



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

MARIA ALICE DE OLIVEIRA RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE NOVAS CONCEPÇÕES DE
MALHAS DE ATERRAMENTO**

Campina Grande, Paraíba
Março de 2012

MARIA ALICE DE OLIVEIRA RODRIGUES

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE NOVAS CONCEPÇÕES DE
MALHAS DE ATERRAMENTO

*Dissertação apresentada à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Elétrica*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Março de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R696a Rodrigues, Maria Alice de Oliveira.
Avaliação do desempenho de novas concepções de malhas de aterramento/ Maria Alice de Oliveira Rodrigues. - Campina Grande, 2012.
81f. : il., color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.
Orientador: Prof. D.Sc. Edson Guedes da Costa.
Referências.

1. Resistência - Engenharia Elétrica. 2. Sistemas de Aterramento. 3. Impulso de Corrente. I. Título.

CDU 621.3.028(043)

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
16-08-12	1724-2012
doação	

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE NOVAS CONCEPÇÕES DE MALHAS
DE ATERRAMENTO

MARIA ALICE DE OLIVEIRA RODRIGUES

Dissertação Aprovada em 14.03.2012



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Componente da Banca



TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO - 2012

AGRADECIMENTOS

Ao professor Edson Guedes da Costa, cujos ensinamentos, orientações, incentivo e paciência foram de vital importância para a elaboração desta dissertação.

A minha mãe, Maria das Dores, e minhas tias pelo apoio constante e pela paciência, principalmente no início e ao final do trabalho (os momentos mais difíceis).

A todos os professores, técnicos, amigos e colegas da graduação e da pós-graduação do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pois todos contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho. Em especial aos alunos Luís Gustavo, Filipe Lucena e Valdemir Brito por serem sempre tão prestativos, e a aluna Malone Soares, companheira de muitos ensaios. E em especial ao professor George Lira pela ajuda com os experimentos e pelos conselhos, e ao professor Tarso Vilela pela ajuda com a análise dos resultados e pelos muitos conselhos.

Ao amigo cubano Ignat Pérez por toda a ajuda durante os meses em que estive no LAT/UFCG.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Referência em Controle e Automação (LARCA) da UFCG pelas conversas e pelo incentivo.

Ao professor Gelmires de Araújo Neves do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da UFCG, e também aos seus alunos pela ajuda, fornecendo materiais vitais a esta dissertação.

A Carmem Terezinha Becker, meteorologista da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AES/A) e ao Senhor Jailton da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela ajuda, fornecendo dados vitais a esta dissertação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

As aplicações dos sistemas de aterramento em sistemas elétricos de potência exigem baixos valores de resistência de aterramento em baixa frequência, da ordem de alguns Ohms. Se o solo apresenta resistividade elevada, os eletrodos convencionais não permitem alcançar o valor especificado de resistência, ou o fazem a um custo muito elevado. Na tentativa de minimizar os efeitos das altas resistividades do solo, reduzindo os valores das resistências de aterramento através de alternativas simples e práticas, este trabalho busca um novo sistema de aterramento, com comportamento resistivo semelhante ou inferior, quando comparado com os sistemas de aterramento convencionais formados por hastes de cobre nu, e que seja minimamente afetado pelas variações de umidade do solo. Duas novas concepções de sistemas de aterramento, com o uso de hastes envolvidas em concreto e hastes envolvidas em concreto com bentonita como aditivo, foram desenvolvidas. Os novos sistemas de hastes de aterramento terão seu desempenho avaliado com medições periódicas da resistência de aterramento e também com a aplicação impulsos de corrente de várias intensidades. Os resultados das medições de resistência de aterramento mostraram que as hastes concretadas dependem da acomodação do solo circunvizinho para a estabilização dos valores de resistência de aterramento em baixa frequência. Os ensaios de impulso de corrente mostraram que as hastes concretadas, com e sem bentonita, apresentam comportamento semelhante à haste convencional (nua). A tensão de passo, sempre apresentou valores bem abaixo dos limites máximos permitidos, no entanto as tensões de toque foram superiores aos limites máximos permitidos, no tempo. Houve uma redução substancial nos valores da impedância impulsiva de aterramento para hastes concretadas com e sem bentonita, com o aumento da tensão de carregamento, conseqüentemente, com o aumento da tensão estabelecida nos terminais das hastes. Todas as hastes concretadas suportaram aos esforços produzidos pelas altas correntes sem apresentar rupturas na estrutura de concreto.

Palavras-chave: sistemas de aterramento, resistência de aterramento, impulso de corrente, concreto, bentonita.

ABSTRACT

The grounding of an electrical system is essentially an electrical connection to the ground, where the value of grounding resistance represents the effectiveness of this connection: the lower the resistance, the better the grounding. Some applications require low values of grounding resistance, about a few ohms, even if the area available for electrodes placement is small. If the soil has high resistivity, conventional electrodes cannot achieve the specified resistance value, and even if it does, the cost would be very high. In an attempt to minimize the effects of the high resistivity of the soil, reducing the values of grounding resistance through a simple and practical alternative, will be sought a new grounding system that, with lower earthing resistance, independent of changes in moisture levels soil compared to the conventional grounding system formed by bare copper rods. Two new designs of grounding systems were developed using rods involved in concrete and rods involved in concrete with bentonite as an additive. The new systems of ground rods will have its performance assessed by applying current impulses of various intensities and with periodic measurements of grounding resistance at low frequency. Concreted rods depend on accommodation of surrounding soil to stabilize the values of grounding resistance at low frequencies. The impulse tests showed that the concreted rods, with and without bentonite, behavior is similar to that of the conventional copper rod. The touch voltages were higher than the maximum allowable limits. In the other hand and the step voltage, always showed values below the maximum allowed. There was a substantial reduction in the impulsive impedance values for concreted rods with and without bentonite, by increasing the charging voltage thereby to increasing the voltage established at the terminals of the rods. All the concreted rods supported the efforts produced by the high currents without presenting breaks in the concrete structure.

Keywords: grounding systems, grounding resistance, current impulse, concrete, bentonite.

SUMÁRIO

Sumário	vi
1 Introdução	12
2 Revisão Bibliográfica	15
2.1 Técnicas de Melhoria na Resistência de Aterramento	15
2.2 O Concreto e sua Utilização em Aterramento	21
2.3 A Bentonita e sua Utilização em Aterramento	26
3 Material e Métodos	30
3.1 Material	30
3.2 Métodos	34
3.2.1 Medições de Resistividade do Solo e de Resistência de Aterramento	34
3.2.2 Ensaios com Aplicação de Impulsos de Corrente	37
3.2.2.1 Hastes Envolvidas em Molde Metálico	39
3.2.2.2 Hastes Fincadas no Solo	40
3.2.3 Análise da Impedância Impulsiva e dos Potenciais de Toque e de Passo	40
3.2.4 Análise da Suportabilidade da Estrutura de Concreto aos Impulsos de Corrente	42
4 Resultados e Análises	43
4.1 Medições de Resistividade do Solo e de Resistência de Aterramento	43
4.2 Aplicação dos Impulsos de Corrente	49
4.2.1 Hastes Envolvidas em Molde Metálico	49
4.2.2 Hastes Fincadas no Solo	51
4.2.2.1 Análise das Hastes Isoladas	51
4.2.2.2 Análise das Malhas	62
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	72
5.1 Conclusões	72
5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros	74
5.3 Trabalhos Publicados	74
6 Referências Bibliográficas	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Materiais utilizados na confecção dos sistemas de aterramento a serem desenvolvidos: (a) cabo de cobre nu, (b) haste de aço cobreada, (c) conector tipo grampo e (d) conector tipo olhal (Faraday Pára-Raios).	30
Figura 2. Fotografias dos moldes utilizados: (a) molde metálico (ferro) (54 mm); (b) detalhe do aterramento do molde; (c) tubo de PVC e (d) isopor utilizado como proteção no interior de ambos os moldes.	31
Figura 3. Hastes concretadas desenvolvidas: (a) esboço (b) fotografia de uma das hastes concretadas.	32
Figura 4. Fotografias retiradas durante a construção de uma das malhas triangulares.	34
Figura 5. Fotografia do terrômetro e seus acessórios.	35
Figura 6. Disposição das hastes isoladas no terreno.	36
Figura 7. Disposição das malhas triangulares no terreno.	36
Figura 8. (a) Fotografia do gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.	38
Figura 9. Arranjo do gerador de impulsos de corrente que será utilizado nos ensaios.	38
Figura 10. Precipitação na cidade de Campina Grande (PB) entre os meses de Jul/2011 e fev/2012, temperatura e URA (Fonte: AESA – Paraíba e EMBRAPA - Paraíba).	43
Figura 11. Estratificação do solo realizada pelo software TecAt Plus.	44
Figura 12. Curvas de variação da resistência em baixa frequência ao longo do tempo, para as hastes isoladas.	47
Figura 13. Curvas de variação da resistência em baixa frequência ao longo do tempo, para as malhas triangulares.	48
Figura 14. Fotografia de uma das hastes concretadas no interior do molde metálico.	49
Figura 15. Comportamento de tensão e corrente para a haste concretada L1-2 para um impulso típico com tensão de carregamento de 10 kV.	50
Figura 16. Fotografia de ruptura na estrutura de concreto em uma das hastes concretadas.	51

Figura 17. Tensões e correntes para um impulso típico, com tensão de carregamento de 40 kV, aplicado nas hastes: nua, L6-1, L6-2, L7-3 e L8-1 (a) tensões; (b) correntes.	53
Figura 18. Tensões máximas estabelecidas em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.	55
Figura 19. Curvas do potencial de toque máximo permitido, no tempo, e da tensão estabelecida na haste L6-1.	57
Figura 20. Curvas de variação da impedância impulsiva para cada nível de tensão de carregamento aplicado, para as hastes isoladas.	60
Figura 21. Formas de onda das correntes para a haste L7-3 para impulsos aplicados com tensões de carregamento de 10, 35 e 60 kV.	62
Figura 22. Tensões e correntes para um impulso típico, com tensão de carregamento de 40 kV, aplicado nas malhas triangulares: com hastes nuas, com hastes sem bentonita e com hastes com bentonita (a) tensões; (b) correntes.	63
Figura 23. Tensões máximas estabelecidas em cada malha triangular, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.	65
Figura 24. Curvas do potencial de toque máximo permitido, no tempo, e da tensão estabelecida na malha concretada com bentonita.	67
Figura 25. Curvas de variação da impedância impulsiva para cada nível de tensão de carregamento aplicado, para as malhas triangulares.	69
Figura 26. Formas de onda das correntes para a malha triangular com hastes concretadas sem bentonita para impulsos aplicados com tensão de carregamento de 10, 35 e 60 kV.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição das hastes concretadas desenvolvidas.	33
Tabela 2. Medição de resistividade do solo realizada com o terrômetro digital.	44
Tabela 3. Valores medidos de resistência de aterramento em baixa frequência, para as hastes isoladas.	45
Tabela 4. Valores medidos de resistência de aterramento em baixa frequência, para as malhas triangulares.	47
Tabela 5. Correntes máximas estabelecidas em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.	54
Tabela 6. Tempos de cauda da onda de tensão para as hastes isoladas.	56
Tabela 7. Limites de potenciais de segurança (potencial de passo).	58
Tabela 8. Potenciais de passo verificados para as hastes isoladas.	59
Tabela 9. Impedância impulsiva de aterramento determinada para as hastes isoladas.	59
Tabela 10. Correntes máximas estabelecidas em cada malha triangular, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.	64
Tabela 11. Tempos de cauda da onda de tensão para as malhas triangulares.	66
Tabela 12. Potenciais de passo verificados para as malhas triangulares.	68
Tabela 13. Impedância impulsiva determinada para as malhas triangulares.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ARRA	Agente Redutor de Resistência de Aterramento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
LAT	Laboratório de Alta Tensão
MEF	Método dos Elementos Finitos
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE SÍMBOLOS

Z_P	Impedância impulsiva de aterramento
V_P	Tensão de pico desenvolvida pelo impulso de corrente
I_P	Corrente de pico desenvolvida pelo impulso de corrente
k	Constante relacionada à energia de choque elétrico, tolerada por um percentual da população com uma determinada massa corpórea
ρ_s	Resistividade superficial do solo
t	Tempo (em segundos) da duração do choque elétrico
h	Profundidade das hastes no solo
ρ	Resistividade elétrica

1 INTRODUÇÃO

O aterramento adequado de um sistema de energia elétrica é de fundamental importância para que o sistema elétrico possa operar corretamente, garantindo a continuidade do serviço, o desempenho eficiente do sistema de proteção e mantendo os potenciais dentro de limites de segurança para as pessoas e para os equipamentos. Para as subestações de energia e torres de linhas de transmissão, um dos objetivos principais dos sistemas de aterramento é fornecer caminhos para que um impulso de corrente, com grande valor de pico possa fluir para a terra, e evitar o aumento dos potenciais no solo superiores a limites de segurança (Tao *et al.*, 2008).

Segundo Visacro Filho (2002), um sistema de aterramento elétrico consiste basicamente de uma ligação elétrica intencional de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou quaisquer corpos metálicos) ao solo. Ele se constitui de três componentes:

- As conexões elétricas que ligam os eletrodos ao ponto do sistema que se deseja aterrar;
- Eletrodos de aterramento (geralmente, hastes de cobre nu);
- Terra que envolve os eletrodos.

