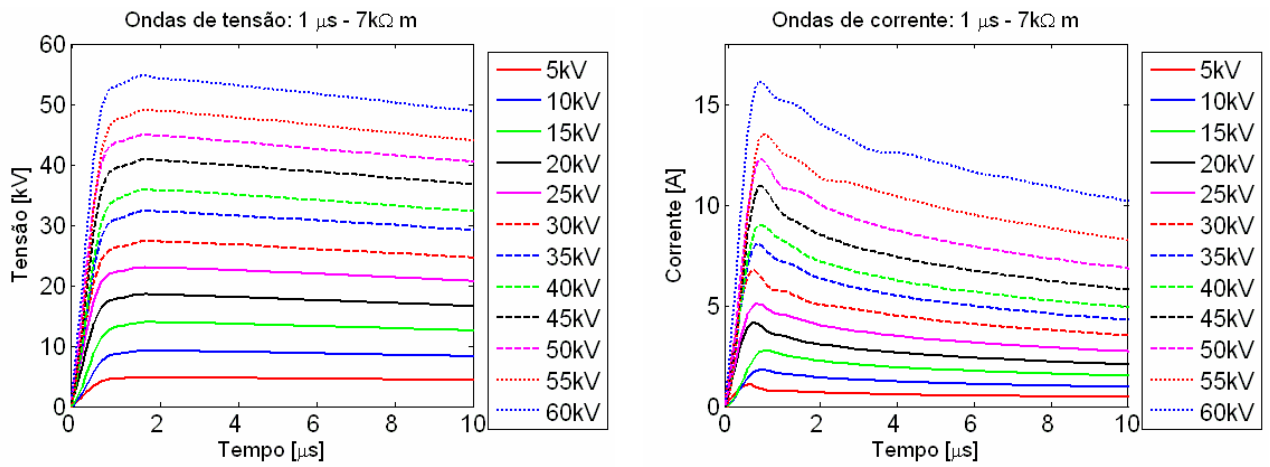


Figura 5.16 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=7$  k $\Omega$ .m.

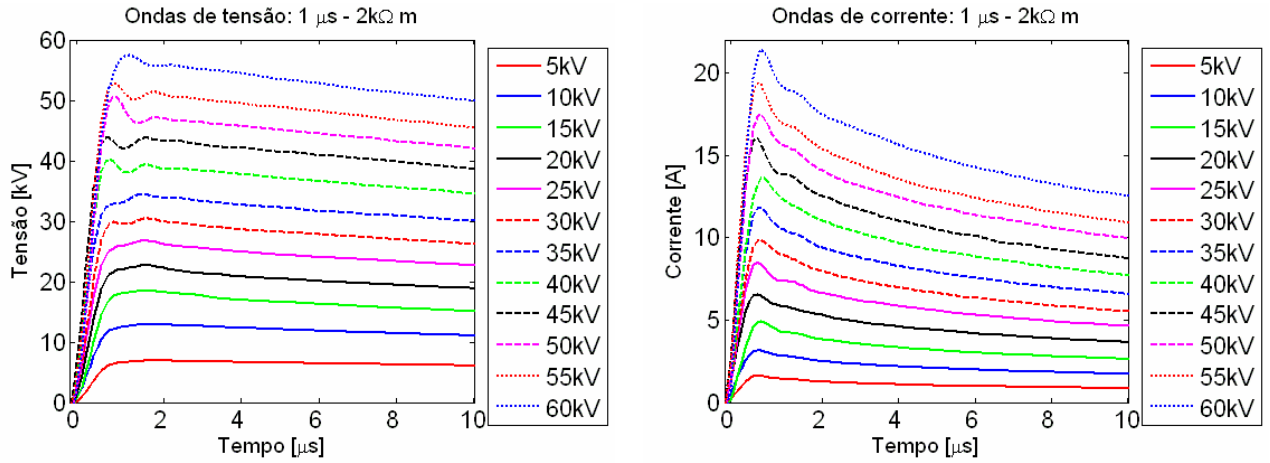


Figura 5.17 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=2$  k $\Omega$ .m.

- Tempo de Frente: 3  $\mu$ s

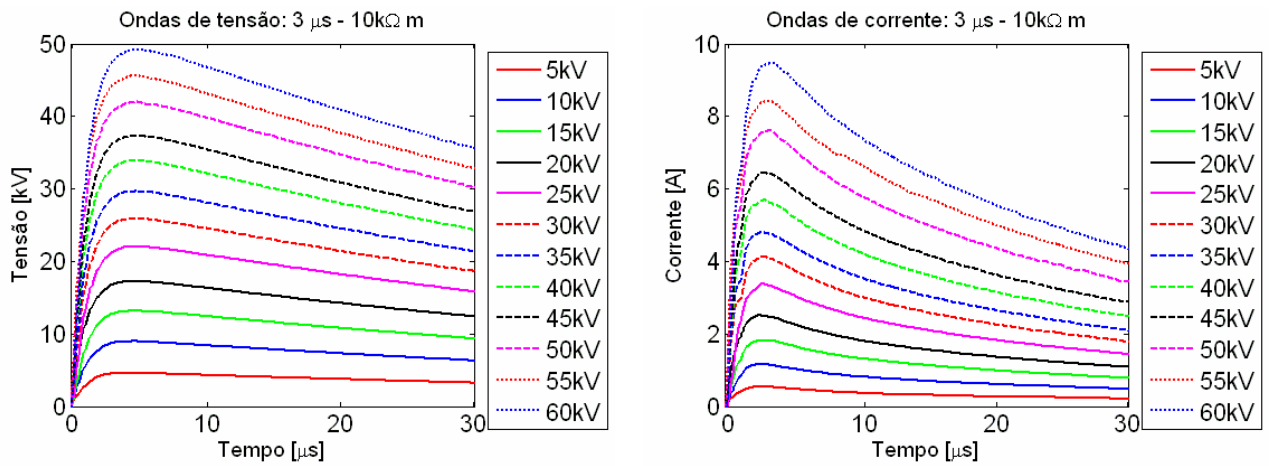


Figura 5.18 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

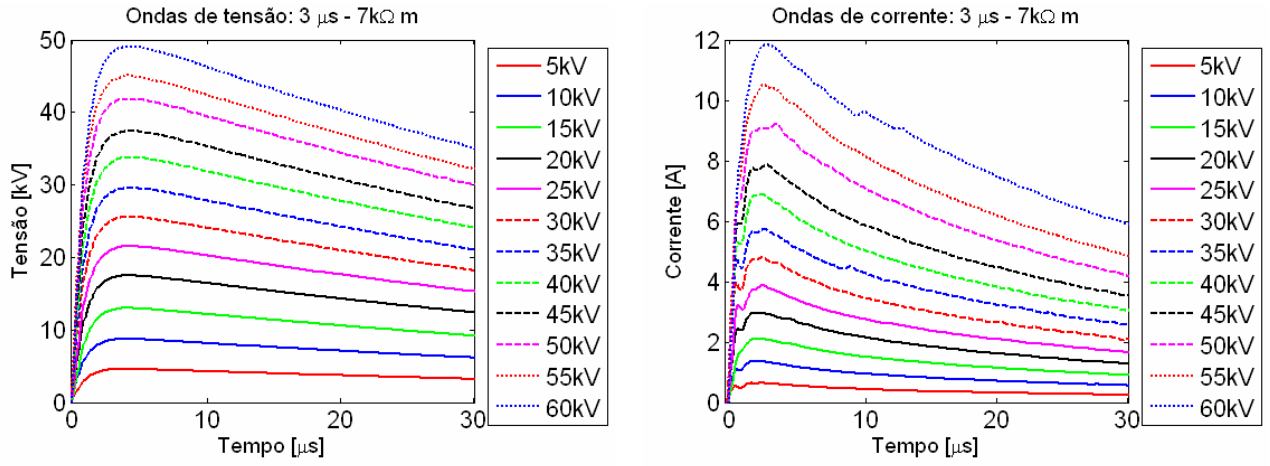


Figura 5.19 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=7$  k $\Omega$ .m.

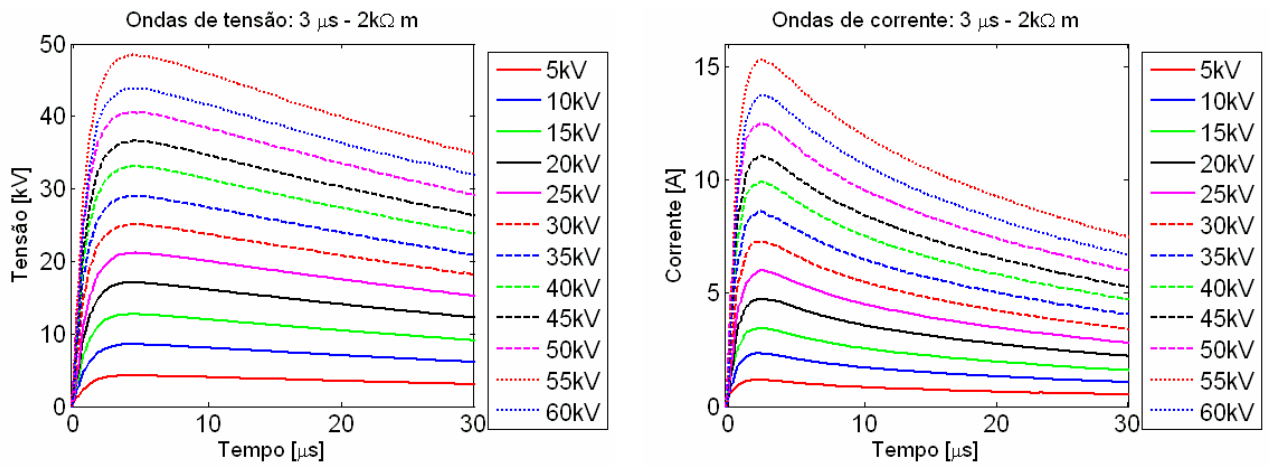


Figura 5.20 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=2$  k $\Omega$ .m.

#### 4. Solo IV

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

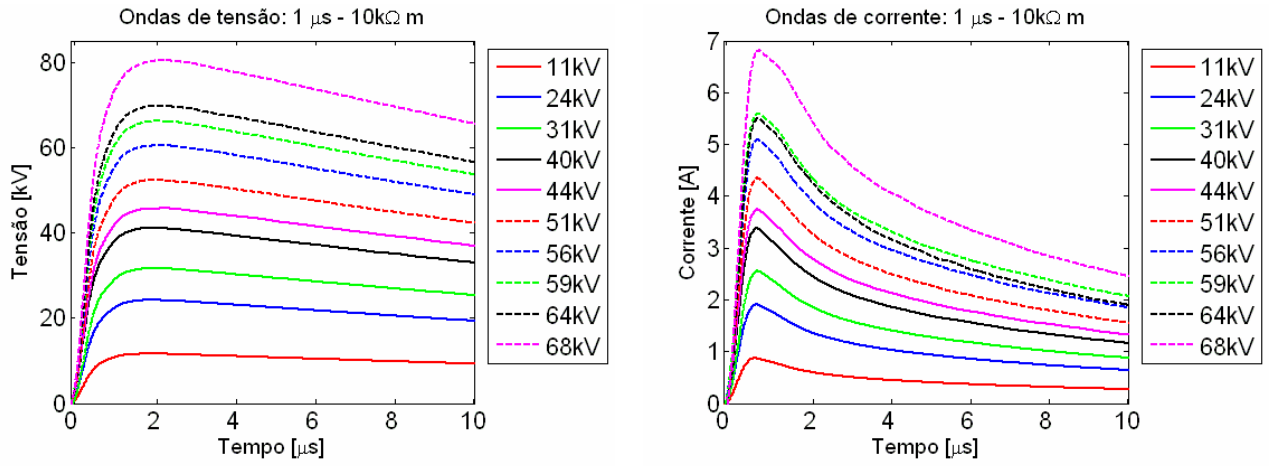


Figura 5.21 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

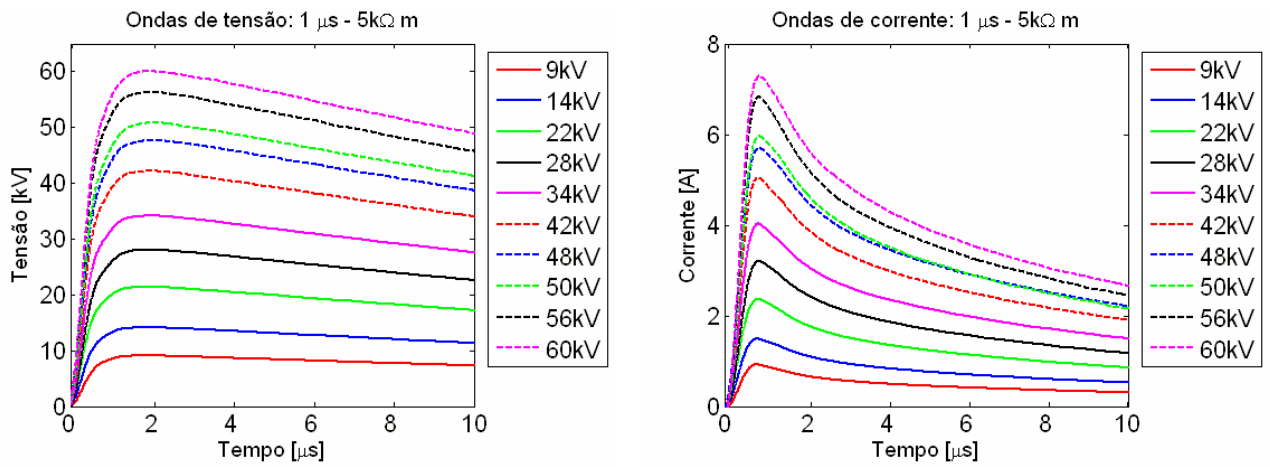


Figura 5.22 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=5$  k $\Omega$ .m.

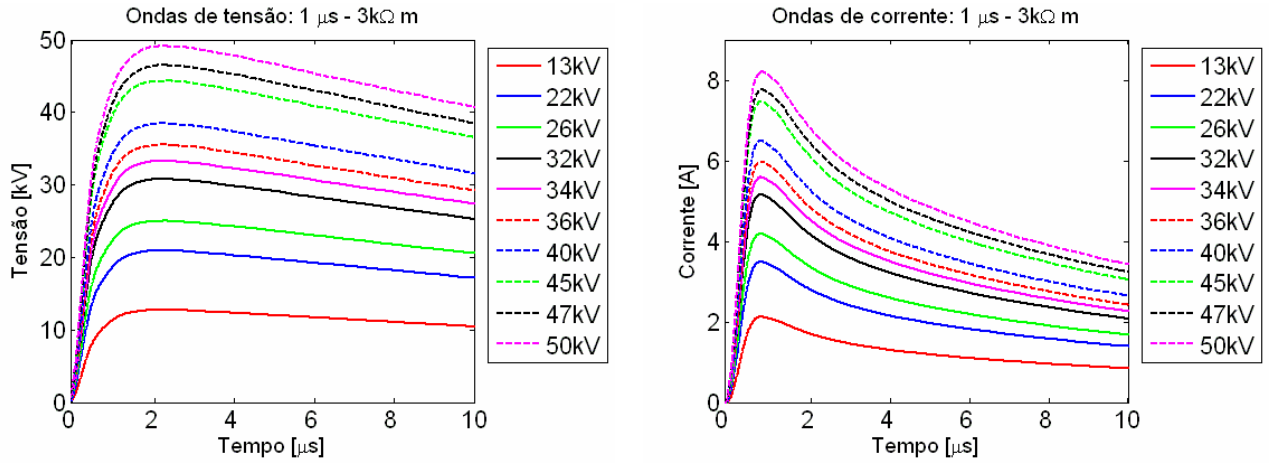


Figura 5.23 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=3 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ .

- **Tempo de Frente: 3  $\mu\text{s}$**

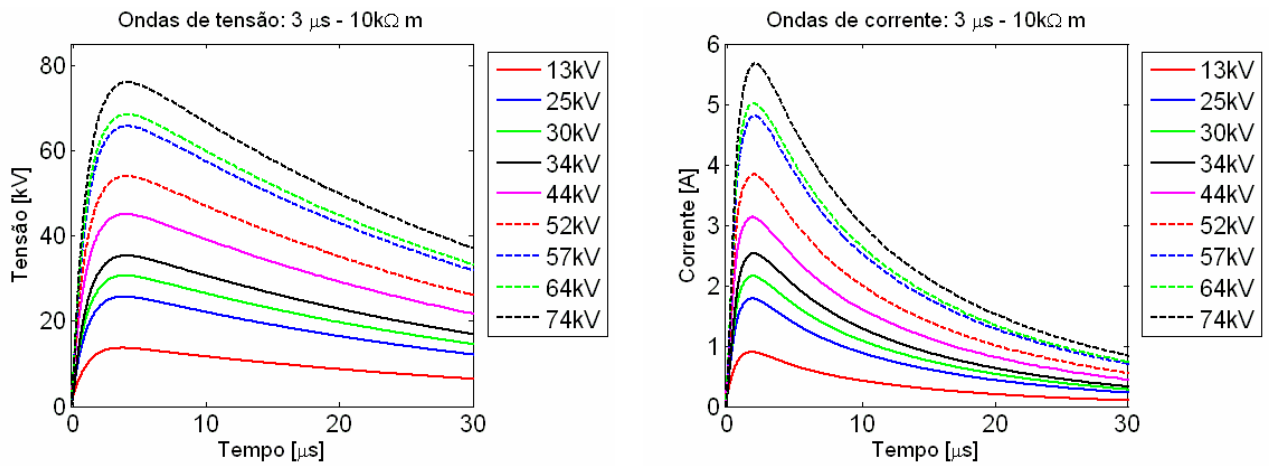


Figura 5.24 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=10\text{k} \Omega\cdot\text{m}$ .

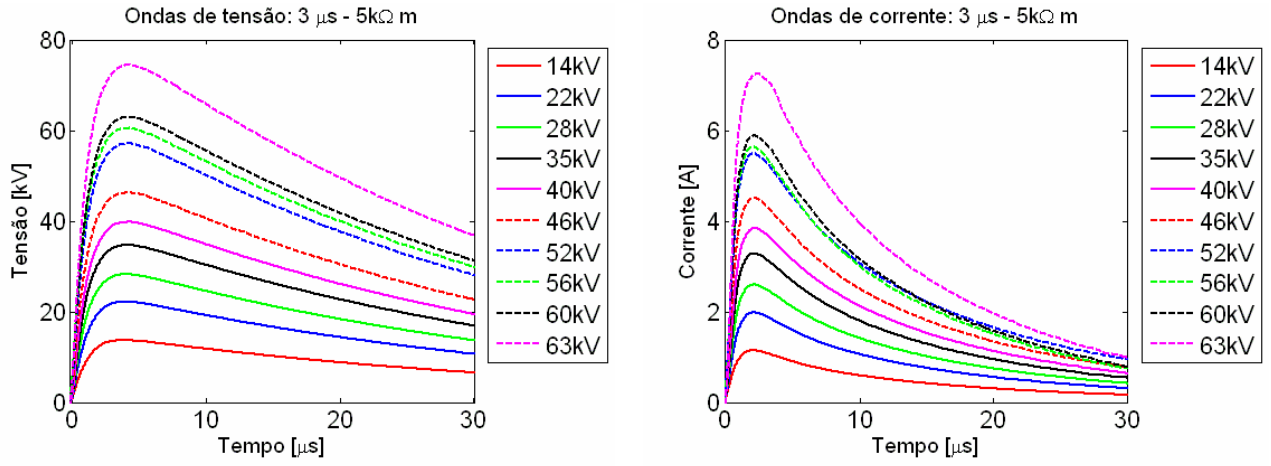


Figura 5.25 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=5$  k $\Omega$ .m.

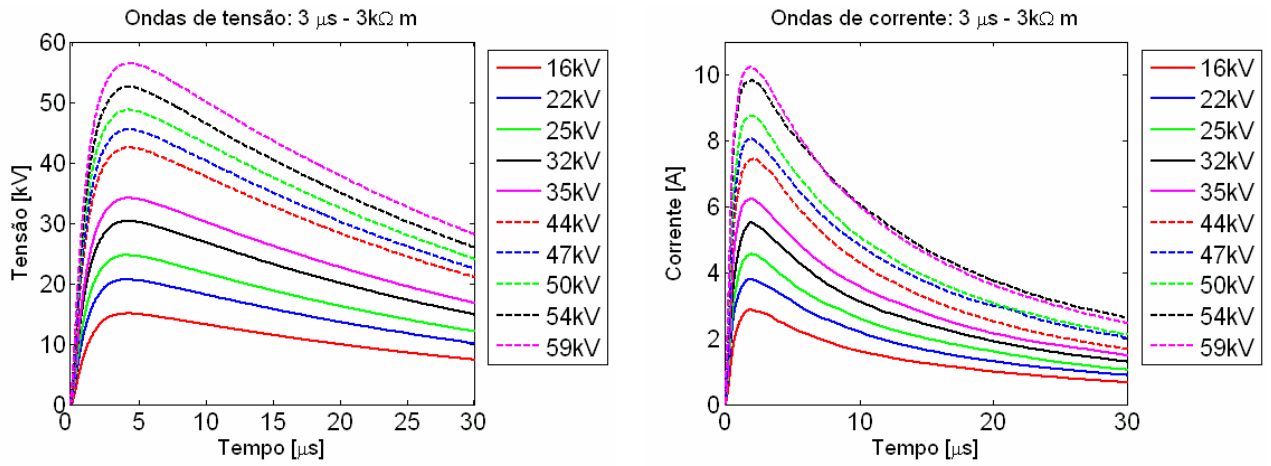


Figura 5.26 – Ondas de tensão e corrente –  $\rho=3$  k $\Omega$ .m.

### 5.2.2 Curvas de Impedância Transitória

A seguir são apresentados gráficos que mostram a evolução no tempo, do quociente dos valores instantâneos das ondas de tensão aplicada na cuba e a corrente resultante ( $Z(t) = v(t)/i(t)$ ), que é designada impedância transitória.

#### 1. Solo I

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

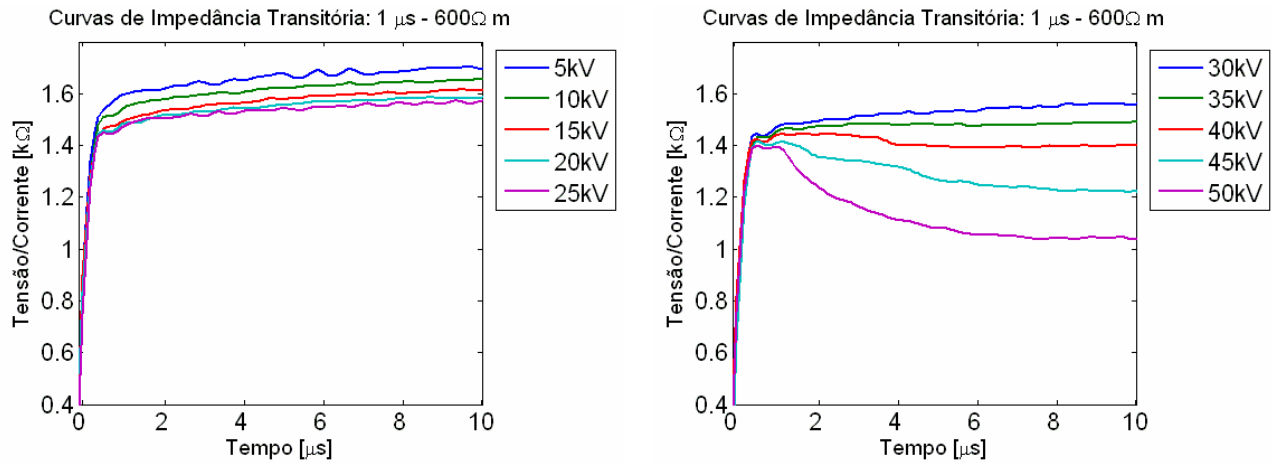


Figura 5.27 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=600 \Omega$ .m.

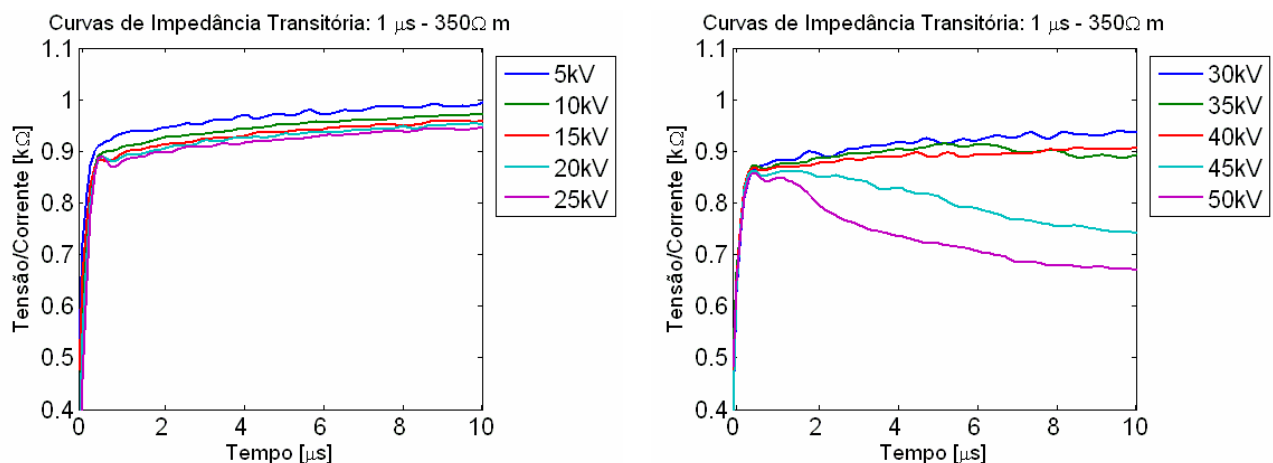


Figura 5.28 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=350 \Omega$ .m.

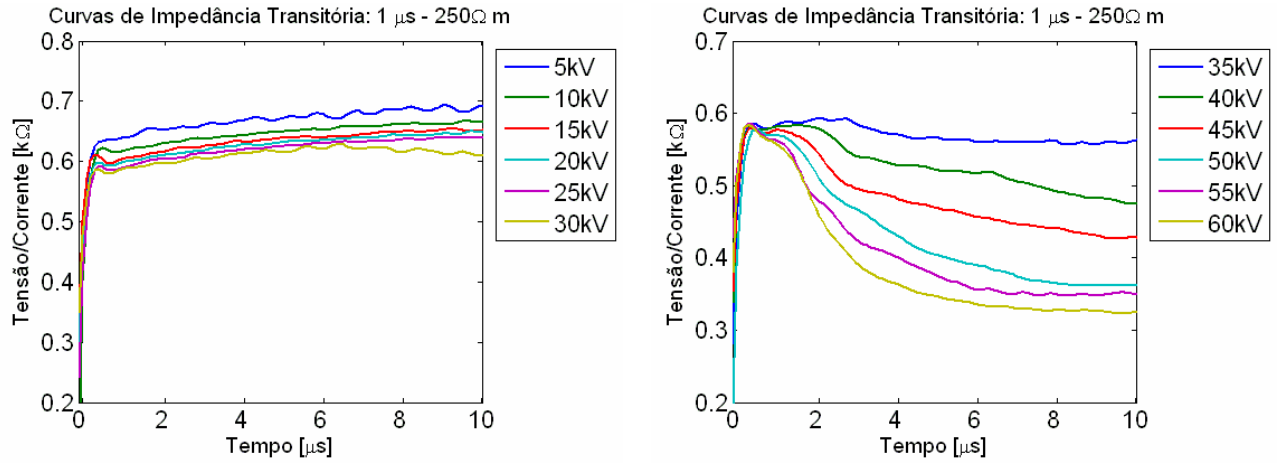


Figura 5.29 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=250 \Omega.m$ .

- **Tempo de Frente: 3  $\mu$ s**

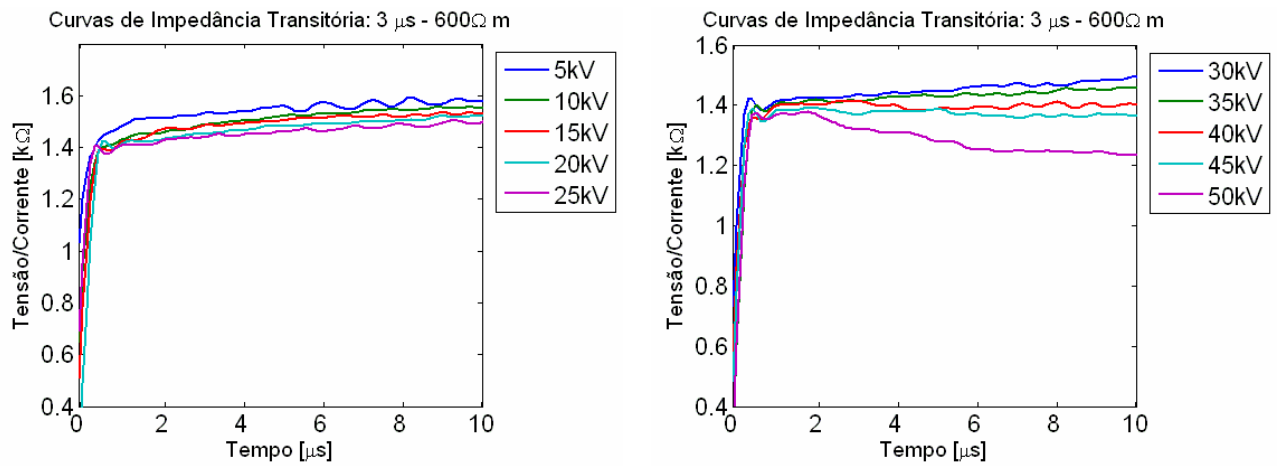


Figura 5.30 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=600 \Omega.m$ .

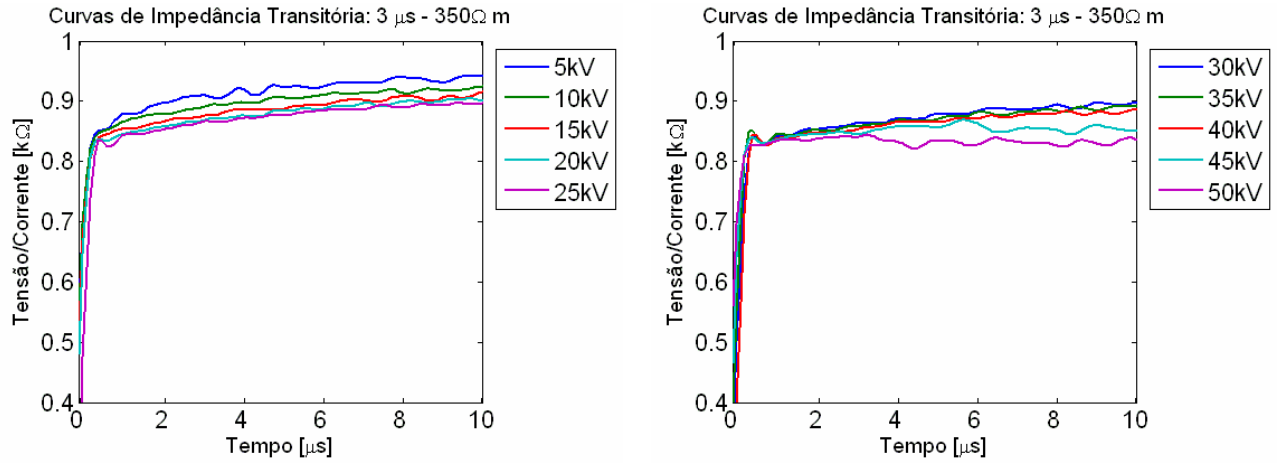


Figura 5.31 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=350 \Omega$ .m.

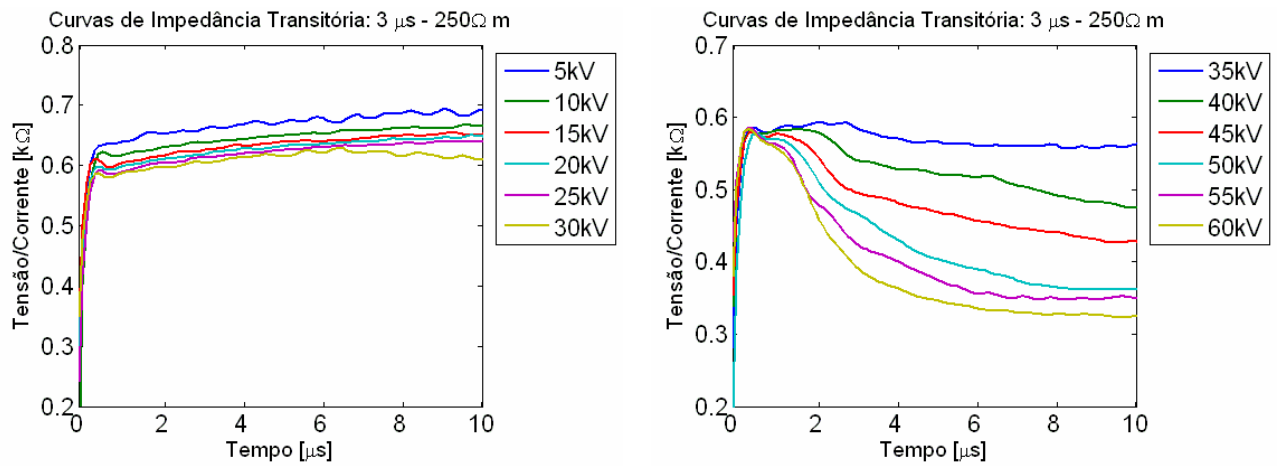


Figura 5.32 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=250 \Omega$ .m.

2. Solo II

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

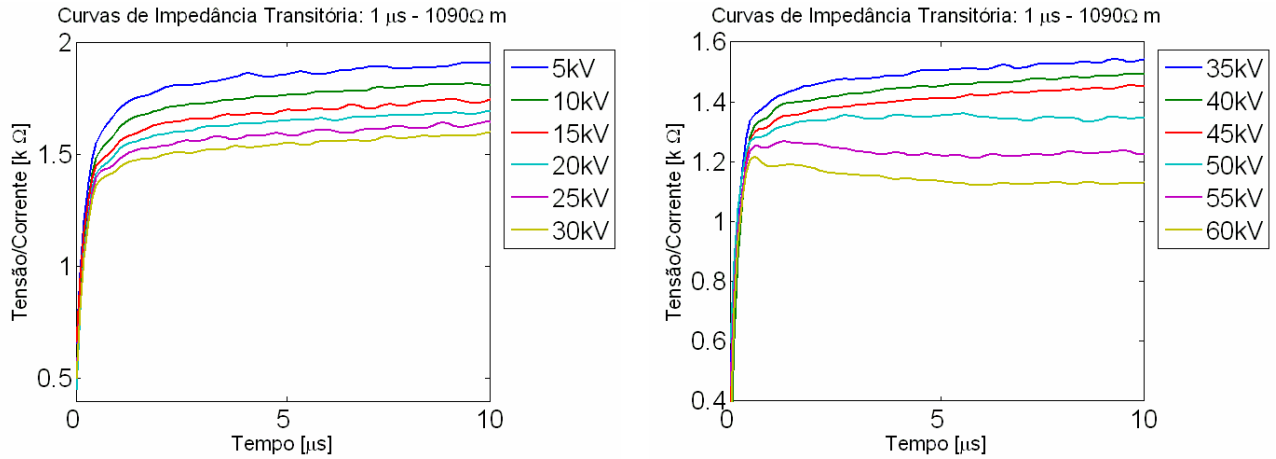


Figura 5.33 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=1090 \Omega$ .m.

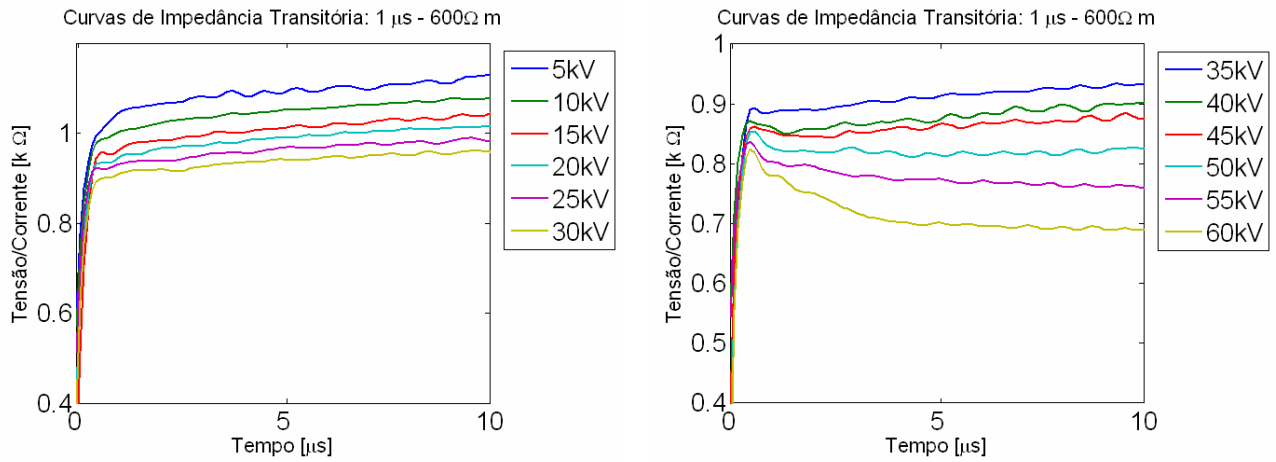


Figura 5.34 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=600 \Omega$ .m.

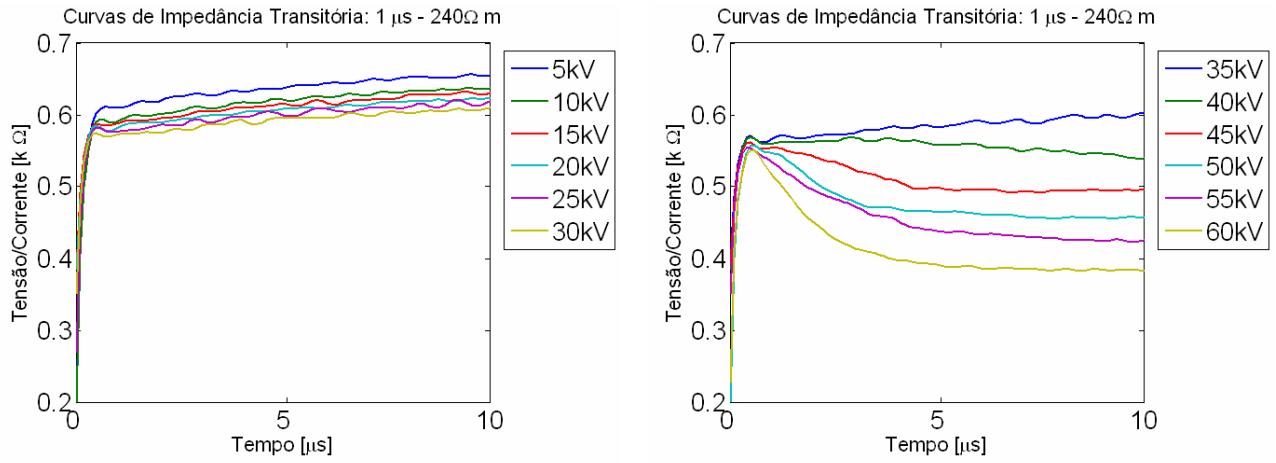


Figura 5.35 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=240 \Omega.m$ .