A resistência de aterramento pode ser entendida como a resistência da terra circunvizinha aos eletrodos. Uma vez que é medida por instrumentos que normalmente empregam um sinal de frequência abaixo de 1 kHz, essa resistência comumente usada é conhecida como a resistência de baixa frequência (Visacro Filho & Rosado, 2009). O valor da resistência de aterramento depende basicamente da resistividade do solo nas adjacências dos eletrodos e da sua geometria (dimensões, forma, número de hastes, posicionamento relativo e espaçamento), visto que a geometria tem influência na distribuição da corrente provinda dos eletrodos (Visacro Filho, 2002). Para um mesmo eletrodo de aterramento, quanto maior a resistividade do solo, maior, será a resistência de aterramento do eletrodo (Leite & Pereira Filho, 2007).

Embora não exista uma relação simples entre a resistência do sistema de aterramento e a corrente máxima de choque elétrico a que uma pessoa pode ser exposta,

a necessidade de uma baixa resistência é muito mais frequente do que o contrário. Além disso, no caso de dispositivos de aterramento de torres de linhas de transmissão as resistências de baixo valor garantem o bom funcionamento dos relés de proteção, em alta velocidade (Kostic *et al.*, 1999). Falhas causadas por descargas atmosféricas são a ameaça mais grave para os sistemas de potência. Elas comprometem a coordenação de isolamento e colocam em risco os equipamentos de potência. É sabido que uma diminuição na resistência de aterramento das torres resulta em uma redução considerável de interrupções causadas pelas descargas atmosféricas.

Vários métodos de diminuição da resistência de aterramento de sistemas de aterramento têm sido propostos para melhorar o desempenho desses sistemas, inclusive sob os efeitos das descargas atmosféricas. Trabalhos como os de Fagan & Lee (1970), Nor, (2006 A e B), Tu *et al.* (2006), Visacro Filho (2007) e Visacro Filho & Rosado (2009) podem ser citados. Exatamente porque, em muitos casos, não é possível alcançar valores de resistência de aterramento baixos, principalmente em condições de solo seco e/ou de resistividade elevada (como os solos encontrados em grande parte da região nordestina, no Brasil e no mundo).

A consolidação de uma solução alternativa aos sistemas de aterramento tradicionais se justifica pela substituição por um sistema mais eficiente e minimamente afetado pela variação da umidade do solo. Uma das técnicas de tratamento físico do solo, que apresenta resultados muito satisfatórios em terrenos secos, faz uso de concreto envolvendo as hastes de cobre. O concreto apresenta valor relativamente reduzido de resistividade. A melhoria da resistência de aterramento com a utilização de hastes concretadas se deve a capacidade do concreto de reter água e de aumentar a área de contato entre a malha e o solo. Além disso, a utilização do concreto contribui para a fixação do eletrodo ao solo e protege o mesmo contra a corrosão.

Uma outra prática comum em solos de alta resistividade é utilizar um material para reduzir a resistividade do solo, em torno dos eletrodos de aterramento (tratamento químico do solo). Desse modo, o material emula um aumento da superfície de contato dos o tamanho efetivo dos eletrodos e assim, reduz a resistência de aterramento. Um tratamento com material contendo sais é normalmente usado. No entanto, os sais corroem o eletrodo de aterramento e também se diluem no solo ao redor do eletrodo, afetando adversamente o meio ambiente (Yamane *et al.*, 1990). Sendo assim, materiais redutores da resistência de aterramento alternativos e/ou novas técnicas menos elaboradas e dispendiosas são desejáveis.

A bentonita é um material quimicamente menos agressivo do que os sais e é largamente utilizada em sistemas de aterramento como agente redutor de resistência. Ela tem as propriedades de absorver facilmente a água, reter a umidade, ser boa condutora de eletricidade, possuir baixa resistividade e não ser corrosiva (Kindermann & Campagnolo, 1995). A sua grande vantagem é não alterar as suas características com o passar dos anos. A concentração maior de umidade se estende inclusive ao solo adjacente à bentonita, o que resulta em uma significativa redução da resistividade do solo, justamente na região que é crítica para definição do valor da resistência de aterramento (Visacro Filho, 2002).

A motivação deste trabalho é a de desenvolver um método de tratamento físico do solo, menos complexo e menos dispendioso, para diminuir a resistência de aterramento de sistemas de aterramento, obtendo uma maior constância dos valores de resistência com as variações de temperatura e umidade. Propõe-se investigar o desempenho de dois novos sistemas de aterramento através da realização de ensaios laboratoriais. A avaliação será realizada de duas formas: realização de medições periódicas dos valores de resistência de aterramento e realização de ensaios com aplicação de impulsos de corrente nos novos sistemas desenvolvidos.

Assim, este trabalho tem por objetivo a busca por um novo modelo de sistema de aterramento, com funções elétricas equivalentes ou superiores aos sistemas convencionais com hastes de cobre nu, que possa emular a baixa resistividade do solo e permitir a elaboração de malhas de aterramento com baixa resistência. Dois tipos de sistemas de aterramento inovadores serão concebidos e serão avaliadas as suas empregabilidades nos sistemas elétricos de potência.

Os capítulos subsequentes da dissertação são organizados de forma que no Capítulo 2 realiza-se uma breve revisão bibliográfica acerca dos temas abordados. Os materiais e a metodologia utilizados no decorrer da pesquisa são apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 4 são expostos os resultados mais significativos, e o Capítulo 5 finaliza a dissertação com a apresentação das principais conclusões e a proposição de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Farren & Hallmark (2000), várias autoridades consideram que os sistemas de aterramento devem apresentar resistência máxima entre 5 e 50 Ω . Assim, para satisfazer essa condição, regiões com alta resistividade do solo necessitam de aterramentos elaborados, o que leva a um planejamento e elaboração de um sistema mais detalhado e, conseqüentemente, mais oneroso (FARREN E HALLMARK, 2000).

A resistividade elétrica do solo tem implicações relevantes no projeto final da malha, para quaisquer distúrbios que possam ocorrer no sistema elétrico, sejam de baixa ou alta frequência. A resistividade está diretamente ligada à dificuldade que o solo apresenta para escoar as correntes elétricas indesejadas (de Souza *et al.*, 2007). A caracterização do solo, bem como do seu comportamento quando da passagem de corrente elétrica, é de fundamental importância na análise de fenômenos ligados ao aterramento elétrico. É um dos parâmetros mais críticos que afetam o projeto de um sistema de aterramento (Telló *et al.*, 2007). Como a resistividade é uma propriedade intrínseca do solo, mudar a sua resistividade geralmente não é uma tarefa trivial ou economicamente viável.

Como forma de mitigar as dificuldades causadas pelas altas resistividades dos solos, tornando o projeto menos oneroso, apresenta-se nos tópicos seguintes uma revisão das principais técnicas de redução da resistividade do solo e, conseqüentemente, da resistência dos sistemas de aterramento.

2.1 TÉCNICAS DE MELHORIA NA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Muitas vezes, torna-se difícil (ou muito oneroso) alcançar a redução necessária da resistência de aterramento. Bem como, após a instalação do sistema de aterramento, observa-se por medições, que o valor da resistência medido é superior ao valor almejado ou projetado inicialmente. Nestes casos empregam-se normalmente algumas técnicas capazes de diminuir o valor dessa resistência. As técnicas convencionais alteram as condições dos eletrodos de aterramento (tratamento físico do sistema de aterramento),

ou modificam a resistividade do solo nas proximidades do eletrodo (tratamento químico do solo). Pode-se ter ainda, a aplicação das duas possibilidades simultaneamente (Visacro Filho, 2002).

São comumente utilizados três procedimentos de tratamento físico em malhas de aterramento:

- Aumento do número de eletrodos em paralelo;
- Aumento da profundidade dos eletrodos;
- Aumento da seção reta do eletrodo.

Os procedimentos provocam a diminuição da resistência de aterramento, contudo, a partir de certo ponto, a resistência passa a diminuir pouco pelo aumento dos tratamentos físicos.

O método proposto por He *et al.* (2005), utiliza um sistema de aterramento formado por um tubo de metal, repleto de orifícios, transformado em paredes laterais sólidas de um poço profundo. O objetivo seria levar a água dos lençóis freáticos até o interior do tubo, mantendo assim o aterramento sempre úmido e com baixa resistência. O método foi testado numa subestação e obteve bons resultados, porém depende da existência de um lençol freático em profundidade atingível pelo tubo, além de ser complexo, detalhado e possivelmente oneroso (HE, 2005).

El Mghairbi *et al.* (2010 e 2011) propõe aumentar o comprimento efetivo de eletrodos de aterramento horizontais, instalando um condutor paralelo isolado, 0,20 m acima do solo, interligado ao eletrodo subterrâneo no horizontal em pontos ao longo de seu comprimento. Simulações e testes de campo com aplicação de impulsos de corrente mostraram que o condutor adicional, acima do solo, tinha um efeito significativo na redução da resistência ao impulso. No entanto, o método é inviável para aplicação em aterramento de subestações, por exemplo, já que o condutor adicional precisa estar a certa distância acima da superfície do solo, percorrendo em paralelo todo o cabeamento do sistema de aterramento em questão (EL MGHAIIRBI *et al.*, 2010; 2011).

Procedimentos de tratamento químico do solo são recomendados por diversos autores. O princípio de funcionamento consiste, essencialmente, na redução da resistividade do solo na região ao redor dos eletrodos de aterramento, através da adição de materiais de baixa resistividade, chamados de agentes redutores de resistência de aterramento (ARRA), tendo como resultado final um aumento virtual do diâmetro do

eletrodo original, reduzindo-se, conseqüentemente, o valor da resistência do sistema de aterramento (Leite & Pereira Filho, 2007).

É comum o emprego de cloreto de sódio, magnésio e sulfatos de cobre ou cloreto de cálcio como ARRA. No entanto, para o tratamento químico do solo deve-se ter atenção para que os sais não entrem em contato direto com os eletrodos, evitando a corrosão. Deve-se também manter um controle do valor da resistência de aterramento, pois esta pode aumentar com o tempo devido à dispersão dos sais pelo solo. Esta prática pode ser muito eficiente para aterramentos de pequena dimensão. Reduções superiores a 50% do valor da resistência de aterramento podem ser obtidas, se a dimensão do sistema é muito pequena. Entretanto, no caso de aterramentos extensos, como é o caso de malhas de subestações, raramente se alcança redução superior a 15% no valor da resistência com o tratamento químico. Além disso, o tratamento com o uso de sais deve ser renovado periodicamente (Visacro Filho, 2002).

Apesar das desvantagens dos tratamentos químicos, como a dispersão do material pelo solo, diminuindo a resistência de aterramento, o risco de contaminação do meio ambiente, a depender do material utilizado no tratamento, o risco de corrosão dos eletrodos e a necessidade de renovação periódica do tratamento, encontram-se na literatura, desde a década de 60, trabalhos envolvendo o tratamento químico do solo com diversos ARRA.

Um ARRA recomendado pelo IEEE *Guide for Safety in AC Substation Grounding* para o tratamento químico do solo, é a bentonita. A bentonita será abordada mais detalhadamente numa seção posterior desta revisão.

Entre os trabalhos analisados pode-se citar o de Clark & Watkins (1960). Neste, estudaram-se quatro tipos de ARRA: acrilamida, gel silicato (gel de ácido silícico), gel de ferrocianeto de cobre (produto da reação de soluções concentradas de sulfato de cobre e ferrocianeto de sódio) e grafite, todas (com exceção do grafite) diluídas em água e misturadas com catalisadores (um deles, o ácido clorídrico). Foram medidos os valores de resistência de aterramento para hastes envolvidas no solo quimicamente tratado com cada uma das quatro soluções, em solos de dois diferentes locais. As hastes envolvidas no solo quimicamente tratado mostraram menor variação da resistência com a variação das estações do ano e com a quantidade de chuvas do que as hastes envolvidas no solo não tratado. Testes de lavagem do solo tratado mostraram que todos os géis e o solo com o grafite eram tratamentos mais permanentes do que o tratamento com adição de sal comum. No entanto, testes de laboratório mostraram que metais

imersos no gel eram corroídos, e a gravidade desta corrosão não foi estabelecida. Além disso, a acrilamida e seus catalisadores associados eram bastante tóxicos. O gel silicato era insolúvel em água e o ácido clorídrico deveria ser transportado e manuseado com cuidado. Desvantagens como estas, tornam o método arriscado para pessoas, equipamentos e meio ambiente (CLARK & WATKINS, 1960).

Yamane *et al.* (1990), estudaram a mistura de epóxi com um polímero absorvente de água (polímero anidro maleico-ácido) em comparação com a bentonita comumente utilizada. O epóxi, utilizado para solidificar o polímero, torna a mistura condutiva, apesar de ser um material de característica isolante. O autor relata como grande vantagem do polímero absorvente, a menor quantidade necessária para a realização do tratamento. Para um mesmo volume de solo a ser tratado, seriam necessários apenas 210 g do polímero, enquanto que a quantidade usualmente utilizada de bentonita seria de 33,5 kg. Os resultados apresentados mostraram que a eficácia do polímero na redução da resistência de aterramento era semelhante a da bentonita. No entanto, esse polímero não é um material de fácil disponibilidade para as empresas do setor elétrico em geral. Materiais de fácil aquisição e baixo custo são preferíveis, uma vez que em geral são aplicados em grandes quantidades (YAMANE *et al.*, 1990).

Segundo Huai-Liang (1991), existe no solo uma camada na qual o ARRA penetra e cuja espessura aumenta com o aumento da quantidade de ARRA utilizado. Ele estudou um ARRA não especificado, com resistividade de $0,93 \Omega\text{m}$, produzido por uma indústria química local. O autor afirmou ainda que quanto maior a quantidade de ARRA utilizado, maior seria a razão de redução na resistência do sistema de aterramento, porém deveria se ter atenção para o efeito saturacional. Em uma área de alta resistividade do solo, o ARRA agiu muito bem, mas em uma área de baixa resistividade do solo, atuou reduzindo pouco a resistência do aterramento. A distribuição de potenciais perto do aterramento também foi melhorada (HUAI-LIANG, 1991).

Uma técnica, mais elaborada, desenvolvida por Meng *et al.* (1999), faz uso da “abertura” do solo, em forma de fissuras e buracos profundos, por meio de explosões nestes buracos. Os buracos e fissuras foram conectados e preenchidos com um ARRA não especificado, com resistividade menor do que $5 \Omega\text{m}$. É criada assim, uma complexa “árvore” ligada à rede da subestação. O método é bastante eficaz na redução da resistência do solo, principalmente em áreas rochosas, porém é complexo e possivelmente perigoso e oneroso (MENG *et al.*, 1999).

Segundo Kurtovic & Vujevic (2000), a influência da substância adicional no solo ao redor dos eletrodos de aterramento, em tensões de toque, é especialmente significativa para as redes de grande porte, enquanto que a influência sobre a resistência de aterramento da mesma rede seria menor. O agente redutor de resistência de aterramento poderia ser o próprio solo peneirado ou outro material com estrutura eletroquímica melhorada, que retenha a umidade de forma eficaz. Os autores apresentaram, através de simulações, que para uma malha de aterramento de uma subestação, a diminuição da resistência de aterramento foi inferior a 10%. No entanto, as tensões de toque diminuíram entre 40 e 50% com a adição de um ARRA com resistividade próxima a zero. Sendo assim, eles concluíram que não seria necessário o uso de uma substância adicional especial e cara com resistividade muito pequena. A solução ideal seria a utilização de uma substância adicional que tivesse resistividade aproximadamente cinco vezes menor do que a do solo. Neste trabalho, o solo foi considerado uniforme e não foi realizado um teste de campo, para comparação dos resultados das simulações (KURTOVIC & VUJEVIC, 2000).

Foi estudado ainda por Farren & Hallmark em 2000, o pó de cimento condutor derramado sobre a vala onde se encontram os cabos condutores de aterramento, tendo o cuidado de não deixar os cabos em contato direto com a mistura utilizada. A idéia é que o cimento seco seria 250-300 vezes mais condutor do que o concreto, de modo que a condução dependeria menos da umidade. Os autores acreditavam que o tratamento com o cimento, dessa forma, teria vida útil de até 6 anos. Com esse método, conseguiu-se reduzir um valor de resistência de 2Ω pra 1Ω , sendo necessário verificar se haveria uma redução eficaz também para aterramentos com valores mais altos de resistência. A vantagem do pó de cimento, é que ele é um material de baixo custo e facilmente encontrado no comércio (FARREN & HALLMARK, 2000).

O resíduo granulado de alto forno (um subproduto da fabricação do aço) foi estudado por Chen, Chen, Liang, & Wang (2004) e Chen S. D. (2004). Segundo os autores, ela poderia ser facilmente misturada com cimento ou outros ingredientes e assim, ser usada como ARRA. Resultados de estudos experimentais mostraram que o material poderia efetivamente reduzir a resistência de aterramento, com taxa de redução maior do que 40%. No entanto, da mesma forma que o estudo de Yamane *et al.*, esse resíduo não é um material de fácil disponibilidade para as empresas do setor elétrico. Além disso, não se tem certeza se esse resíduo pode ser agressivo ao meio ambiente

próximo ao sistema de aterramento. Também não foi analisada a questão da corrosão do eletrodo (CHEN *et al.*, 2004; CHEN, 2004).

Poucos trabalhos, no entanto, tratam não somente da análise dos valores de resistência como também do resultado da aplicação de impulsos de corrente nesses sistemas de aterramento, com tratamento químico do solo. Entre eles, os trabalhos desenvolvidos por Nor *et al.*, em 2006a e Nor, em 2006b, com o uso de sais de cloreto de sódio. Em ambos os trabalhos, foi instalado um pequeno sistema de aterramento envolvido em misturas de cloreto de sódio (NaCl) e areia, com vários teores de água. Foram aplicados impulsos de corrente e verificou-se que a resistência ao impulso do sistema de aterramento adotado diminuiu para quaisquer teores de água utilizados nas misturas. Com a mesma técnica, em 2006c, Nor passou a estudar os sais de sulfato de cobre (CuSO₄), além do NaCl. Ele verificou que o NaCl na areia tinha um efeito mais significativo na redução da resistividade do solo da amostra do que a adição de CuSO₄ (NOR, 2006a; 2006b; 2006c).

Habjanic *et al.* (2007) propuseram um método mais eficiente do que o desenvolvido por Kurtovic & Vujevic. Eles utilizaram o Método dos Elementos Finitos (MEF) na análise da influência de um ARRA em valas ao redor de uma malha de aterramento no desempenho de sistemas de aterramento em solos de duas camadas. Estruturas de solo diferentes e vários volumes do ARRA foram analisados. Habjanic *et al.* afirmaram que a resistência de aterramento diminuiu ligeiramente com o aumento do volume do ARRA e com a diminuição da resistividade do ARRA. Os potenciais de passo e toque da malha também foram diminuídos. Da mesma forma que o trabalho de Kurtovic & Vujevic, não foram realizados testes de campo para comparação e validação dos resultados (HABJANIC *et al.*, 2007).

Eduful *et al.* acreditam que materiais de natureza orgânica são candidatos promissores como agentes de redução de resistência de aterramento, já que a matéria orgânica desempenha um papel importante na estrutura do solo equivalendo a até 10% da sua composição. Inicialmente (2009a), estudou-se a “borra” de óleo de palmiste (*palm kernel oil cake*), um material orgânico, derivado do dendê. Uma área de solo de 40% em torno dos eletrodos foi preenchida com esse material e obteve-se diminuição na resistência de aterramento de 73%. Ao longo de seis anos, manteve-se um percentual médio de 50% de diminuição da resistência. Posteriormente (2009b) eles continuaram estudando a mesma “borra” de óleo, além de outros materiais como cinzas de pneus e de madeira e cascas de cacau em pó, percebendo então que as cinzas eram também uma

boa opção. Materiais orgânicos se apresentam como boas opções de ARRA, no entanto, para as empresas do setor elétrico, são opções pouco viáveis, já que seriam necessários programas de recolhimento, armazenamento e processamento desses materiais até a aplicação final no sistema elétrico (EDUFUL *et al.*, 2009a; 2009b).

O uso eficiente dos ARRA por meio de dimensões otimizadas (volume ótimo) foi estudado recentemente por Khan *et al.* (2010). Segundo os autores, o uso de um volume muito alto destes ARRA não reduz a resistência de aterramento de uma forma correspondente. Eles simularam no ambiente de computação numérica Matlab® a variação do volume do buraco de solo, de acordo com o volume do eletrodo colocado no mesmo buraco, a fim de chegar a um volume ótimo. Foi mencionado apenas que o ARRA considerado possuía resistividade de $2 \Omega\text{m}$. O ARRA foi simulado em três arranjos diferentes (KHAN *et al.*, 2010). O estudo de Al-Arainy *et al.* (2011) deu continuidade ao estudo de Khan *et al.* testando um quarto arranjo. Desta forma, os autores conseguiram definir um arranjo mais adequado para o preenchimento do solo com o ARRA. Também não foram realizados testes de campo para comparação e validação dos resultados (AL-ARAINY *et al.*, 2011).

Visacro Filho (2002) define tratamento físico do solo como sendo o envolvimento do eletrodo com material condutor, proporcionando uma ampliação de sua superfície de contato com a terra adjacente.

Sabe-se que as técnicas mencionadas diminuem a resistência de um sistema de aterramento. Porém, não se pode afirmar o quão significativa será a redução para cada caso e nem por quanto tempo essa redução acontecerá.

Um procedimento para tratamento físico do solo, citado pelo IEEE, é o uso de concreto envolvendo os eletrodos de aterramento. Na próxima seção, este tipo de tratamento bem como, alguns trabalhos relacionados ao tema são mais detalhadamente abordados.

2.2 O CONCRETO E SUA UTILIZAÇÃO EM ATERRAMENTO

O concreto é um material muito utilizado na construção civil. É basicamente o resultado da mistura de cimento, água, pedra e areia, além de outros aditivos eventuais.

O concreto, sendo higroscópico, retém a umidade. Enterrado no solo, um bloco de concreto se comporta como um meio semicondutor com uma resistividade variando

de 30 a 90 Ω .m. Este invólucro proporcionado pelo concreto reduz a resistividade da parte mais crítica do material em torno do eletrodo de metal da mesma maneira que um tratamento químico do solo (IEEE, 2000). Outra vantagem é que, em condições normais, o aço não enferruja quando embutido no concreto, pois dentro do concreto, o cobre possui uma eletronegatividade semelhante à do aço, o que elimina, na prática, a ocorrência de corrosão por pilha galvânica. Dessa forma, não seria necessária a utilização de galvanização ou de verificações periódicas especiais (Leite & Pereira Filho, 2007).

De acordo com o Guia de Utilização do Cimento Portland, cimento Portland é a denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água.

Ainda de acordo com o referido Guia, há tempos havia no Brasil, praticamente, um único tipo de cimento Portland. Com a evolução dos conhecimentos técnicos sobre o assunto, foram sendo fabricados novos tipos. A maioria dos tipos de cimento Portland hoje existente no mercado serve para o uso geral. Alguns deles, entretanto, têm certas características e propriedades que os tornam mais adequados para determinados usos, permitindo que se obtenha um concreto com resistência e durabilidade desejadas, de forma econômica.

Porém, é difícil fazer um bom concreto. Faz-se necessário estudar a dosagem ideal dos componentes dos concretos a partir do tipo de cimento escolhido ou disponível no comércio, de forma a estabelecer uma composição que dê o melhor resultado ao menor custo. As dosagens devem obedecer a métodos racionais comprovados na prática e que respeitem as normas técnicas aplicáveis e o uso dos aditivos deve seguir as instruções do seu fabricante. Além disso, é absolutamente fundamental fazer corretamente o adensamento e a cura dos concretos (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002).

A cura é importante no sentido de evitar que o concreto perca sua água, responsável pela hidratação dos compostos presentes na pasta de cimento, principais responsáveis pelo ganho de resistência no concreto, além de promover maior durabilidade em seu estado endurecido, contra agentes agressivos (Santana & Costa, 2009). Segundo Battagin *et al.* (2002) nos concretos convencionais, há unanimidade em aceitar que a cura adequada é condição essencial para obtenção de um concreto durável.

O adensamento e a cura malfeitos são as principais causas de defeitos e problemas que surgem nas argamassas e nos concretos, como a baixa resistência, as trincas e fissuras, a corrosão da armadura etc. O bom adensamento é obtido através de uma vibração adequada. O principal cuidado que se deve tomar para obter uma cura correta é manter os concretos úmidos após a pega, de modo a impedir a evaporação da água por ação do vento e do calor do sol durante um período mínimo de sete dias (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002).

Existem diferentes métodos de cura do concreto. Trabalhos na área de engenharia civil, como os de Cervo & Balbo (2004), Bardella *et al.*, (2005) e Santana & Costa (2009), tratam da influência e comparação entre métodos de cura na resistência à compressão do concreto (na engenharia civil, normalmente, utiliza-se a resistência à compressão simples para medir a qualidade do concreto), comprovando as melhorias que o concreto apresenta quando se realiza a cura adequada.

Para o presente trabalho, dois métodos de cura foram estudados: a cura ao ar, ou cura ambiente, quando os cuidados tomados são mínimos de modo que o concreto fique exposto aos efeitos de temperatura e umidade do ambiente no qual esteja solicitado, e a cura úmida por imersão. A cura úmida é o método mais utilizado nos canteiros de obra do Brasil. Sua realização pode ser feita através de molhagem (aspersão com água, areia, sacos de aniagem, serragem), sendo geralmente a mais utilizada submersão ou por imersão. A temperatura da água é um fator importante, pois o concreto pode apresentar trincas devido à ocorrência de tensões térmicas. Outro fator a ser considerado é a utilização de água sem adição de agentes agressivos. A cura úmida deve ser iniciada logo após o início da hidratação do cimento, ou seja, nos casos comuns, duas ou três horas após o lançamento. Não há um tempo pré-determinado para a realização da cura, sabendo que quanto maior for esse prazo melhores serão as condições de formações dos cristais, mais refinada será a estrutura interna, com maior resistência e maior durabilidade (Santana & Costa, 2009).

Na construção civil, o impacto econômico do problema da durabilidade do concreto conduz a uma pesquisa extensiva e tem iniciado os caminhos para a produção de melhores e mais duráveis concretos ou estruturas de concreto reforçadas (Coimbra *et al.*, 2006), fato que para o presente trabalho, é de especial interesse.