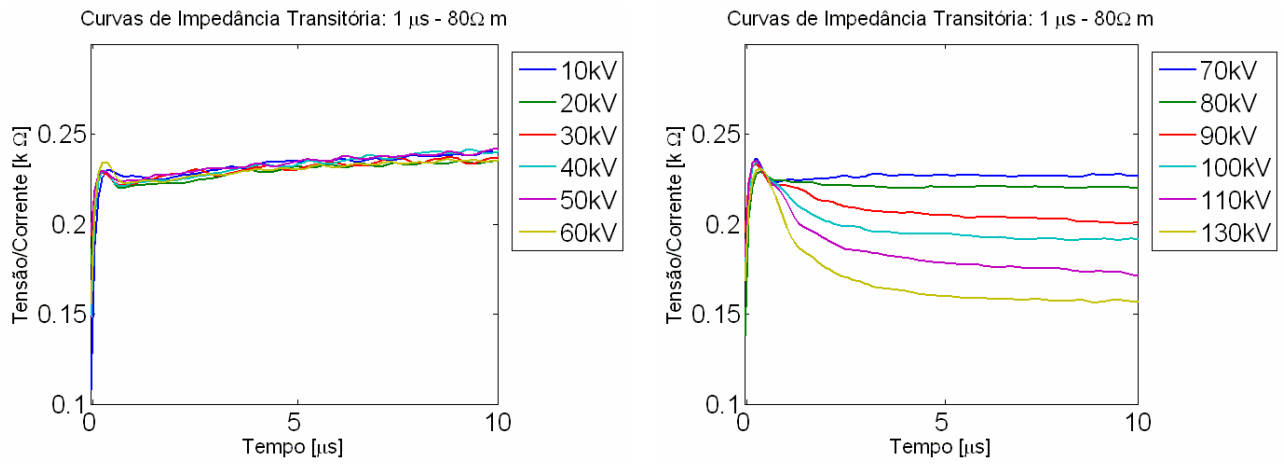


Figura 5.36 – Ondas de impedância transitória –  $\rho=80 \Omega.m$ .

- Tempo de Frente: 3  $\mu$ s

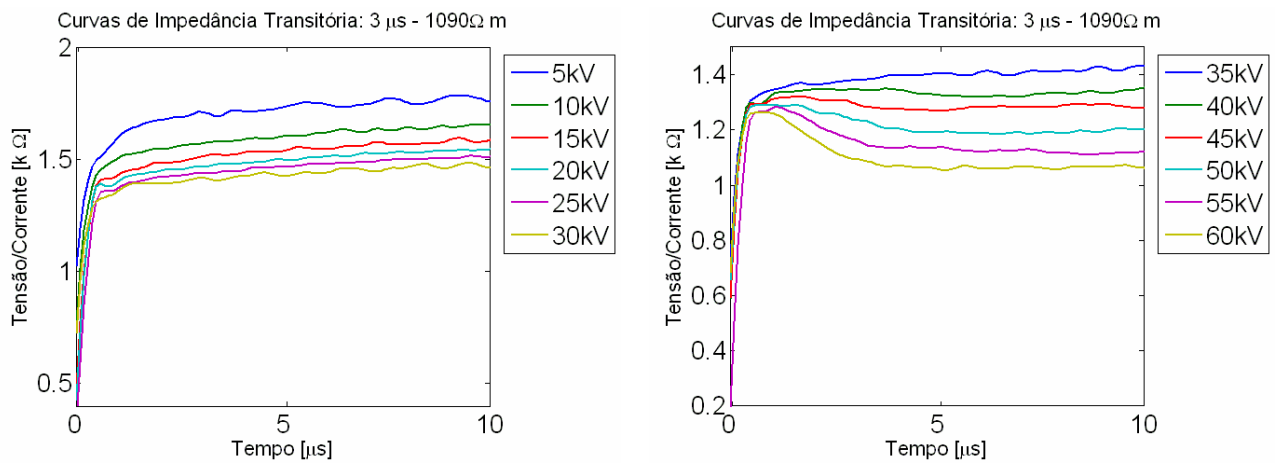


Figura 5.37 – Ondas de impedância transitória –  $\rho=1090 \Omega.m$ .

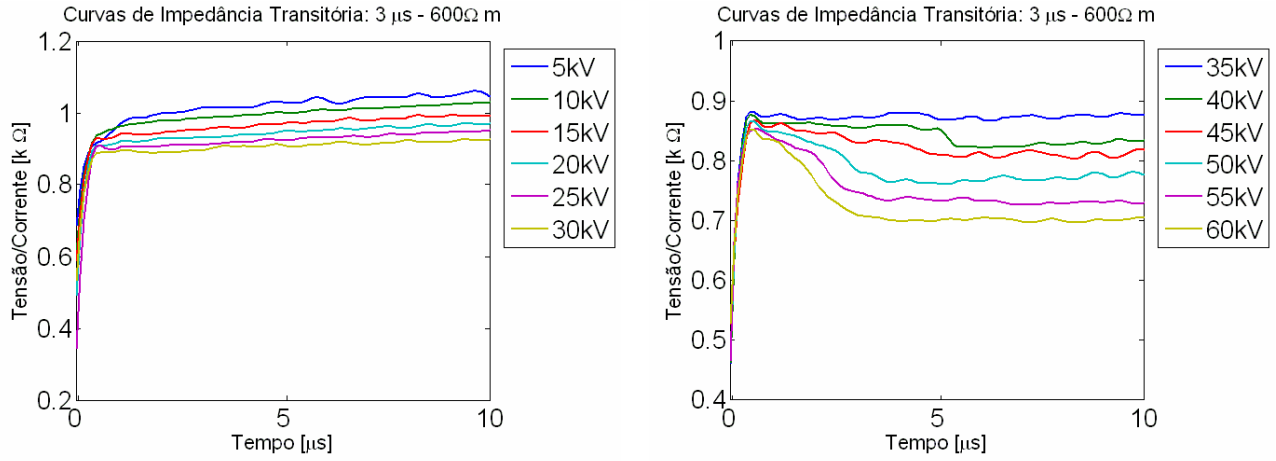


Figura 5.38 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=600 \Omega$ .m.

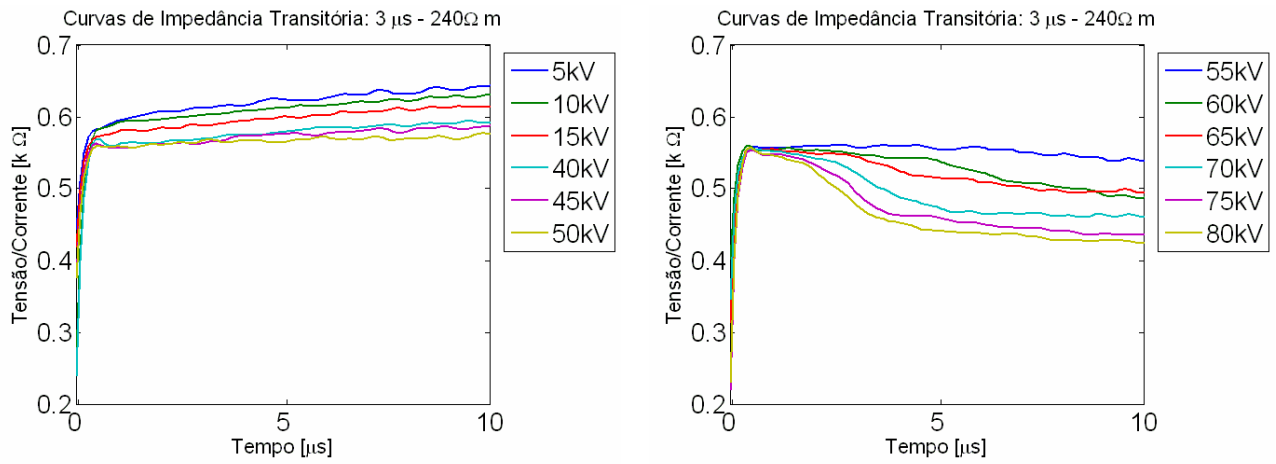


Figura 5.39 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=240 \Omega$ .m.

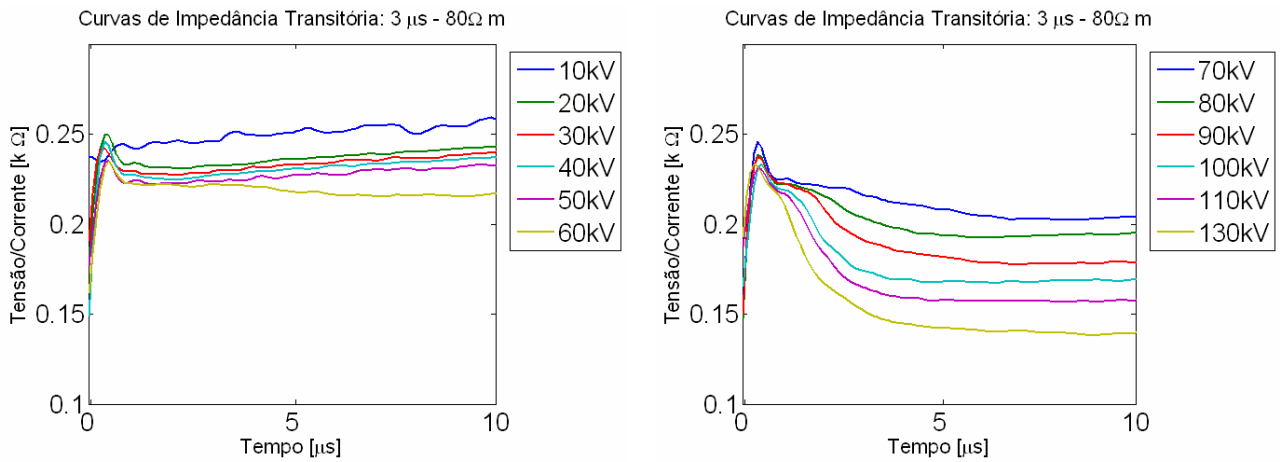


Figura 5.40 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=80 \Omega$ .m.

3. Solo III

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

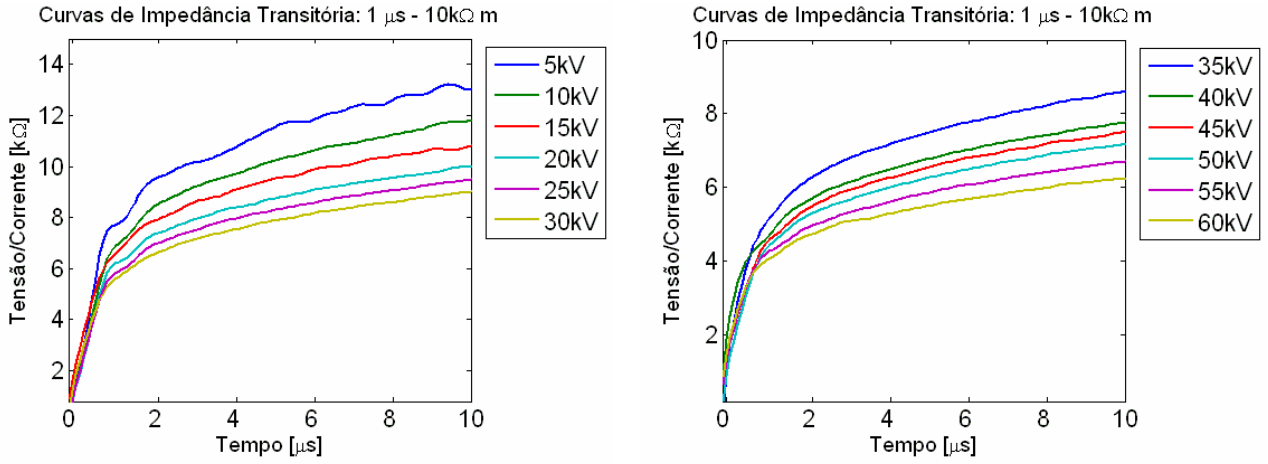


Figura 5.41 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

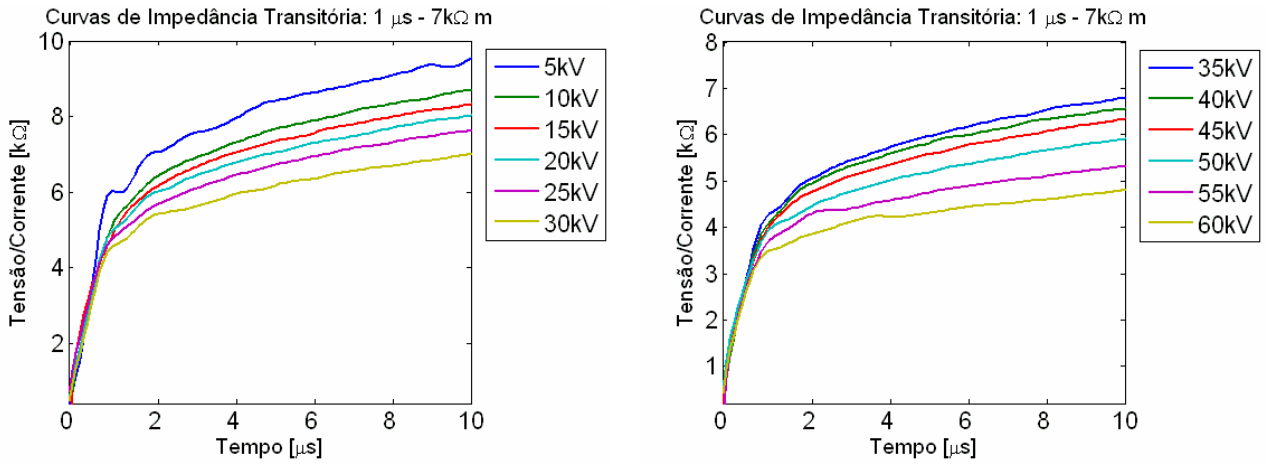


Figura 5.42 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=7$  k $\Omega$ .m.

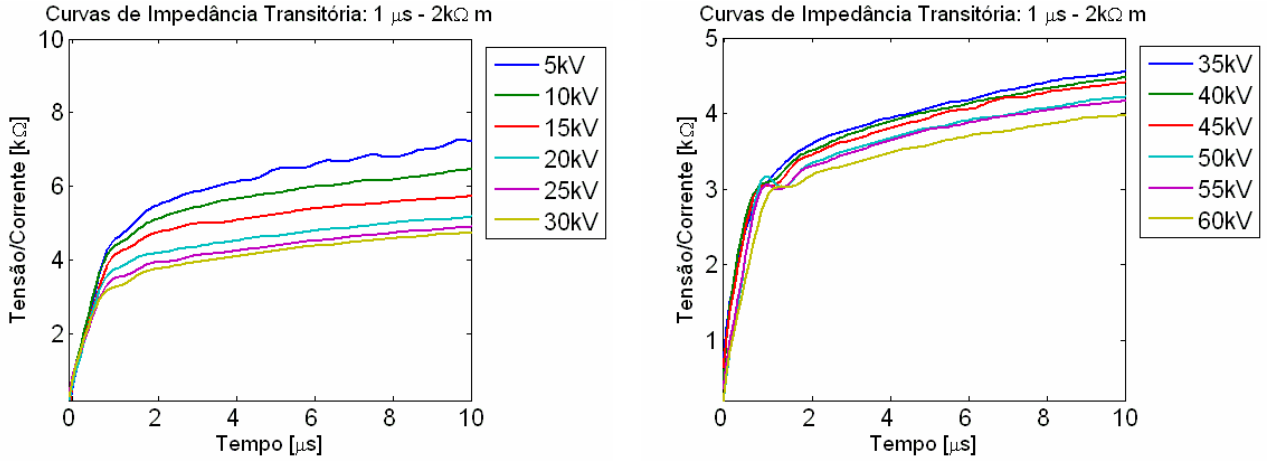


Figura 5.43 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=2$  k $\Omega$ .m.

- Tempo de Frente: 3  $\mu$ s

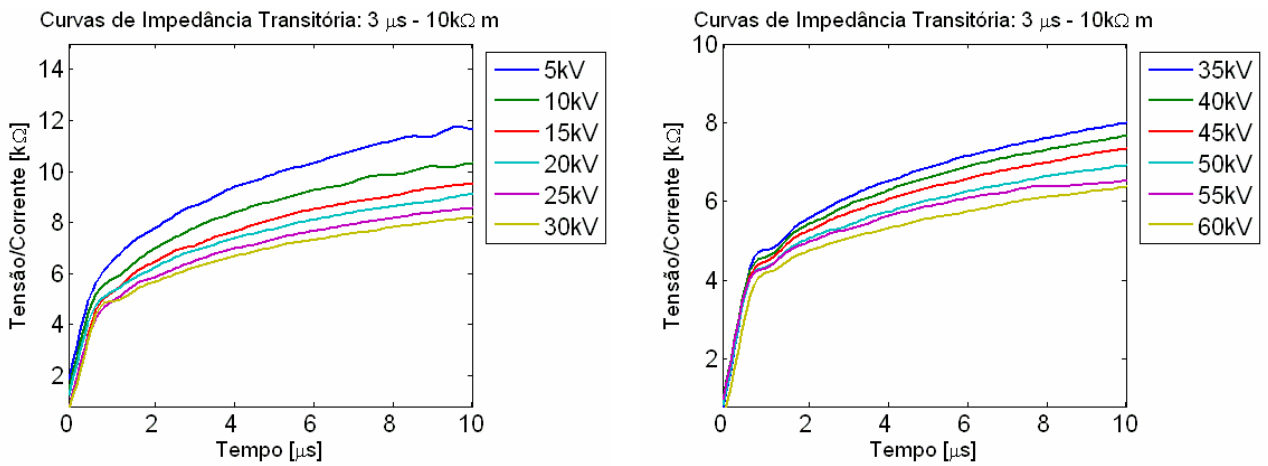


Figura 5.44 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

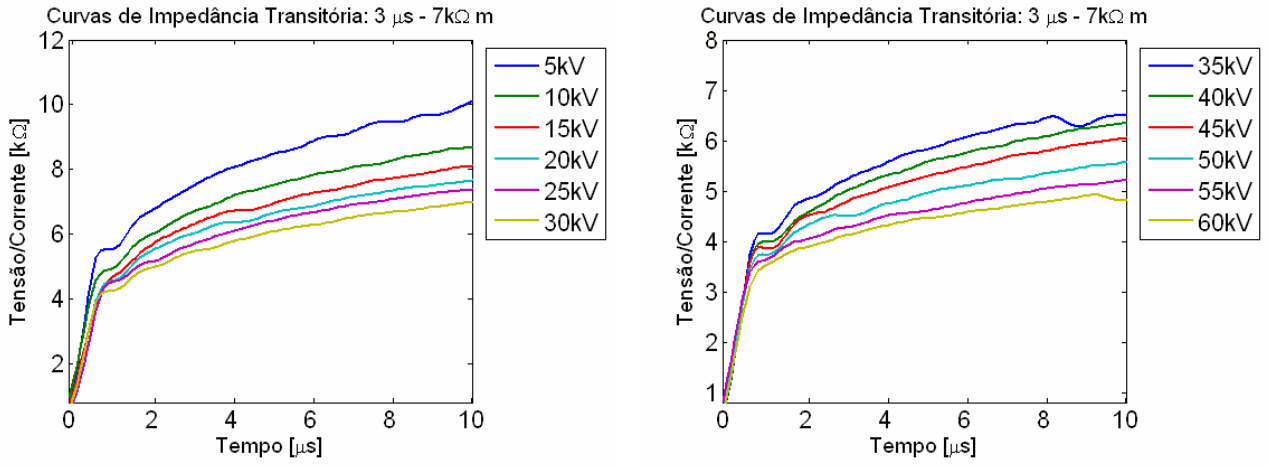


Figura 5.45 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=7$  k $\Omega$ .m.

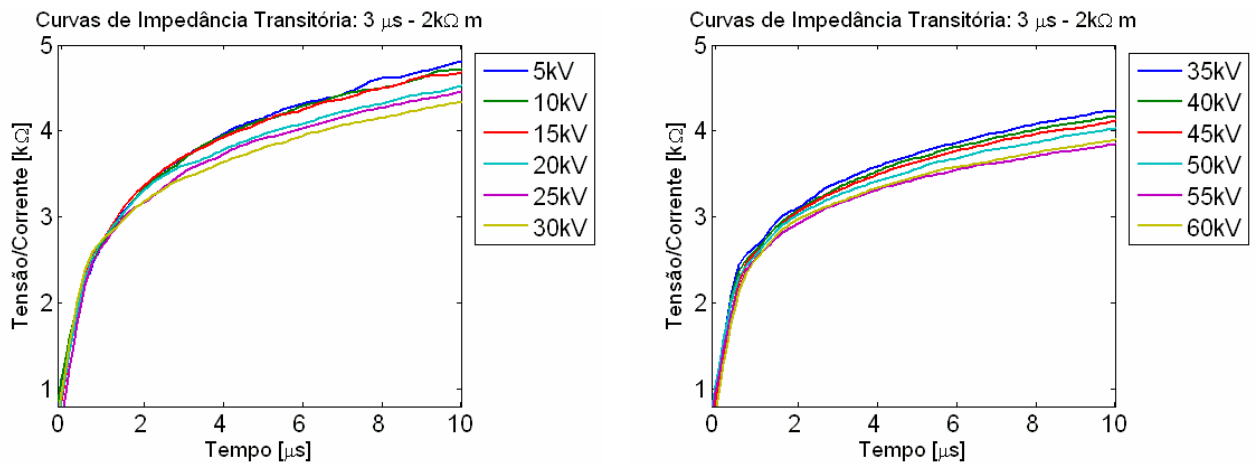


Figura 5.46 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=2$  k $\Omega$ .m.

4. Solo IV

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

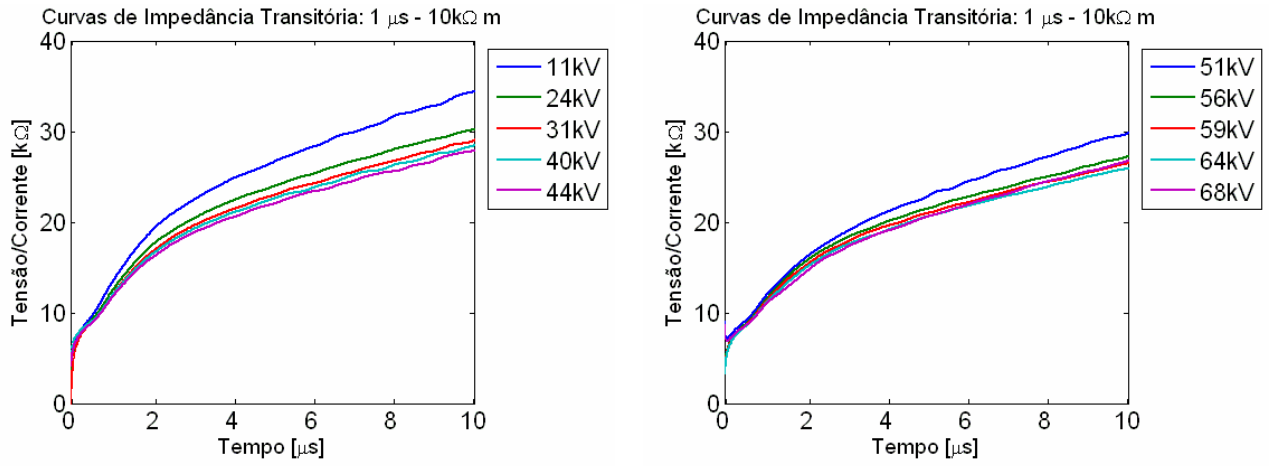


Figura 5.47 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

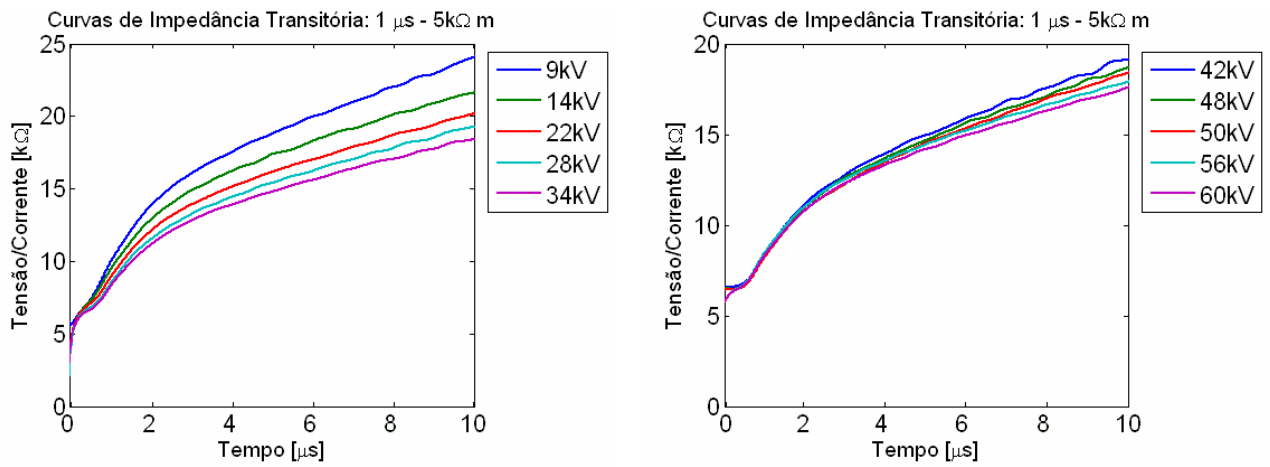


Figura 5.48 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=5$  k $\Omega$ .m.

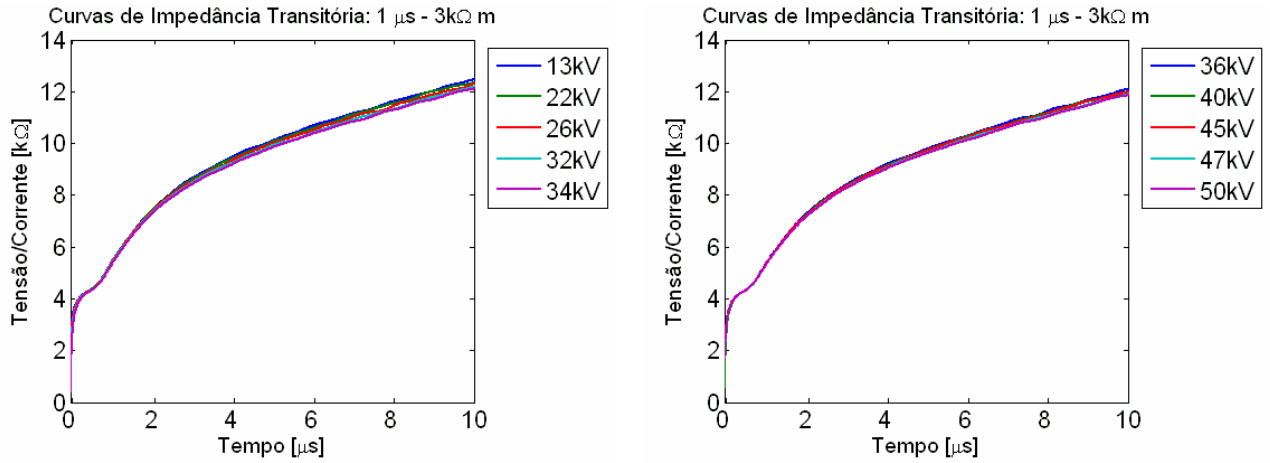


Figura 5.49 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=3$  k $\Omega$ .m.

- Tempo de Frente: 3  $\mu$ s

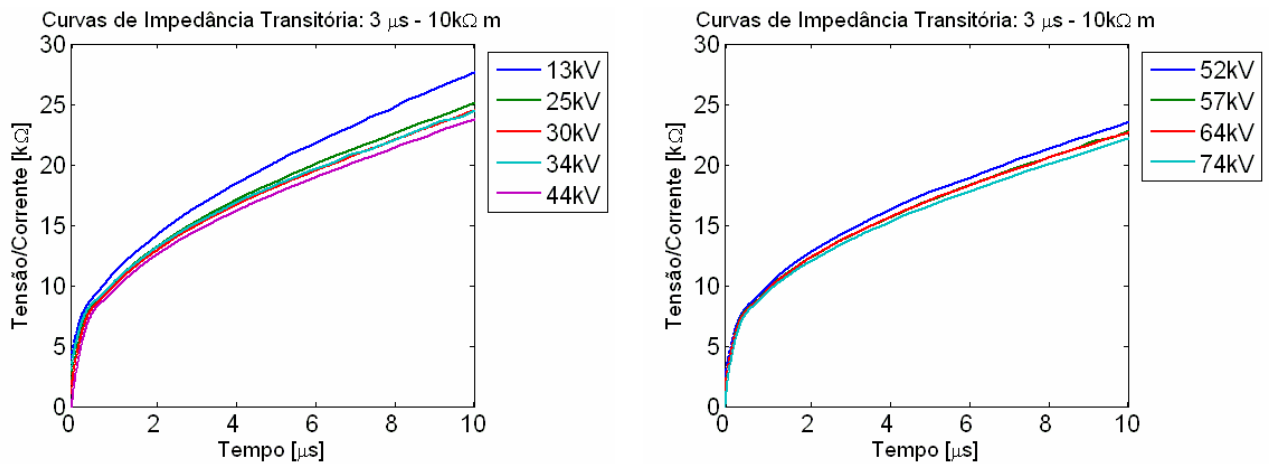


Figura 5.50 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

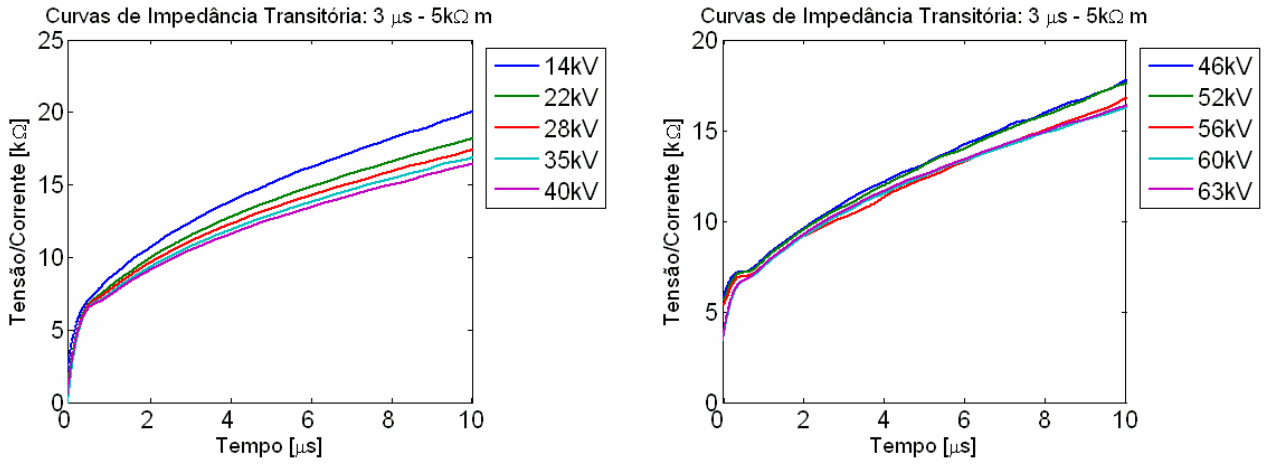


Figura 5.51 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=5$  k $\Omega$ .m.

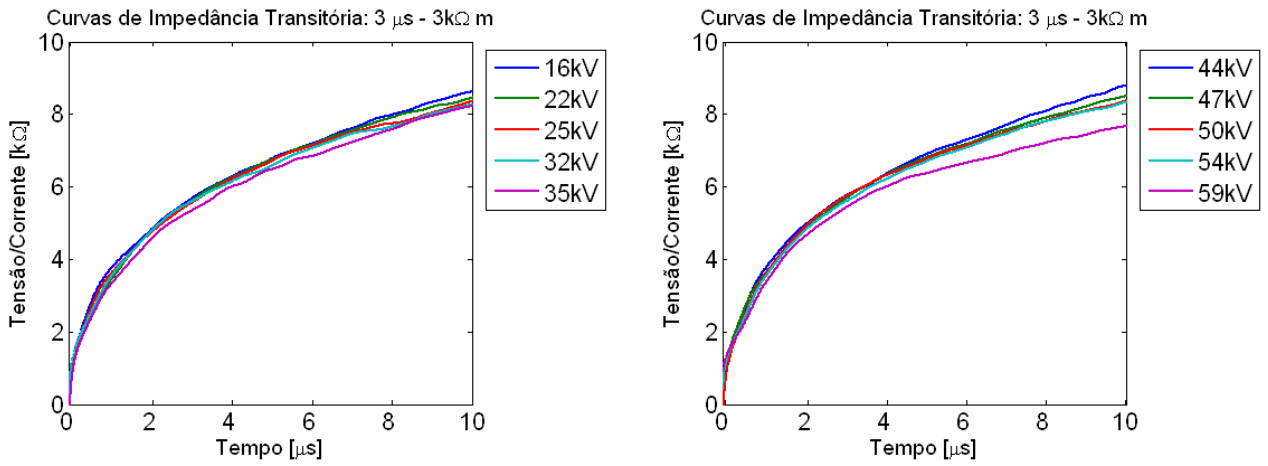


Figura 5.52 – Curvas de impedância transitória –  $\rho=3$  k $\Omega$ .m.

### 5.2.3 Curvas de Tensão versus Corrente (VxI)

A seguir, são apresentados gráficos com as designadas curvas  $V(t) \times I(t)$ . Estas correspondem à plotagem dos valores instantâneos da tensão em função da variação da corrente no tempo, correspondentes aos resultados apresentados nas figuras 5.1 a 5.26.

#### 1. Solo I

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ seg

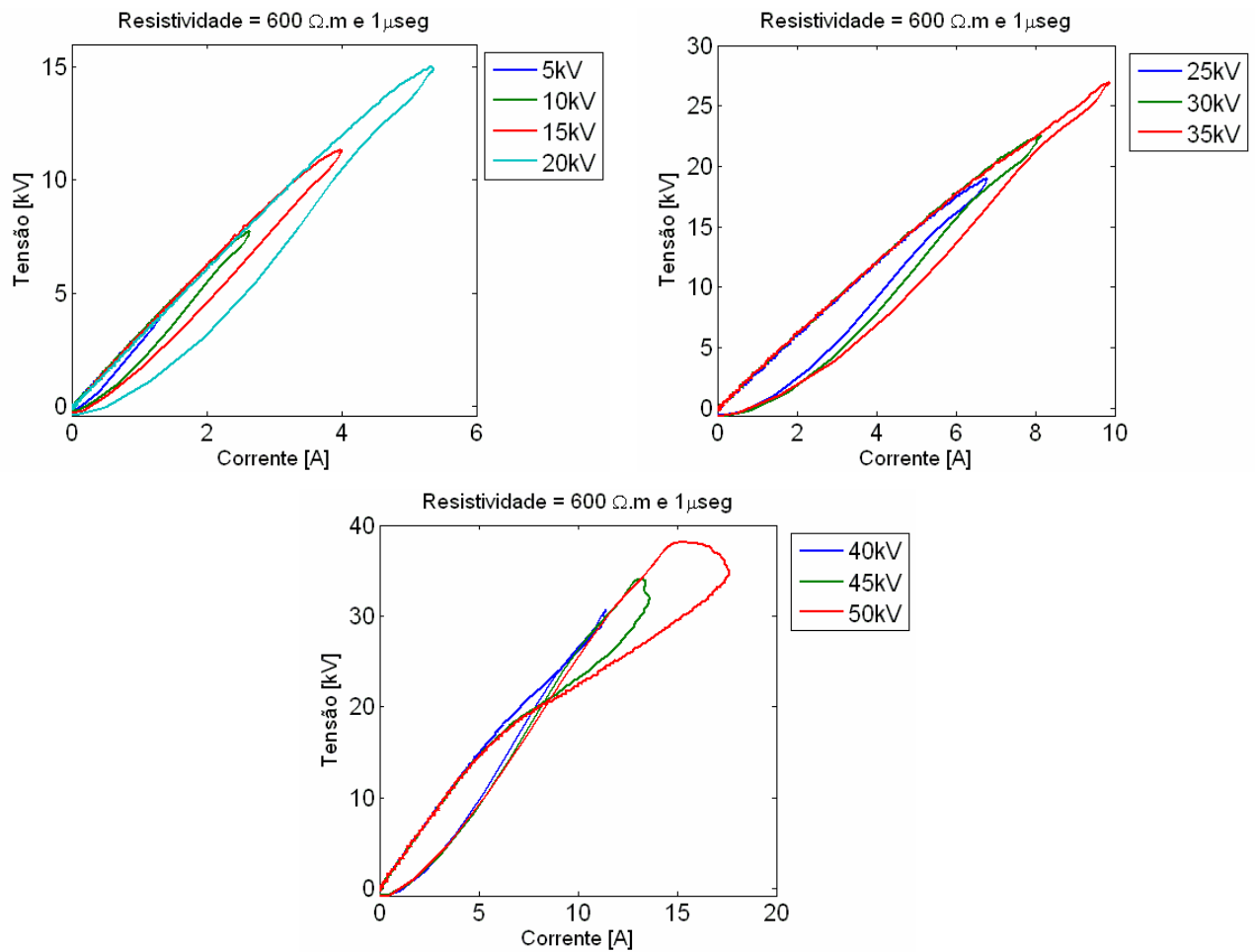


Figura 5.53 – Curvas VxI –  $\rho=600 \Omega$ .m.

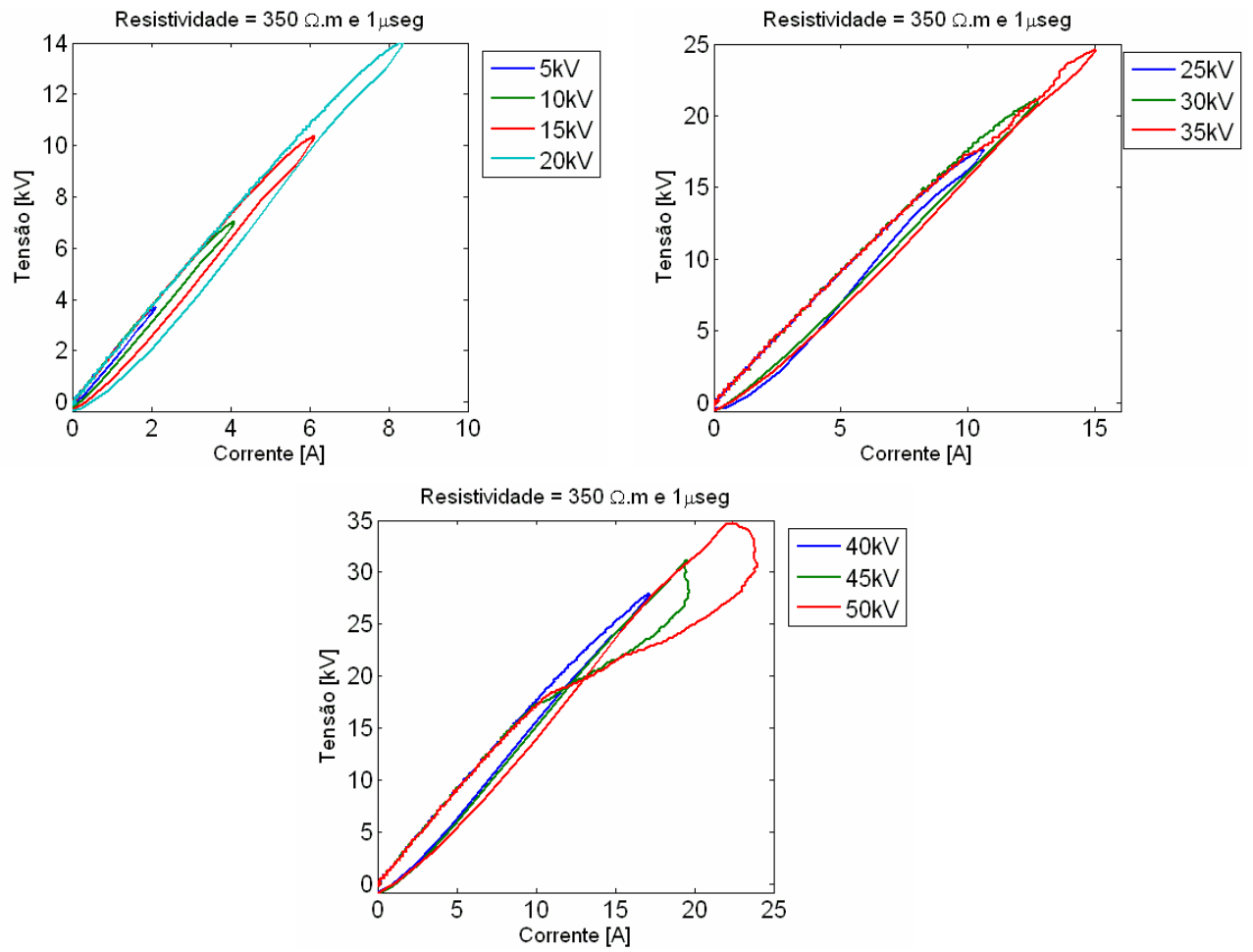


Figura 5.54 – Curvas VxI –  $\rho=350 \Omega.m$ .