Em sistemas de aterramento, o concreto teve sua primeira utilização conhecida na Segunda Guerra Mundial, mais precisamente em 1941, em um sistema idealizado pelo engenheiro Herb Ufer para os depósitos de bombas da base aérea Davis Monthan

em Tucson, no Arizona/EUA. O objetivo desse sistema era proteger o depósito contra descargas atmosféricas e eletricidade estática, esta última causada por ventos e tempestades de areia. Anos mais tarde, Ufer reinspecionou as instalações e concluiu que eletrodos de aterramento utilizando armaduras do concreto promoviam resistência de aterramento menor e mais consistente que as hastes isoladas, especialmente em regiões com valores elevados de resistividade. Notou-se que a melhoria da resistência de aterramento com a utilização de hastes concretadas, se deve a capacidade do concreto de reter água e de aumentar a área de contato entre a malha de aterramento e o solo (Gomes, 2007; Costa, *et al.*, 2010). Ao que tudo indica, ao conduzir uma carga impulsiva e, portanto, de curta duração, como uma descarga atmosférica, a ferragem embutida no concreto pouco se aquece. Isto se deve ao pequeno tempo de aplicação da carga que, embora com uma corrente de até dezenas de quilo ampères, fornece pouca energia ao eletrodo, pois se dissipa rapidamente (Leite & Pereira Filho, 2007).

Estudos referentes ao uso do concreto, ainda pioneiros, como o de Fagan e Lee em 1970, avaliaram a eficácia de eletrodos de aterramento constituídos de ferragens utilizadas em construção civil, envolvidas por concreto, em solos de resistividade alta, média e baixa. Os resultados obtidos nos ensaios indicaram capacidade de aterramento dos eletrodos concretados equivalente à de eletrodos convencionais sob condições de solo de baixa e média resistividade, e superior em condições de solo de alta resistividade. Quanto ao efeito de altas correntes (variando de 1,9 a 9,3 kA) sobre a estrutura física dos novos eletrodos, nenhuma evidência de dano foi encontrada em inspeções visuais e microfissuras foram encontradas em apenas algumas amostras analisadas microscopicamente em laboratório.

Os aterramentos utilizando as ferragens da própria fundação de edifícios como eletrodos de aterramento, e a proteção contra descargas atmosféricas pelo Método da Gaiola de Faraday utilizando as estruturas metálicas (telhas e/ou seus suportes metálicos) e as armaduras do concreto, são práticas mundialmente consagradas há aproximadamente 70 anos e continuam sendo estudadas, como em Gomes (2007). Tem-se a vantagem de que a estrutura já está lá, por motivos estruturais, além de não ser aparente, não requerer manutenção (exceto nas conexões externas) e ser estável (Leite & Pereira Filho, 2007). Apesar desse tipo de sistema de aterramento ser utilizado há 70 anos, são poucas as pesquisas em torno da suportabilidade do concreto quando submetido diretamente a uma corrente proveniente de descargas atmosféricas (Costa, *et al.*, 2010).

Em 2007, de Souza *et al.*, propõem uma análise comparativa do comportamento da resistência de aterramento para a configuração de malha de aterramento triangular, em um solo com resistividade elétrica elevada. Foram comparadas três malhas: uma malha de aterramento convencional, utilizando apenas eletrodos convencionais de cobre (nus), sem o uso de nenhum tipo de tratamento, no solo ou nos eletrodos. Uma malha com tratamento químico, onde foi feito o tratamento químico do solo através de um gel alto grau de higroscopia. E uma malha com eletrodos convencionais de cobre, concretados. Os resultados obtidos para o acompanhamento dos valores de resistência ao longo do tempo foram bastante animadores para os eletrodos concretados. No entanto, apenas medições de resistência foram realizadas, não sendo realizados ensaios elétricos impulsivos nos sistemas com eletrodos concretados, o que é de fundamental importância (DE SOUZA *et al.*, 2007).

Ensaio preliminares, com aplicação de impulsos de altas correntes e análise dos valores de resistência de aterramento, foram realizados por Costa, *et al.* (2010). Duas hastes concretadas com diâmetros diferentes foram analisadas e observou-se uma resposta satisfatória quanto aos resultados da aplicação dos impulsos de corrente, bem como, houve diminuição nos valores de resistência com o passar de algum tempo. Porém este trabalho não foi finalizado, servindo então como base para o presente estudo.

No campo da simulação e dos métodos numéricos computacionais, tem-se o trabalho de Bezerra e Kanashiro (2010) e os trabalhos de Velez *et al.* (2011a e 2011b). Bezerra e Kanashiro apresentaram resultados de simulações computacionais e de medições em campo, considerando hastes convencionais e hastes envolvidas em concreto como sistemas de aterramento, confirmando a melhoria nos valores das resistências de aterramento daqueles sistemas e confirmando também que os resultados das simulações são próximos daqueles encontrados nas medições realizadas em campo (BEZERRA & KANASHIRO, 2010).

Já Velez *et al.* (2011a), inicialmente realizaram uma comparação entre as expressões analíticas de precisão existentes para o cálculo da resistência de eletrodos de aterramento concretados. Eles obtiveram resultados por modelagem numérica (com o uso do MEF) e resultados de medições mensais em campo. Desta forma, os autores conseguiram definir um equacionamento adequado para a modelagem do sistema. Posteriormente (2011b), utilizam o MEF para simular eletrodos de aterramentos envoltos em concreto condutor, que seria o concreto com a adição, na mistura, de um

ARRA. Foram obtidos bons resultados neste segundo estudo, porém não foram realizadas medições em campo para confirmação dos resultados das simulações. Outro problema neste caso, é que o solo também foi considerado como homogêneo e uniforme nas simulações (VELEV, 2011a; 2011b).

Como se pode observar existem poucos trabalhos relacionados ao uso e ensaios impulsivos de eletrodos de aterramento concretados na literatura.

2.3 A BENTONITA E SUA UTILIZAÇÃO EM ATERRAMENTO

O termo bentonita é empregado atualmente para designar argilas constituídas principalmente pelo argilomineral montmorilonita, do grupo esmectita, uma família de argilas com propriedades semelhantes: em contato com a água expandem várias vezes o seu volume, formando géis tixotrópicos, ou seja, géis que passam do estado de gel para o estado líquido, quando agitados (REZENDE, 2008).

A bentonita é uma argila natural que não é corrosiva, é estável e tem uma resistividade considerada muito baixa para altos valores de umidade no ambiente. Devido à sua natureza higroscópica, ela atua como um agente de secagem absorvendo a umidade disponível no ambiente circundante. Fornecida com uma quantidade suficiente de água, incha até 13 vezes o seu volume seco e vai aderir a quase qualquer superfície que envolve. No entanto, a bentonita precisa de água para obter e manter as suas características benéficas, logo, uma vez instalada no sistema, ela depende da presença de umidade do solo para manter essas características (IEEE, 2000).

A bentonita pode ter composição cálcica ou sódica. No segmento de processamento da bentonita, é realizada a ativação, pela adição do carbonato de sódio transformando-se a bentonita, naturalmente cálcica em sódica. Esta última possui uma característica de expansão de volume, em contato com água, mais significativa, pois o sódio é o responsável por provocar a expansão mais notável.

Nas jazidas ocorrem diversas cores de bentonita e as cores denominadas conforme as mineradoras e as empresas de mineração são: verde, chocolate, bofe, vermelho, amarelo, e branco. Ainda usam-se denominações de cores resultadas de uma combinação das cores principais citadas como, por exemplo, chocobofe, chocolate, verde lodo e outras. As cores servem como guia para definir a qualidade e as especificações da argila para as aplicações industriais específicas durante a lavra de

argila nas minas. As análises químicas e mineralógicas mostram que existem diferenças entre as argilas de cores diferentes. A classificação de bentonita da região baseada nas cores para usos diversos é válida considerando que por coincidência ou não, cada classe da cor de argila tende a ser diferente das outras em composição química e mineralógica, ou seja, de acordo com a concentração dos materiais componentes presentes naquele tipo de bentonita, ela se adapta melhor ao uso em uma aplicação X do que outra que se adapta melhor ao uso em uma aplicação Y. (GOPINATH *et al.*, 2003).

A bentonita é utilizada principalmente como: agente tixotrópico de fluidos de perfuração de poços de petróleo e de água; na pelotização de minérios de ferro; aglomerante de areias de moldagem usadas em fundição; descoramento de óleos vegetais, minerais e animais; impermeabilização de bacias; entre outros. É também utilizada em exploração de gás e petróleo, lama de trincheira e como misturas aditivas de solos (COELHO, 2009). A bentonita sódica é mais utilizada como selante do solo, sendo este o maior mercado na área de engenharia.

Dados de 2008 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) retratam que, no Brasil, as reservas de bentonita totalizavam, aproximadamente, 47 milhões de toneladas. No ano de 2004, a Paraíba foi o principal Estado produtor de bentonita perfazendo 88,5% da produção nacional. A produção estimada de bentonita bruta no Brasil atingiu 329.647 toneladas. Oficialmente, quatorze empresas atuam neste segmento no país. A maior delas é a Bentonit União Nordeste, situada em Boa Vista/PB (DNPM, 2008).

Em sistemas de aterramento, Jones (1980) estudou o tratamento químico do solo com a bentonita como ARRA. Segundo o autor, a característica pastosa da bentonita, aderente a quase qualquer superfície, resolveria os problemas existentes de compactação do solo e de contato dos eletrodos. O objetivo era conseguir um solo que não fosse tão vulnerável às variações de umidade. Medições de resistência de aterramento em campo concluíram que o aterramento com uso de bentonita era, sem dúvida, uma maneira eficaz para a instalação de sistemas de aterramento em solos de alta resistividade. Os dados permaneceram consistentes ao longo do ano, no entanto, não foi apresentada uma estimativa de por quanto tempo o tratamento do solo seria eficiente, ou seja, se seria necessária uma nova aplicação da bentonita para manter os valores de resistência em níveis baixos e quando esta nova aplicação deveria ser realizada (JONES, 1980).

Kostic *et al.* (1999) apresentaram resultados de ensaios experimentais relacionados com a melhoria das propriedades elétricas de sistemas de aterramento

utilizando a bentonita (em suspensão e em pó) e a lama de perfuração de resíduos, também como ARRA. Foi confirmado que o uso destes materiais resultou em uma redução significativa da resistência de aterramento e da tensão de toque, especialmente durante períodos de seca. Da mesma forma, não foi apresentada uma estimativa de por quanto tempo ambos os tratamentos seriam eficientes (KOSTIC *et al.*, 1999).

Já em 2001, Radakovic & Kostic, pensando na necessidade de baixos valores de resistências de aterramento no caso de fundações de torres de linhas de transmissão, realizaram experimentos para analisar o efeito do curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão de 35 kV em amostras de solo, também utilizando a bentonita como ARRA. A análise mostrou que o pó de bentonita poderia ser utilizado com sucesso em vez de bentonita em suspensão, cuja preparação, transporte e instalação seriam mais difíceis e mais custosos. Foi observado um pequeno aumento, em curto prazo, nos valores de resistência, como resultado dos esforços térmicos aplicados. A bentonita manteve suas propriedades positivas ao longo do tempo. Não foi analisada a questão do impulso atmosférico neste trabalho (RADAKOVIC & KOSTIC, 2011).

Ainda utilizando a bentonita (uma bentonita aditivada feita da mistura de 1,6% de hidróxido de sódio, 2,6% de cloreto de sódio, 1,5% de cal, 1,5% de pó de gesso, 18,5% de pó de carvão, 55,8% de bentonita e 18,5% de tenaz de argila) como ARRA, resultados experimentais de propriedades impulsivas de sistemas de aterramento recobertos com esse material foram apresentados por Tu *et al.*, em 2006. O ARRA testado poderia efetivamente diminuir a resistência de aterramento, sob condições de impulso de corrente, de dispositivos de aterramento de linhas de transmissão. No entanto, as influências do impulso de corrente, as dimensões geométricas do dispositivo de aterramento e coeficiente de impulso de dispositivos de aterramento com as coberturas de bentonita ainda seriam os mesmos com aqueles sem o revestimento de bentonita (TU *et al.*, 2006).

Al-Ammar *et al.*, em 2010, analisaram combinações de seis diferentes materiais (bentonita; mistura de bentonita, água e $MgSO_4$; mistura de bentonita, água e $MgCO_3$; mistura de bentonita, água e Na_2CO_3 ; mistura de bentonita, água e Na_2SO_4 ; mistura de bentonita, água, $MgSO_4$ e $MgCO_3$) que poderiam ser usados como ARRA em sistemas de aterramento. Foi medida apenas a resistividade de amostras de solo misturadas a estes seis materiais. Observou-se que os sais com sulfatos misturados a bentonita produziam influência considerável na redução da resistividade das amostras, dando indícios de serem bons candidatos a agentes redutores de resistência de aterramento.

Testes de campo com essas misturas no solo, com medição de resistências, no entanto, não foram realizados (AL-AMMAR *et al.*, 2010).

Um estudo mais recente, de Panciera Jr. *et al.* (2011), propõe uma análise da variação da resistência de aterramento de transformadores realizando o tratamento químico do solo com a bentonita nos poços dos transformadores. Após a aplicação da bentonita e transcorridos sete meses subsequentes, foi obtida uma redução nas resistências de aterramento dos transformadores de, em média, 63,14% de sua resistência de aterramento inicial (PANCIERA JR *et al.*, 2011).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os principais, materiais, equipamentos e ferramentas utilizados para a realização dos ensaios. Também serão descritos os procedimentos metodológicos para a realização dos ensaios e interpretação dos resultados.

3.1 MATERIAL

Com o objetivo de confeccionar novos sistemas de aterramento, no desenvolvimento deste trabalho, serão utilizadas hastes verticais de aço revestidas por cobre, disponíveis comercialmente, com 1,20 m de comprimento e 12,2 mm de diâmetro. Serão utilizadas duas configurações de sistemas de aterramento: hastes isoladas e malhas triangulares. Para a construção das malhas, as hastes verticais serão interligadas por cabos de cobre nu com 35 mm² de seção transversal, através de conectores de aperto, de cobre, do tipo grampo e do tipo olhal, em concordância com a norma ABNT NBR 13571. Na Figura 1 são apresentadas fotografias dos materiais citados.

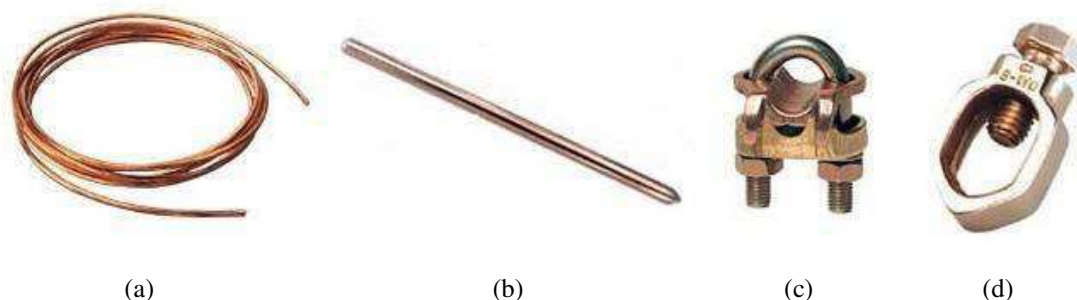


Figura 1. Materiais utilizados na confecção dos sistemas de aterramento a serem desenvolvidos: (a) cabo de cobre nu, (b) haste de aço cobreada, (c) conector tipo grampo e (d) conector tipo olhal (Faraday Pára-Raios).

Com o objetivo de avaliar o desempenho de eletrodos de aterramento envolvidos por uma estrutura de concreto, serão confeccionadas hastes concretadas. Na confecção dessas hastes concretadas, não será utilizado nenhum tipo especial de concreto. Serão utilizados na preparação da mistura de concreto, o cimento Portland do tipo CII Z32

RS (disponível comercialmente), brita do tipo 1 (pequena) e areia grossa. O traço da mistura de concreto é dado pela relação cimento:areia:brita. Será utilizado também o pó de pedra britada ao invés da brita pequena, em um tipo de haste, visando comparação com a mistura onde se utilizará a brita. A água a ser utilizada na mistura é proveniente da rede pública de distribuição da região metropolitana de Campina Grande – PB. A norma ABNT NBR 7211 especifica as metodologias de preparação do concreto.

Os moldes utilizados na concretagem das hastes concretadas confeccionadas, serão seções circulares de diâmetros semelhantes. Serão utilizados moldes confeccionados no laboratório, construídos com canos de ferro, confeccionados no laboratório, de 54 mm de diâmetro, e moldes de policloreto de polivinila (tubo PVC) disponíveis comercialmente, de 50 mm de diâmetro. Ambos os moldes possuem 1 m de altura, logo, todas as hastes concretadas terão 1 m de altura de estrutura de concreto e 20 cm de haste de cobre exposta. Um “piso” tampão de isopor será utilizado no fundo de todos os moldes, como forma de impedir a saída da água presente na mistura de cimento. A Figura 2 apresenta fotografias dos dois tipos de moldes utilizados.

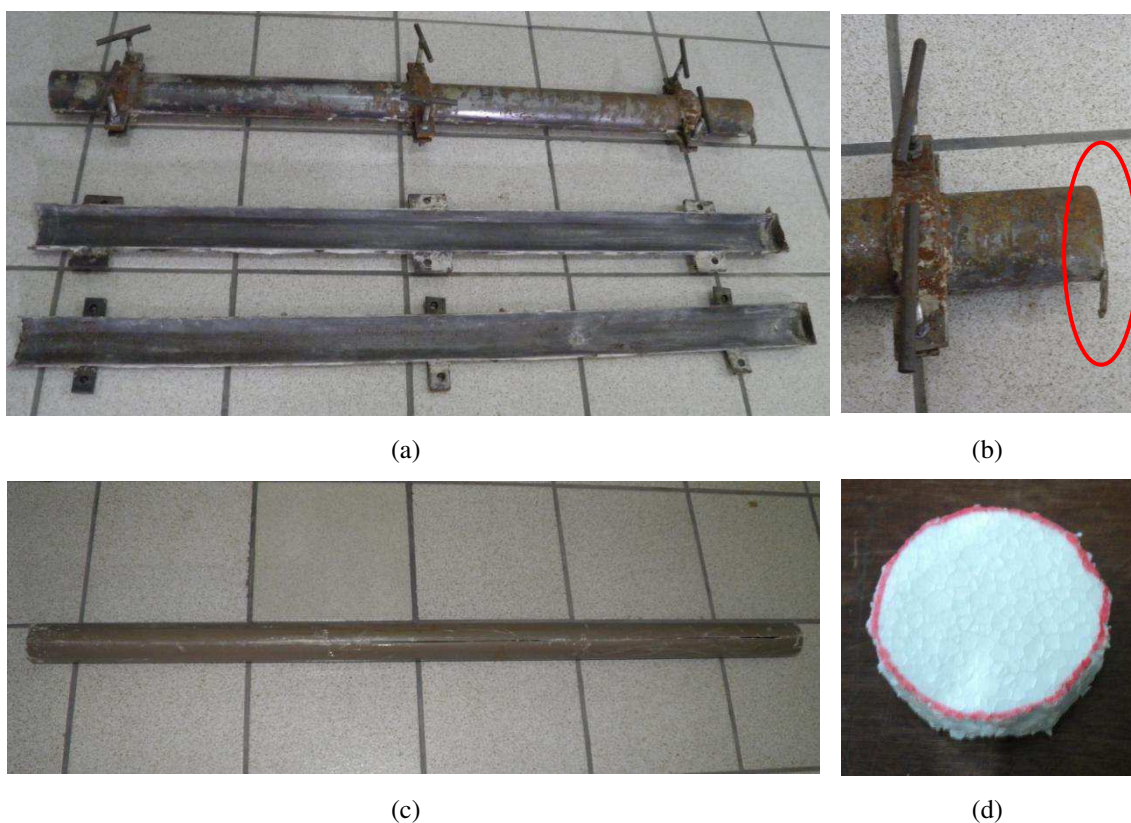


Figura 2. Fotografias dos moldes utilizados: (a) molde metálico (ferro) (54 mm); (b) detalhe do aterramento do molde; (c) tubo de PVC e (d) isopor utilizado como proteção no interior de ambos os moldes.

Com o objetivo de avaliar o comportamento de eletrodos de aterramento concretados com dopagem de aditivos na mistura do concreto, foram confeccionadas hastes concretadas com dopagem de bentonita seguindo a metodologia adotada anteriormente. Dois percentuais de dopagem serão investigados. Foi escolhida a bentonita sódica, devido a sua melhor propriedade de expansão quando em contato com água, comercialmente conhecida como Brasgel PA. A bentonita foi adquirida da empresa Bentonit União Nordeste (BUN) situada na cidade de Boa Vista (PB).

Após a retirada dos moldes, algumas hastes concretadas sofrerão processo de cura por imersão em água, com o objetivo de maximizar a capacidade de absorção de umidade do concreto. Outras não sofrerão processo de cura, para fins de comparação. Será observada a norma ABNT NBR 5738. Na Figura 3 são apresentados um esboço da haste concretada e a fotografia de uma das hastes concretadas desenvolvida.

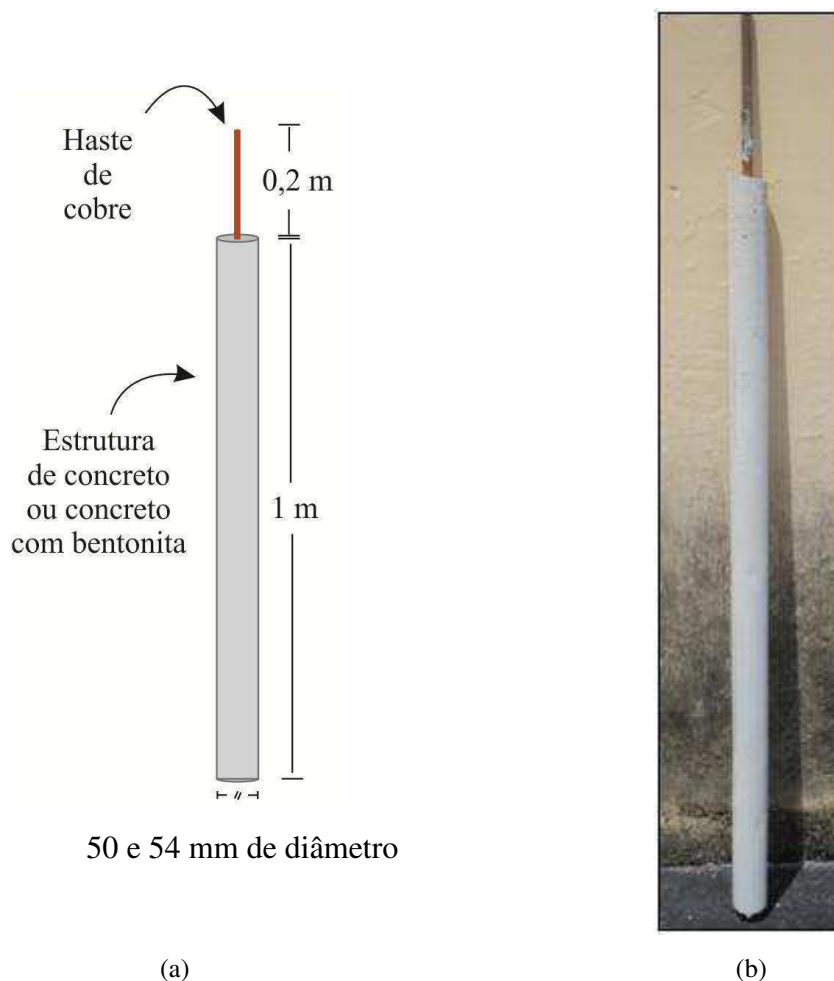


Figura 3. Hastes concretadas desenvolvidas: (a) esboço (b) fotografia de uma das hastes concretadas.

A Tabela 1 apresenta um quadro resumo com as composições dos materiais envolvidos no processo de concretagem das hastes, bem como, com os processos de cura envolvidos. O pó de pedra britada foi utilizado apenas na confecção da haste L2-1. O traço da mistura nesse caso, é a relação cimento:areia:pó de pedra britada.

Tabela 1. Composição das hastes concretadas desenvolvidas.

	Traço da mistura	Quantidade de água (l)	Quantidade de aditivo (bentonita)	Processo de cura	Período de confecção	Tipo de molde
L1-2	1:2:1	2,1	-	Ambiente, exposta a temperatura e umidade do laboratório	Abr/2011	Cano de ferro de 54 mm de diâmetro
L2-1	1:2:2	2,25	-	3 dias em tanque de imersão com água na temperatura média de 19°C	Mai/2011	Cano de ferro de 54 mm de diâmetro
L3-2	1:3:1	2,4	2% da massa total	5 dias em tanque de imersão com água na temperatura média de 19°C	Mai/2011	Cano de ferro de 54 mm de diâmetro
L6-1	1,5:2:1	2,2	-	Ambiente, exposta a temperatura e umidade do laboratório	Jul/2011	Cano de ferro de 54 mm de diâmetro
L6-2	1,5:2:1	2,2	-	7 dias em tanque de imersão com água na temperatura média de 20°C	Jul/2011	Cano de ferro de 54 mm de diâmetro
L7-3	1,5:2:1	3,8	2% da massa total	7 dias em tanque de imersão com água na temperatura média de 20°C	Jul/2011	Tubo PVC de 50 mm de diâmetro
L8-1	1,5:2:1	3,6	5% da massa total	7 dias em tanque de imersão com água na temperatura média de 20°C	Ago/2011	Tubo PVC de 50 mm de diâmetro

As hastes concretadas que serão utilizadas na confecção das malhas de aterramento, com e sem a bentonita, seguirão o mesmo padrão de construção das hastes L8-1 e L6-2, apresentado na Tabela 1. Neste caso, a confecção das hastes sem bentonita ocorreu no mês de agosto de 2011. Enquanto que a confecção das hastes com bentonita ocorreu no mês de outubro de 2011. As malhas deverão ter a forma de triângulo equilátero de lado 2,5 m.

A Figura 4 apresenta fotografias produzidas durante a construção de uma das malhas triangulares. A confecção de todas as hastes concretadas, com e sem bentonita, o processo de cura e a construção das malhas de aterramento devem ser realizados nas

imediações do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

O solo onde serão instalados os sistemas de aterramento desenvolvidos possui estrutura geológica dura e rochosa. Em períodos de pouca chuva, com o solo muito seco, torna-se difícil o cravamento de hastes. Todas as hastes nuas serão fincadas no solo por meio de batimentos, enquanto que para todas as hastes concretadas, serão feitos buracos no solo e as hastes serão plantadas.



(a)



(b)

Figura 4. Fotografias retiradas durante a construção de uma das malhas triangulares.