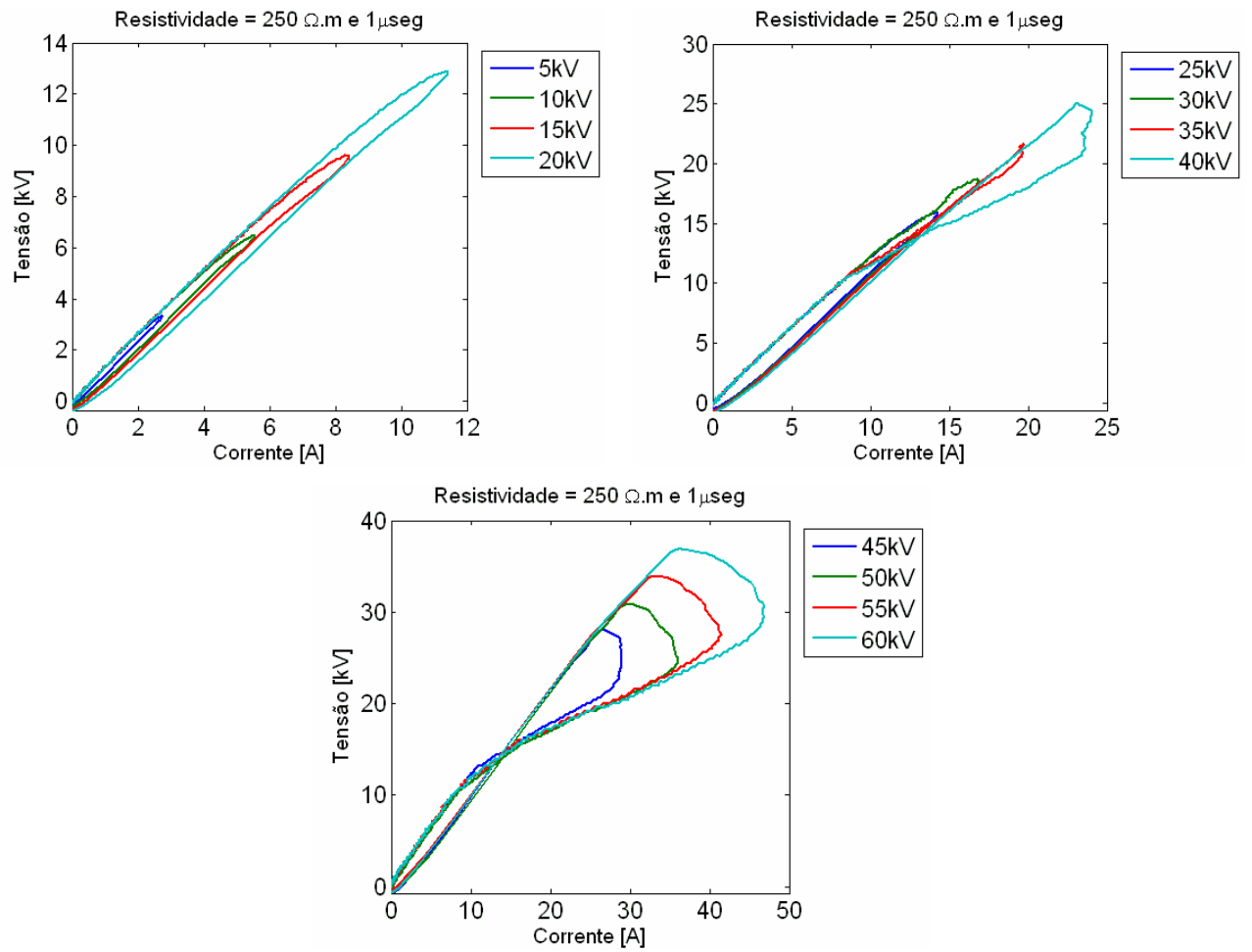


Figura 5.55 – Curvas VxI –  $\rho=250 \Omega.m$ .

- Tempo de Frente: 3  $\mu$ s

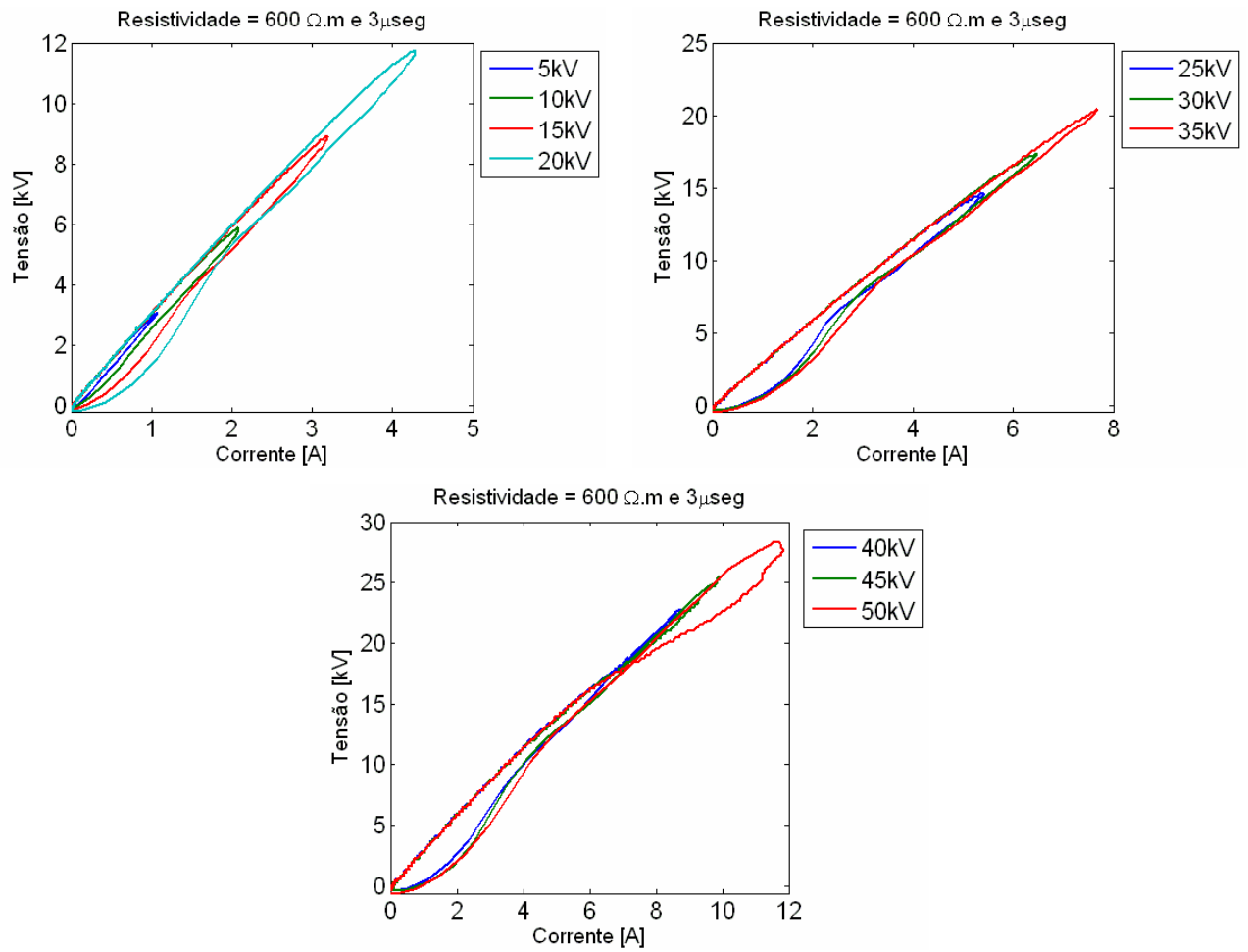


Figura 5.56 – Curvas VxI –  $\rho=600 \Omega$ .m.

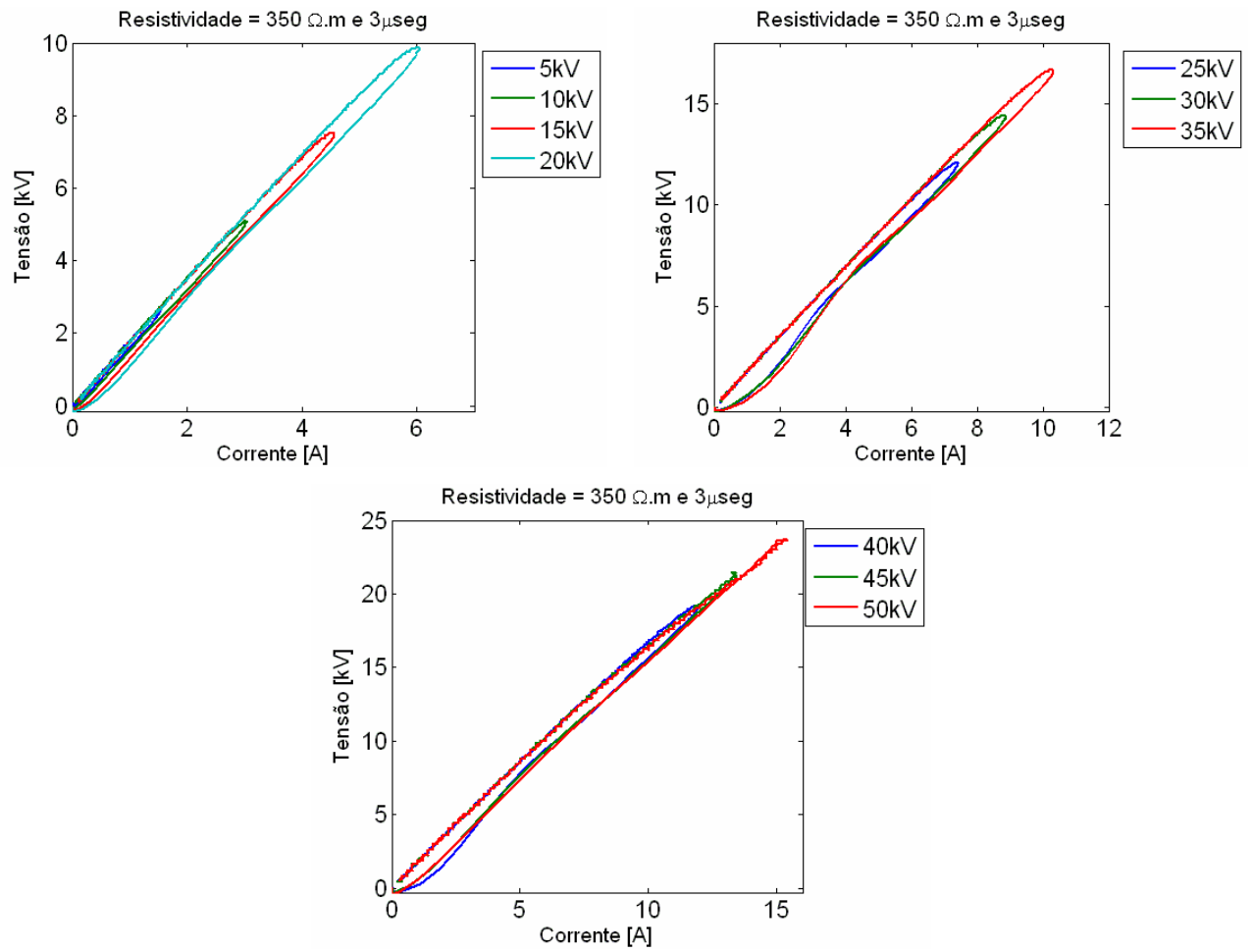


Figura 5.57 – Curvas VxI –  $\rho=350 \Omega.m$ .

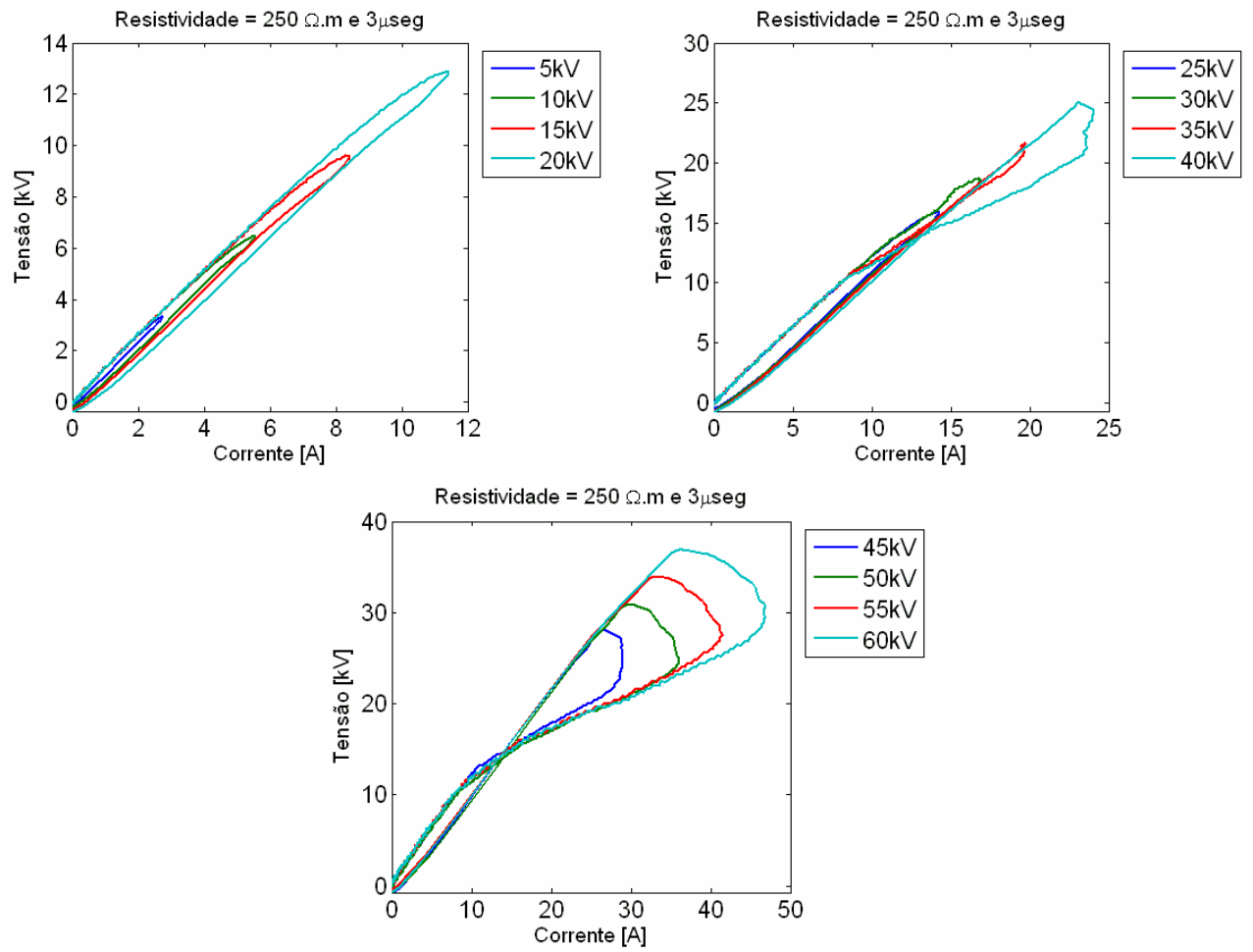


Figura 5.58 – Curvas VxI –  $\rho=250 \Omega.m$ .

2. Solo II

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

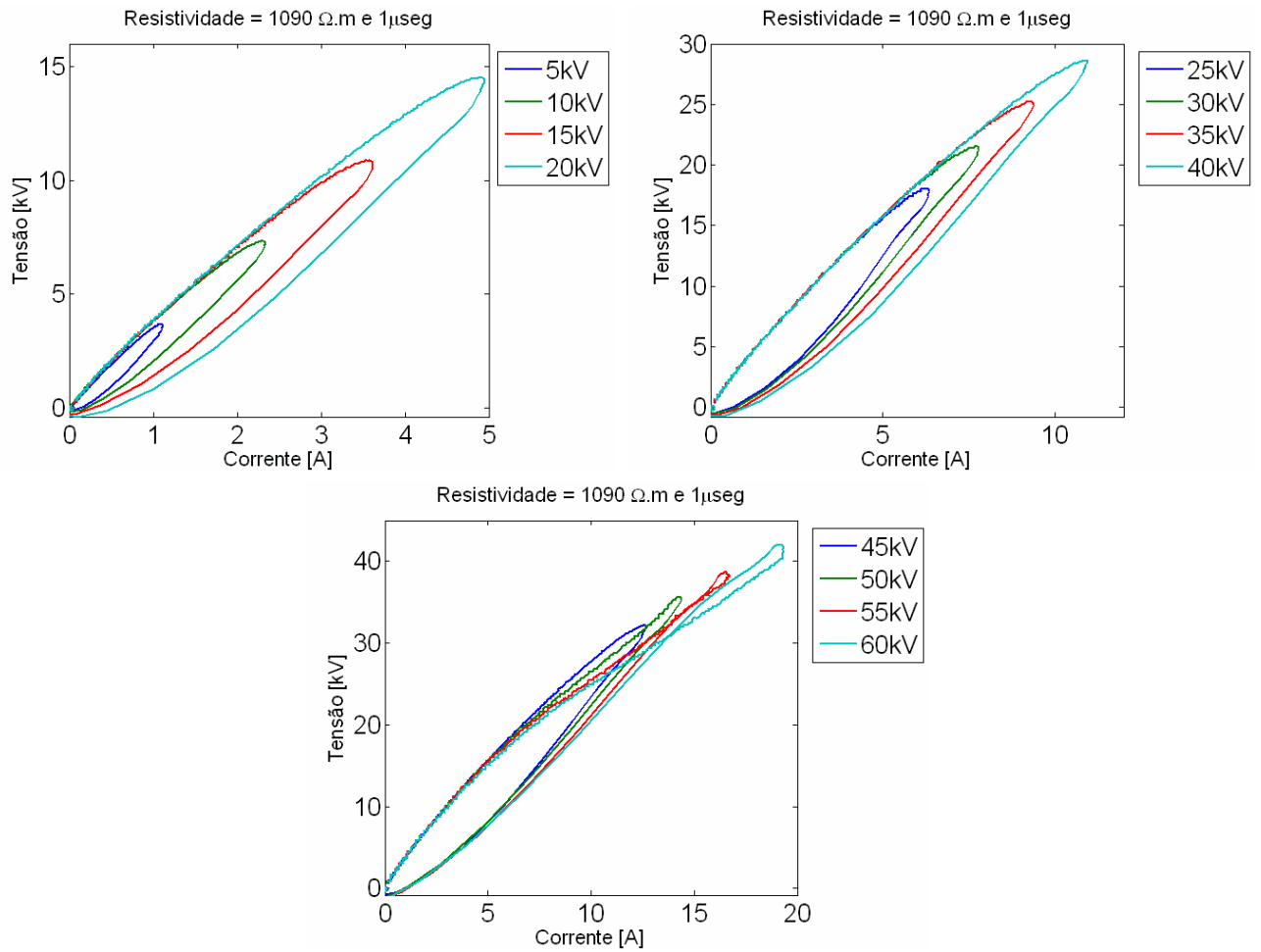
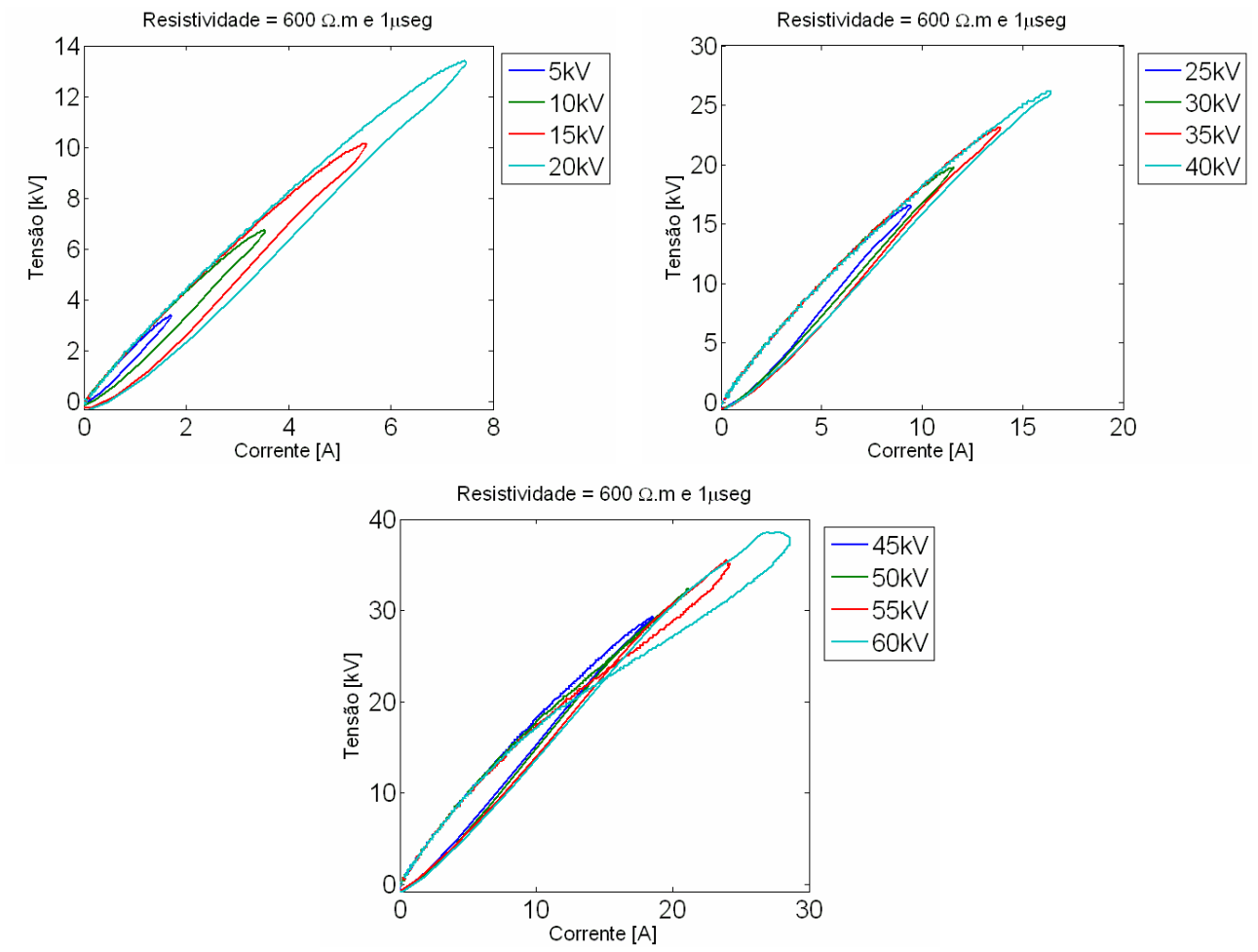


Figura 5.59 – Curvas VxI –  $\rho=1090 \Omega$ .m.



**Figura 5.60 - Curvas VxI –  $\rho=600 \Omega.m$ .**

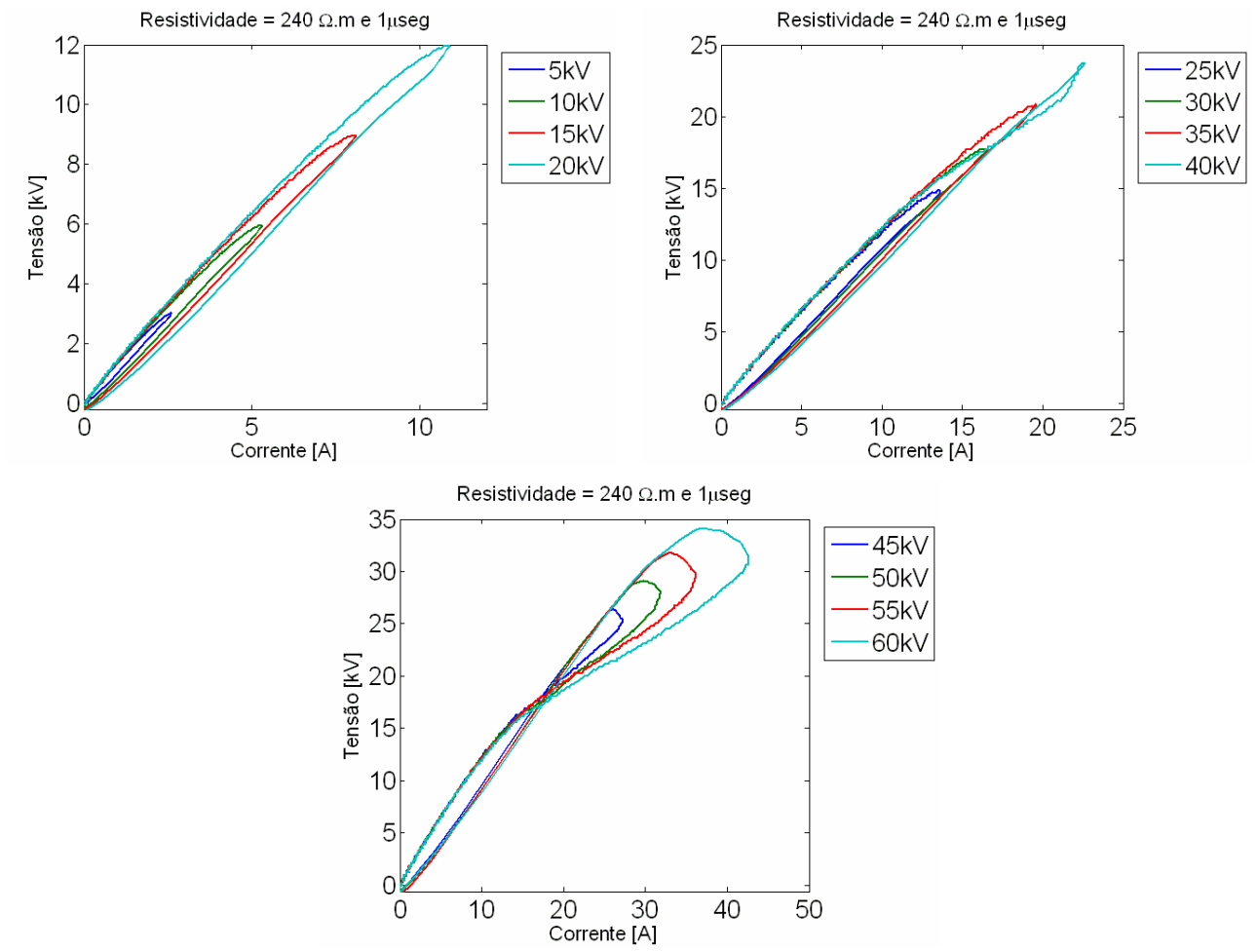
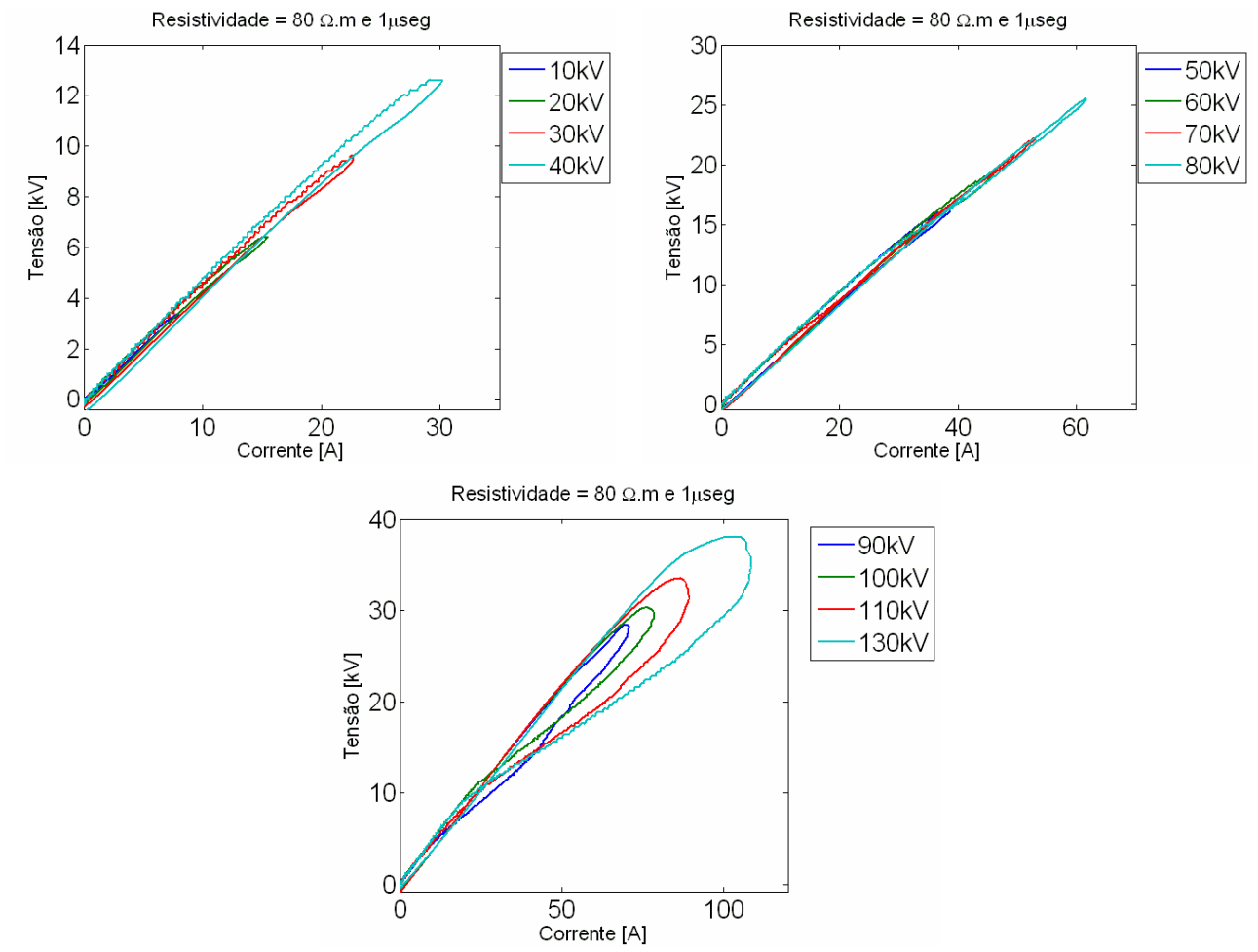
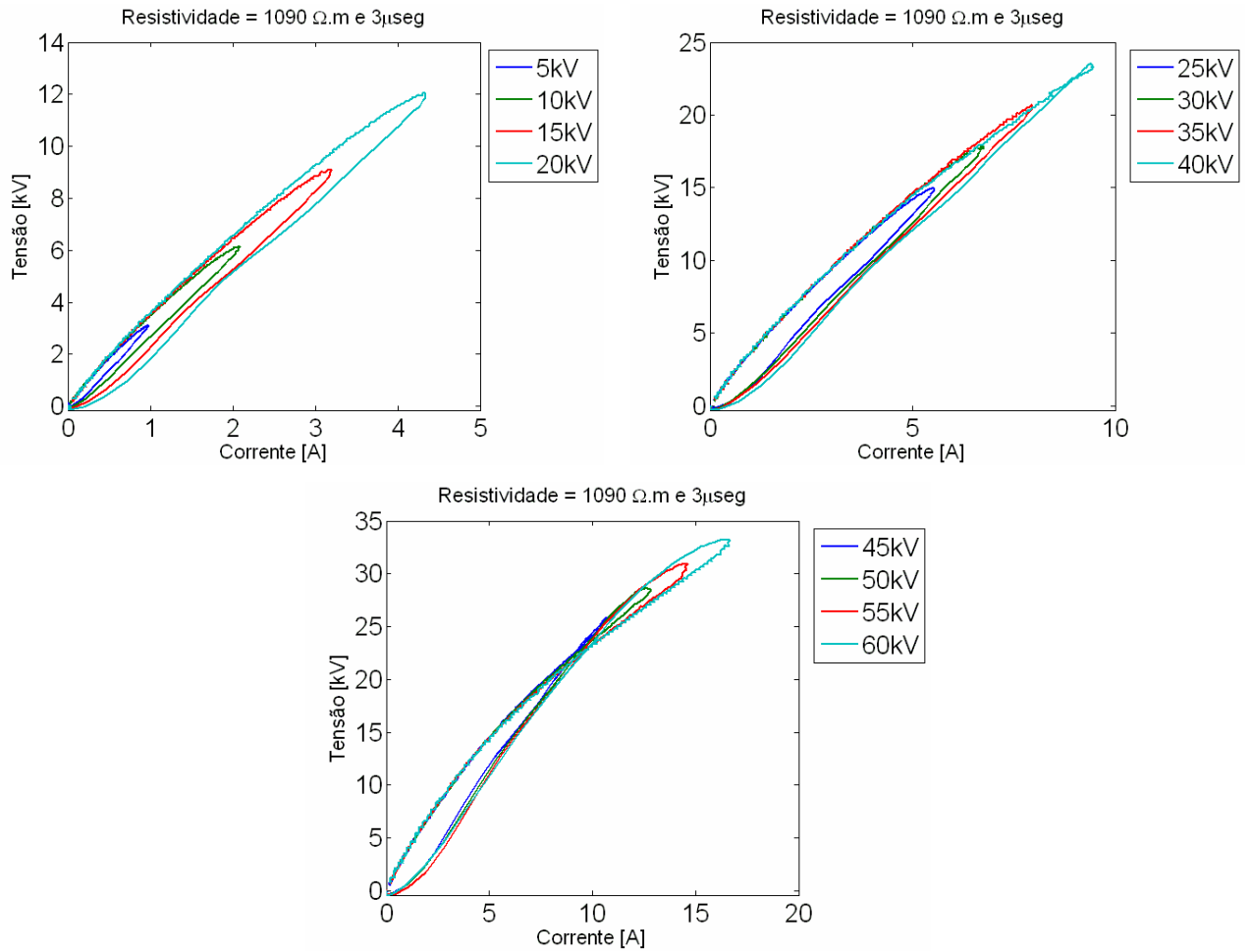


Figura 5.61 - Curvas VxI –  $\rho=240 \Omega.m$ .



**Figura 5.62 – Curvas  $V \times I$  –  $\rho=80 \Omega.m$ .**

- **Tempo de Frente: 3  $\mu$ s**



**Figura 5.63 – Curvas VxI –  $\rho=1090 \Omega$ .m.**

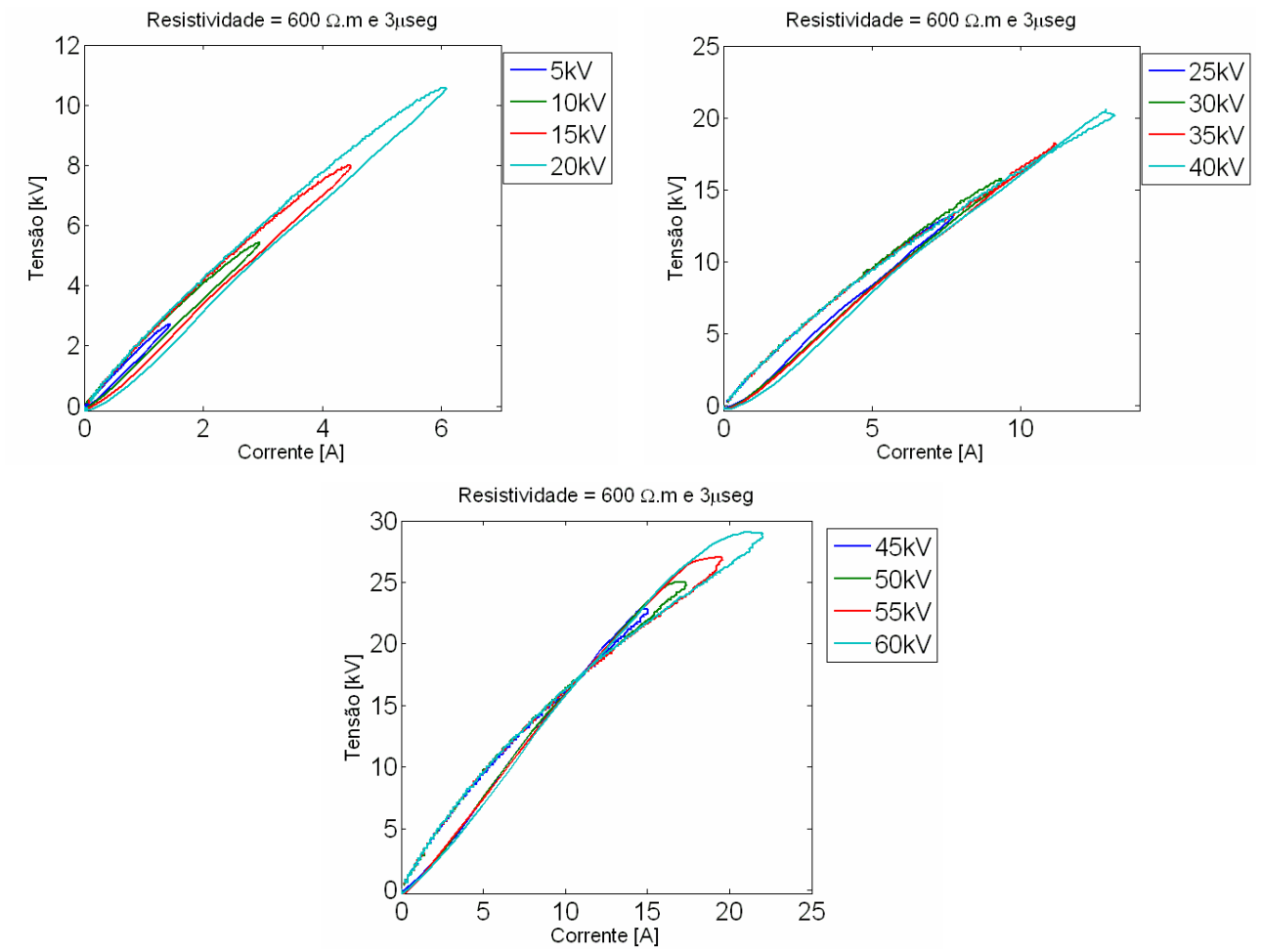


Figura 5.64 – Curvas VxI –  $\rho=600 \Omega.m$ .

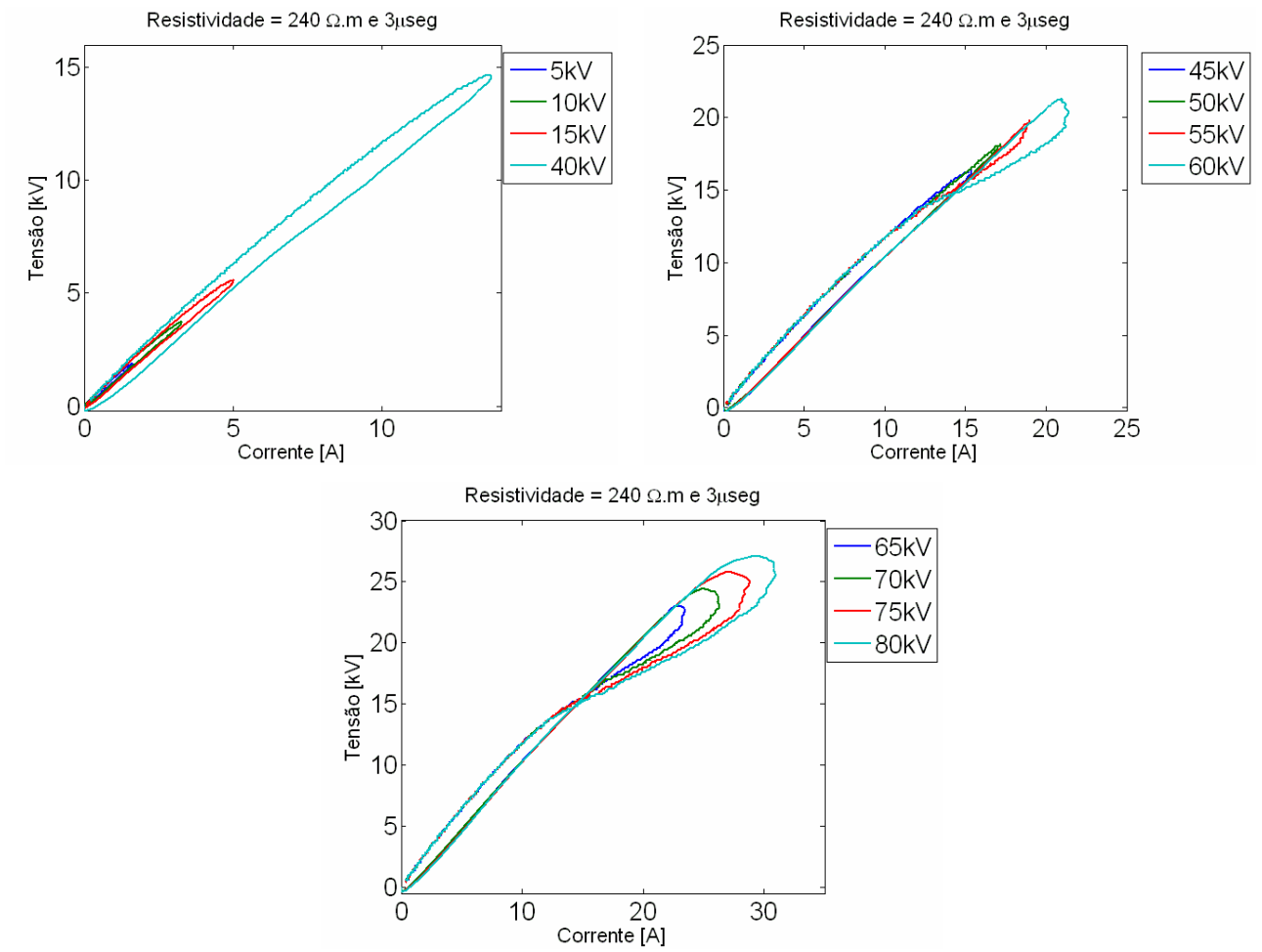
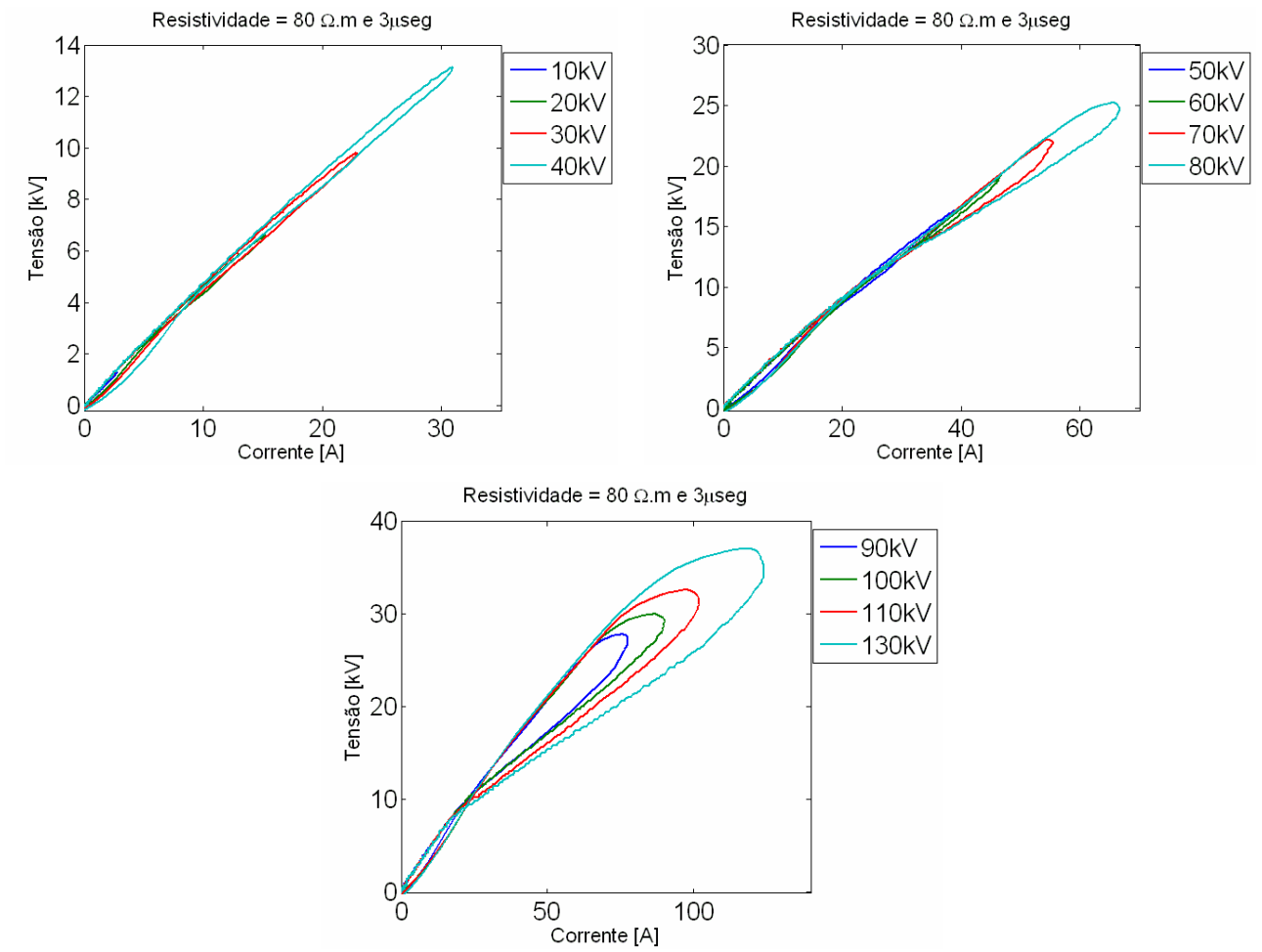


Figura 5.65 – Curvas  $V \times I$  –  $\rho=240 \Omega.m$ .



**Figura 5.66 – Curvas  $V \times I$  –  $\rho=80 \Omega.m$ .**

3. Solo III

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

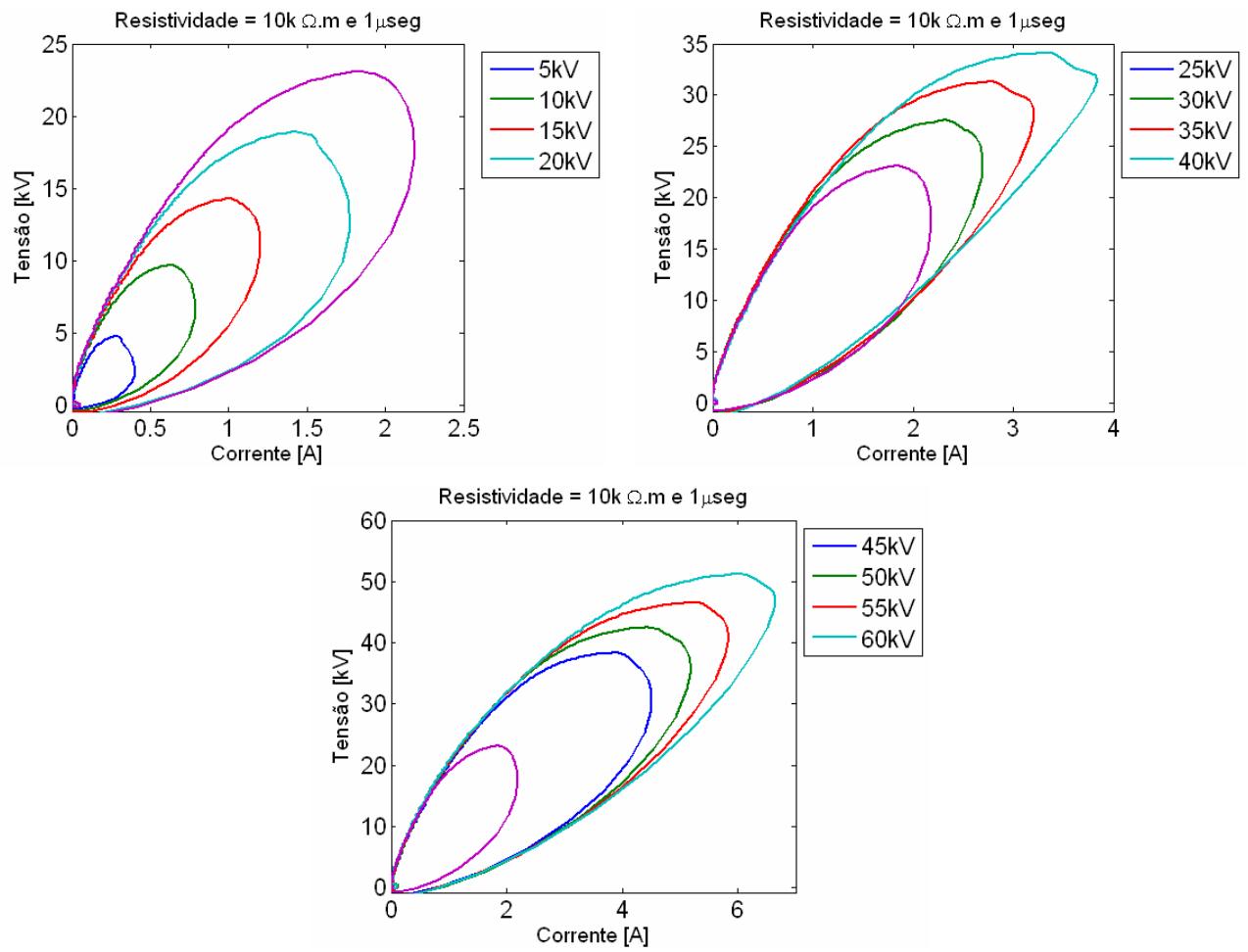


Figura 5.67 – Curvas VxI –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

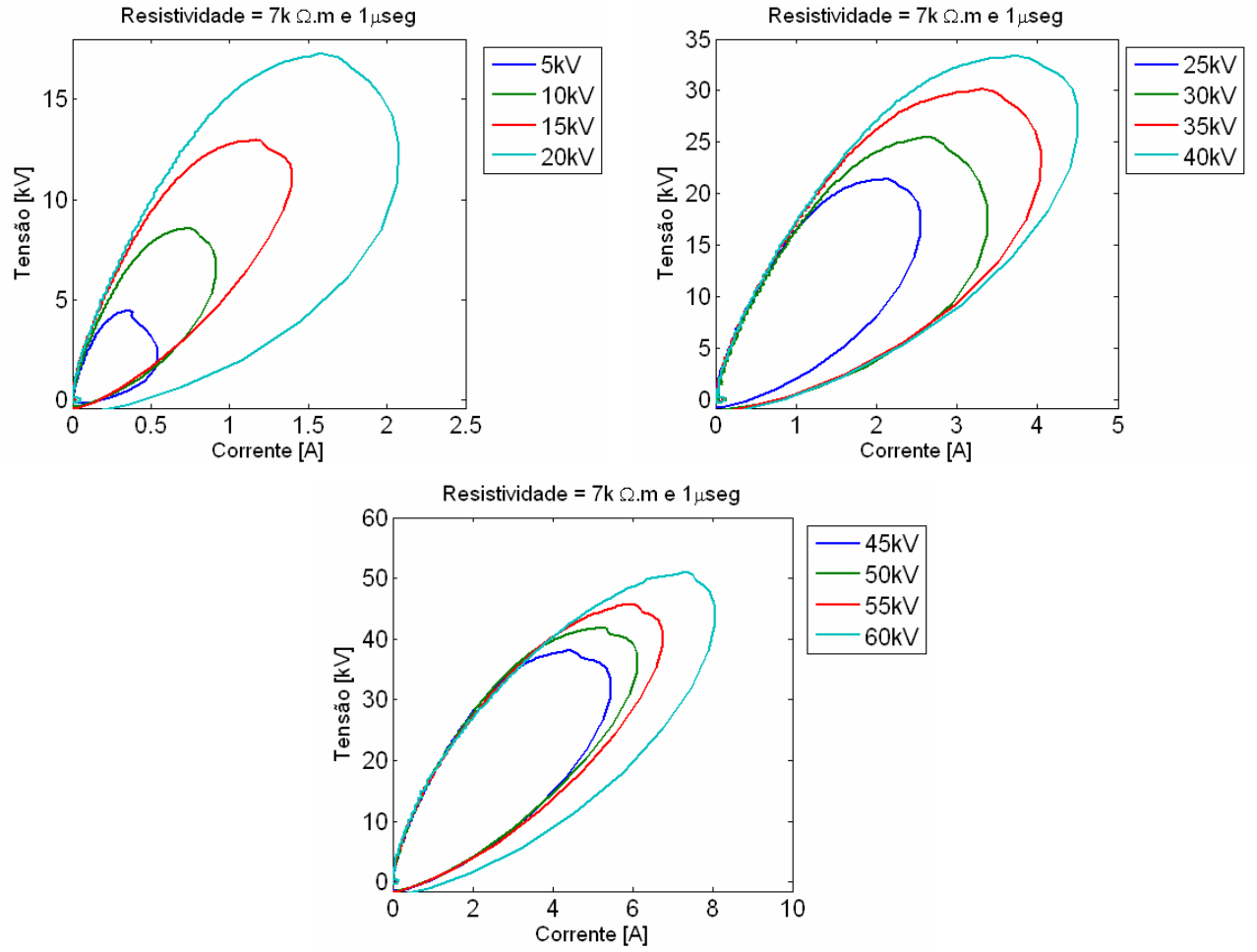


Figura 5.68 – Curvas VxI –  $\rho=7 \text{ k}\Omega.m$ .

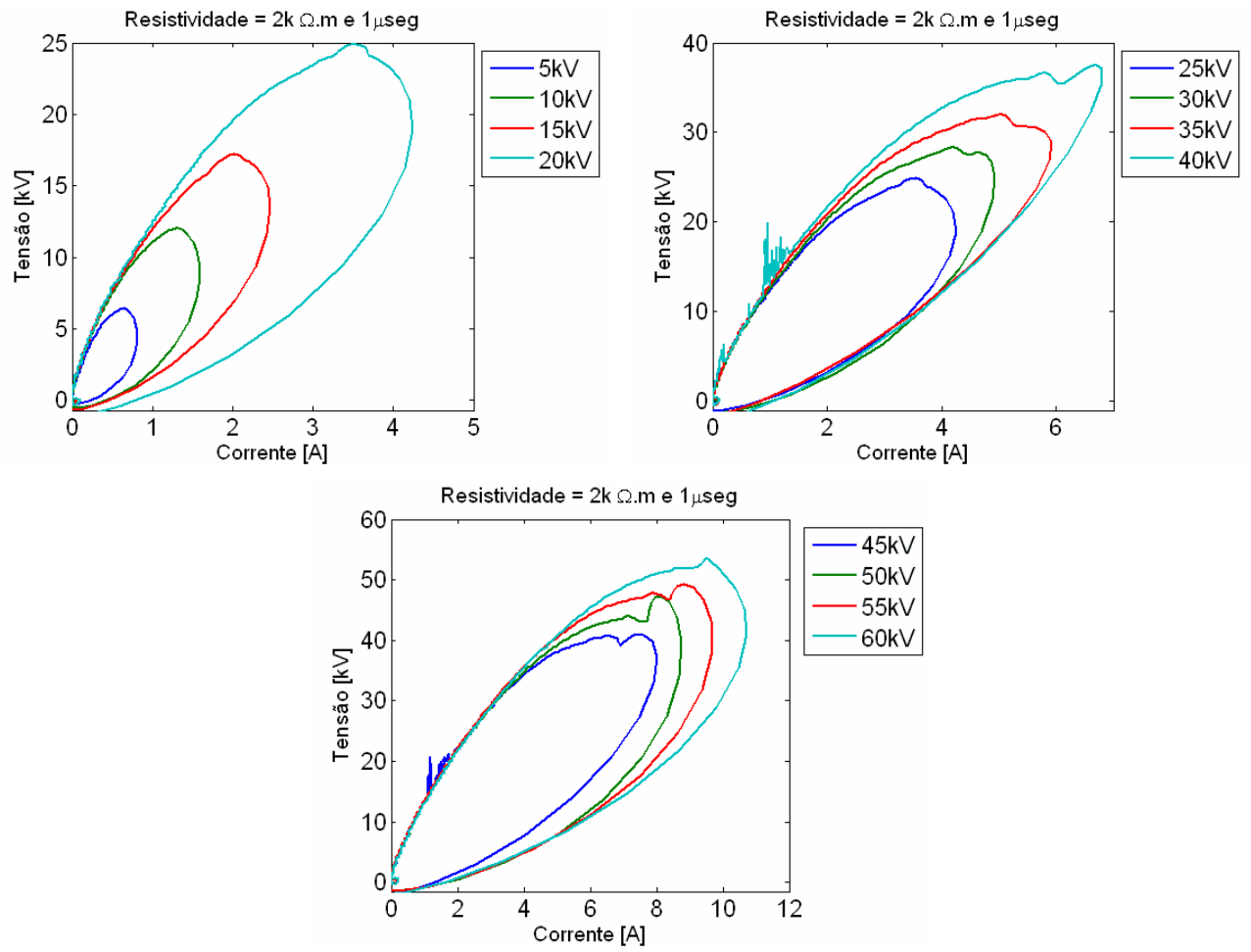
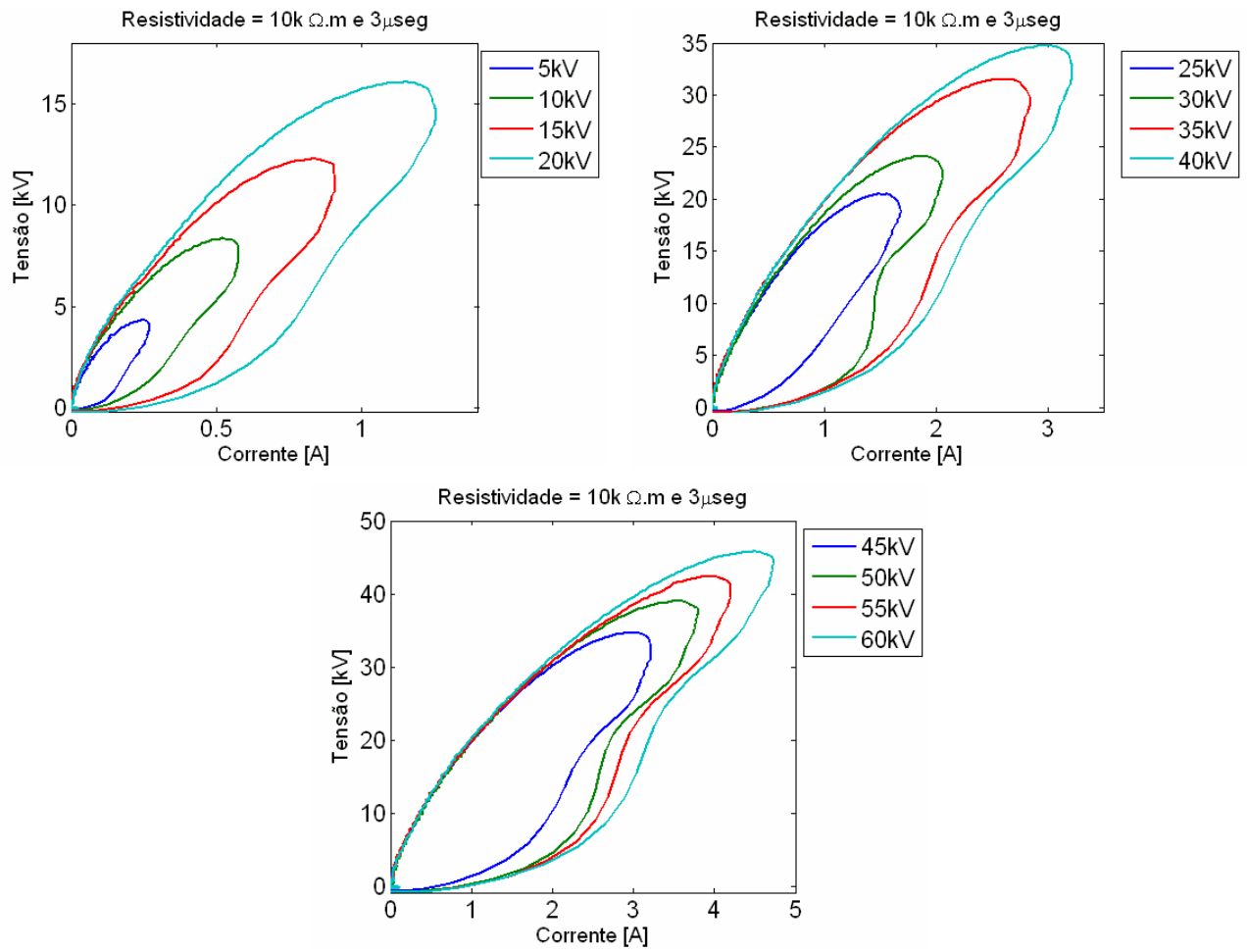


Figura 5.69 – Curvas VxI –  $\rho=2 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ .

- **Tempo de Frente: 3  $\mu$ s**



**Figura 5.70 – Curvas VxI –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.**

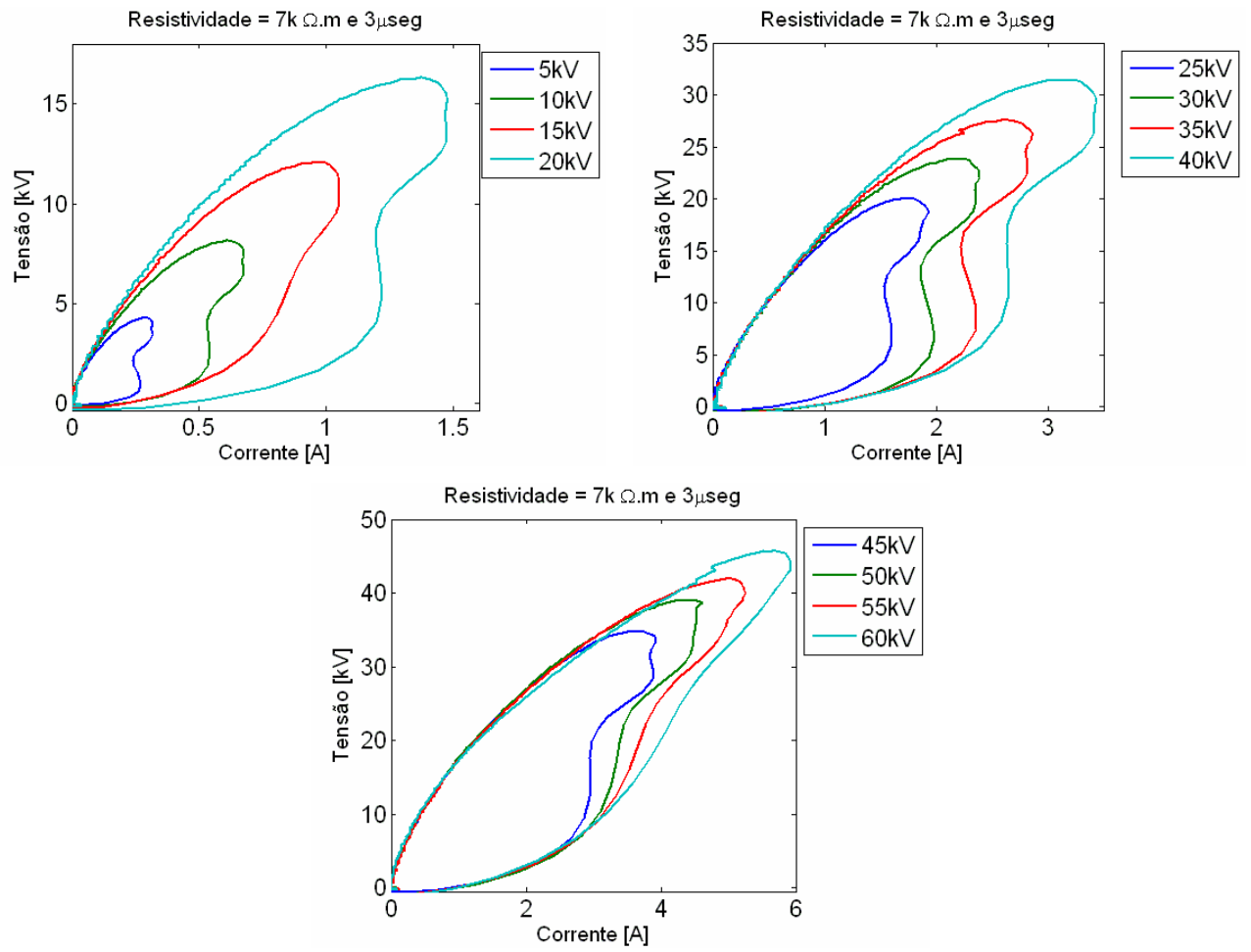


Figura 5.71 – Curvas VxI –  $\rho=7 \text{ k}\Omega.\text{m}$ .

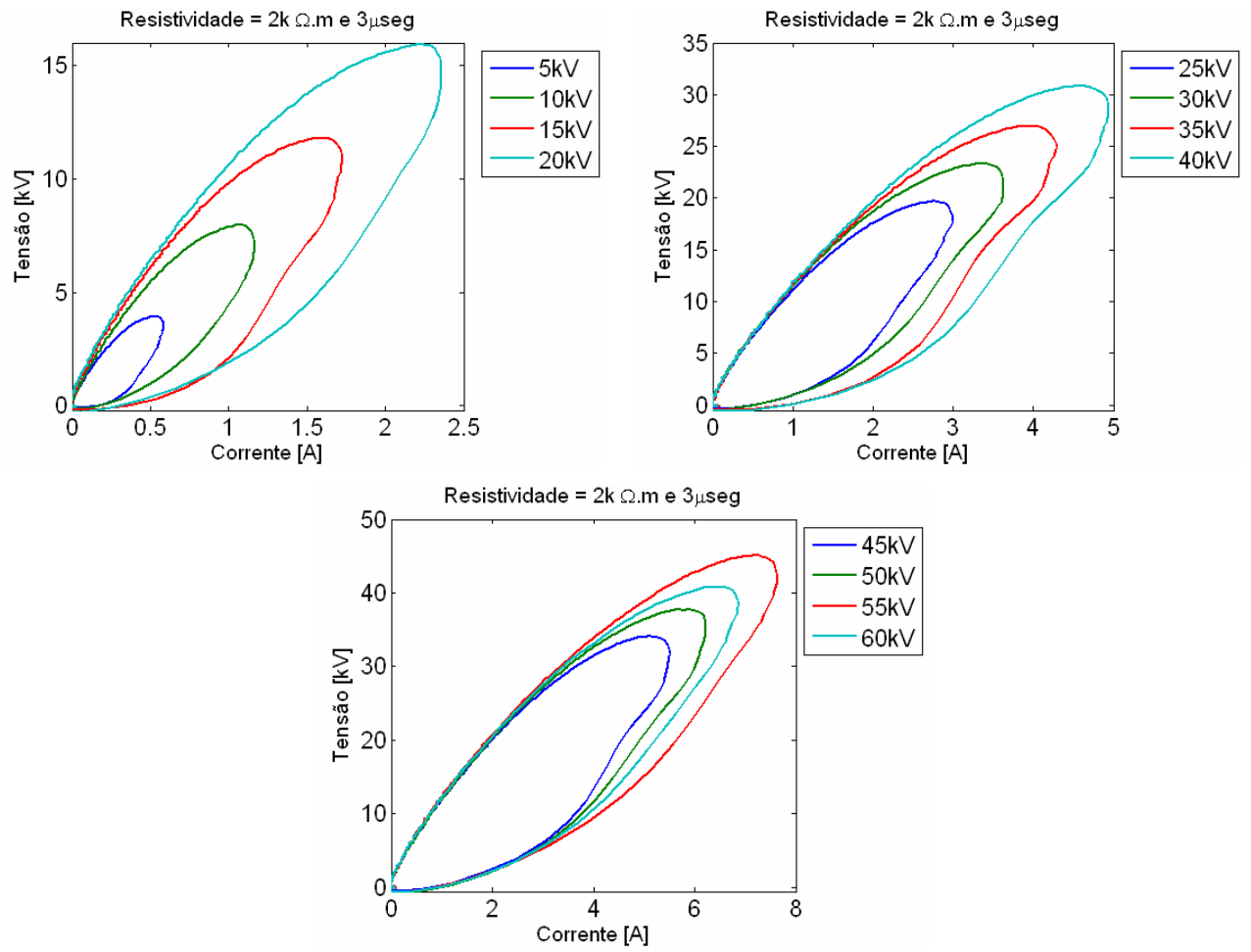


Figura 5.72 – Curvas VxI –  $\rho=2 \text{ k}\Omega.m$ .

4. Solo IV

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s

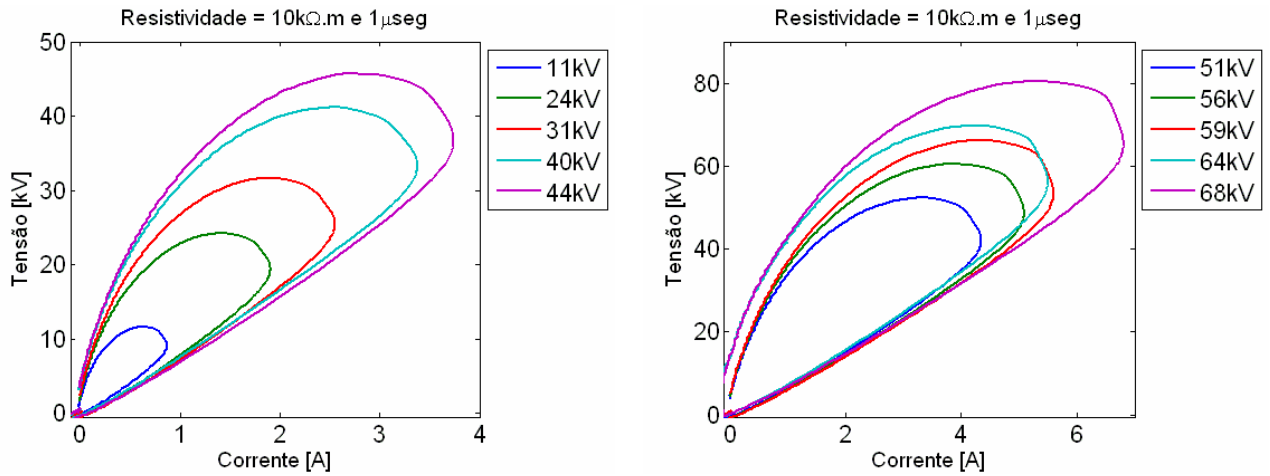


Figura 5.73 – Curvas VxI –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

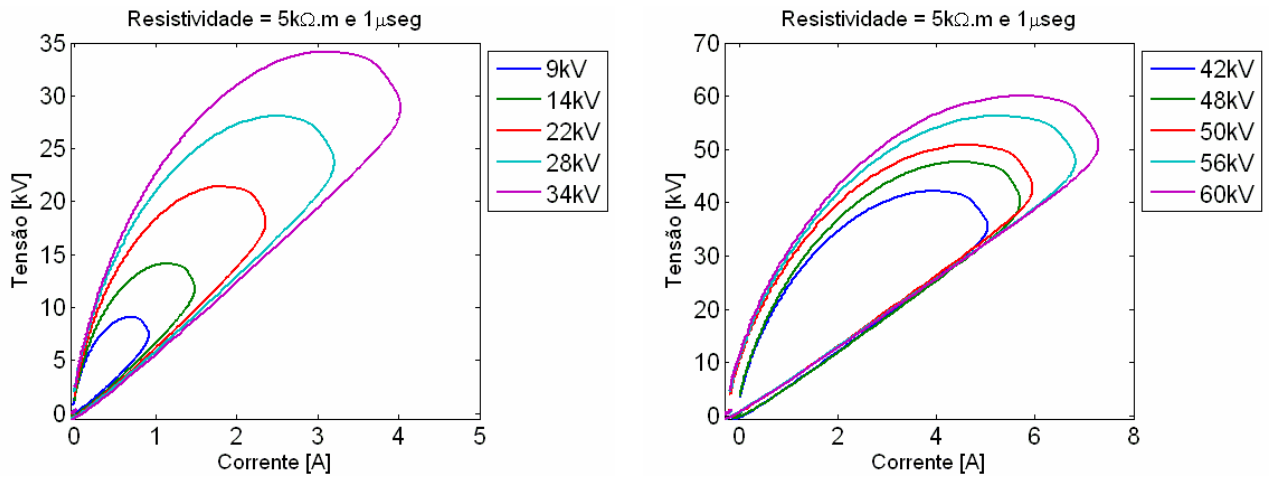


Figura 5.74 – Curvas VxI –  $\rho=5$  k $\Omega$ .m.

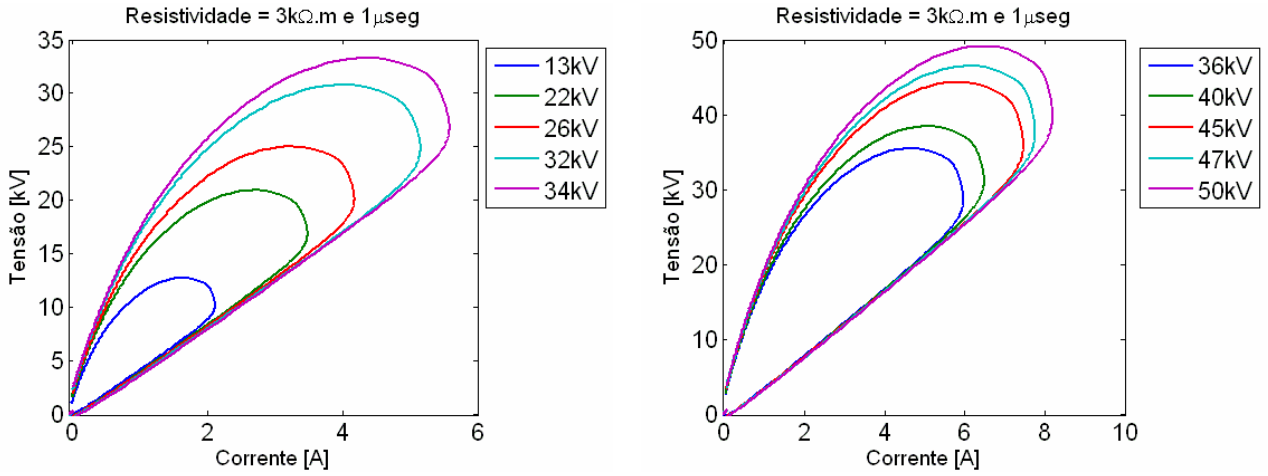


Figura 5.75 – Curvas  $V \times I$  –  $\rho=3\text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ .

- Tempo de Frente:  $3\mu\text{s}$

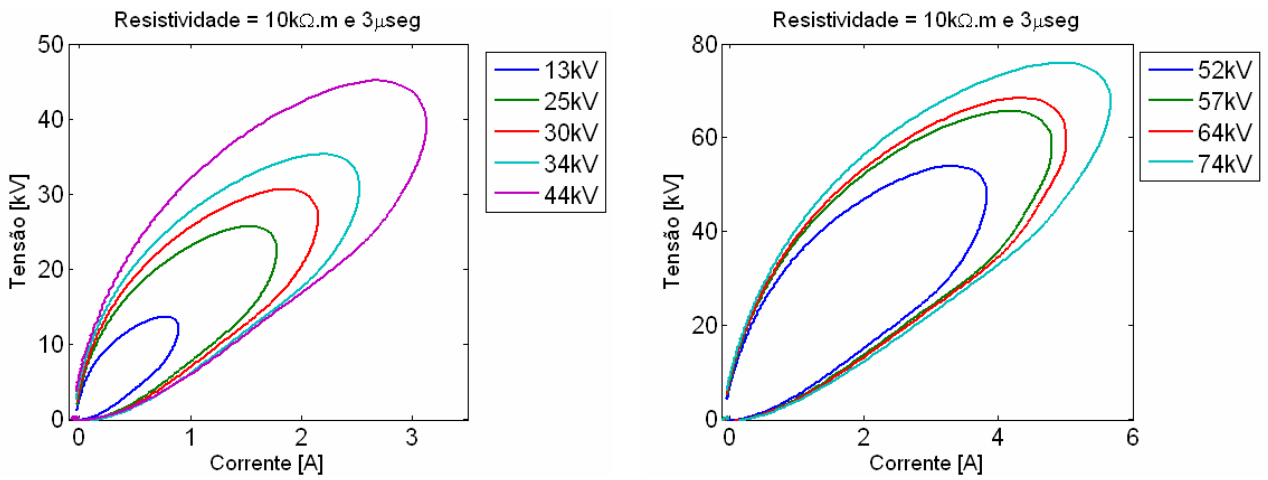


Figura 5.76 – Curvas  $V \times I$  –  $\rho=10\text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ .

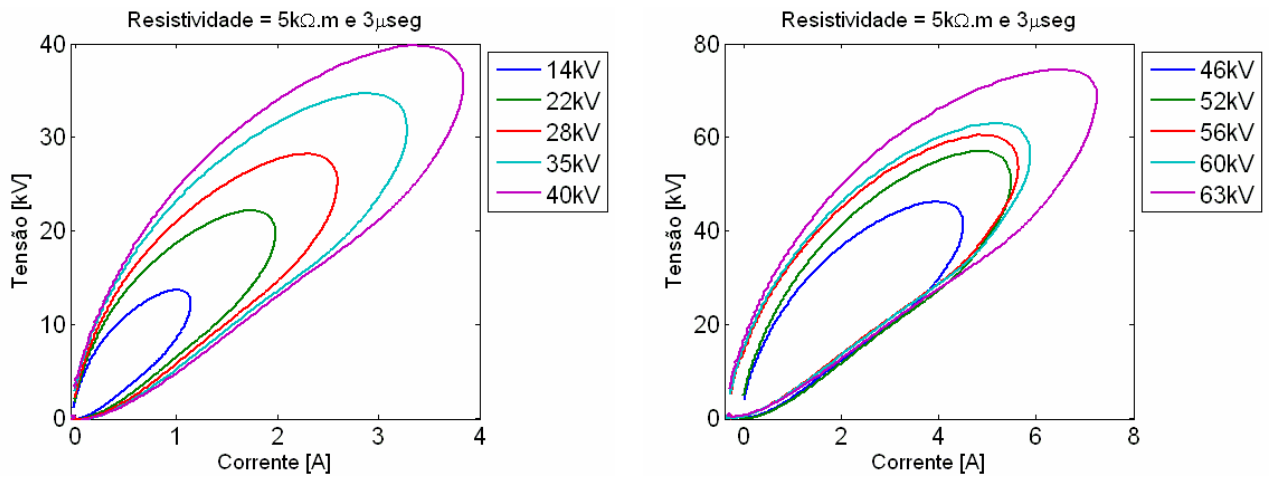


Figura 5.77 – Curvas VxI –  $\rho=5 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ .

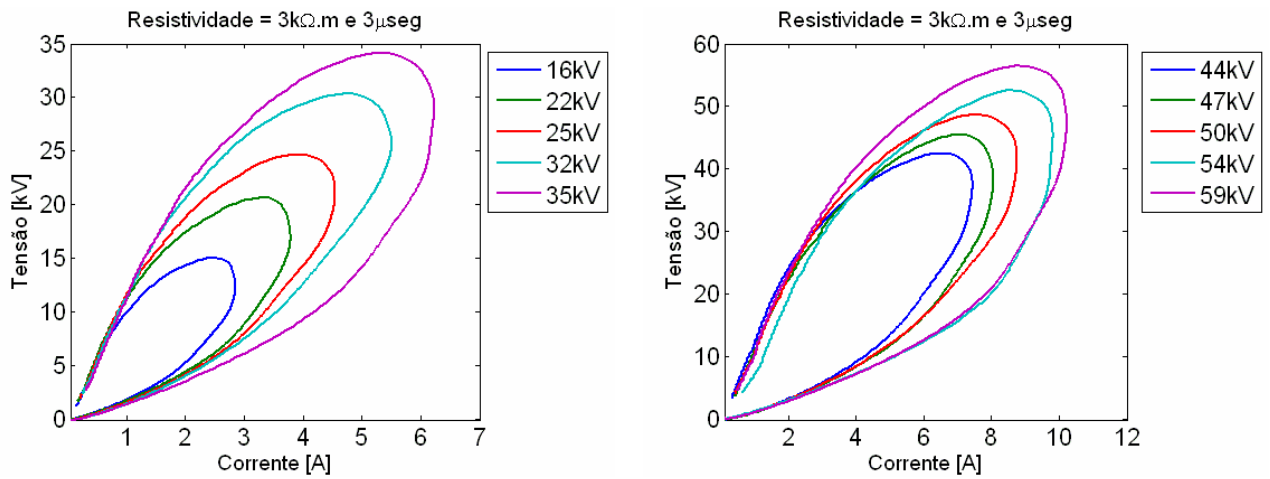


Figura 5.78 – Curvas VxI –  $\rho=3 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ .

## 5.3 Resultados Referentes à Configuração de Placas Paralelas

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais obtidos com o emprego da configuração de placas paralelas. Assim como no caso da configuração cilíndrica, os testes foram realizados por meio da aplicação de tensões impulsivas partindo do valor de pico de 5 kV por estágio até alcançar a ruptura, com passos crescentes de 5 kV. A fim de verificar a consistência do valor da tensão de ruptura realizou-se um procedimento similar ao método de acréscimo e decréscimo (*up-and-down*).

Procedendo da mesma forma como realizado para a configuração cilíndrica, foram medidos os valores da resistividade para cada solo, com os devidos percentuais de umidade, conforme Tabela 4.1. As análises dos resultados a seguir também são mostradas no próximo capítulo.

### 5.3.1 Ondas de Tensão

#### 1. Solo I

- Tempo de Frente: 1  $\mu$ s e 3  $\mu$ s

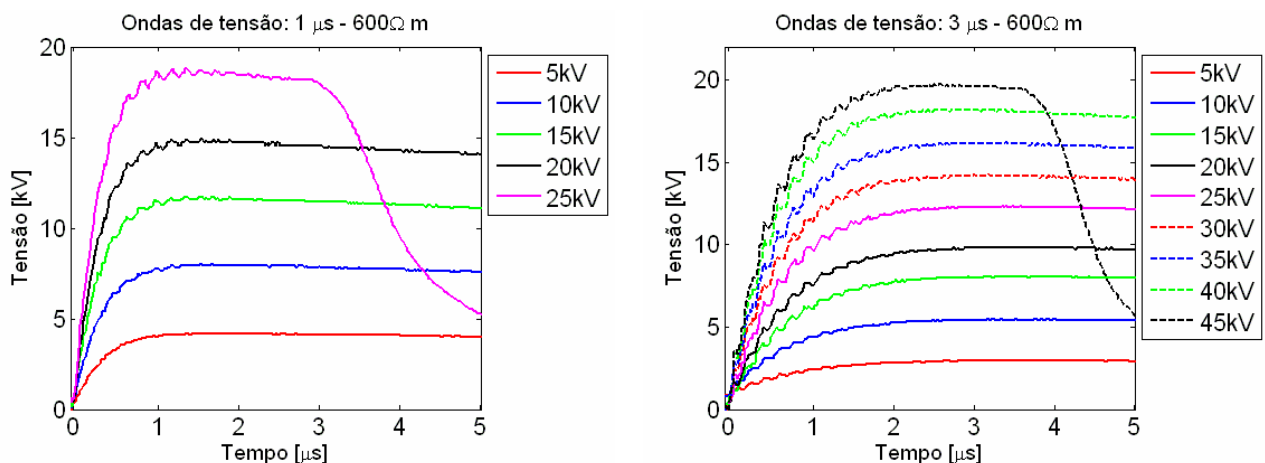


Figura 5.79 – Ondas de tensão –  $\rho=600 \Omega.m$ .

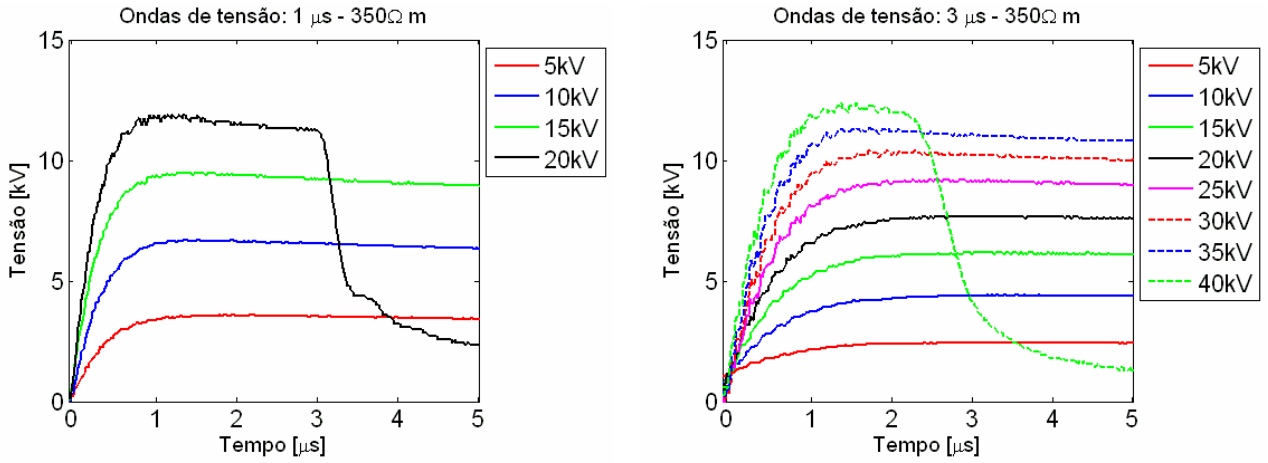


Figura 5.80 – Ondas de tensão –  $\rho=350 \Omega.m$ .

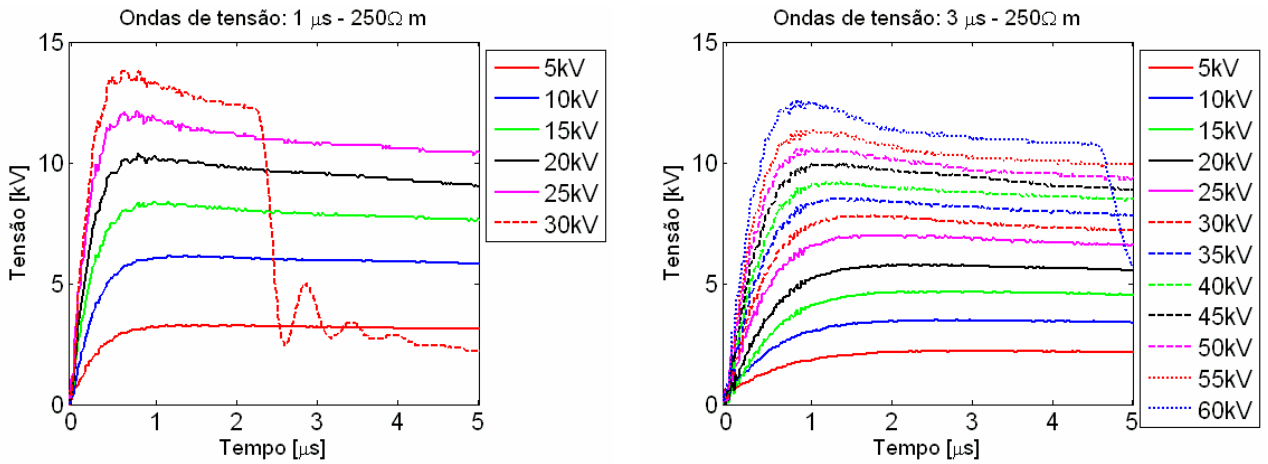


Figura 5.81 – Ondas de tensão –  $\rho=250 \Omega.m$ .

2. Solo II

- Tempo de Frente: 1  $\mu\text{s}$  e 3  $\mu\text{s}$

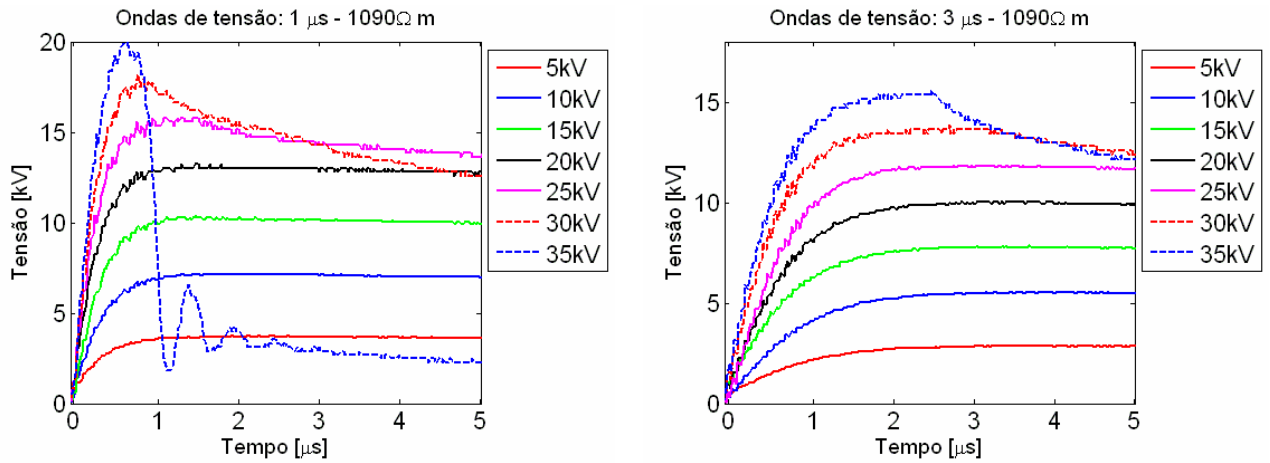


Figura 5.82 – Ondas de tensão –  $\rho=1090\ \Omega\text{.m.}$

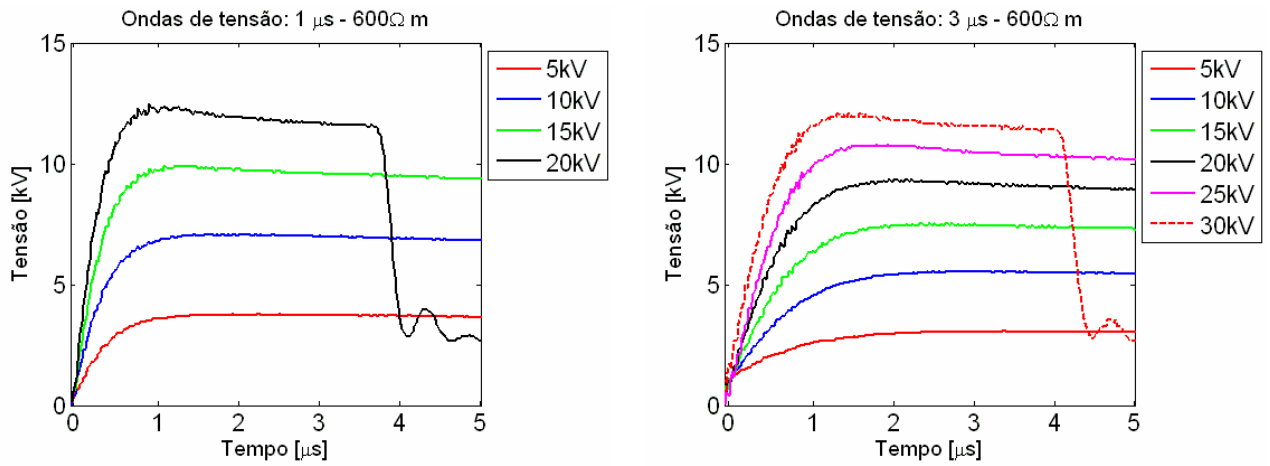


Figura 5.82 – Ondas de tensão –  $\rho=600\ \Omega\text{.m.}$

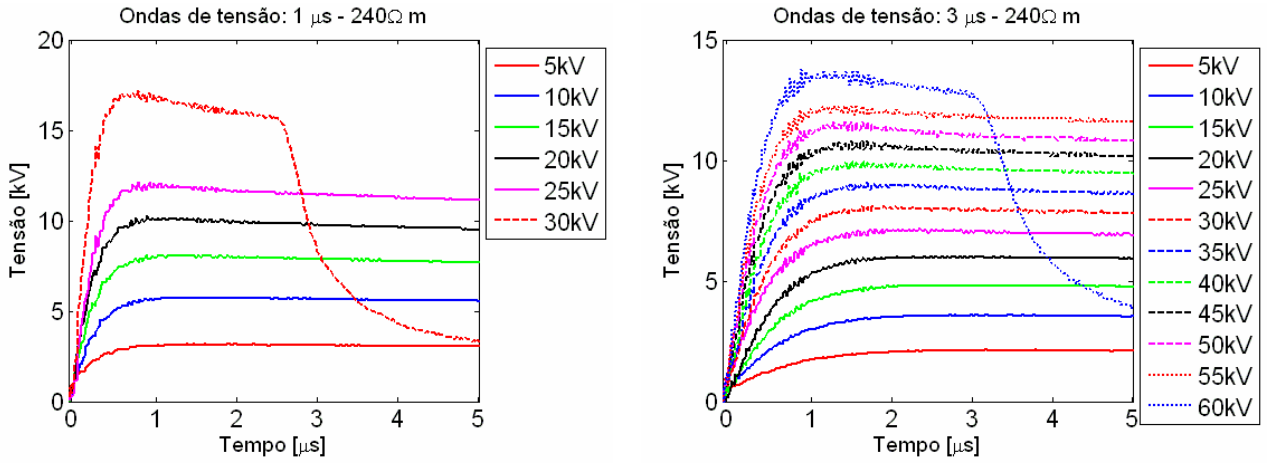


Figura 5.83 – Ondas de tensão –  $\rho=240 \Omega.m$ .

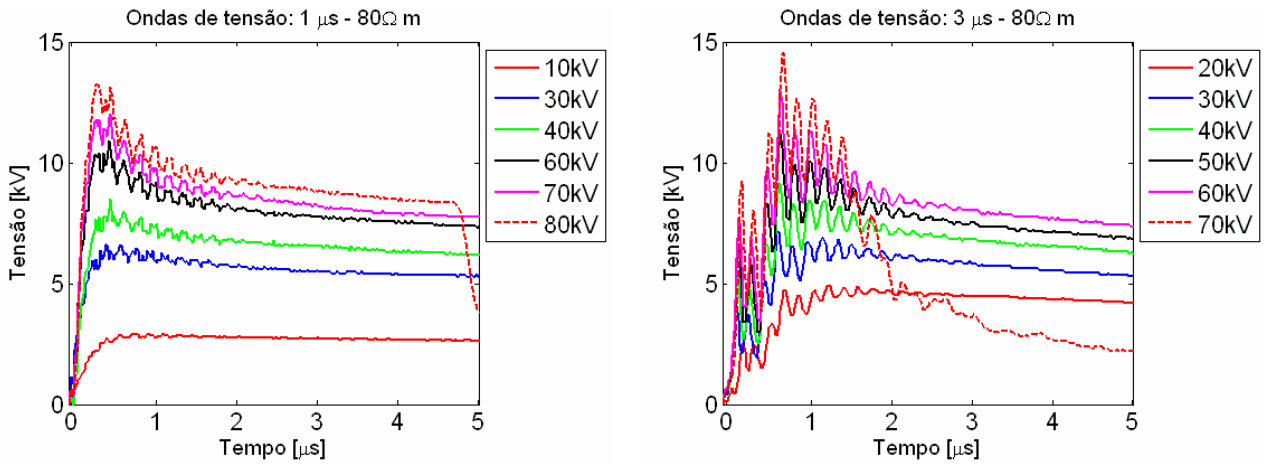
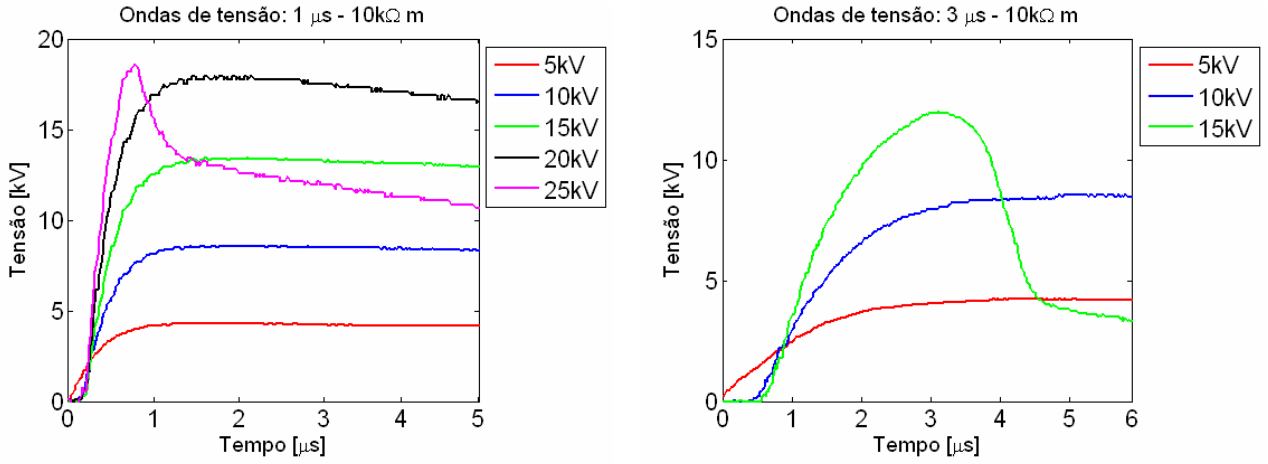


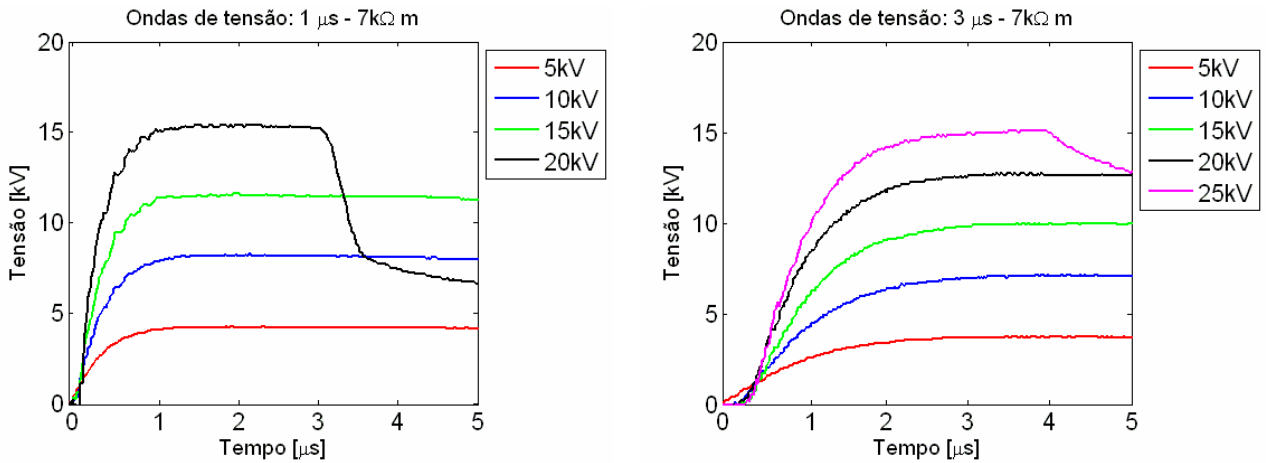
Figura 5.84 – Ondas de tensão –  $\rho=80 \Omega.m$ .

**3. Solo III**

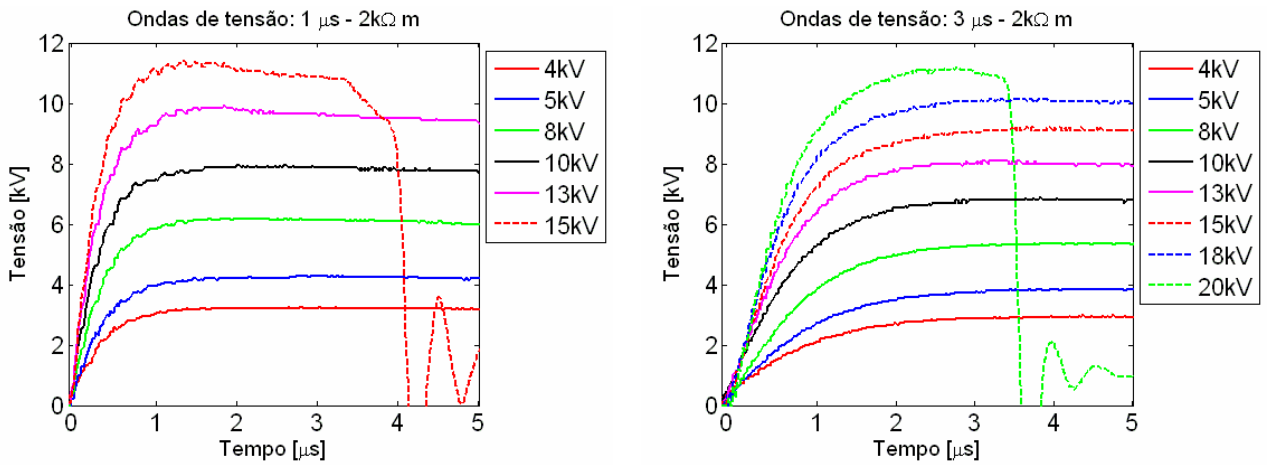
- **Tempo de Frente: 1  $\mu$ s e 3  $\mu$ s**



**Figura 5.85 – Ondas de tensão –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.**



**Figura 5.86 – Ondas de tensão –  $\rho=7$  k $\Omega$ .m.**



**Figura 5.87 – Ondas de tensão –  $\rho=2$  k $\Omega$ .m.**

4. Solo IV

- Tempo de Frente: 1  $\mu\text{s}$  e 3  $\mu\text{s}$

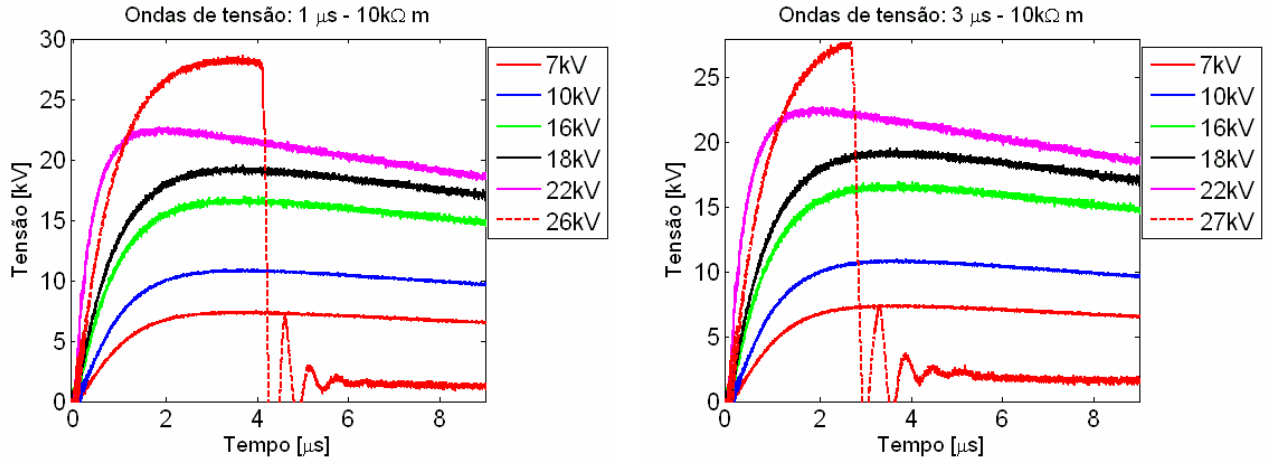


Figura 5.88 – Ondas de tensão –  $\rho=10$  k $\Omega$ .m.

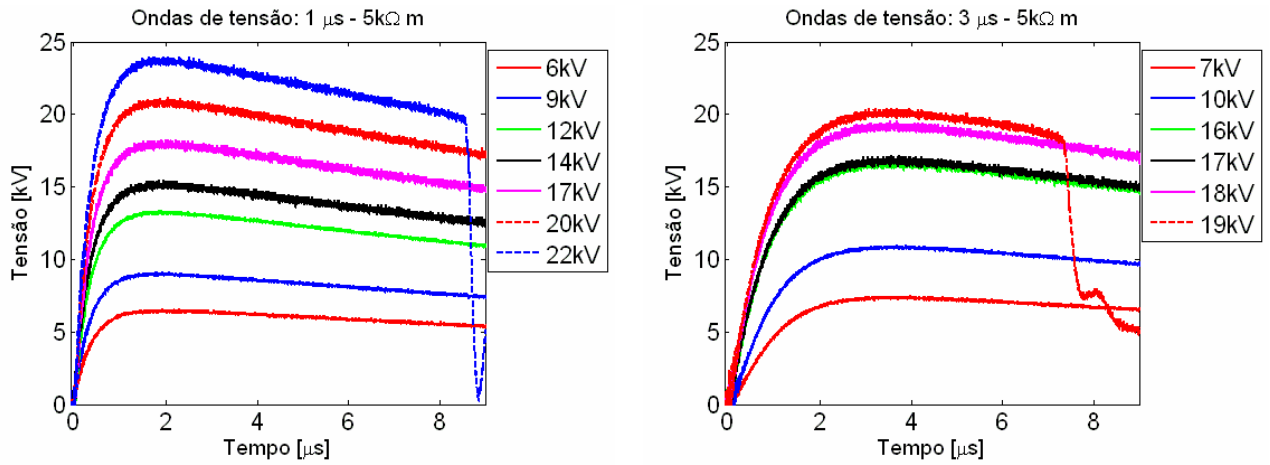


Figura 5.89 – Ondas de tensão –  $\rho=5$  k $\Omega$ .m.

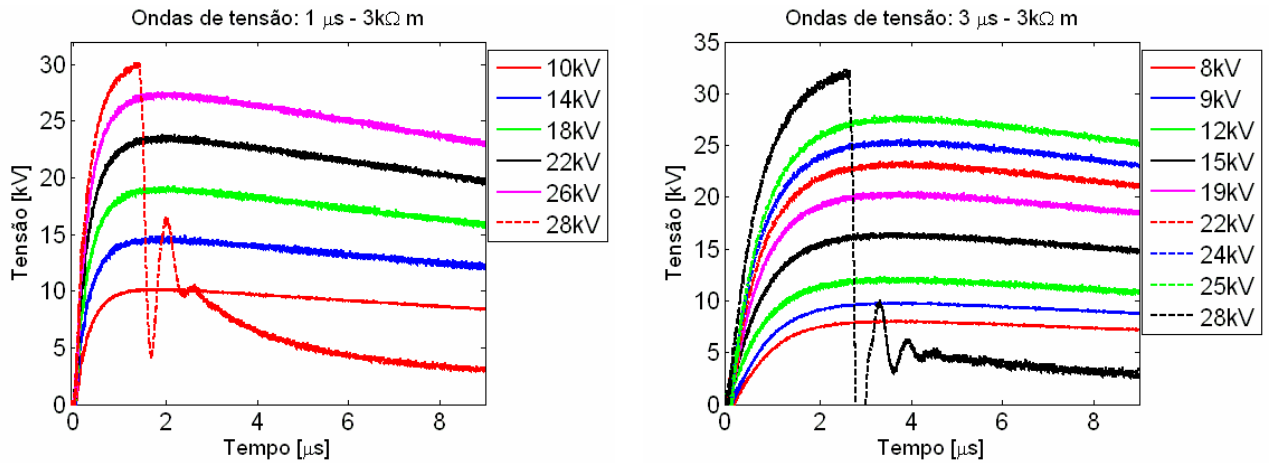


Figura 5.90 – Ondas de tensão –  $\rho=3$  k $\Omega$ .m.

### 5.3.2 Campo Elétrico Crítico

A partir dos resultados obtidos para a configuração de placas paralelas, foram calculados os valores dos campos elétricos críticos para os diversos tipos de solos com suas respectivas resistividades. Vale citar que no caso da cuba paralela, o campo crítico corresponde ao campo de ruptura, dado a distribuição uniforme do campo. A Tabela 5.1 mostra os valores determinados para o campo crítico.

**Tabela 5.1: Campo elétrico crítico e resistividades obtidas em laboratório**

Tipos de Solo	Resistividade ( $\rho$ ) [ $\Omega.m$ ]	Campo Crítico ( $E_C$ ) [ $kV/cm$ ]	
		$1 \mu s$	$3 \mu s$
Solo I	600	9,3	9,0
	350	6,0	6,3
	250	5,5	6,1
Solo II	1090	9,5	6,0
	600	5,8	5,7
	240	5,2	5,3
	80	4,2	5,0
Solo III	10000	5,3	5,5
	7000	5,0	5,0
	2000	3,7	3,7
Solo IV	10000	14,2	14,4
	5000	12,0	11,6
	3000	10,0	9,0

# 6 Análises dos Resultados

## 6.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentadas as análises relativas à influência da intensidade de campos elétricos associados a correntes impulsivas no comportamento do solo, mais particularmente na sua ionização. Tais análises se estendem à influência dos parâmetros da corrente, como seu tempo de frente, e da resistividade do solo, no fenômeno de ionização, notadamente na definição do campo elétrico crítico.

As análises são realizadas para toda a massa de dados correspondentes aos testes, apresentada no capítulo 5.

## 6.2 Análises dos Resultados Referentes à Configuração de Placas Paralelas

Nessa configuração foram desenvolvidos três tipos de análises: (a) determinação do campo elétrico crítico para os diversos tipos de solos estudados, (b) estudo da influência do valor da resistividade no valor deste campo, e (c) determinação do tempo de ruptura.

---

## 6.2.1 Determinação do Campo Elétrico Crítico

Para cada amostra de solo, foram desenvolvidos os ensaios indicados no item 5.3, nos quais se aplicava uma onda de tensão impulsiva com amplitude crescente entre os eletrodos paralelos. O pico de tensão era elevado em degraus de 5 kV até que se verificasse a ruptura do solo entre as placas. Após tal ruptura, através de um processo de “up-and-down”, verificava-se a consistência da ocorrência da ruptura naquela amplitude.

A Figura 6.1 ilustra o resultado desse processo para o solo I com a resistividade 600  $\Omega \cdot m$ .

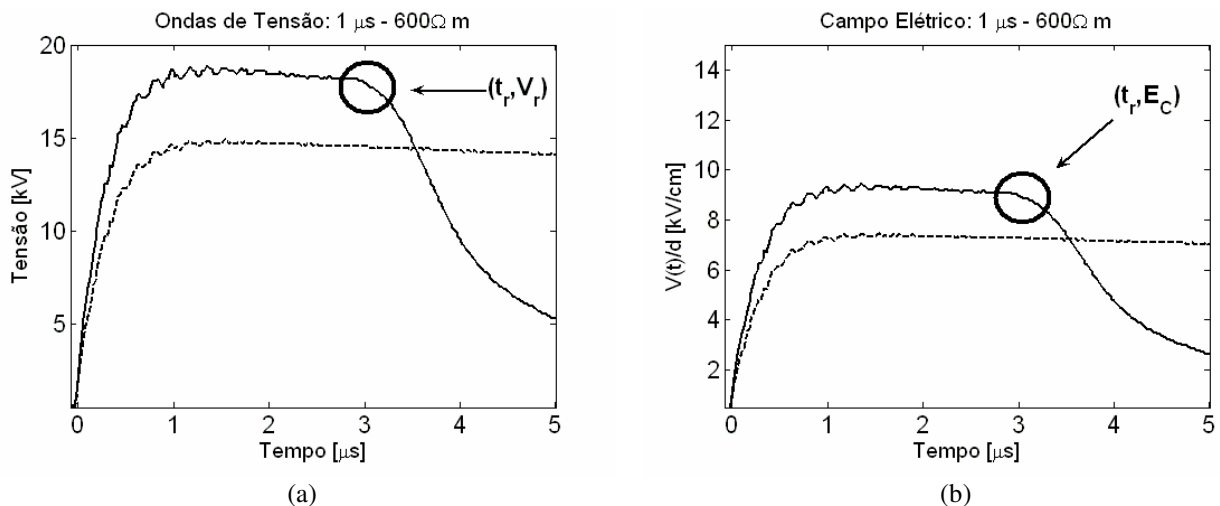


Figura 6.1 – Ondas de tensão e campo –  $\rho=600 \Omega \cdot m$ .

Devido à configuração plana dos eletrodos e à reduzida distância entre estes, o campo elétrico  $E$  no solo é uniforme e seu valor instantâneo pode ser obtido diretamente da curva de tensão (Figura 6.1a), pela expressão

$$E(t) = \frac{V(t)}{d} \quad (1)$$

onde  $d$  é a distância entre os eletrodos.

Na Figura 6.1b, o campo crítico (ou de ruptura)  $E_c$  corresponde ao valor obtido a partir da relação (1) para a tensão de ruptura  $V_r$ :

$$E_c(t) = \frac{V_r(t)}{d} \quad (2)$$

Para fins ilustrativos, são mostrados nas Figuras 6.2 a 6.4 as curvas com a relação  $V(t)/d$  do solo I para três valores de resistividade, com o objetivo de identificação do campo crítico para ondas de tensão aplicadas de tempo de frente iguais a  $1 \mu\text{s}$  e  $3 \mu\text{s}$ .

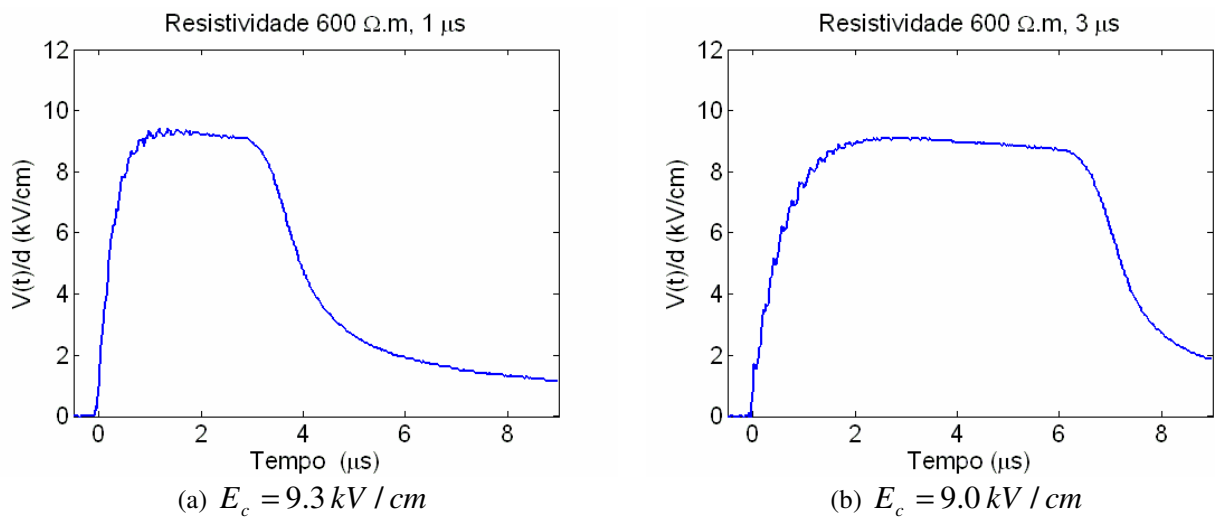


Figura 6.2 – Campo elétrico em função do tempo ( $\rho=600 \Omega.m$ )

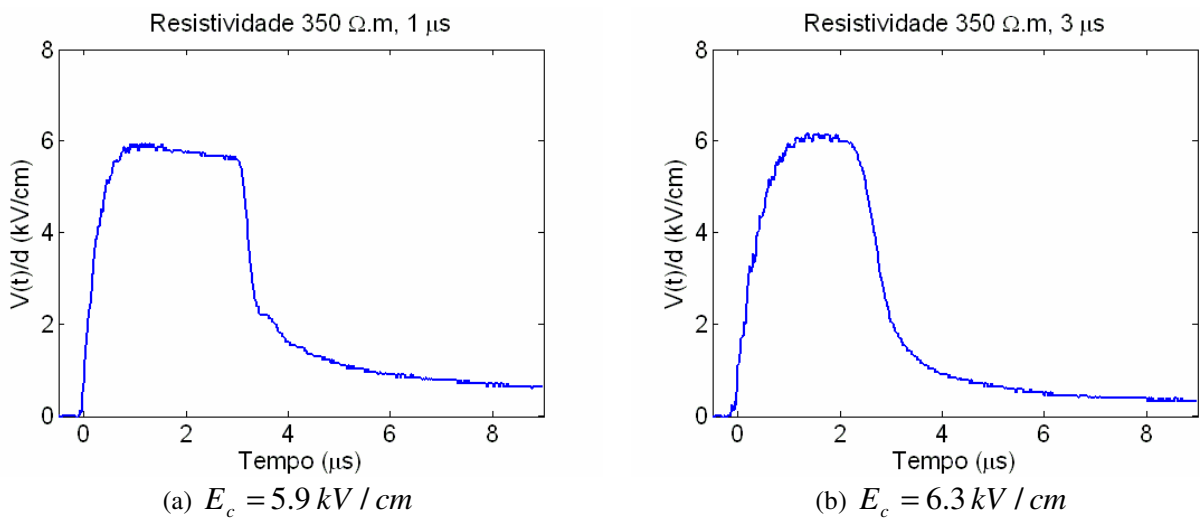


Figura 6.3 – Campo elétrico em função do tempo ( $\rho=350 \Omega.m$ )

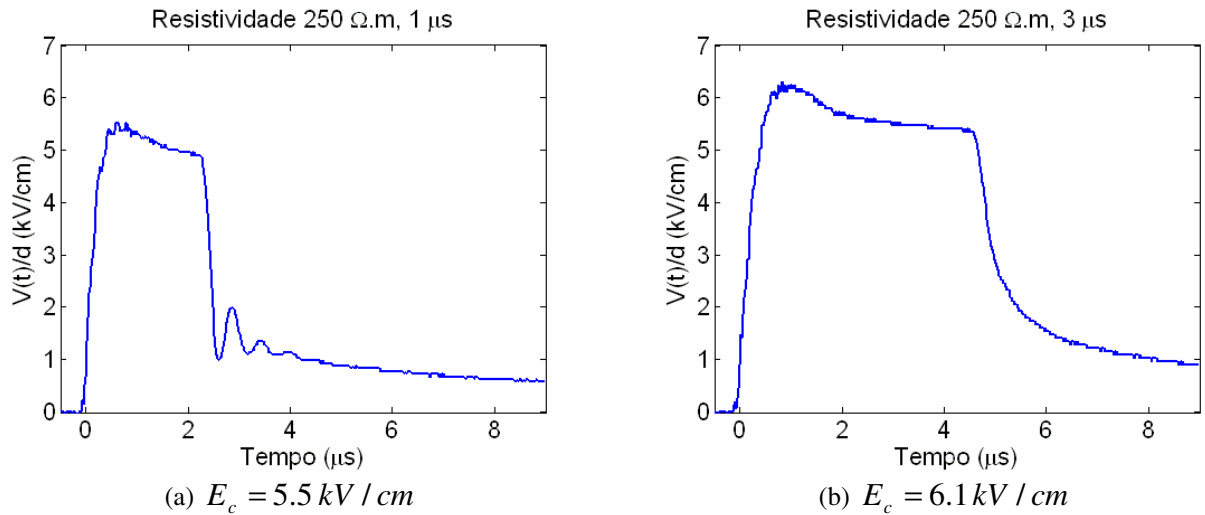


Figura 6.4 – Campo elétrico em função do tempo ( $\rho=250 \Omega.m$ )

Resultados similares obtidos para os demais solos permitiram identificar os campos críticos ou de ruptura em cada situação de teste. Estes são indicados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Valores de campo elétrico crítico e resistividades obtidos em laboratório

Tipos de Solo	Resistividade ( $\rho$ ) [ $\Omega.m$ ]	Campo Crítico ( $E_c$ ) [ $kV/cm$ ]	
		1 $\mu s$	3 $\mu s$
Solo I	600	9,3	9,0
	350	6,0	6,3
	250	5,5	6,1
Solo II	1090	9,5	6,0
	600	5,8	5,7
	240	5,2	5,3
	80	4,2	5,0
Solo III	10000	5,3	5,5
	7000	5,0	5,0
	2000	3,7	3,7
Solo IV	10000	14,2	14,4
	5000	12,0	11,6
	3000	10,0	9,0

## 6.2.2 Influência do Valor da Resistividade do Solo

A literatura apresenta indicativos de que o campo crítico cresce com o aumento da resistividade do solo, (Oettlé,1988b). Entretanto, esses indícios foram verificados para solos diferentes (e, por conseguinte, diferentes resistividades).