3.2 MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos sistemas de aterramento desenvolvidos, serão realizados os experimentos descritos abaixo nas seções seguintes.

3.2.1 MEDIÇÕES DE RESISTIVIDADE DO SOLO E DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Devido à necessidade de caracterizar o solo onde as hastes serão fincadas, será realizada uma medição de resistividade do solo no terreno. As medições de resistividade do solo serão realizadas de acordo com o consolidado Método de Wenner, em concordância com a norma ABNT NBR 7117. As medições de resistência de aterramento em baixa frequência serão realizadas conforme o Método da Queda de Potencial (ou Volt-Amperímetro), em concordância com a norma ABNT NBR 15749.

As medições de resistividade do solo e de resistência de aterramento serão realizadas com o terrômetro digital modelo AEMC Instruments 6472®, pertencente ao LAT/UFCG. O terrômetro digital utilizado dispõe de uma fonte de corrente interna,

além de um software que estima o valor da resistividade do solo (Dias, 2011). Um kit contendo uma marreta, rolos de cabos isolados, com comprimentos distintos e bitolas de 2,5 mm², além de trenas e hastes de aço revestidas por cobre, com 0,50 m de comprimento e 11 mm de diâmetro cada será utilizado no processo das medições. Na Figura 5 estão mostradas fotografias do terrômetro digital e seus acessórios.



Figura 5. Fotografia do terrômetro e seus acessórios.

As medições de resistividade do solo com o auxílio do terrômetro serão realizadas em eixos perpendiculares, com espaçamentos variando a cada 1, 2, 3, 4 e 8 metros, segundo a norma ABNT NBR 7117 e recomendações de Leite & Pereira Filho (2007). A área disponível para as medições de resistividade tem dimensão aproximada de 500 m². Para uma área menor do que 1.000 m², é recomendado fazer apenas duas linhas de medição para a implementação dos dados no software (dois eixos perpendiculares, A e B) (Leite & Pereira Filho, 2007).

Após a realização das medições com o terrômetro, será utilizado o software TecAt Plus 5 para a obtenção da estratificação do solo do terreno.

O TecAt é capaz de realizar, a partir de dados medidos em campo com o terrômetro, a estratificação da resistividade do solo em 1, 2, 3 ou 4 camadas. Ele também é capaz de realizar o cálculo da resistência da malha, para qualquer configuração ou aplicação. Como também, o cálculo dos potenciais de toque, de passo e de superfície, necessários ao desenvolvimento de projetos de malhas de subestações (Oficina de Mydia, 2011).

Se o solo for não homogêneo ao longo do terreno, o software é projetado para aproximá-lo para um modelo matemático que traduza o problema de forma computável e com precisão aceitável. O software é capaz de interpretar os dados fornecidos, calculando internamente as curvas e executando as interpolações necessárias baseada no Método dos Mínimos Quadrados (Officina de Mydia, 2011). Dessa forma, ele consegue estimar os valores de resistividade das n camadas de solo e também, a espessura das $n-1$ camadas (considera-se que a última camada possui espessura infinita).

Nas medições de resistência dos sistemas de aterramento, o eletrodo auxiliar de corrente será posicionado, conforme o arranjo apresentado na Figura 6 e na Figura 7.

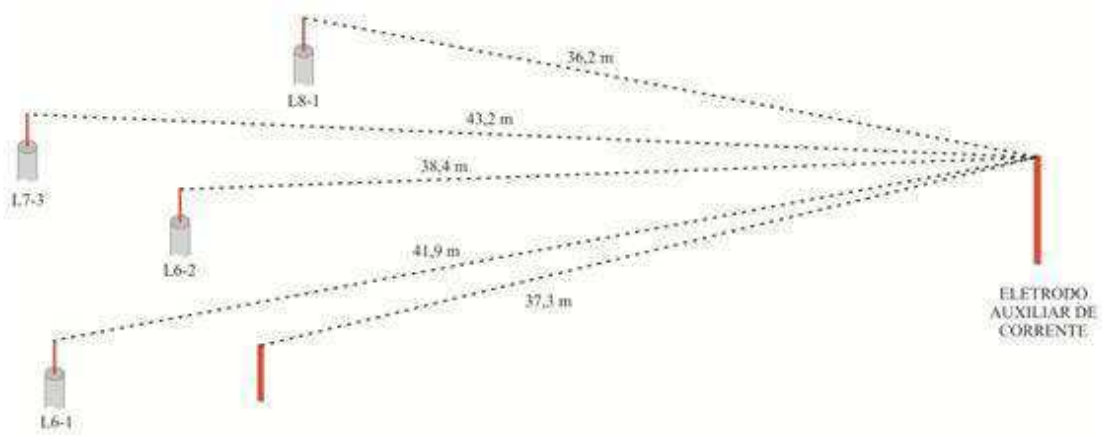


Figura 6. Disposição das hastes isoladas no terreno.

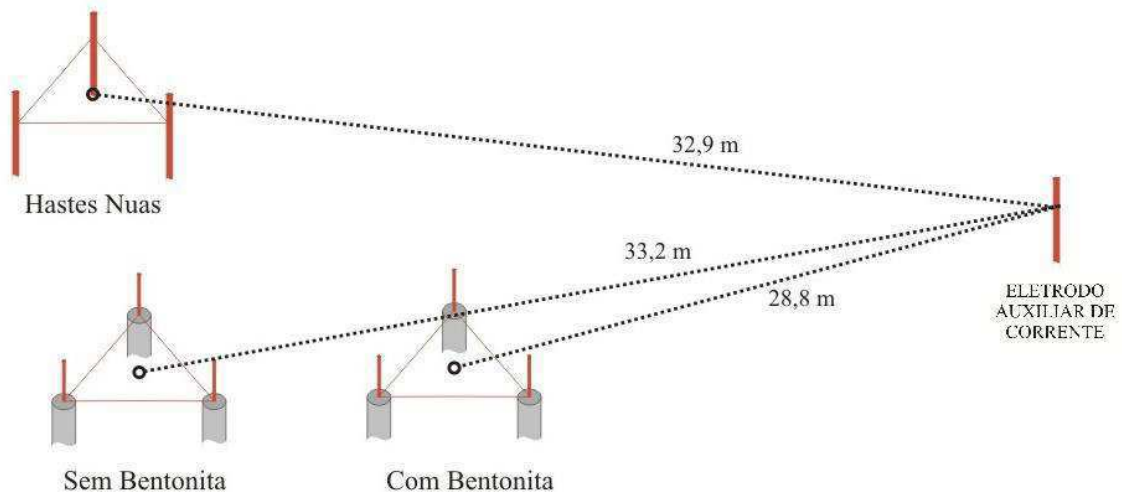


Figura 7. Disposição das malhas triangulares no terreno.

Por outro lado, o eletrodo auxiliar de potencial será posicionado diretamente na região do patamar de potencial (aproximadamente 62% da distância entre o sistema de aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente). A esta distância, será obtido o valor da

resistência do aterramento medido, tanto para as hastes isoladas quanto para as malhas triangulares. Para as malhas, as distâncias foram medidas a partir do centróide (baricentro) dos triângulos equiláteros, segundo recomendações de Leite e Pereira Filho (2007). As hastes isoladas e as malhas encontram-se enterradas relativamente próximas devido à pequena área disponível.

Os eletrodos referentes às medições de resistividade do solo e resistência de aterramento serão enterrados a uma profundidade variando entre 20 e 30 cm, devido à estrutura geológica do solo em questão (muito seco e rochoso). As condições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar serão registradas. Dados de precipitação na cidade de Campina Grande serão coletados perante a Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs) do Estado da Paraíba e dados de temperatura e umidade serão coletados perante a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) do Estado da Paraíba.

3.2.2 ENSAIOS COM APLICAÇÃO DE IMPULSOS DE CORRENTE

O comportamento do solo sob impulsos atmosféricos é bastante diferente quando se compara com o comportamento na frequência industrial (Visacro Filho, 2009). Com o objetivo de avaliar o comportamento dos sistemas de aterramento desenvolvidos, sob essa condição, serão realizados ensaios com aplicação de impulsos de corrente (similares a uma descarga atmosférica), utilizando um gerador de impulsos de corrente.

Os impulsos de corrente, característicos de descargas atmosféricas, serão simulados utilizando o gerador de impulso (80 kJ/100 kV) da Haefely, existente no LAT/UFCG. Na Figura 8 são apresentadas fotografias do gerador e de sua mesa de controle.

O gerador é formado por oito estágios em paralelo, onde cada estágio conta com um capacitor de capacitância $2 \mu\text{F}$ e um resistor de resistência 5Ω . Um centelhador de esferas (*spark gap*) é utilizado para o chaveamento da descarga de corrente. Os controles da mesa envolvem, entre outras funções, a operação do regulador de tensão, o controle da tensão de carregamento e a polaridade do impulso desejado.



Figura 8. (a) Fotografia do gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.

O gerador de impulsos deverá ser montado para gerar ondas de corrente com tempos de frente que variam de $110\text{-}120\ \mu\text{s}$ e tempos de cauda em torno de $200\ \mu\text{s}$, com polaridade positiva. Sendo assim, cinco estágios de capacitores e resistores serão interligados em paralelo. A indutância L deverá ter valor de $0,8\ \mu\text{H}$. Na Figura 9 é apresentado o arranjo do gerador de impulsos de corrente. Através do circuito gerador é possível obter impulsos de corrente com várias formas de onda e diversas amplitudes, bastando para tal, realizar o ajuste adequado dos elementos R , L e C do circuito (Lira, Fernandes Jr., & Costa, 2010).

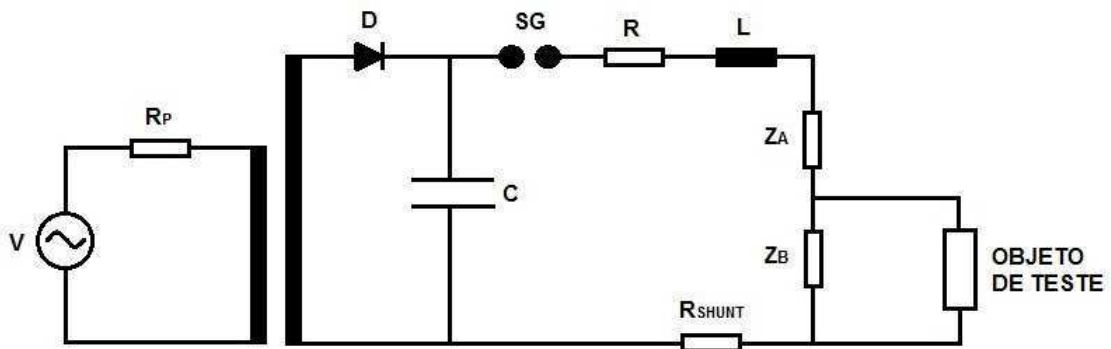


Figura 9. Arranjo do gerador de impulsos de corrente que será utilizado nos ensaios.

Os sinais de corrente oriundos dos impulsos serão obtidos por meio da resistência "shunt" (R_{shunt}). Os sinais de tensão serão obtidos com o auxílio de um divisor de tensão misto (capacitivo em conjunto com um resistor de amortecimento) com relação de transformação de aproximadamente 16,5. O sistema de aquisição de dados é formado por um osciloscópio digital Tektronix modelo TDS 2012 de quatro

canais. Serão utilizadas também pontas de prova de alta tensão Tektronix modelo P6015A com limite máximo de 40 kV, com atenuação de 1.000 vezes. Com o intuito de reduzir os efeitos das capacitâncias parasitas e indutância, todas as conexões serão feitas por cabos coaxiais blindados e/ou por folhas largas, de cobre com largura mínima de 150 mm e 1 mm de espessura.

Para melhor visualização e análise das formas de onda das tensões e correntes desenvolvidas nos sistemas de aterramento em questão, será utilizado o ambiente de computação numérica Matlab®.

3.2.2.1 HASTES ENVOLVIDAS EM MOLDE METÁLICO

Com o objetivo de fincar no solo apenas as hastes concretadas que apresentarem melhor condição física da estrutura de concreto, bem como, melhor desempenho aos impulsos de corrente, as hastes concretadas serão inicialmente ensaiadas no interior do molde metálico (mesmo molde utilizado na confecção das hastes). As hastes selecionadas nesta etapa do trabalho deverão ser confeccionadas novamente, com o mesmo padrão de construção, para ser então fincadas no solo.

Para a aplicação dos impulsos de corrente nas hastes concretadas no interior do molde metálico, as hastes serão envolvidas em papel alumínio, visando garantir um maior contato entre as superfícies do molde e do concreto.

Com o objetivo de adquirir os sinais de tensão aplicada no eletrodo, o Canal 1 do osciloscópio deverá ser conectado diretamente ao eletrodo de injeção de corrente, inicialmente sem a necessidade do uso do divisor de tensão, utilizando-se de uma ponta de prova com isolamento para alta tensão (40 kV). O Canal 2 deverá ser conectado ao resistor *shunt* (R_{shunt}) para adquirir os sinais da corrente injetada no mesmo eletrodo de injeção de corrente. O valor do resistor *shunt* utilizado nestes ensaios deverá ser de 10,53 mΩ. A escala de tempo do osciloscópio será ajustada de acordo com as formas de onda obtidas.

Pretende-se aplicar um conjunto de aproximadamente 10 impulsos de corrente em cada uma das hastes concretadas, com valores das tensões de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos variando de 5 em 5 kV, entre 10 e 60 kV, a depender da suportabilidade da estrutura de concreto das hastes.