Nesta seção se analisa a relação entre a resistividade e o campo elétrico crítico para diferentes resistividades de um mesmo solo, alcançadas pela variação da umidade do meio.

As Figuras 6.5 a 6.8 mostram o comportamento do campo elétrico crítico  $E_c$  em função da resistividade do solo para as ondas de tempo de frente de  $1 \mu\text{s}$  e  $3 \mu\text{s}$  para todos os solos estudados.

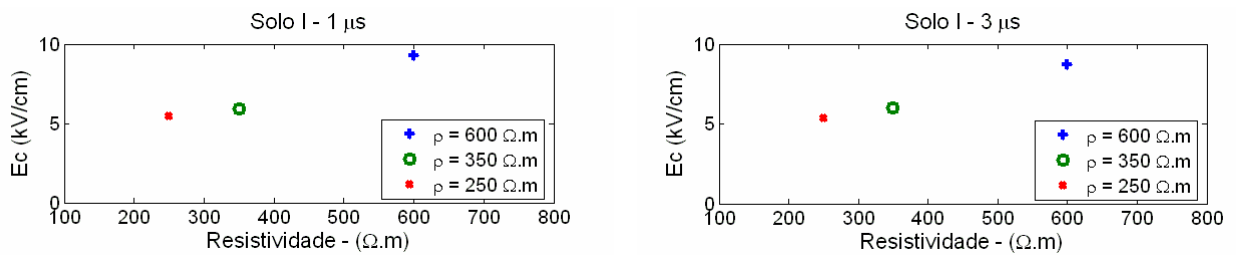


Figura 6.5 – Campo crítico em função da resistividade para o solo I

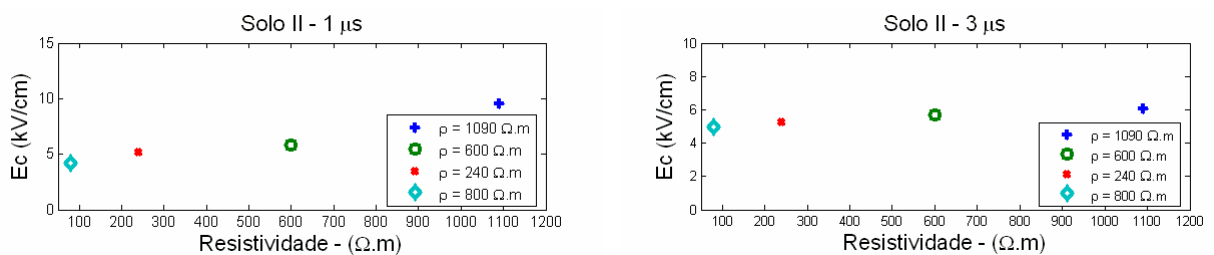
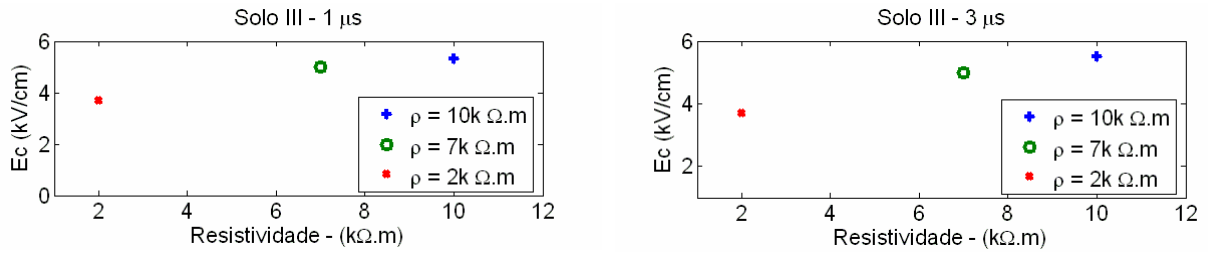
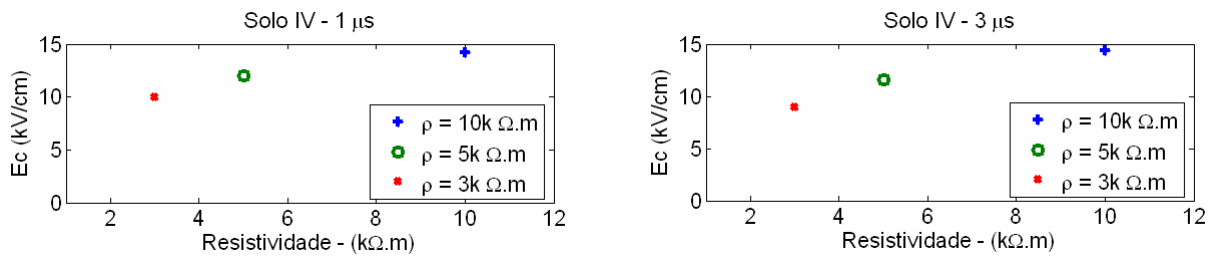


Figura 6.6 – Campo crítico em função da resistividade para o solo II



**Figura 6.7 – Campo crítico em função da resistividade para o solo III**



**Figura 6.8 – Campo crítico em função da resistividade para o solo IV**

Em todos os casos observa-se que o campo elétrico crítico cresce com o aumento da resistividade do solo.

Para tornar mais explícita a relação entre a resistividade do solo e o campo elétrico crítico as Figuras 6.9 e 6.10 apresentam as curvas interpoladas relacionadas aos valores de campo crítico e de resistividade, medidos nos ensaios de laboratório. As curvas em questão indicam com maior nitidez a tendência do aumento do campo crítico com o acréscimo da resistividade, para todas as amostras de solos estudadas.

A título de comparação são apresentados na Figura 6.11 os resultados de campo ruptura em função da resistividade, obtidos por Oettlé (1988b). Conforme se pode observar, os resultados são similares.

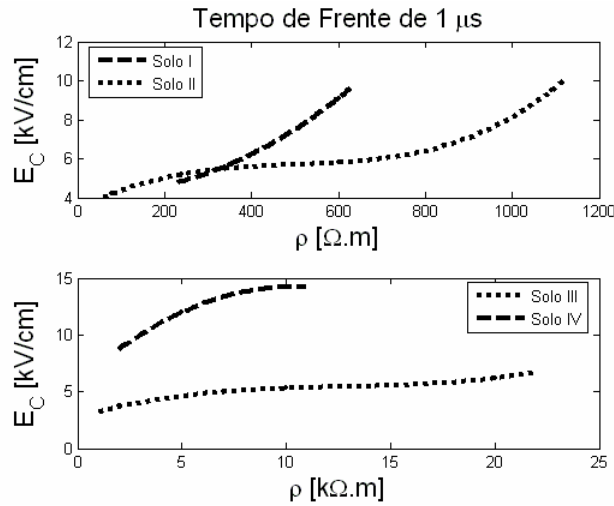


Figura 6.9 – Comportamento do campo crítico em função da resistividade para todos os solos –  $T_f=1 \mu$ s

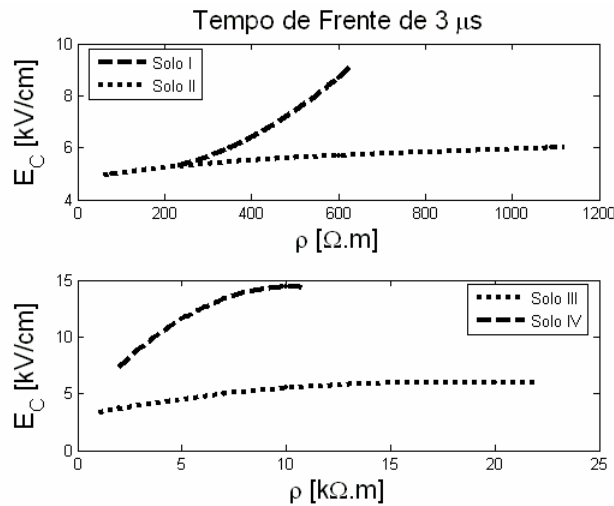


Figura 6.10 - Comportamento do Campo crítico em função da resistividade para todos os solos –  $T_f=3 \mu$ s

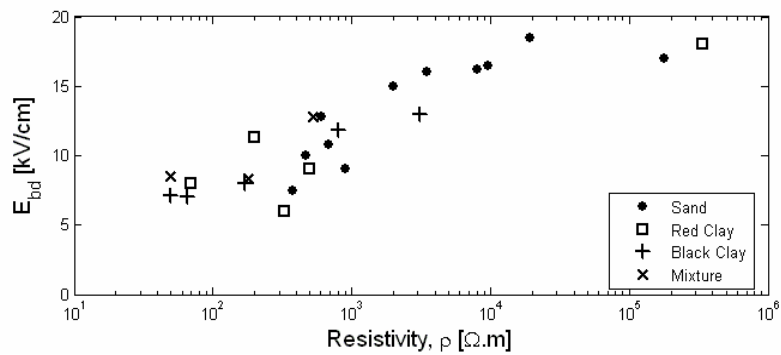


Figura 6.11: Resultado extraído da referência (Oettle, 1988b) relativos ao campo de ruptura ( $E_{bd}$ ) em função da resistividade do solo ( $\rho$ )

### 6.2.3 Determinação dos Tempos de Ruptura

Existe uma discussão na literatura acerca do tempo requerido para que o efeito de ionização do solo se estabeleça. Há autores que assumem a existência de um tempo mínimo para início do processo de ionização da ordem 5  $\mu\text{s}$ . Isto sugeriu a avaliação realizada neste item, que busca identificar o tempo de ruptura observado nos testes realizados. As Figuras 6.12 a 6.15 indicam esse comportamento.

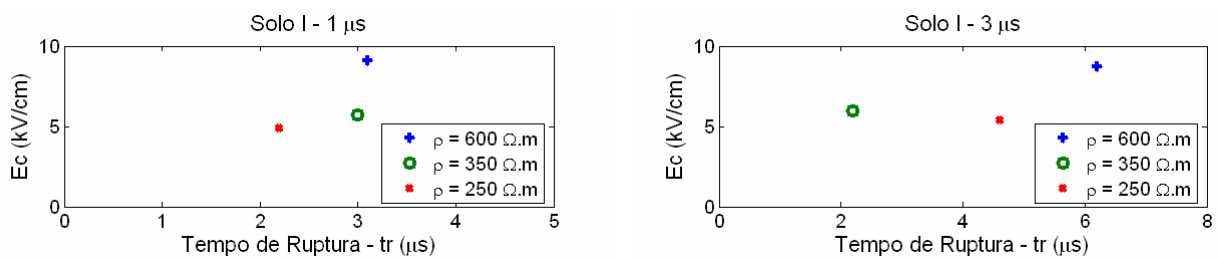


Figura 6.12 –  $E_c$   $x$   $t_r$  - Solo I

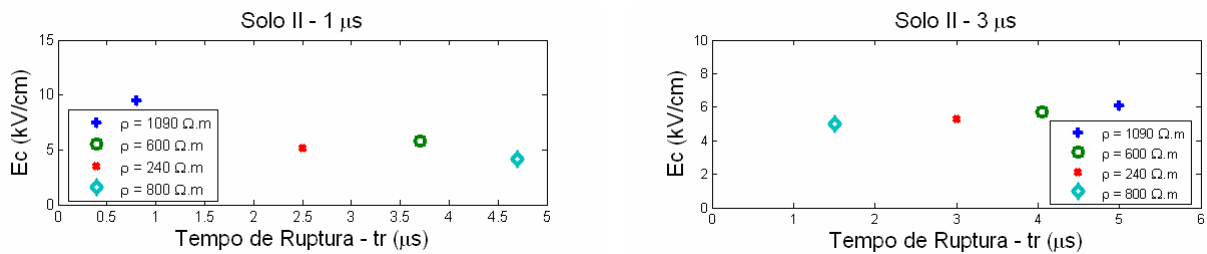


Figura 6.13 –  $E_c$   $x$   $t_r$  - Solo II

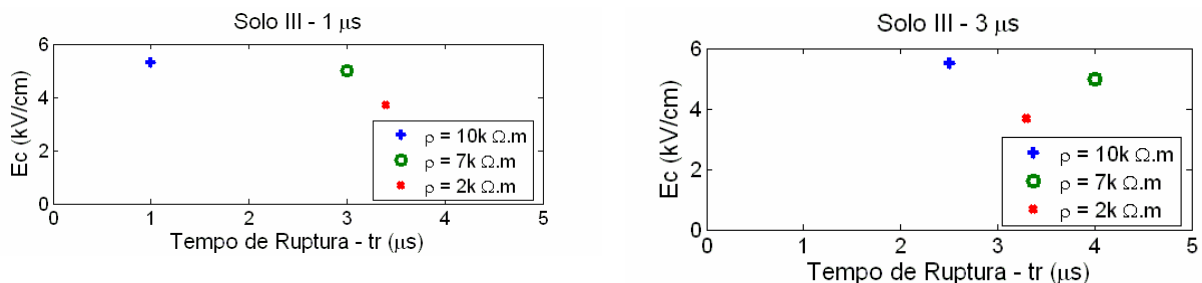
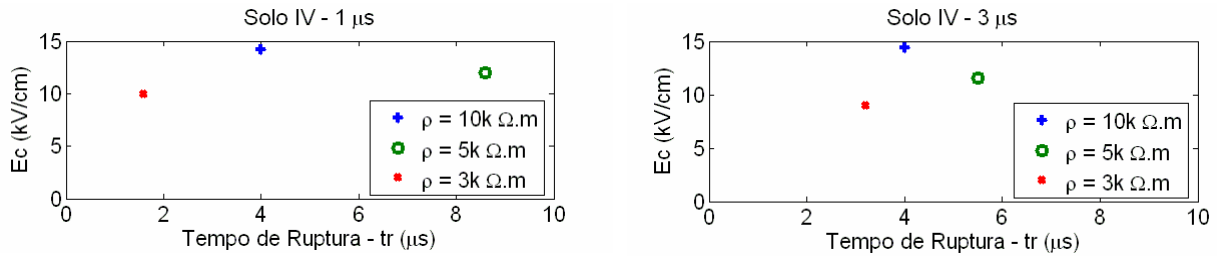


Figura 6.14 –  $E_c$   $x$   $t_r$  - Solo III



**Figura 6.15 –  $E_c$  x  $t_r$  - Solo IV**

Verifica-se com base nas Figuras 6.12 a 6.15, que, para um mesmo solo e diferentes valores de resistividade tem-se a ocorrência de ruptura em instantes distintos de tempo que variou entre um valor inferior a  $1 \mu\text{s}$  até a ordem de  $9 \mu\text{s}$ .

Além disso, percebe-se que o instante de ocorrência do campo crítico não segue uma tendência clara que indique uma dependência com relação ao valor de resistividade do solo.

Acredita-se que esta variabilidade tenha motivado Oettlé (1988b) a adotar um tempo mínimo de  $5 \mu\text{s}$  como requisito de seleção das curvas de ruptura utilizados para cálculo do campo crítico. Os ensaios com tempo inferior de ruptura eram descartados. Este procedimento buscava uma certa homogeneidade nas amostras.

Aparentemente, este fato motivou uma interpretação equivocada de alguns autores por exemplo, (Nor, 2000) que supõem que o processo de ionização do solo só se inicia após este tempo de  $5 \mu\text{s}$ . Os testes apresentados nas Figuras 6.12 a 6.15 mostram que com freqüência a ruptura ocorre antes.

## 6.2.4 Comparação com os Resultados da Literatura

Para fins de comparação com resultados encontrados na literatura para o mesmo tipo de teste (cubas de placas paralelas), nesta seção são apresentados os valores de campos críticos obtidos. A Tabela 6.2 refere-se aos valores encontrados por Oettlè (1988b), e a Tabela 6.3 aos valores obtidos para os solos analisados em laboratório.

**Tabela 6.2: Valores de campo elétrico crítico e resistividade do solo obtidos por Oettlè (1988b)**

Descrição	Resistividade [ $\Omega.m$ ]	$E_{bd}$ [ $kV/cm$ ]	
Areia	180000	17,0	
	19200	18,5	
	8000	16,2	
	3500	16,0	
	2000	15,0	
	960	16,5	
	900	9,0	
	680	10,8	
	610	12,8	
	470	10,0	
	380	7,5	
Argila Vermelha	340000	18,0	
	500	9,0	
	330	6,0	
	200	11,3	
	70	8,0	
Argila Preta	3100	13,0	
	800	11,8	
	170	8,0	
	50	7,1	
	65	7,0	
Mistura dos tipos de solos	525	12,8	
	180	8,3	
	50	8,5	

**Tabela 6.3: Valores de campo elétrico crítico e resistividade obtidos em laboratório**

Tipos de Solo	Resistividade ( $\rho$ ) [ $\Omega.m$ ]	Campo Crítico ( $E_c$ ) [ $kV/cm$ ]	
		$1 \mu s$	$3 \mu s$
Solo I	600	9,3	9,0
	350	6,0	6,3
	250	5,5	6,1
Solo II	1090	9,5	6,0
	600	5,8	5,7
	240	5,2	5,3
	80	4,2	5,0
Solo III	10000	5,3	5,5
	7000	5,0	5,0
	2000	3,7	3,7
Solo IV	10000	14,2	14,4
	5000	12,0	11,6
	3000	10,0	9,0

Verifica-se que os resultados tem ordem de grandeza semelhante na mesma faixa de resistividade ( 5 e 15 kV/cm para a faixa de 100  $\Omega$ .m a 10.000  $\Omega$ .m) e, em ambos os casos, os campos críticos são em geral superiores aos valores encontrados em medições realizadas em cubas cilíndricas e esféricas como as de Mousa (1994), que obteve 4 kV/cm para este parâmetro.

### **6.3 Análise dos Resultados Referentes à Configuração Cilíndrica**

Nesta seção, são realizadas análises referentes aos resultados com a configuração cilíndrica, apresentados no capítulo 5. Três tipos de análises são apresentadas:

A primeira tem natureza qualitativa e busca caracterizar os diversos estágios de ocorrência do processo de ionização, para fins de interpretação, a partir de curvas  $V \times I$ .

A segunda análise, desenvolvida a partir das curvas de impedância transitória, busca avaliar, de forma quantitativa, a evolução do processo de ionização em função da intensidade do campo elétrico.

Em seguida, também a partir dessas curvas, realiza-se a terceira e última análise, que corresponde à busca do valor do campo elétrico crítico em função do raio da região média até a qual o processo de ionização se estende no entorno do eletrodo cilíndrico interno.

### 6.3.1 Análise pelas Curvas $V_{xI}$

A partir dos registros de tensões e correntes medidas em cada amostra de solo testada, foram traçadas curvas  $V_{xI}$ , que relacionam ponto a ponto os valores instantâneos dessas grandezas. É possível identificar com nitidez três diferentes estágios de comportamento do solo quanto à intensidade do processo de ionização. Estes são apresentados a seguir.

- **Ausência da Ionização do Solo**

Para reduzidas densidades de corrente no solo, o processo de ionização não ocorre. Neste caso, a curva  $V_{xI}$  se comporta conforme indicado na Figura 6.16. Essa curva tem forma de *loop* por causa das diferentes componentes de frequência envolvidas. Assim, a curva se inicia com inclinação reduzida e fecha o *loop* pela parte superior, segundo a reta  $R_{BF}$  (resistência de baixa frequência). As diferenças entre as inclinações das retas no início e no final da curva podem ser explicadas pelo fato de que, em altas frequências, não só o valor da resistividade do solo decresce, como também a parcela capacitiva da corrente alcança o seu valor máximo, caracterizando uma situação de impedância mínima, ou seja, de valor mínimo da relação  $\Delta V/\Delta I$ , onde  $\Delta$  refere à variação das grandezas.

Essa situação típica ocorre na frente das ondas impulsivas aplicadas, onde estão presentes as componentes de mais alta frequência.

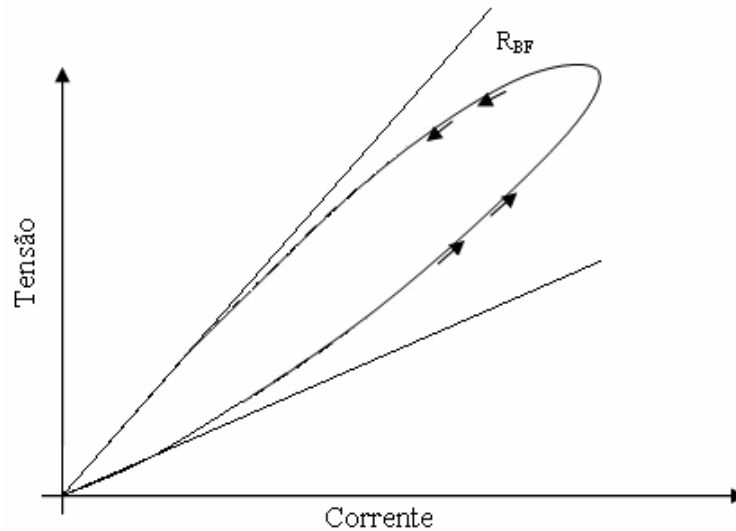


Figura 6.16 - Curva V x I sem ionização do solo

Com o decorrer do tempo, esses efeitos tendem a diminuir e a curva atinge o seu ponto máximo, retornando em seguida com comportamento próximo de uma reta ( $R_{BF}$ ) de maior inclinação. Nessa situação, a parcela capacitiva da corrente no solo é bastante reduzida e a resistividade do solo possui valor maior em comparação ao início do processo. Para ilustrar este comportamento, são mostrados na Figura 6.17 os resultados obtidos em laboratório para ondas de tensão com tempo de frente de  $1 \mu\text{s}$  e  $3 \mu\text{s}$  para o solo I, com resistividade  $\rho = 600 \Omega \cdot \text{m}$ .

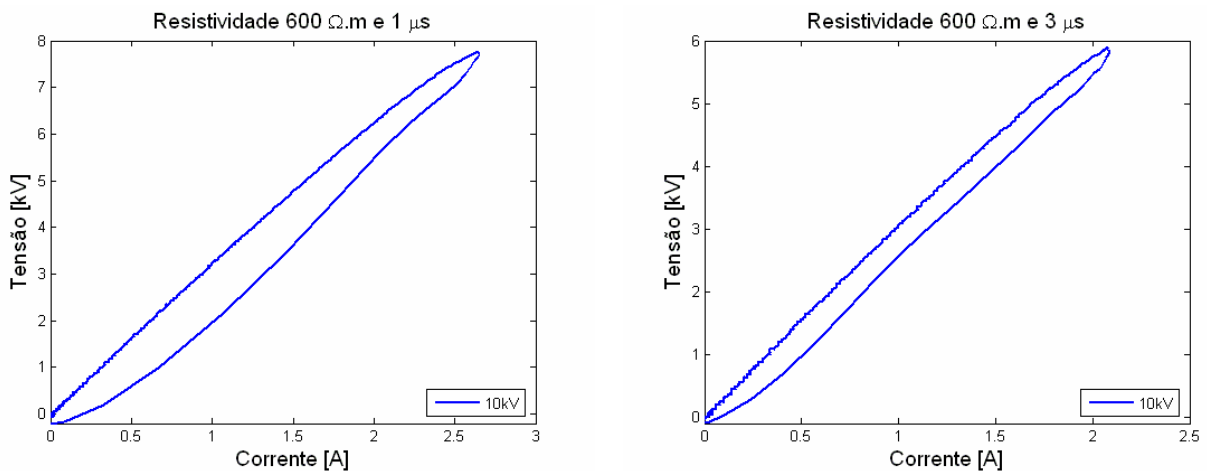


Figura 6.17 – Curvas VxI (obtidas em laboratório) – sem ionização do solo

- **Início do Processo de Ionização do Solo**

Com o aumento da densidade de corrente, tem início o processo de ionização do solo. A figura 6.18 mostra esse comportamento para uma onda de tensão com de tempos de frente 1  $\mu\text{s}$  e 3  $\mu\text{s}$  no solo I, para uma resistividade  $\rho = 600 \Omega\cdot\text{m}$ .

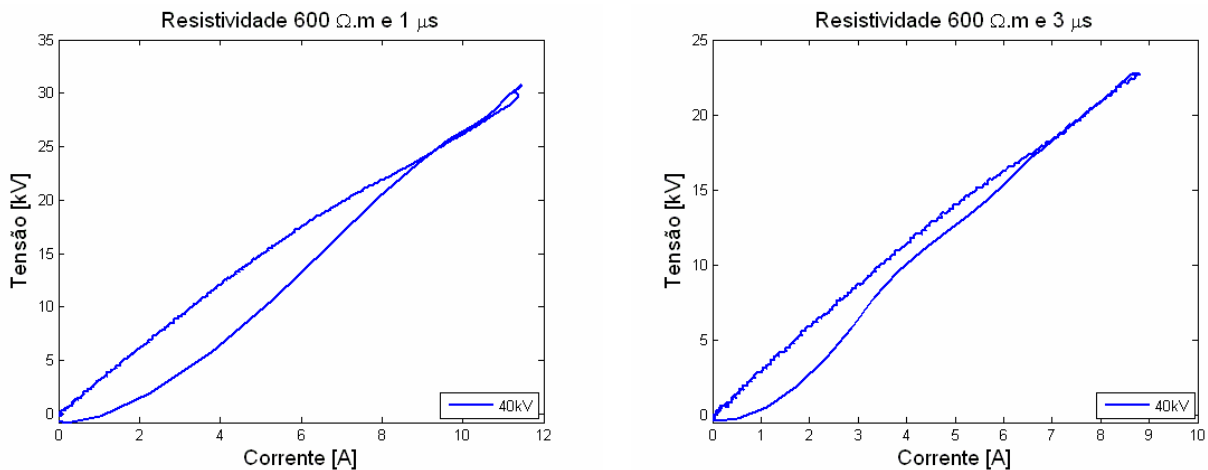


Figura 6.18 – Curvas  $VxI$  (obtidas em laboratório) – início do processo ionização do solo

- **Estabelecimento do Processo intenso de Ionização**

A ocorrência do processo de ionização promove o aumento na mesma proporção das correntes de condução e capacitiva no solo. À medida que este processo é aumentado, há uma diminuição da inclinação da curva de retorno (no gráfico  $VxI$ ) com o seu discreto deslocamento para baixo. O traçado fica semelhante a um “oito inclinado”. Esse comportamento é mostrado na Figura 6.19, que ilustra curvas  $VxI$  obtidas com a aplicação de ondas de tensão com tempos de frente 1  $\mu\text{s}$  e 3  $\mu\text{s}$  no solo I, para resistividade  $\rho = 600 \Omega\cdot\text{m}$ .

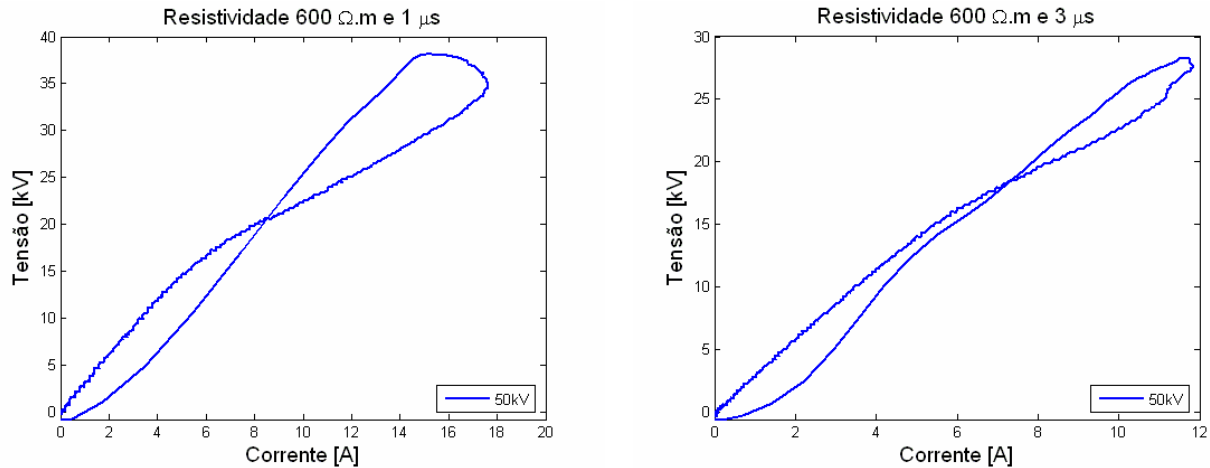


Figura 6.19 - Curvas  $VxI$  (obtidas em laboratório) – com ionização do solo

## • Comparação de Curvas $VxI$ para Diferentes Condições de Ionização

Para ilustrar a diferença no comportamento do solo quando submetido a diferentes densidades de corrente, foi construído o gráfico mostrado na figura 6.20. Esse gráfico apresenta curvas  $VxI$  derivadas de experimentos em laboratório nos quais foram aplicadas ondas impulsivas de tensão aplicada de 25, 40 e 50 kV.

Cada um dos casos apresentados corresponde a um diferente estágio do fenômeno de ionização (respectivamente, ausência, início e estabelecimento da ionização).

O efeito da ionização fica evidenciado nas curvas referentes às tensões de 40 e 50 kV. A curva de 25 kV não apresenta tal efeito. Notam-se, na curva de 40 kV (amplitude da tensão cerca de 50% maior que a primeira), os primeiros vestígios de ocorrência do fenômeno. O início do processo de ionização modifica um pouco o formato da curva em relação à curva de 25 kV. Entretanto, o valor de 40 kV não foi suficiente para reduzir a impedância do corpo de prova a ponto de haver um cruzamento da curva no formato característico de um “oito inclinado”.

Uma acentuada ionização se mostra presente na terceira curva (50 kV), que corresponde à aplicação de uma tensão cerca de 90% maior que o valor da primeira (25 kV). Para este caso, a ocorrência do fenômeno força a curva, em sua

trajetória ascendente, a completar a volta no sentido contrário àquele seguido pela primeira curva, denotando assim uma maior passagem de corrente mesmo quando do início da diminuição da tensão (instantes de tempo após o pico da onda de tensão).

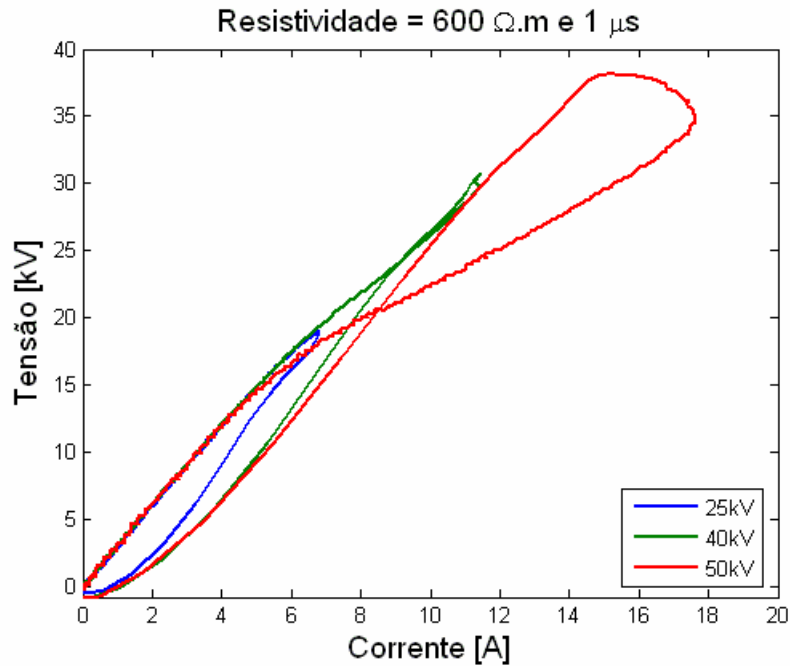


Figura 6.20 – Curvas  $V \times I$  para diferentes níveis de densidade de corrente

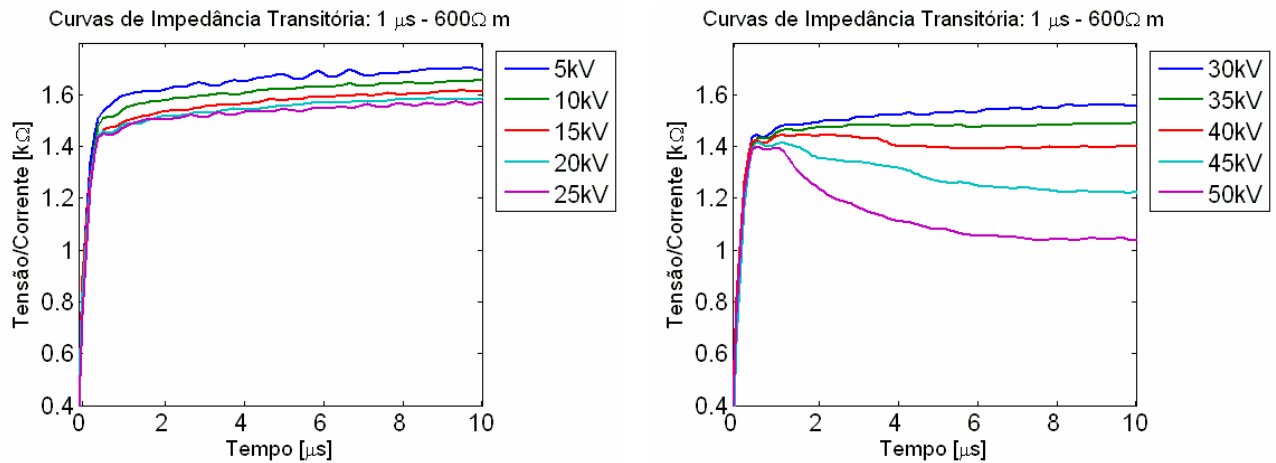
### 6.3.2 Análise da Impedância Transitória

A partir dos registros de tensões e correntes foram traçadas curvas que mostram a variação da relação entre os valores instantâneos de tensão e corrente

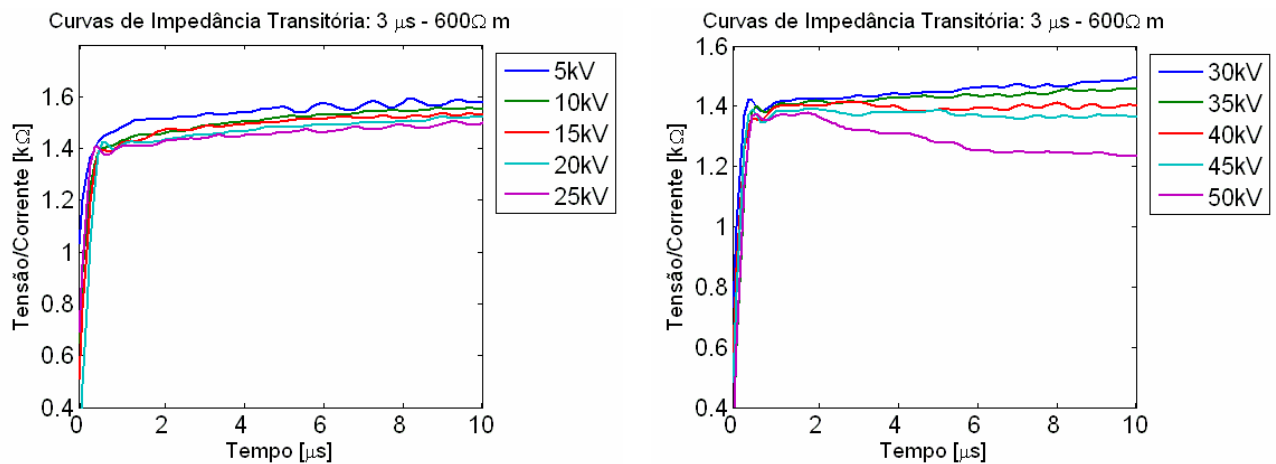
$\left( \frac{v(t)}{i(t)} \right)$  em função do tempo.

As Figuras 6.21 e 6.22, retiradas do capítulo 5, ilustram o comportamento da impedância transitória da amostra do solo tipo I na resistividade de 600 Ω.m, para os tempos de frente de 1 μs e 3 μs. É notável a variação desta relação em função da amplitude da tensão aplicada à amostra.

Vale notar que os valores de tensão indicados nas legendas se referem à tensão de saída do gerador de impulsos, mas a tensão utilizada no cálculo de  $z(t)$  é aquela medida sobre a amostra.

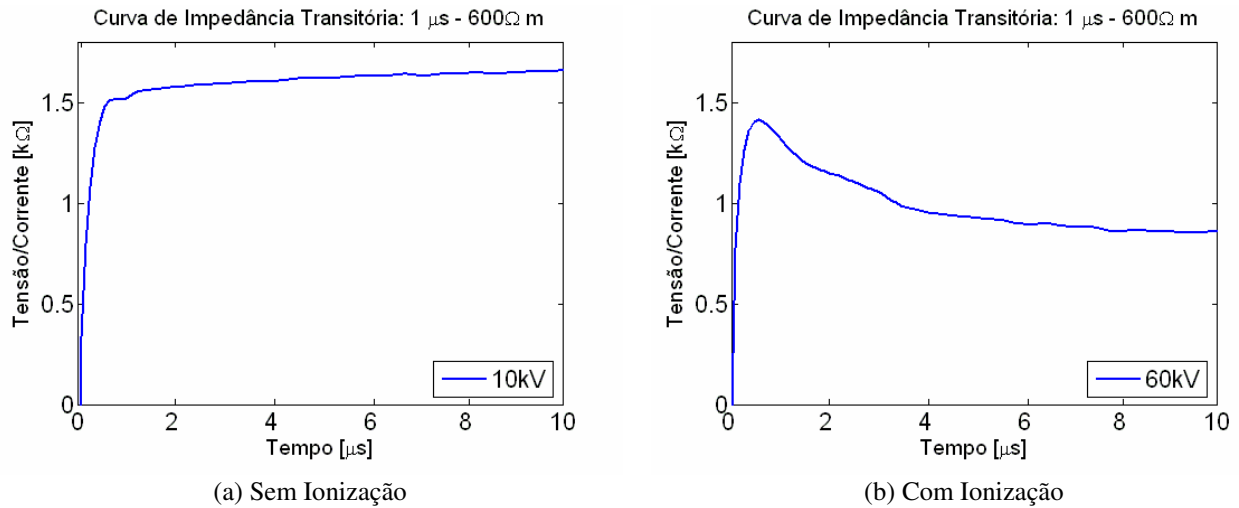


**Figura 6.21 – Curva de impedância transitória**

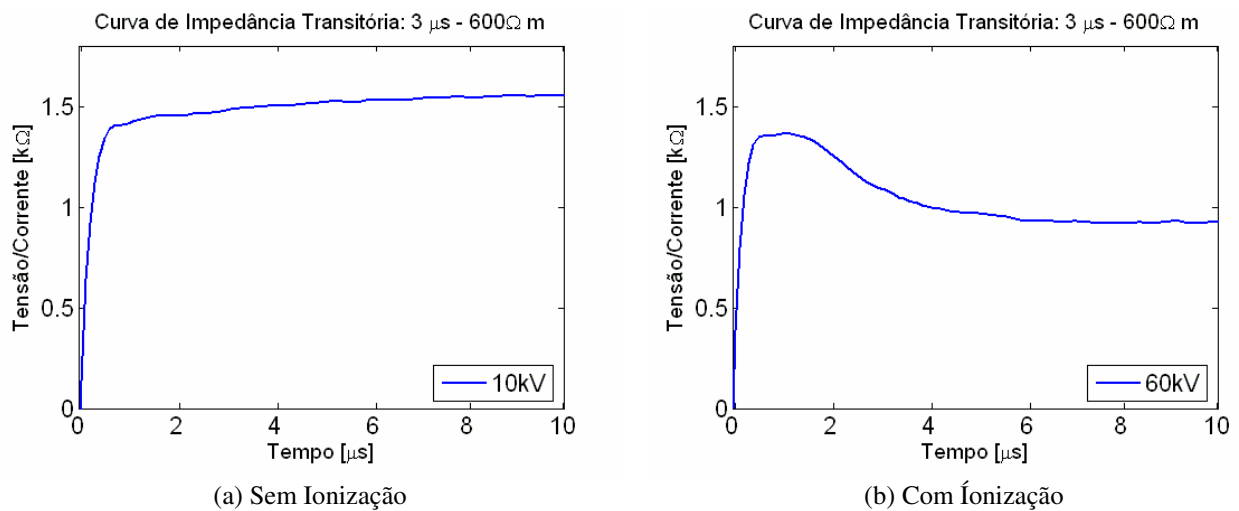


**Figura 6.22 – Curva de impedância transitória**

Nas Figuras 6.23 e 6.24 são apresentadas curvas extraídas das Figuras 6.21 e 6.22 que correspondem às condições aproximadas de ausência do efeito de ionização e de um efeito intenso de ionização, da amostra do solo tipo I para a resistividade de 600  $\Omega\text{ m}$ , para os tempos de frente de 1  $\mu\text{s}$  e 3  $\mu\text{s}$ .