3.2.2.2 HASTES FINCADAS NO SOLO

Visando comparar os resultados a serem obtidos das hastes concretadas, com a haste convencional (nua), comumente utilizada em sistemas de aterramento, os primeiros ensaios em hastes fincadas no solo se darão na haste nua e em hastes concretadas sem bentonita. O Canal 1 do osciloscópio deverá ser conectado ao eletrodo de injeção de corrente, com a necessidade do uso do divisor de tensão, utilizando a ponta de prova com isolamento para alta tensão, para adquirir os sinais de tensão aplicada no eletrodo. O Canal 2 deverá ser conectado ao resistor *shunt* (R_{shunt}) para adquirir os sinais da corrente injetada no mesmo eletrodo de injeção de corrente. O valor do resistor *shunt* utilizado nestes ensaios deverá ser de 5,488 m Ω . Para os níveis de tensões de carregamento que serão aplicados nos eletrodos de injeção de corrente, devido às intensidades da corrente e ao valor da resistência *shunt*, as diferenças de potenciais no R_{shunt} não deverão apresentar valores de pico superiores a 300 V (limite da ponta de prova), não carecendo de ponta de prova especial. A escala de tempo do osciloscópio será ajustada de acordo com as formas de onda obtidas.

Após a aplicação dos impulsos de corrente nas hastes concretadas sem bentonita, o objetivo será o de comparar os resultados a serem obtidos das hastes concretadas sem bentonita, com as hastes concretadas com adição de bentonita, bem como, com a haste nua. Por fim, serão aplicados impulsos nas três malhas triangulares.

Pretende-se aplicar um conjunto de aproximadamente 44 impulsos de corrente em cada uma das hastes, com valores das tensões de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos variando de 5 em 5 kV, entre 10 e 60 kV, a depender da suportabilidade da estrutura de concreto das hastes concretadas.

3.2.3 ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA E DOS POTENCIAIS DE TOQUE E DE PASSO

Uma grandeza representativa da resposta de um sistema de aterramento a correntes impulsivas é a impedância impulsiva de aterramento. Sendo assim, a partir dos impulsos de corrente aplicados, este parâmetro será também analisado.

Para o presente trabalho, adotou-se a definição utilizada por Visacro Filho (2007,) (2009,) (2011), Grcev (2009) e por Gonos *et al.* (1998) na qual a impedância impulsiva de aterramento é dada pela razão entre os picos de ondas desenvolvidas de tensão e corrente, como apresentado na Equação 1:

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (1)$$

Na maioria das condições práticas de engenharia, a medição da impedância impulsiva de aterramento Z_p não é uma tarefa viável e é prática comum medir a resistência de aterramento em baixa frequência ao invés de Z_p (Visacro Filho, 2007; IEEE, 1983).

Com a determinação de Z_p , pretende-se investigar e compreender como a impedância impulsiva e a resistência de aterramento em baixa frequência estão relacionadas. Serão realizadas medições de resistência de aterramento, conforme descrito na seção 3.2.1, e, após a aplicação de impulsos de correntes, será determinada a impedância impulsiva de aterramento, conforme a Equação 1, com o valores das tensões e das correntes de pico obtidos dos impulsos aplicados. Pretende-se ainda analisar a sensibilidade dos sistemas de aterramentos, pois, segundo Visacro Filho (2011), a máxima tensão desenvolvida em um sistema de aterramento pode ser prontamente obtida simplesmente multiplicando-se o pico de corrente pelo valor de Z_p .

Com o objetivo de analisar o comportamento dos sistemas de aterramento desenvolvidos, perante os potenciais de passo e de toque, e em especial, os níveis dos potenciais que poderiam comprometer os referenciais de isolação de equipamentos e da proteção, serão analisadas neste trabalho as mais importantes diferenças de potenciais que podem ser aplicadas ao ser humano, no interior de uma subestação: os potenciais de toque e de passo, conforme mencionadas em IEEE-80 (2000), os quais são referenciados como parâmetros críticos na elaboração de projetos de sistemas de aterramento. O potencial de toque máximo é dado pela Equação 2:

$$V_{\text{toque máximo}} = (1000 + 1,5 \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

Já o potencial de passo máximo é dado pela Equação 3:

$$V_{\text{passo máximo}} = (1000 + 6 \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

onde em que k é uma constante relacionada à energia de choque elétrico tolerada por um percentual da população com uma determinada massa corpórea. São apresentados alguns valores padrões, tais como, $k = 0,116$ (para pessoas com 50 kg) e $k = 0,157$ (para

peças com 70 kg), ρ_s é a resistividade superficial do solo e t é o tempo (em segundos) da duração do choque (Dias, 2011; IEEE-80, 2000).

No entanto, as Equações 2 e 3 acima, normalmente são utilizadas no cálculo de potenciais de toque e de passo máximos na condição de curto-circuito. Como não se conhece uma expressão para determinação das tensões de toque e de passo, aplicável a impulsos de corrente, irá se recorrer as Equações 2 e 3.

3.2.4 ANÁLISE DA SUPORTABILIDADE DA ESTRUTURA DE CONCRETO AOS IMPULSOS DE CORRENTE

A análise da suportabilidade da estrutura de concreto aos impulsos de corrente aplicados nas hastes concretadas (com e sem bentonita) se dará da seguinte forma:

- Hastes a serem envolvidas no molde metálico: inspeção visual da estrutura de concreto, antes do início dos ensaios e após a aplicação de cada conjunto de 10 impulsos, com abertura do molde e retirada do papel alumínio.
- Hastes a serem fincadas no solo:
 - Configuração de haste isoladas: inspeção visual da estrutura de concreto, antes do início dos ensaios e após a aplicação de todos os impulsos, com retirada do solo. E análise das formas de onda obtidas das curvas de tensão e corrente.
 - Configuração de malha triangular: inspeção visual da estrutura de concreto, antes do início dos ensaios e análise das formas de onda obtidas das curvas de tensão e corrente. As malhas não serão retiradas do solo para nova inspeção visual da estrutura de concreto devido à maior complexidade deste sistema de aterramento.

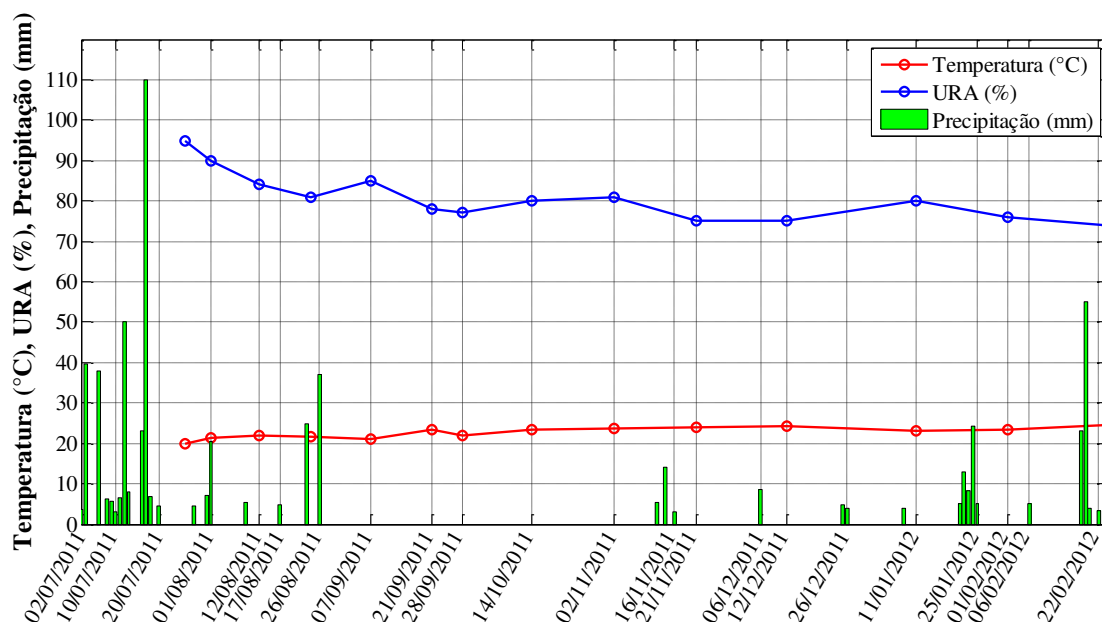
No próximo capítulo serão descritos os resultados obtidos para as medições de resistividade do solo e resistência de aterramento, resultados obtidos para as aplicações dos impulsos de corrente, bem como, para a análise dos potenciais de toque e de passo realizada, e para a análise da impedância impulsiva de aterramento determinada. Serão apresentados ainda o resultado da suportabilidade da estrutura de concreto de todas as hastes concretadas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

No decorrer deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas medições e nos ensaios realizados. As seções estão organizadas de acordo com a configuração de sistema de aterramento (hastes isoladas ou malhas).

4.1 MEDIÇÕES DE RESISTIVIDADE DO SOLO E DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

A resistividade do solo depende da sua umidade e temperatura e estes parâmetros são de vital grande importância na análise dos resultados. Na Figura 10 estão apresentados os dados de precipitação, fornecidos pela AESA, acima de 3,0 milímetros, a partir do primeiro dia do mês de julho de 2011 como também, as médias diárias de temperatura e umidade relativa do ar (URA), fornecidos pela EMBRAPA.



Datas das Precipitações e das Medições de Resistência de Aterramento

Figura 10. Precipitação na cidade de Campina Grande (PB) entre os meses de Jul/2011 e fev/2012, temperatura e URA (Fonte: AESA – Paraíba e EMBRAPA - Paraíba).

Com o intuito de caracterizar o solo onde as hastes estão fincadas, foram realizadas medições de resistividade do solo, com o terrômetro digital. O procedimento de realização das medições está descrito na seção 3.2.1. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 2 e eles serviram de entrada no software TecAt Plus, para a estratificação do solo. A curva de estratificação do solo está apresentada na Figura 11.

O software estratificou o solo em três camadas, sendo a primeira camada com resistividade ρ_1 de 43,19 Ωm e altura h_1 de 0,75 m, a segunda camada com resistividade ρ_2 de 6,24 Ωm e altura h_2 de 0,55 m, e a terceira camada com resistividade ρ_3 de 76,10 Ωm e altura h_3 infinita. O erro obtido para a simulação, dado também pelo software, foi de 1%.

Tabela 2. Medição de resistividade do solo realizada com o terrômetro digital.

Espaçamento (m)	Direção A ($\Omega\text{.m}$)	Direção B ($\Omega\text{.m}$)
1	38,0	16,0
2	34,0	12,6
3	-	27,2
4	33,7	-
8	48,0	-

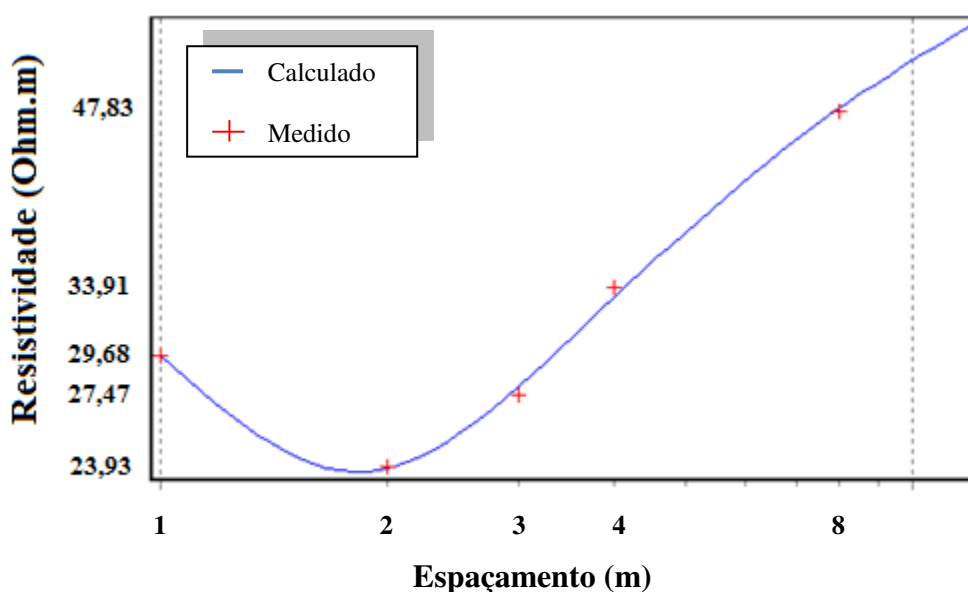


Figura 11. Estratificação do solo realizada pelo software TecAt Plus.

As medições da resistência de aterramento em baixa frequência foram realizadas também com o terrômetro digital, como descrito na seção 3.2.1. A Tabela 3 apresenta os resultados das medições de resistência, realizadas ao longo de 6 meses. Contudo, a haste

L8-1 foi enterrada no solo, posteriormente. A Figura 12 apresenta as curvas de variação da resistência ao longo do tempo para as hastes isoladas. Na análise do comportamento da resistência das hastes isoladas, deve-se considerar duas razões para a obtenção dos valores distintos de resistência: a compactação no solo ao redor das hastes de aterramento e a retenção de água pela estrutura de concreto.

Como pode ser visto nas Tabela 3, e nas curvas da Figura 12, a haste concretada L6-1, que não sofreu processo de cura do concreto, apresentou comportamento praticamente crescente da resistência, com uma tendência a estabilização em um valor próximo de 53,00 Ω .