**Figura 6.23 – Comparativo das curvas de impedância transitória**



**Figura 6.24 – Comparativo das curvas de impedância transitória**

Percebe-se com nitidez a ocorrência do fenômeno de ionização quando o mesmo é intenso. Entretanto, mesmo para valores relativamente reduzidos de tensão aplicada, conforme Figuras 6.21 e 6.22, verifica-se a redução contínua do valor da relação instantânea à medida que a tensão é aumentada.

Verifica-se, nas curvas de impedância transitória apresentadas ao longo do item 5.2.2 do capítulo 5, que o mesmo comportamento básico foi observado para todos os solos testados.

### 6.3.3 Avaliação do Campo Elétrico Crítico Durante a Evolução do Processo de Ionização

Essa seção tem como objetivo identificar possíveis relações entre as grandezas elétricas e geométricas envolvidas na evolução do processo de ionização, visando quantificar o campo elétrico crítico.

- **Considerações Preliminares**

Verifica-se experimentalmente que a evolução do processo de ionização na condição de campo cilíndrico (cuba coaxial) se dá com distribuição bastante não uniforme. Na realidade, tal situação acontece na forma do estabelecimento de canais ionizados que se estendem a partir do eletrodo interno no espaço entre as paredes cilíndricas metálicas à medida que o campo elétrico aumenta. Naturalmente, a densidade desses canais é bem superior na região próxima ao eletrodo interno.

É possível modelar a evolução desse efeito por meio de uma expansão da área do eletrodo interno, que pode ser computada através de um aumento do seu raio equivalente, determinado pela redução da impedância medida ao longo do processo (Visacro, 1994, Mousa, 1994). Alguns autores, ao realizar o modelamento do processo, propõem atribuir-se um valor de resistência residual para a resistividade do solo na região altamente ionizada (Liew, 1974, Liu, 2003).

Aparentemente este último modelamento carece de consistência, pois os canais ionizados têm valor de resistividade muito inferior àquela do solo circundante e, na realidade, quando se propõe o computo da extensão do potencial do eletrodo para um raio maior que o raio do eletrodo, busca-se caracterizar este raio expandido correspondente ao raio de uma região média de evolução do processo. Este tem apenas o significado de um raio equivalente.

---

Neste trabalho, adota-se o primeiro tipo de modelamento, segundo o qual se verifica qual seria o raio equivalente expandido capaz de justificar a redução dos valores de impedância medidos na prática.

Adicionalmente, procurou-se estimar qual seria o valor do campo elétrico verificado nesse raio expandido. De certa forma, este valor de campo traduz, em termos médios, um limite de evolução do processo de ionização. Parece razoável considerar este valor como o limiar de campo elétrico associado ao processo de ionização ou, equivalentemente, o campo crítico à medida que o raio equivalente da região de ionização é aumentado.

Nesta perspectiva, apresenta-se a seguir a formulação que permite determinar o raio equivalente expandido e o campo elétrico crítico associado.

- **Formulação para Cálculo do Raio Expandido e do Campo Elétrico Crítico Associado.**

A determinação do raio equivalente da região de ionização foi realizada com base na Figura 6.25, onde  $r$  é o raio expandido de ionização,  $r_i$  é o raio do eletrodo interno,  $r_e$  é o raio do eletrodo externo,  $\rho_o$  é a resistividade do solo e  $L$  é o comprimento da cuba cilíndrica.

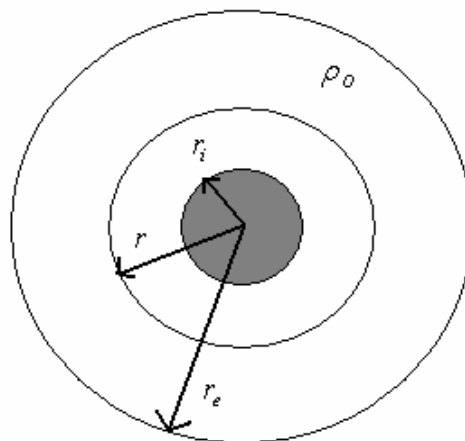


Figura 6.25: Corte transversal da cuba cilíndrica

Dependendo da área de dissipação do eletrodo e da resistividade do solo ( $\rho_o$ ), a densidade de corrente total no meio ( $J_t = J_c + J_d$ ) pode dar origem a um campo elétrico ( $E$ ) que excede a rigidez dielétrica do meio, dado por:

$$E = \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} J_T \quad (3)$$

onde  $\sigma$  é condutividade do meio,  $\omega$  a frequência angular e  $\epsilon$  a permissividade do meio. Por outro lado, por questões geométricas associadas à cuba cilíndrica, tem-se que  $J = I/A$  onde  $A = 2\pi rL$ , sendo  $A$  a superfície cilíndrica coaxial onde se deseja calcular a densidade de corrente,  $r$  o raio de tal superfície,  $L$  o comprimento axial da cuba, e  $I$  a corrente que flui entre os dois eletrodos. Assim, pode-se escrever (3) como:

$$E = \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \frac{I}{2\pi rL} \quad (4)$$

$$E = k \cdot \frac{I}{2\pi rL} \quad (5)$$

A diferença de potencial ( $v$ ) entre os eletrodos interno e externo pode ser calculada pela integração do campo elétrico ( $E$ ) ao longo de um caminho que os una. A utilização de um caminho radial facilita os cálculos.

$$v = -\int E \cdot dr \quad (6)$$

Partindo dessas definições, realizou-se a integração levando-se em conta a ausência de ionização e a ocorrência de ionização, conforme detalhado a seguir:

### • Ausência de Ionização

Na ausência de ionização, a integral de (4) pode ser resolvida tendo como limites de integração o raio interno do condutor cilíndrico externo ( $r_e$ ) e o raio da haste interna ( $r_i$ ).

$$v = -\int_{r_e}^{r_i} \frac{k.I}{2\pi r L} dr \quad (7)$$

$$v = \frac{k.I}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \quad (8)$$

Visando obter o valor da impedância entre os dois cilíndricos concêntricos  $Z_0$ , na ausência de ionização explicitou-se o valor da corrente  $I$ , obtendo-se:

$$Z_0 = \frac{v}{I} = \frac{k}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \quad (9)$$

### • Ocorrência de Ionização

Na ocorrência de ionização, a integral de (4) pode ser resolvida considerando um raio interno ( $r$ ) que, corresponde ao raio da fronteira da zona de alta ionização. Com isso,

$$v = -\int_{r_e}^r \frac{k.I}{2\pi r L} dr \quad (10)$$

$$v = \frac{k.I}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_e}{r}\right) \quad (11)$$

Visando obter o valor da impedância impulsiva  $Z_i$ , que em função do efeito de ionização é menor que  $Z_0$  explicitou-se em (11) o valor da corrente  $I$ , obtendo-se:

$$Z_i = \frac{v}{I} = \frac{k}{2\pi L} \ln\left(\frac{r_e}{r}\right) \quad (12)$$

- **Cálculo do Raio Equivalente da Região de Ionização ( $r$ )**

Obtendo-se a relação entre as impedâncias impulsivas  $Z_i/Z_0$  tem-se:

$$\frac{Z_i}{Z_0} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \Rightarrow \frac{Z_i}{Z_0} = \frac{\ln r_e - \ln r}{\ln r_e - \ln r_i} \quad (13)$$

Resolvendo (13), tem-se:

$$\ln r = \ln \left[ r_e^{\left(1 - \frac{Z_i}{Z_0}\right)} \times r_i^{\left(\frac{Z_i}{Z_0}\right)} \right] \quad (14)$$

Realizando as devidas simplificações em (14), pode-se explicitar o valor de  $r$ :

$$r = r_e^{\left(1 - \frac{Z_i}{Z_0}\right)} \times r_i^{\left(\frac{Z_i}{Z_0}\right)} \quad (15)$$

- **Cálculo do Campo Elétrico Crítico ( $E_c$ )**

Considerando-se o aumento do raio do eletrodo interno ( $r$ ), e utilizando as equações (5) e (11), o campo elétrico ( $E_c$ ) será dado por:

$$E_c = \frac{v}{r \ln\left(\frac{r_e}{r}\right)} \quad (16)$$

### 6.3.4 Aplicação da Formulação Desenvolvida

Neste item, aplica-se sistematicamente a formulação desenvolvida (3) a (16) para a determinação do campo crítico em função do raio expandido de ionização.

Inicialmente, a aplicação é apresentada para o solo I, considerando-se suas diversas resistividades. Em cada caso, são apresentadas as curvas de impedância transitória obtidas para cada resistividade do solo e as respectivas tabelas que possibilitaram relacionar o valor de campo crítico com o raio expandido, que traduz a extensão do processo de ionização.

Finalmente, a partir destas tabelas são construídos gráficos que relacionam estas duas grandezas, nos quais foram também indicados os valores de campo crítico determinados nas cubas de placas paralelas para o mesmo solo e resistividade.

Para fins de ilustração, no primeiro caso (solo I) são apresentados os resultados integrais: curvas de impedância transitória, tabela com os valores do campo crítico em função do raio expandido e os gráficos confrontando a evolução do campo crítico na condição de campo não-uniforme com o valor obtido deste campo na condição de campo uniforme. Por simplificação, para os demais solos são apresentados apenas os gráficos.

Vale comentar que nos desenvolvimentos que seguem,  $Z_0$  corresponde à impedância calculada entre os eletrodos cilíndricos na ausência de ionização. A impedância  $Z_i$  corresponde ao valor desta impedância na presença do efeito, o que significa pela abordagem adotada que é a impedância entre o eletrodo externo e a superfície cilíndrica correspondente ao raio expandido. Como esta impedância

---

varia no tempo, adotou-se nos cálculos os valores em 9  $\mu\text{s}$  como referência de cálculo.

- **Curvas ( $E_c \times r$ ) para o Solo I**

As Figuras 6.26 e 6.27 mostram as curvas de impedância transitória para vários valores de tensões aplicadas para a resistividade de 600  $\Omega\cdot\text{m}$ . Como pode ser observado, houve uma ligeira redução contínua desta impedância com o aumento da tensão aplicada, para os dois tempos de frente de onda, o que evidencia a evolução do processo de ionização.

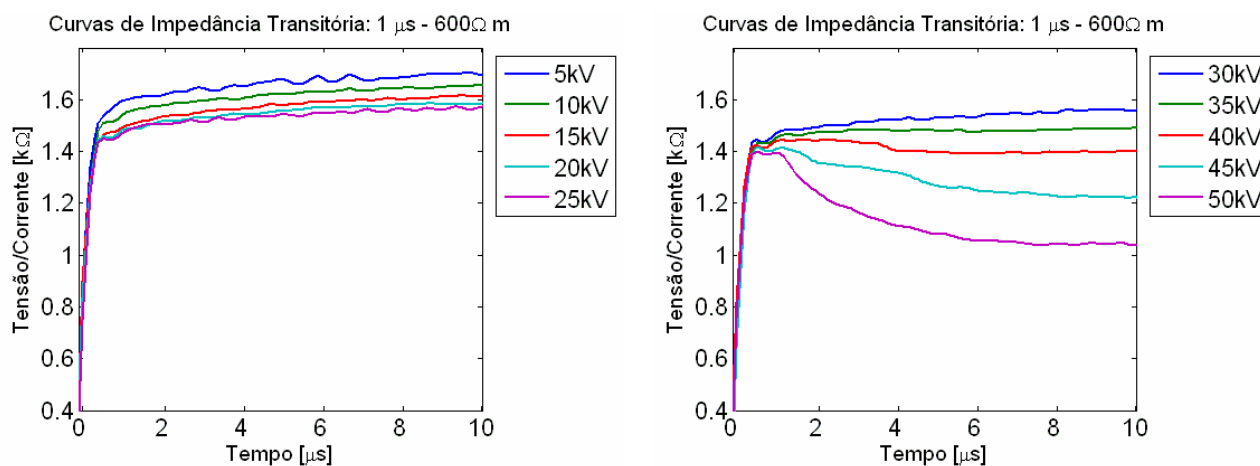


Figura 6.26 – Curvas de impedância transitória

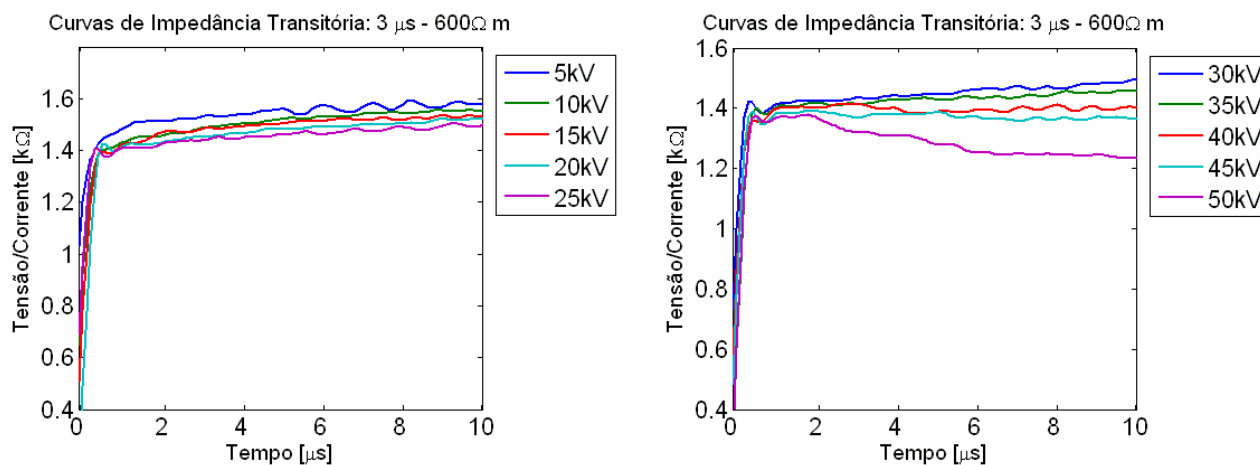
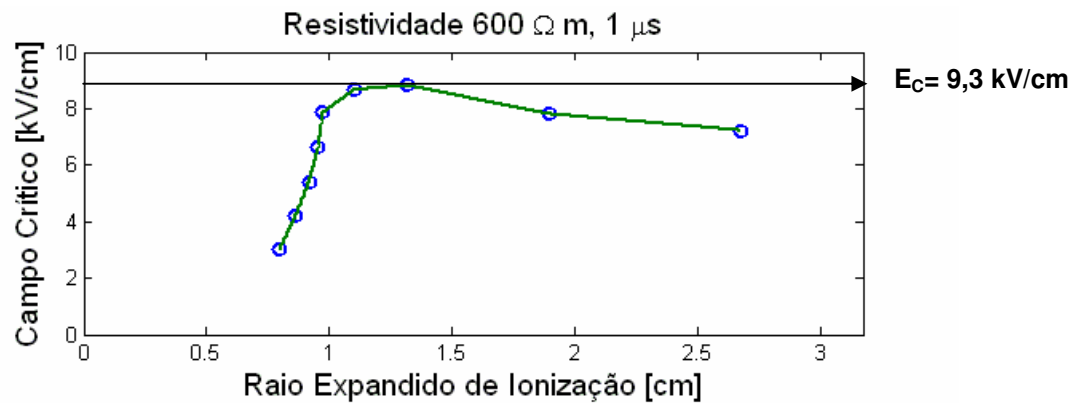


Figura 6.27 – Curvas de impedância transitória

Para cálculo do raio expandido da região ionizada ( $r$ ) e do campo crítico ( $E_c$ ), foram empregados as equações (15) e (16) respectivamente, sendo geradas as tabelas e curvas indicadas a seguir.

**Tabela 6.4:** Valores obtidos de campo elétrico e raio expandido de ionização para  $Z_0 = 1,70 \text{ k}\Omega$ .

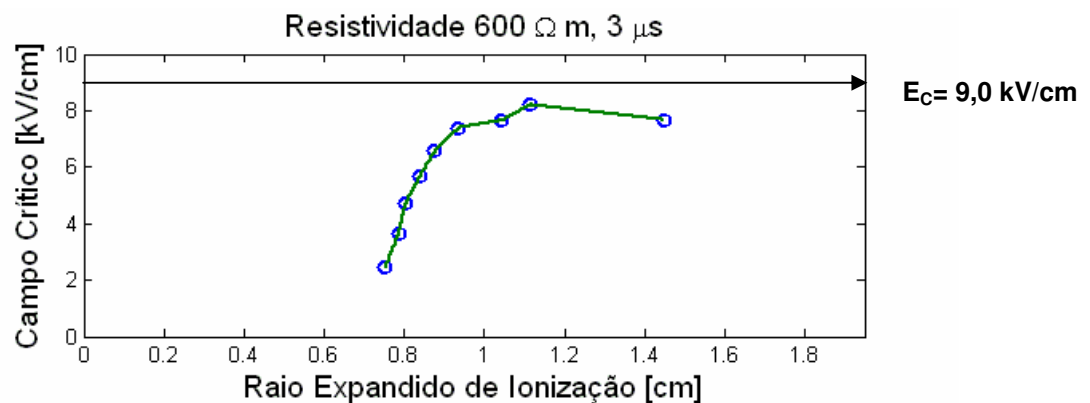
$Z_i$ [k $\Omega$ ]	1,65	1,61	1,58	1,56	1,55	1,49	1,40	1,22	1,05
$r$ [cm]	0,80	0,86	0,92	0,95	0,97	1,10	1,31	1,90	2,67
$E_c$ [kV/cm]	3,12	4,22	5,38	6,63	7,87	8,66	8,82	7,80	7,23



**Figura 6.28:** Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

**Tabela 6.5:** Valores obtidos de campo elétrico e raio expandido de ionização para  $Z_0 = 1,57 \text{ k}\Omega$ .

$Z_i$ [k $\Omega$ ]	1,55	1,53	1,52	1,50	1,48	1,45	1,40	1,37	1,25
$r$ [cm]	0,75	0,78	0,80	0,84	0,88	0,94	1,04	1,11	1,45
$E_c$ [kV/cm]	2,44	3,63	4,70	5,70	6,58	7,39	7,65	8,20	7,67



**Figura 6.29:** Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

Os resultados para as resistividades de 350 e 250  $\Omega \cdot m$  são apresentados a seguir.

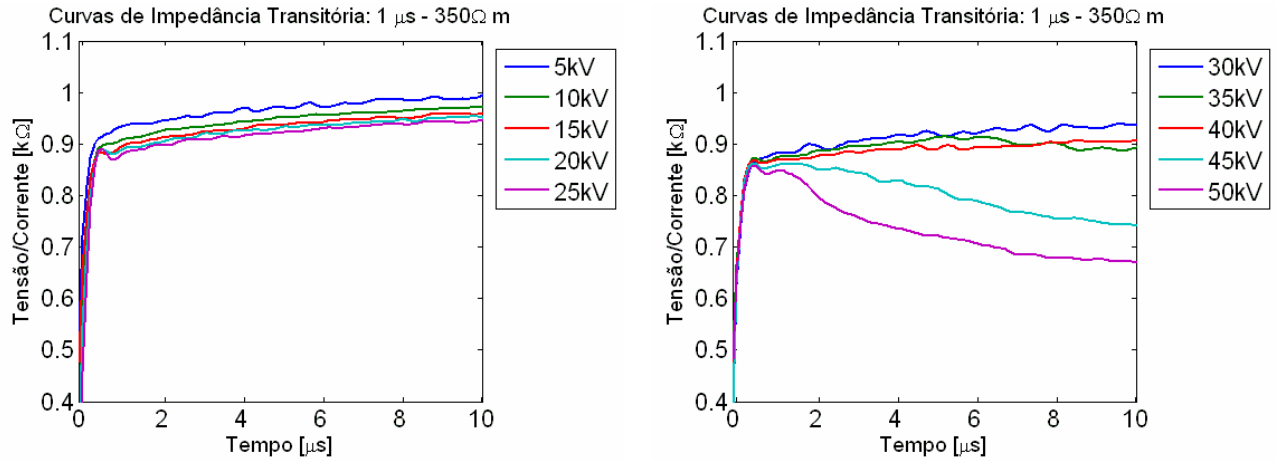


Figura 6.30 – Curvas de impedância transitória

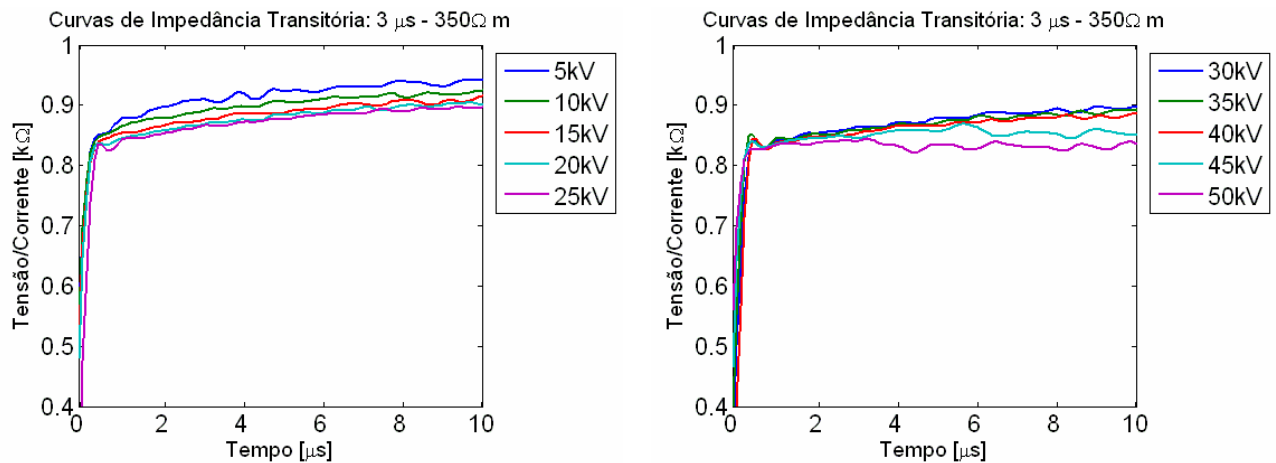


Figura 6.31 – Curvas de impedância transitória

Tabela 6.6: Valores obtidos de campo elétrico e raio expandido de ionização para  $Z_0 = 0,99 k\Omega$ .

$Z_i$ [ $k\Omega$ ]	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,90	0,89	0,75	0,68
$r$ [cm]	0,77	0,80	0,83	0,86	0,89	0,98	1,02	1,65	2,11
$E_c$ [kV/cm]	2,81	4,13	5,46	6,74	7,84	8,56	9,52	7,75	7,48

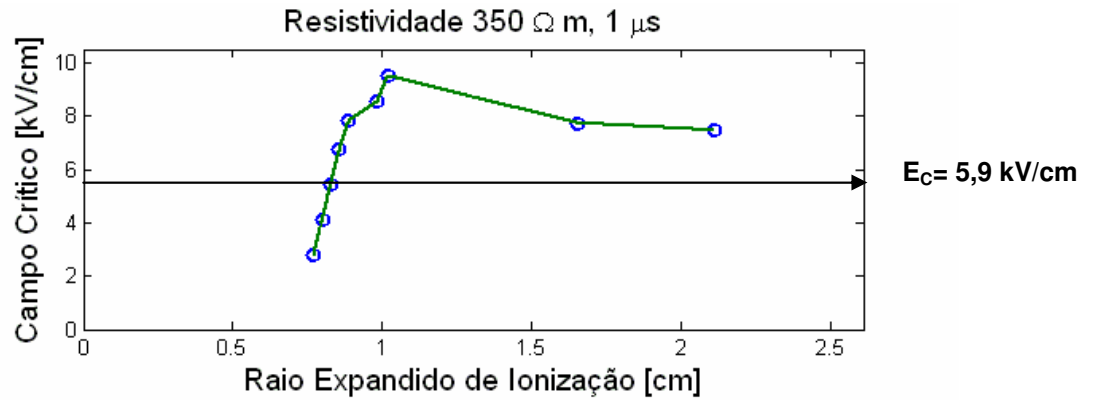


Figura 6.32: Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

Tabela 6.7: Valores obtidos de campo elétrico e raio de ionização para  $Z_0 = 0,93 \text{ k}\Omega$ .

$Z_i$ [k Ω]	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,83
$r$ [cm]	0,75	0,77	0,80	0,83	0,86	0,90	0,93	0,97	1,04
$E_r$ [kV/cm]	2,14	3,06	3,92	4,68	5,44	6,22	6,97	7,58	7,97

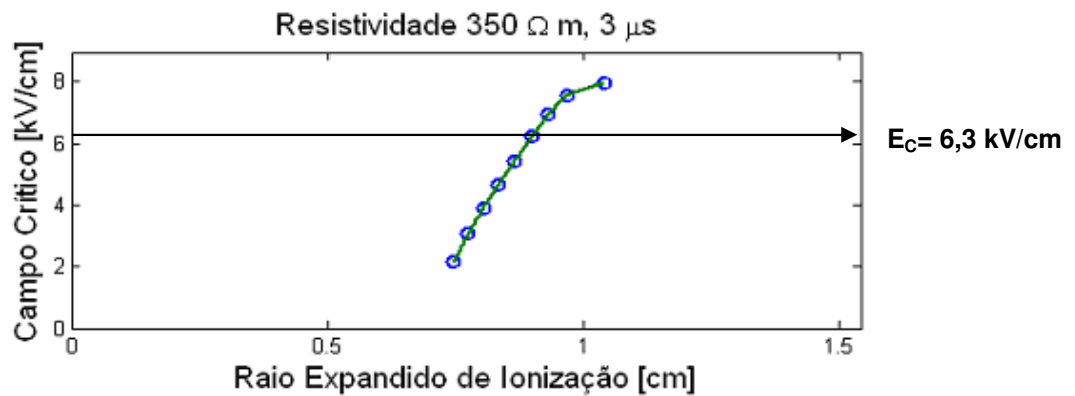


Figura 6.33: Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

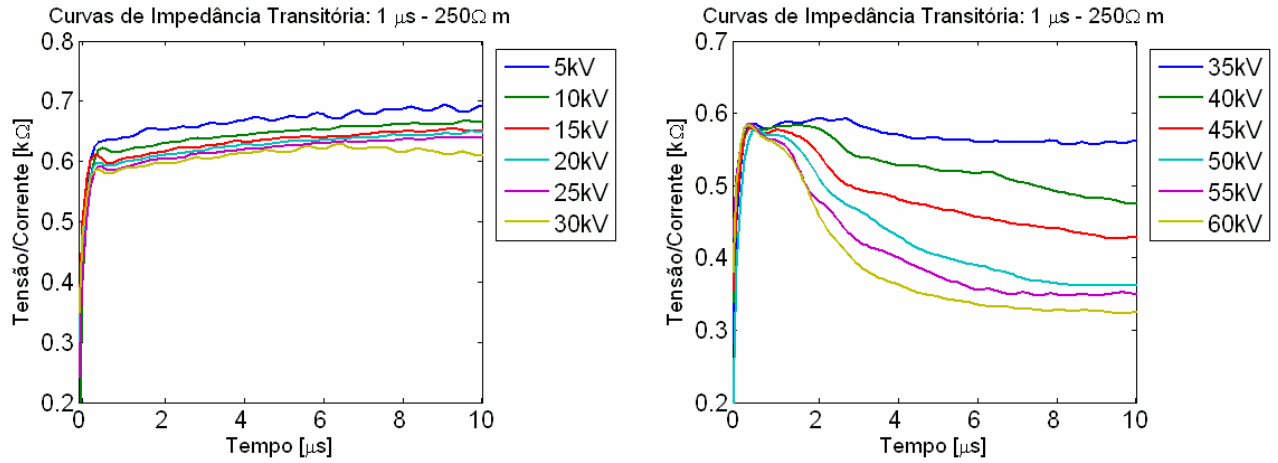


Figura 6.34 – Curvas de impedância transitória

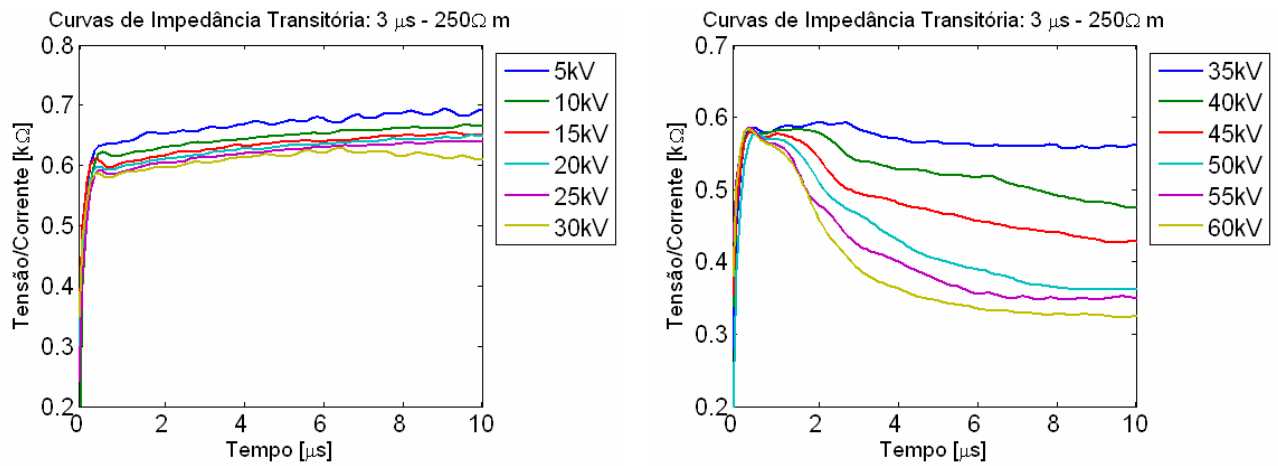


Figura 6.35 – Curvas de impedância transitória

Tabela 6.8: Valores obtidos de campo elétrico e raio expandido de ionização para  $Z_0 = 0,69 \text{ k}\Omega$ .

$Z_i$ [k $\Omega$ ]	0,66	0,65	0,64	0,63	0,61	0,56	0,48	0,43	0,36	0,35	0,33
$r$ [cm]	0,84	0,88	0,92	0,97	1,07	1,37	2,04	2,62	3,71	3,90	4,31
$E_c$ [kV/cm]	2,32	3,46	4,67	5,55	6,11	6,03	5,47	5,35	4,98	5,36	5,59

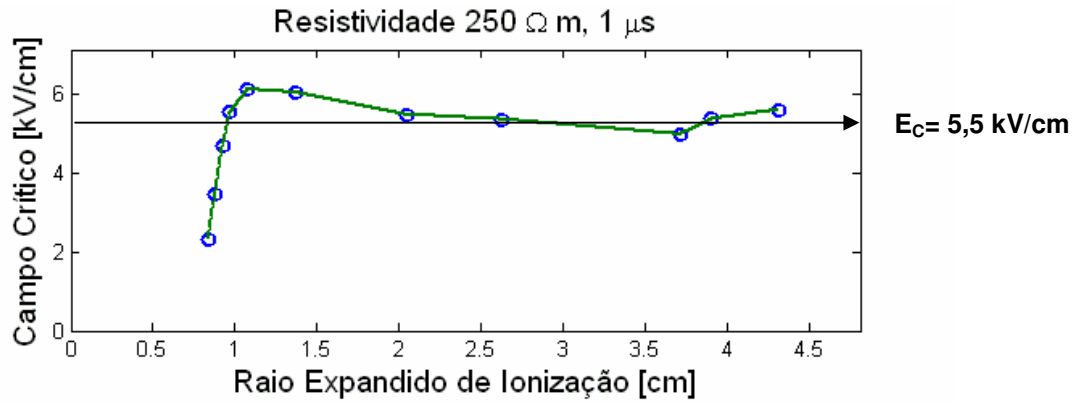


Figura 6.36: Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

Tabela 6.9: Valores obtidos de campo elétrico e raio expandido de ionização para  $Z_0 = 0,68 \text{ k}\Omega$ .

$Z_i$ [kΩ]	0,66	0,65	0,64	0,63	0,61	0,56	0,48	0,43	0,36	0,35	0,33
$r$ [cm]	0,80	0,84	0,88	0,93	1,02	1,32	1,97	2,54	3,62	3,81	4,21
$E_r$ [kV/cm]	1,55	2,20	2,86	3,52	3,84	3,73	3,39	3,23	2,98	3,20	3,34

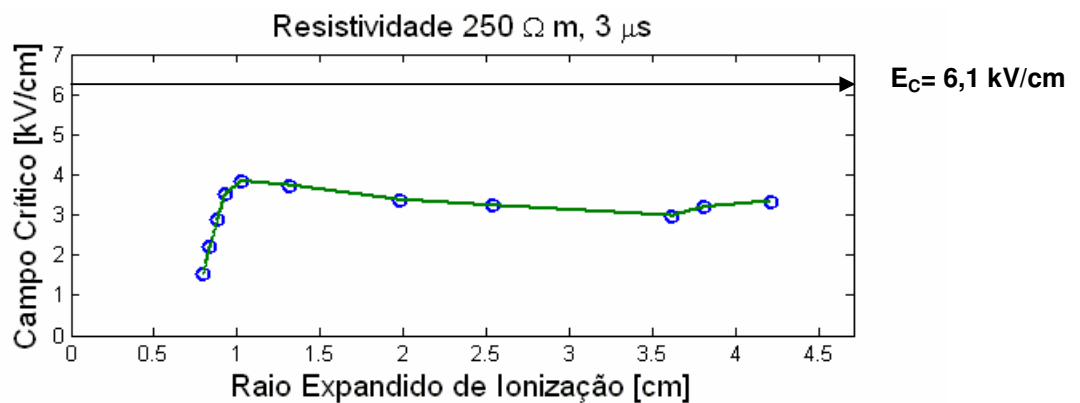


Figura 6.37: Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

Os resultados referentes ao solo I em termos de curvas  $E_c \times r$  nas diferentes resistividades são agrupadas num gráfico único para fins de análise comparativa em função do campo elétrico crítico e do raio expandido da região de ionização. Os conjuntos de gráficos referentes aos tempos de frente de  $1 \mu\text{s}$  e  $3 \mu\text{s}$  são apresentados nas figuras 6.39 e 6.40, respectivamente.

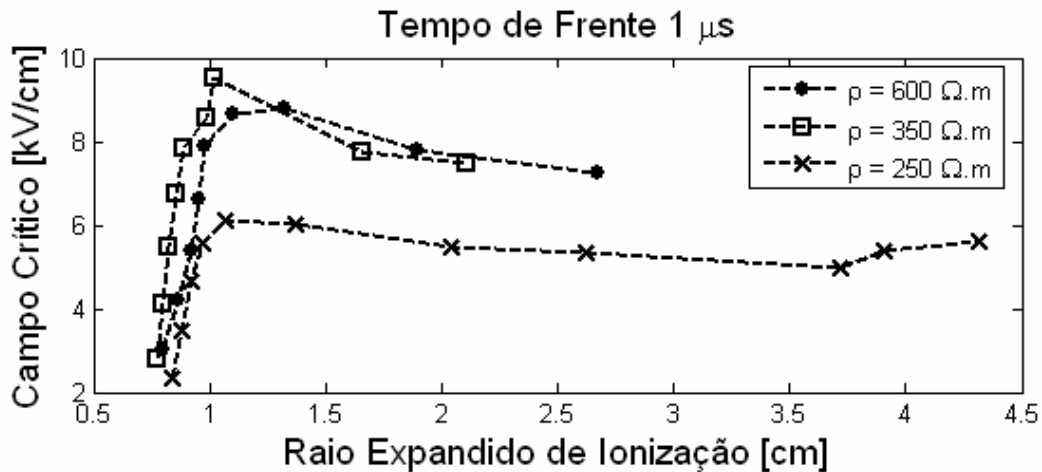


Figura 6.39: Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

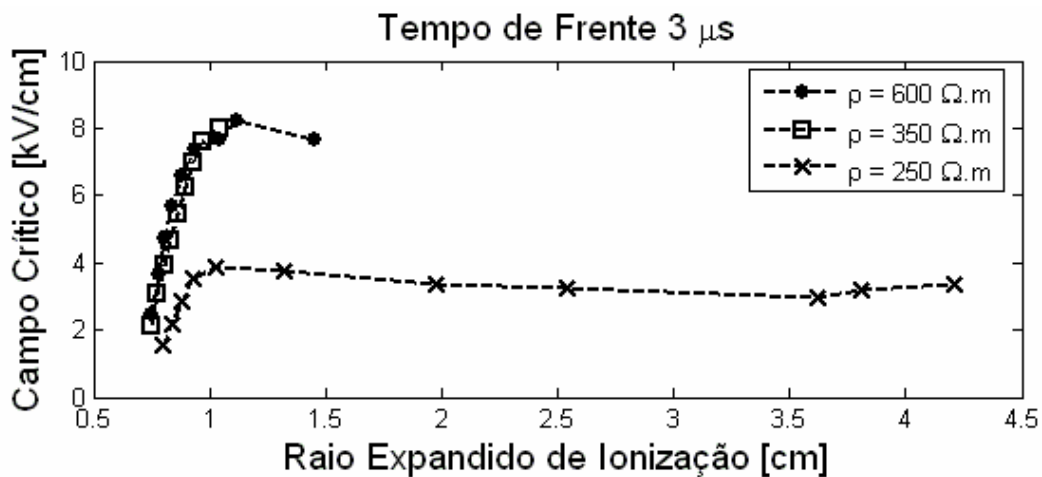


Figura 6.40: Campo elétrico em função do raio expandido ( $E_c \times r$ )

Para o solo em questão, tem-se uma indicação clara de que o campo crítico é muito reduzido no início do processo, que ocorre próximo ao raio do condutor, e, à medida que o processo evolui, vai tendo seu valor aumentado significativamente. Este aumento contínuo indica que o campo elétrico crítico estimado para a configuração cilíndrica (campo não-uniforme) tende a se aproximar, em ordem de

grandeza, do valor do campo crítico obtido para a configuração de placas paralelas (condição de campo uniforme ).

Tal procedimento se verifica para todas as resistividades, como mostram as curvas das Figuras 6.39 e 6.40 para as três resistividades do solo I. Este comportamento parece indicar que a não-homogeneidade do solo é responsável por uma redução muito significativa do campo crítico do material. Isto poderia estar associado ao fato de que as partículas do solo (de composição não homogênea) estariam alterando a distribuição de campo nas proximidades do eletrodo de forma muito significativa, fornecendo os meios para que o processo de ionização se estabeleça para valores de campo aplicado bem inferior ao campo crítico nas condições de campo uniforme.

A seguir são apresentados curvas relacionando o campo crítico com o raio expandido para os solos II, III e IV em suas diversas resistividades, para aplicação de tensão de  $1 \mu\text{s}$  e  $3 \mu\text{s}$ .

- **Curvas ( $E_c \times r$ ) para o Solo II**

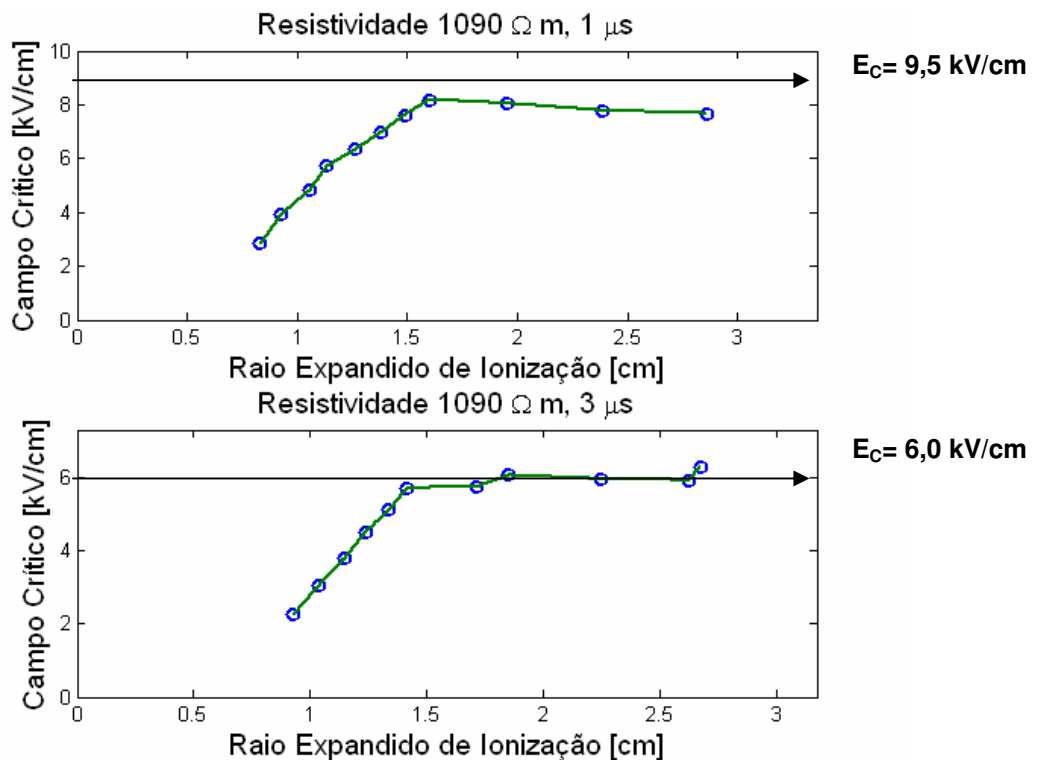


Figura 6.41: Campo elétrico em função do raio expandido

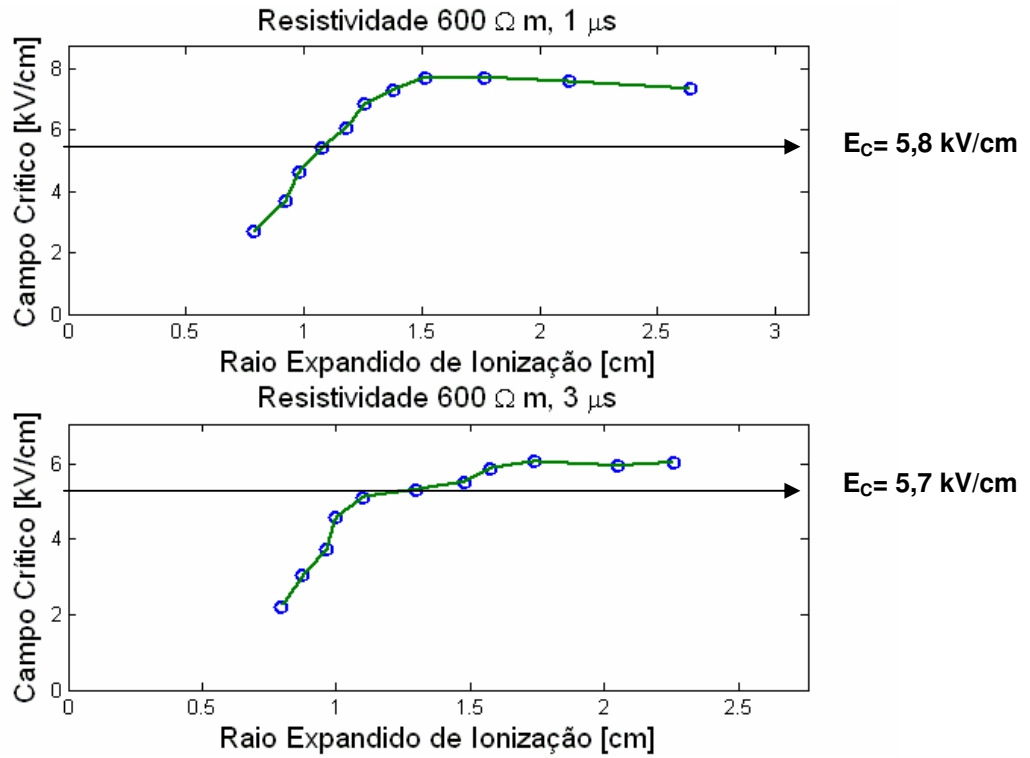


Figura 6.42: Campo elétrico em função do raio expandido

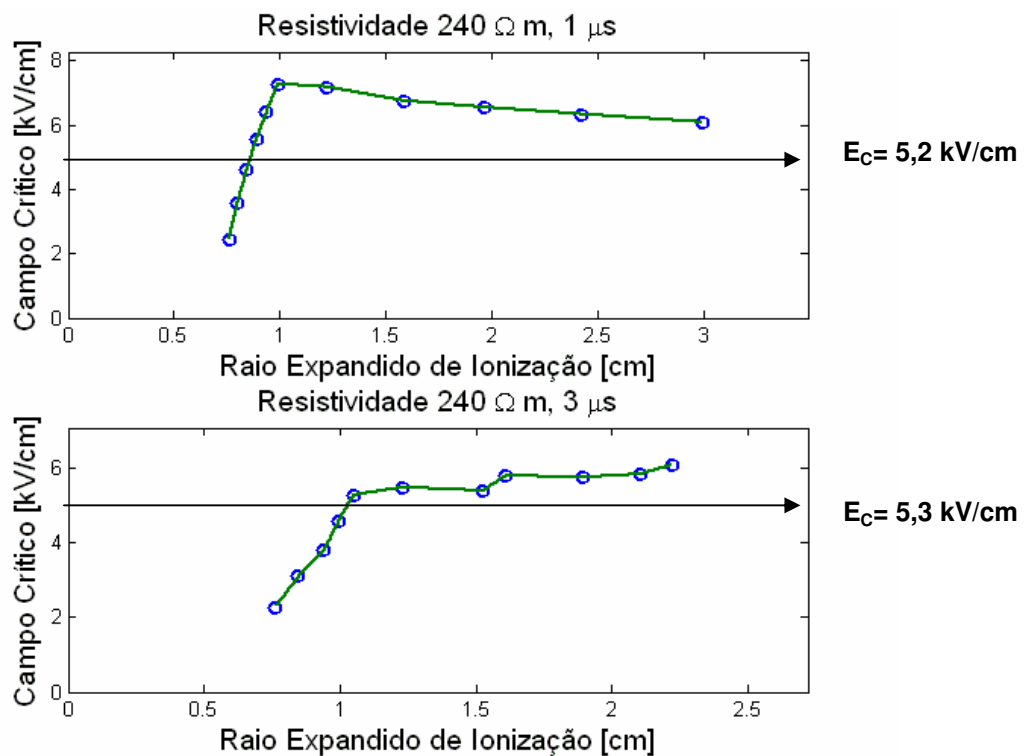


Figura 6.43: Campo elétrico em função do raio expandido

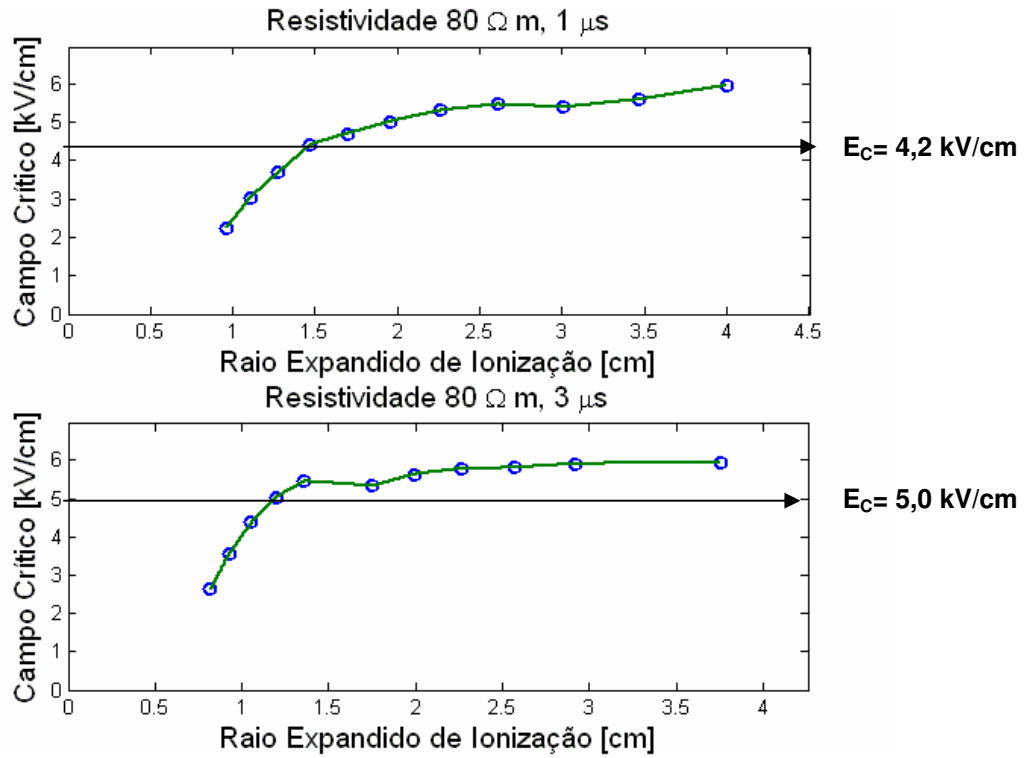


Figura 6.44: Campo elétrico em função do raio expandido

- **Curvas ( $E_c \times r$ ) para o Solo III**

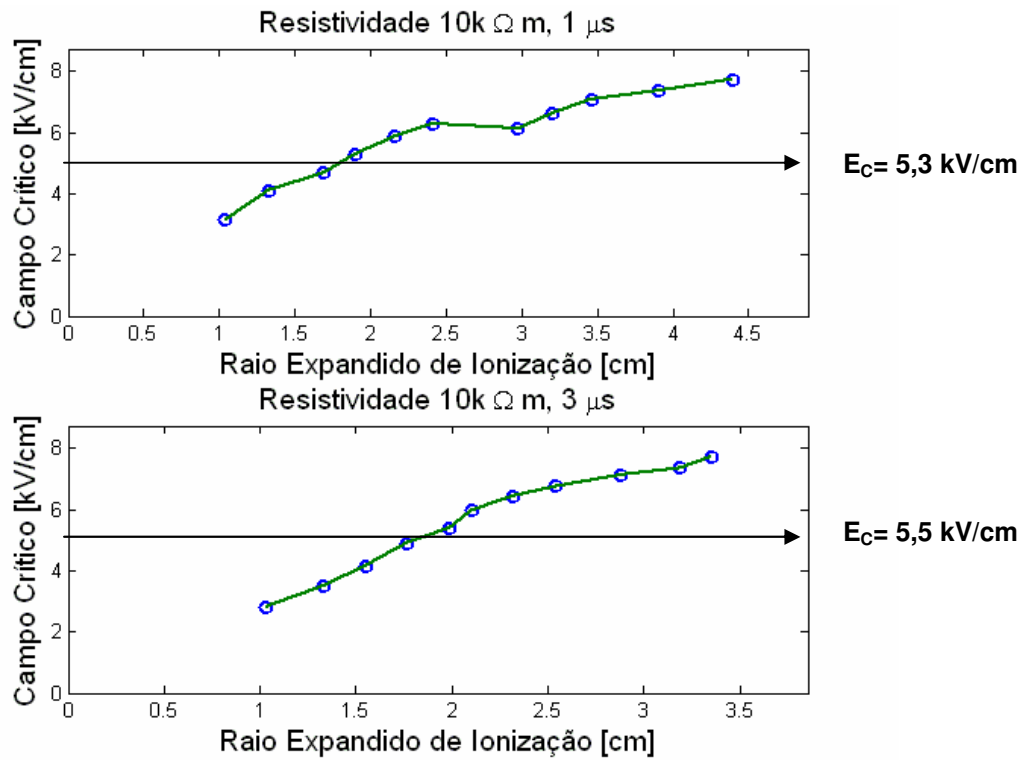


Figura 6.45: Campo elétrico em função do raio expandido

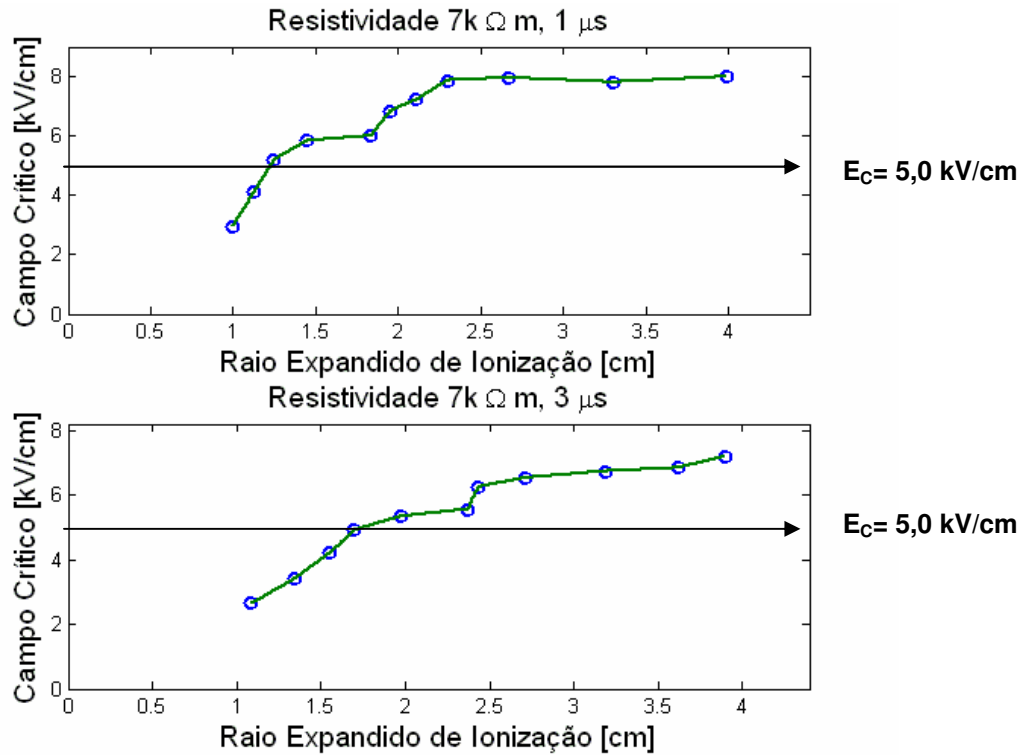


Figura 6.46: Campo elétrico em função do raio expandido

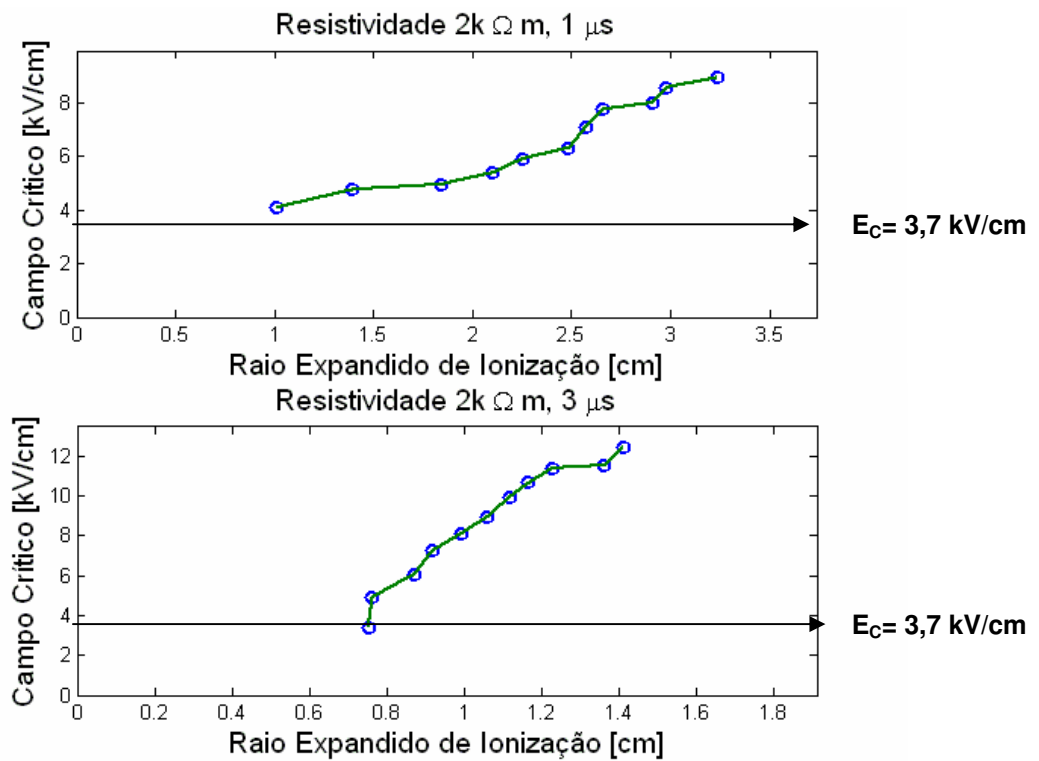


Figura 6.47: Campo elétrico em função do raio expandido

• **Curvas ( $E_c \times r$ ) para o Solo IV**

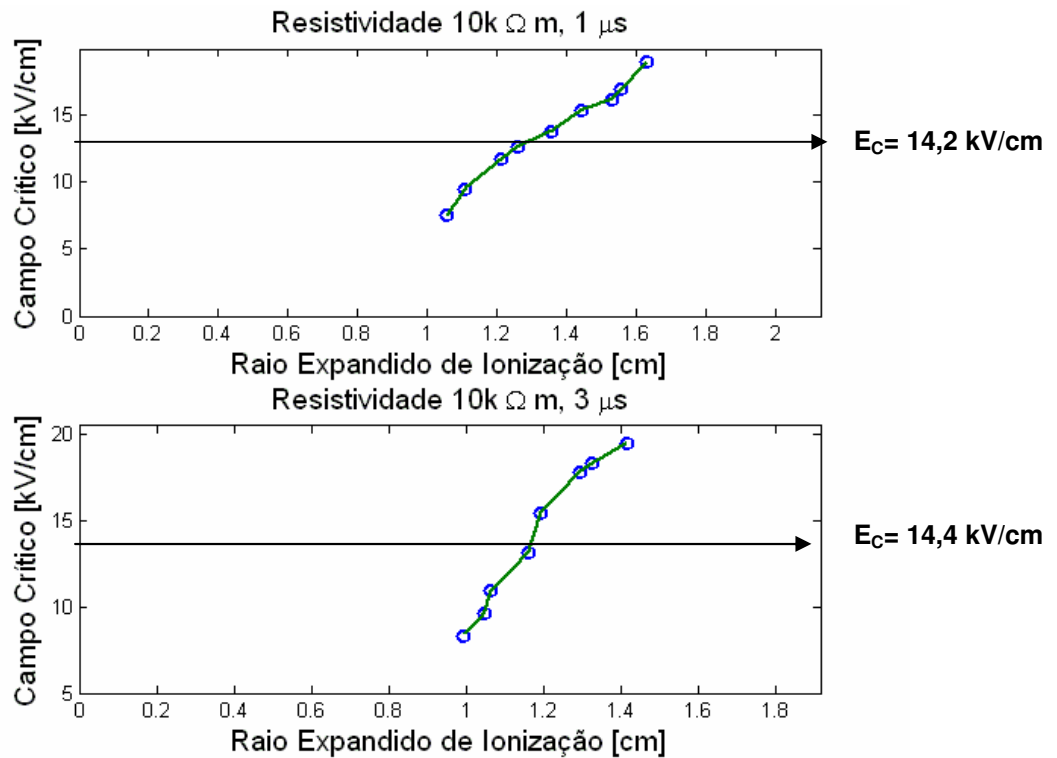


Figura 6.48: Campo elétrico em função do raio expandido

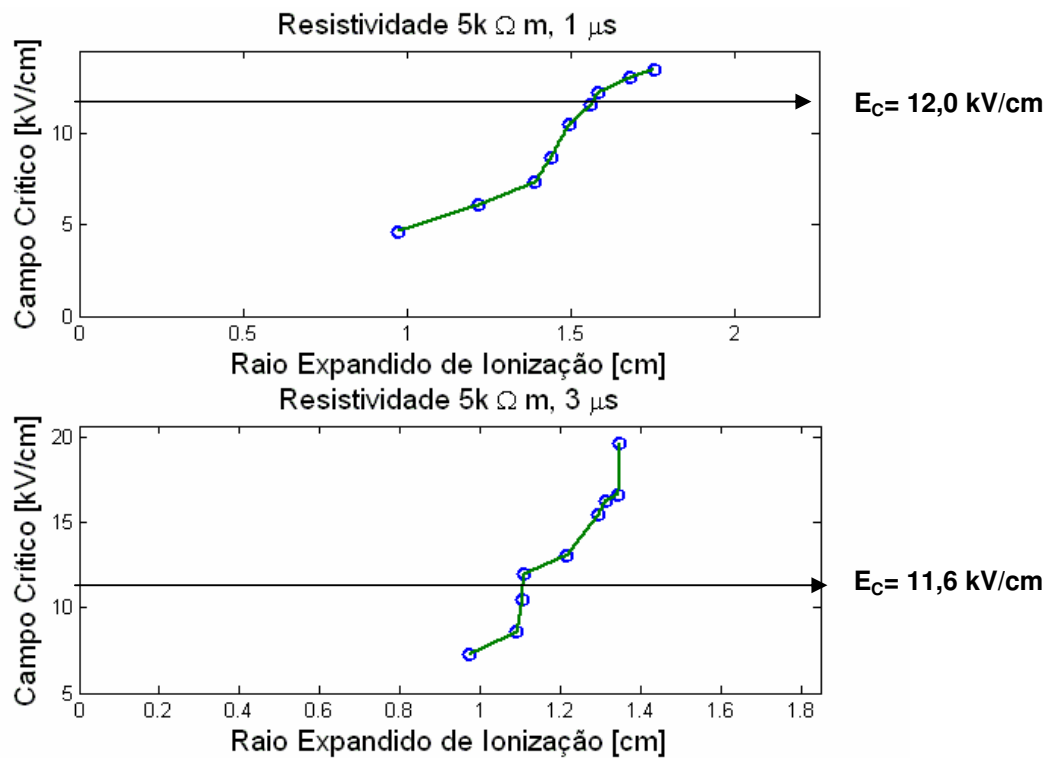


Figura 6.49: Campo elétrico em função do raio expandido

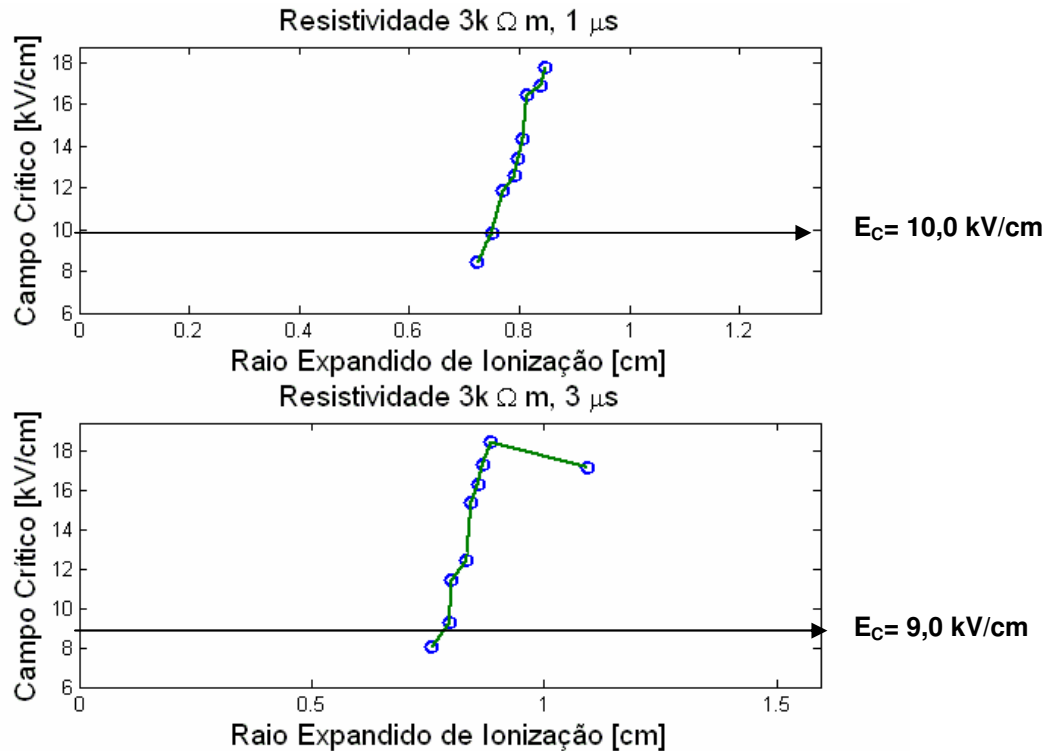


Figura 6.50: Campo elétrico em função do raio expandido

De forma geral, verifica-se para todos os solos as tendências descritas para o solo I.

Percebe-se, a partir dos resultados obtidos, que o valor do campo crítico é muito reduzido para um raio próximo ao do condutor interno, tendo ordem de grandeza em torno de 3,0 kV/cm, como sugerido por diversos autores (Mousa, 1994, Gonos, 2004, Nor, 2006, 2007). O valor é bem inferior àquele obtido por Oettlé, (1988b) na faixa de 8.0 kV/cm. Contudo, à medida que o processo evolui (aumento do raio expandido), nota-se que este limiar tende a crescer assumindo a ordem de grandeza na faixa indicada por Oettlé, que obteve seus resultados sobretudo para campo uniforme (eletrodos paralelos).

Uma exceção à regra são os solos muito úmidos (encharcados), quando o campo crítico uniforme torna-se muito reduzido, possivelmente pela existência de filetes de água conectando as placas, como o solo III em todos os casos e o solo IV nos dois últimos casos.

---

A influência da não-uniformidade do campo parece nítida. Quanto menor o raio, menor o campo crítico, o que é comprovado pelos experimentos de Loboda (1996). Tal comportamento denota que o processo de ionização tende a se iniciar com valores reduzidos de campo crítico, mas com sua evolução (expansão do raio equivalente) passam a ser requeridos valores mais elevados de campo crítico para a continuidade da evolução. Esse comportamento tem implicação prática importante.

Primeiramente, mostra que, de fato, o processo de redução da impedância equivalente se inicia para valores reduzidos de campo crítico, da ordem daqueles sugeridos usualmente na literatura em torno de 3,0 kV/cm. Porém o processo não evolui com a mesma intensidade prevista quando se admite o valor do campo crítico constante. Portanto, a redução da impedância não alcança as expectativas indicadas a partir de tal hipótese, quando se consideram correntes muito intensas.

Em termos práticos, a redução inicial da impedância de aterramento principia efetivamente para os valores de densidade corrente indicados na literatura. Mas para as densidades de correntes mais elevadas, tal redução é bem menor que as expectativas, pois a evolução do processo requer valores de campo crítico bem mais elevados, tendendo para aqueles indicados por Oettlé.

---

### 6.3.5 Valores de Referência para Campos Críticos encontrados na Literatura

Para fins de referência, são indicados na tabela 6.10 os valores de campo crítico adquiridos por vários trabalhos experimentais publicados na literatura, que fizeram uso de configuração cilíndrica.

Tabela 6.10 – Quadro comparativo dos valores de campo crítico

Referências	Tipos de Testes	$\rho$ [ $\Omega$ .m]	$E_c$ [kV/cm]	Comentários
Bellaschi	Campo	75-300	1,2-4,2	Configuração utilizada: Hastes enterradas verticalmente no solo.
Liew e Darveniza	Campo	50-300	0,5-3,0	Configuração utilizada: Hastes enterradas verticalmente no solo.
Mousa	Campo	100-5000	3,0-4,0	Configurações utilizadas: Hastes enterradas verticalmente no solo
Loboda e Scuka	Laboratoriais	40-2000	2,0-10,0	Configuração utilizada: Geometria cilíndrica.
Mohamad Nor	Laboratoriais	40-2000	2,0-10,0	Configuração utilizada: Geometria cilíndrica.
Gonos e Stathopoulos	Laboratoriais	1000-1300	3,5-13,0	Configuração utilizada: Geometria cilíndrica.
Deste trabalho	Laboratoriais	80-10000	2,3-14,0	Configuração utilizada: Geometria cilíndrica.

Os valores de campo elétrico crítico obtidos em testes de campo com hastes verticais, na faixa de 1,2 a 4,9 kV/cm, são compatíveis com os valores encontrados neste trabalho, quando se considera o campo crítico próximo ao raio do eletrodo interno.

Particularmente, foi observado no trabalho laboratorial de Loboda (1996) que o valor do campo crítico cresceu com o aumento do raio do eletrodo interno, tal qual no caso do raio expandido.

Os dois últimos trabalhos (Nor e Gonos), a despeito de indicarem a mesma faixa de campo crítico encontrados neste trabalho, utilizam uma metodologia questionável para cálculo de  $E_c$  (campo médio na condição de ruptura total).

Para complementar, são apresentados os resultados encontrados por Oettlé para uma configuração esférica, conforme tabela 6.11.

**Tabela 6.11 – Valores de campo crítico obtidos por Oettlé**

<b>Referências</b>	<b>Tipos de Testes</b>	$\rho$ <b>[<math>\Omega</math>.m]</b>	$E_c$ <b>[kV/cm]</b>	<b>Comentários</b>
Oettlé	Laboratoriais	570-690	8,0-10,0	Configuração utilizada: Geometria esférica.

Nota-se que os valores são bastante elevados, na mesma faixa de valores encontrados nas medições da cuba de placas paralelas.

# 7 Conclusões

## 7.1 Considerações

O presente trabalho teve como objetivo a investigação do comportamento de amostras de solo frente a correntes impulsivas, representativas de correntes de descargas atmosféricas, com vistas à avaliação da dinâmica do fenômeno de ionização do solo.

Para tal, foi realizada uma série de testes laboratoriais, nos quais foram injetadas correntes impulsivas de diferentes intensidades e tempos de frente variáveis em quatro tipos de solo. Foram utilizadas duas configurações básicas de cubas para a realização dos ensaios com as amostras de solo, uma de placas paralelas e outra de condutores coaxiais (cilíndrica).

De posse dos resultados experimentais obtidos, foram desenvolvidas análises físicas, nas quais buscou-se identificar de que forma os diversos parâmetros presentes poderiam estar associados ao fenômeno de ionização como, o campo elétrico crítico.

## 7.2 Conclusões

As análises dos resultados deste trabalho permitiram desenvolver um conjunto de conclusões principais, organizados nos itens seguintes.

---

- **Condição de Campo Uniforme no Solo (Configuração Placas Paralelas)**

Dos resultados obtidos nos testes com a cuba de placas paralelas foram desenvolvidas três tipos de análises respectivamente, à determinação do campo elétrico crítico, à análise da influência do valor da resistividade no valor deste campo e à determinação do tempo de ruptura.

Com relação ao campo elétrico crítico, verificou-se que, de uma forma geral, os resultados obtidos experimentalmente neste trabalho na condição de campo uniforme têm ordem de grandeza semelhante aos encontrados por Oettlé (1988b), que realizou testes do mesmo tipo. Verificou-se ainda que os campos elétricos críticos são muito superiores aos valores encontrados em cubas coaxiais.

Para todos os solos estudados e suas diferentes resistividades, os resultados deste trabalho mostram a nítida tendência do crescimento do campo elétrico crítico com o aumento da resistividade do solo, como indicado nas Figuras 6.5 a 6.8.

Com relação ao tempo de ruptura, existe na literatura uma discussão acerca do tempo requerido para que o efeito de ionização do solo se estabeleça. Em seu trabalho Oettlé (1988b), definiu um tempo mínimo de 5  $\mu$ s como referência para caracterizar o campo elétrico capaz de romper a rigidez dielétrica da amostra do solo. Aparentemente, por tal motivo, alguns autores interpretaram que este seria o tempo mínimo requerido para que o processo de ionização tivesse início. O presente trabalho mostra que o tempo de ruptura tem natureza aleatória, ou seja, para um mesmo solo e tomando-se diferentes valores de resistividades, observa-se a ocorrência da ruptura em instantes distintos de tempo, tanto inferiores quanto superiores a 5  $\mu$ s. Em alguns casos, o processo tem início em tempos inferiores a 1  $\mu$ s. Tal resultado mostra que a hipótese adotada por certos autores de um tempo mínimo de inepção do processo em torno de 5  $\mu$ s é equivocada.

- **Condição de Campo Não Uniforme no Solo. (Configuração. Cilíndrica)**

Na configuração de cuba coaxial foram desenvolvidos três tipos de análises, que levaram a algumas conclusões interessantes.

A análise de curvas  $V_{xI}$ , obtidas a partir dos registros de tensões e correntes medidas em laboratório para cada amostra do solo, possibilitou caracterizar os diversos estágios da ocorrência do fenômeno de ionização. Com uma densidade de corrente no solo bastante reduzida, não se verifica a ocorrência do processo de ionização. Assim a curva  $V_{xI}$  (Figura 6.17) se inicia com inclinação reduzida e retorna pela parte superior, segundo a reta  $R_{bf}$ . Este comportamento é típico de um circuito RC paralelo. Quando o processo tem início, a curva  $V_{xI}$  (Figura 6.18) mostra os primeiros efeitos de ionização, devido ao aumento da densidade de corrente. Em situações de alta densidade de corrente, como mostrado na Figura 6.19, o processo de ionização é intenso, o que causa um deslocamento para baixo da curva de retorno, fazendo com que a curva tenda a retornar a origem pela parte inferior. Este traçado fica semelhante a um “oito inclinado”. Vale ressaltar que o comportamento das curvas obtidas possui aspectos diferentes para os tipos distintos de solo, possivelmente em função dos valores específicos de permissividade e condutividade elétrica de cada solo.

Duas outras análises, a partir das curvas de impedância transitória, buscaram quantificar a evolução do processo de ionização. Verificou-se experimentalmente, que a evolução desse processo na condição de campo cilíndrico (cuba coaxial) se dá com distribuição bastante não uniforme.

Na primeira análise, foi possível modelar a evolução desse efeito através de uma expansão da área do eletrodo interno, que pode ser computada através de um aumento do seu raio expandido, determinado pela redução da impedância medida ao longo do processo.

Na segunda análise, estimou-se o valor do campo elétrico verificado nesse raio expandido, que traduz, em termos médios, um limite de evolução do processo

---

---

de ionização. Considera-se razoável adotar este valor como o limiar de campo elétrico associado ao processo de ionização ou, equivalentemente, como o campo crítico para o raio equivalente da região de ionização.

A conclusão mais relevante deste trabalho decorreu da análise do comportamento do campo elétrico crítico em função do raio expandido e da comparação com o campo crítico determinado para a condição de campo uniforme: *“o processo de ionização tende a se iniciar com valores reduzidos de campo crítico (na faixa de 2,0 kV/cm), em decorrência da não uniformidade do campo, como indicado na literatura para os testes com hastes enterradas (Tabela 6.10). Entretanto, com a evolução do processo (expansão do raio equivalente) passam a ser requeridos valores mais elevados de campo crítico para a continuidade da evolução do processo e, à medida que este raio é aumentado, o valor de campo crítico se aproxima em ordem de grandeza dos valores determinados em condições de campo uniforme”*. Este é o aspecto original deste trabalho, não relatado na literatura.

Por outro lado, este resultado tem implicação prática importante, pois indica que o processo de ionização tem início realmente para valores reduzidos de campo e, portanto, valores reduzidos de amplitude de corrente injetada no eletrodo. Porém, não se pode assumir o valor de campo crítico como constante, já que à medida que a ionização se expande este valor cresce para uma ordem de 4 a 5 vezes maior.

Na prática isto implica uma redução de impedância de aterramento bem inferior àquela que ocorreria se o valor de campo crítico fosse mantido constante, como é assumido comumente na literatura. Em outras palavras, o efeito de ionização é menos significativo do que usualmente se supõe.

---

---

### 7.3 Propostas de Continuidade

Sugere-se, para continuidade deste trabalho, que sejam contemplados alguns itens de investigação complementar:

- Avaliação da evolução do campo elétrico crítico para diferentes valores do eletrodo interno de aterramento, para comparação com os valores de raios expandidos calculados neste trabalho;
  - Desenvolvimento de uma modelagem computacional levando-se em conta a dinâmica do fenômeno de ionização do solo, observada neste trabalho que inclui a variação do campo crítico com a evolução do processo.
-

# 8 Referências Bibliográficas

BELLASCHI, P. L., “**Impulse and 60-cycle Characteristics of Driven Grounds**”, AIEE Transactions, Vol.60, p.123-128, março, 1941.

BELLASCHI, P. L., ARMINGTON, R. E., SNOWDEN, A. E., “**Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds - II**”, AIEE Transactions, Vol.61, p.349-363, 1942.

BELLASCHI, P. L., ARMINGTON, R. E., “**Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds - III**”, AIEE Transactions, Vol.62, p.334-345, 1943.

GONOS, I. F., STATHOPOULOS, I. A., “**Soil Ionisation Under Lightning Impulse Voltages**” IEE Proc.-Sci Meas. Technol., Vol 151, No. 5, setembro, 2004.

KUFFEL, E., ZAENGL, W. S., “**High-Voltage Engineering: Fundamentals**”, São Paulo, Pergamon Editora, 2000.

LIEW, A. C., DARVENIZA, B. E., “**Dynamic Model of Impulse Characteristic of Concentrated Earths**”, Proc IEEE, Vol 121, No2, fevereiro, 1974.

LIU, Y., THEETHAYI, N., GONZALEZ, R. M., THOTTAPPILLIL, R., “**The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results**”, IEEE, 2003.

---

---

LOBODA, M., POCHANKE, Z., **“Current and Voltage Distribution in Earthing. A Numerical Simulation Based on the Dynamic Model of impulse Soil Conductivity”**, 20<sup>th</sup> ICLP Proceedings, Interlaken, Suíça, p. 3.13P, setembro, 1990.

LOBODA, M., POCHANKE, Z., **“A Numerical Identification of Dynamic Model Parameters of Surge Soil Conduction Based on Experimental Data”**, 21<sup>st</sup> ICLP Proceedings, Berlin, p. 139-143, setembro, 1992.

LOBODA, M., SCUKA, V., **“On The Transient Characteristics of Electrical Discharges and Ionization Processes in Soil”**, 23<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection Proceedings, Itália, p.539-544, setembro, 1996.

MOUSA, A. M., **“The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9, No. 3, julho, 1994.

NBR 6936 – **“Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta-Tensão”**, abril, 1992.

NOR, M. N., SRISAKOT, S., GRIFFITHS, H., HADDAD, A., **“Characterisation of Soil Ionisation Under Fast Impulse”**, 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, p. 417-422, setembro, 2000.

NOR, M. N., **“Review: Soil Electrical Characteristics Under High Impulse Currents”**, Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 48, p. 826-829, novembro, 2006.

NOR, M. N., IDRIS, N. A., AHMAD H., **“Electrical Properties of Dry Soil Under High Impulse Currents”**, Journal of Electrostatics, Vol. 65, p. 500-5005, julho, 2007.

OETTLÉ, E. E., **“The Impulse Response of Concentrated Earth Electrodes in the Absence of Soil Ionization Processes”**, NEERI Internal Report I ELEK 210, Janeiro, 1986.

---

---

OETTLÉ, E. E., "**A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes**", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 3, No. 4, p. 2020-2029, outubro, 1988a.

OETTLÉ, E. E., "**The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil**", The Transactions of the SA Institute of Electrical Engineers, p. 63-70, dezembro, 1988b.

VISACRO, S. F., SOARES, A. J., "**Sensitivity Analysis for the Effect of Lightning Current Intensity on the Behavior of Earthing Systems**", XXII-ICLP Proceedings (International Conference on Lightning Protection) Budapest, setembro, 1994.

VISACRO, S. F., "**Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents**", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.22, p.381 - 386, 2007.

VISACRO, S. F., "**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**". São Paulo, Artliber Editora, 2005.

VISACRO, S. F., "**Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**". São Paulo, Artliber Editora, 2002.

VISACRO, S. F., "**Curso Básico de Teoria Eletromagnética**" fevereiro, 1996.

VISACRO, S., Rosado G., "**Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: an Experimental Evaluation**", accepted for publication on IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Junho, 2008.

---