A haste concretada L6-2, que sofreu processo de cura do concreto, também apresentou comportamento praticamente sempre crescente da resistência, com uma tendência a estabilização em um valor também próximo de 53,00 Ω . As duas hastes, com padrão de construção semelhante, apresentaram comportamento semelhante, com relação às medições de resistência. Não se observando assim, diferenças relacionadas à cura do concreto.

A haste concretada com 2% de bentonita, L7-3, apresentou comportamento crescente da resistência com os maiores valores entre todas as hastes até a alteração da umidade do solo. Assim, após um período de maior concentração de chuvas (mês de janeiro de 2012), a resistência da haste passou a diminuir significativamente (de 103,00 para 75,00 Ω). A diminuição da resistência evidencia que a estrutura de concreto com 2% de bentonita foi capaz de absorver a umidade presente no solo e conservá-la por algum tempo.

Tabela 3. Valores medidos de resistência de aterramento em baixa frequência, para as hastes isoladas.

Data das Medições	Valores de Resistência (Ω)				
	Haste Nua	L6-1	L6-2	L7-3	L8-1
26/07/11	25,60	-	31,40	-	-
01/08/11	25,00	32,30	26,90	28,90	-
12/08/11	24,90	32,70	31,00	32,80	-
24/08/11	24,60	36,10	32,70	35,30	-
07/09/11	25,60	40,30	38,00	44,20	-
21/09/11	25,50	43,10	41,40	47,80	33,40
28/09/11	25,50	43,80	42,40	48,30	32,80
14/10/11	25,20	47,50	46,00	49,70	36,60
02/11/11	25,30	52,30	48,70	54,40	44,80
21/11/11	24,90	52,60	53,30	87,60	40,40
12/12/11	25,00	52,40	57,70	93,50	59,80
11/01/12	26,60	54,60	63,90	103,00	81,30
01/02/12	24,90	54,60	53,50	90,20	43,50
24/02/12	23,90	54,00	52,60	75,00	37,70

Posteriormente, a haste L8-1, concretada com 5% de bentonita, foi fincada após um período de estiagem de quase 1 mês. A compactação do solo ao redor da haste foi precária e o solo se encontrava seco, conseqüentemente, a absorção de umidade foi mínima, o que justifica os altos valores de resistência medidos para a haste. No entanto, para o mesmo período de chuvas (mês de janeiro), a resistência da haste diminuiu significativamente (de 81,30 para 37,70 Ω), uma diminuição maior do que a haste L7-3. A diminuição da resistência evidencia que a estrutura de concreto com 5% de bentonita foi capaz de absorver ainda mais a umidade presente no solo e conservá-la por algum tempo.

Ainda pode ser visto que a resistência da haste nua permaneceu praticamente constante em um valor próximo de 25,00 Ω , ao longo dos 6 meses de medições.

Uma hipótese que pode justificar os valores mais altos de resistência medidos para todas as hastes concretadas, é que a compactação do solo ao redor do revestimento de concreto das hastes pode ser mais difícil do que para a haste nua. Como o processo de fincamento da haste nua foi feito por meio de batimento, e no processo de fincamento das hastes concretadas, foram feitos buracos e as hastes foram plantadas, foram criados vazios no solo ao redor das hastes concretadas, o que proporcionou um efeito capacitivo no solo.

A acomodação do solo, muitas vezes é obtida com a incidência de chuvas. Assim, recomenda-se a aplicação de água no terreno onde se encontra o sistema de aterramento com hastes concretadas, para realizar a acomodação do solo desses sistemas de aterramento, antes da energização dos mesmos.

Observando-se a Figura 12, a redução dos valores das resistências da hastes L7-3 e L8-1 podem ser justificadas pela absorção de água do solo pela haste e também pela compactação do solo promovida pela ação da chuva.

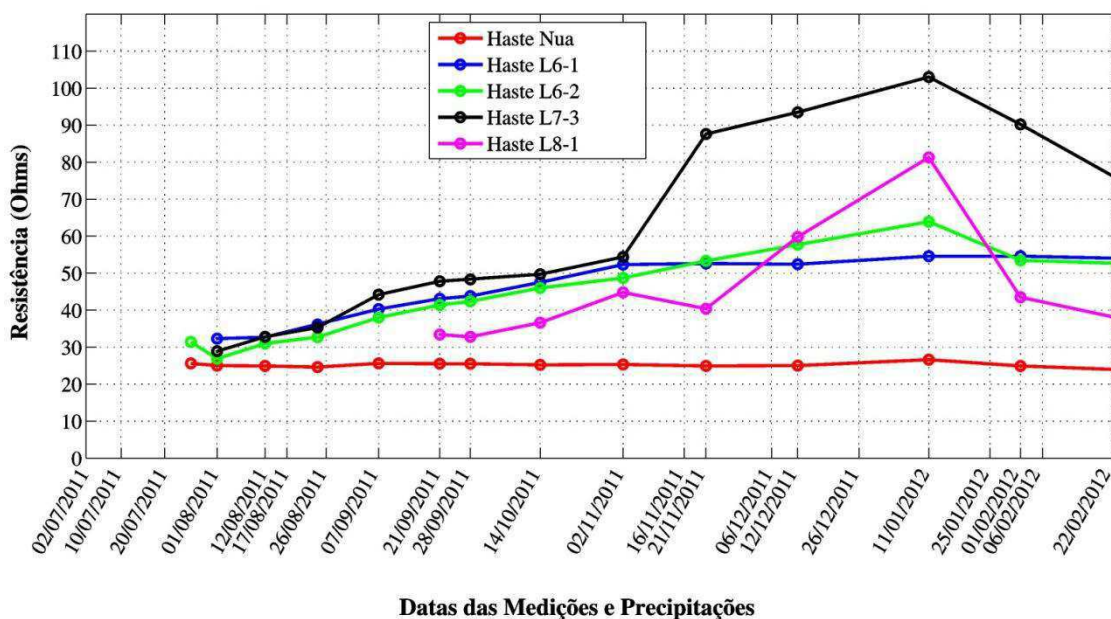


Figura 12. Curvas de variação da resistência em baixa frequência ao longo do tempo, para as hastes isoladas.

A Tabela 4 apresenta os resultados das medições, realizadas com o terrômetro digital, para as malhas triangulares, realizadas ao longo de 4 meses. A Figura 13 apresenta as curvas de variação da resistência ao longo do tempo para as malhas. As malhas foram construídas com hastes nuas, hastes concretadas sem bentonita e hastes concretadas com bentonita conforme descrito na seção 3.1.

Tabela 4. Valores medidos de resistência de aterramento em baixa frequência, para as malhas triangulares.

Data das Medições	Valores de Resistência (Ω)		
	Hastes Nuas	Hastes Concretadas sem Bentonita	Hastes Concretadas com Bentonita
14/10/11	-	26,70	-
02/11/11	-	15,20	-
21/11/11	-	6,47	-
12/12/11	8,46	6,81	10,10
11/01/12	8,60	7,68	9,75
01/02/12	7,16	6,63	6,90
24/02/12	6,99	6,48	6,67

Na análise do comportamento da resistência das malhas, deve-se considerar duas razões para a obtenção dos valores distintos de resistência: a compactação no solo ao redor das hastes e dos cabos de aterramento e a retenção de água pelo concreto.

Como pode ser visto na Tabela 4, e nas curvas da Figura 13, a malha com hastes concretadas sem bentonita teve uma redução inicial significativa nos valores de

resistência de aterramento, mesmo sendo construída no solo em um período de escassez de chuvas, com uma tendência a estabilização em um valor próximo de 6,60 Ω .

As malhas com hastes nuas e com hastes concretadas com bentonita foram construídas após algumas semanas da instalação da malha com hastes concretadas sem bentonita. A malha com hastes nuas também apresentou redução nos valores da resistência. Já a malha com hastes concretadas com bentonita teve uma redução inicial significativa na resistência (de 9,75 para 6,67 Ω), com uma tendência a estabilização em um valor próximo de 6,80 Ω .

Analisando as curvas da Figura 13, percebe-se que a partir da medição realizada no dia 12 de dezembro, as três malhas apresentaram comportamento bastante semelhante, e tendendo a uma diminuição. A malha com hastes concretadas sem bentonita foi a malha que apresentou os menores valores de resistência, após essa data. Com as chuvas do mês de janeiro, a diminuição da resistência foi pequena, para as três malhas.

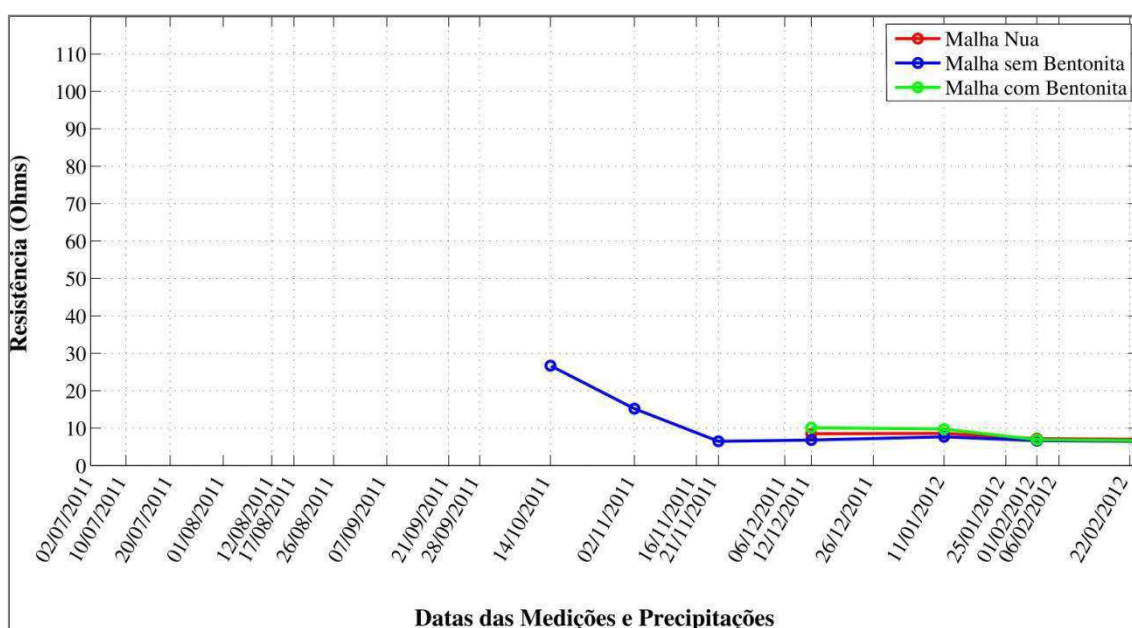


Figura 13. Curvas de variação da resistência em baixa frequência ao longo do tempo, para as malhas triangulares.

Comparando estes resultados com os obtidos em hastes individuais, percebe-se um comportamento melhor das hastes concretadas quando usadas em malhas.

Resalva-se que o solo utilizado no fincamento das hastes e das malhas era um solo com característica anisotrópica e com presença de rochas. Podendo-se ter características diferentes para a região onde as hastes e as malhas foram fincadas.

4.2 APLICAÇÃO DOS IMPULSOS DE CORRENTE

4.2.1 HASTES ENVOLVIDAS EM MOLDE METÁLICO

Com o objetivo de avaliar a suportabilidade do concreto aos impulsos de corrente de alta intensidade, foram realizados os ensaios com aplicação de impulsos de corrente com as hastes concretadas no interior de um molde metálico, como descrito na seção 3.2.2. Os impulsos foram aplicados entre a haste metálica e o molde metálico que revestia o concreto. Uma fotografia de uma das hastes concretadas, envolvida em papel alumínio, no interior do molde metálico é apresentada na Figura 14. Foram ensaiadas as hastes concretadas L1-2, L2-1 e L3-2. As formas de onda para as tensões e correntes apresentaram comportamento semelhante para as três hastes.



Figura 14. Fotografia de uma das hastes concretadas no interior do molde metálico.

Os revestimentos em concreto das hastes no molde metálico se quebravam facilmente durante os ensaios de aplicação de impulsos de alta corrente. Nos primeiros impulsos aplicados, com tensão de carregamento de 10 kV, as estruturas de concreto já apresentaram fissuras e protrusões comprometedoras para a continuidade dos ensaios. Os ensaios mostraram que a metodologia adotada permitia a circulação de correntes preferenciais, devido à deficiência do molde no envelopamento completo do concreto. O molde permitia a geração de regiões com campos elétricos altos, onde sempre ocorria a ruptura, isto é, a corrente impulsiva não se distribuía uniformemente fluía por toda estrutura de concreto.

Devido a isso, a meta de aplicar tensões de até 60 kV de tensão de carregamento não foi possível de se cumprir, pois se pretendia avaliar a suportabilidade do concreto aos impulsos de alta corrente. A metodologia de ensaio foi cancelada após os ensaios nas três hastes citadas.

A Figura 15 apresenta a forma de onda da tensão e da corrente na haste concretada L1-2, para um impulso típico de corrente, com tensão de carregamento dos capacitores de 10 kV.

As formas de onda de tensões e correntes evidenciam a ruptura da estrutura de concreto da haste. No momento da ruptura, pode ser observado um aumento brusco da corrente, com respectiva diminuição na tensão. Havendo ruptura do concreto com as hastes fincadas no solo, espera-se que um comportamento semelhante seja observado.

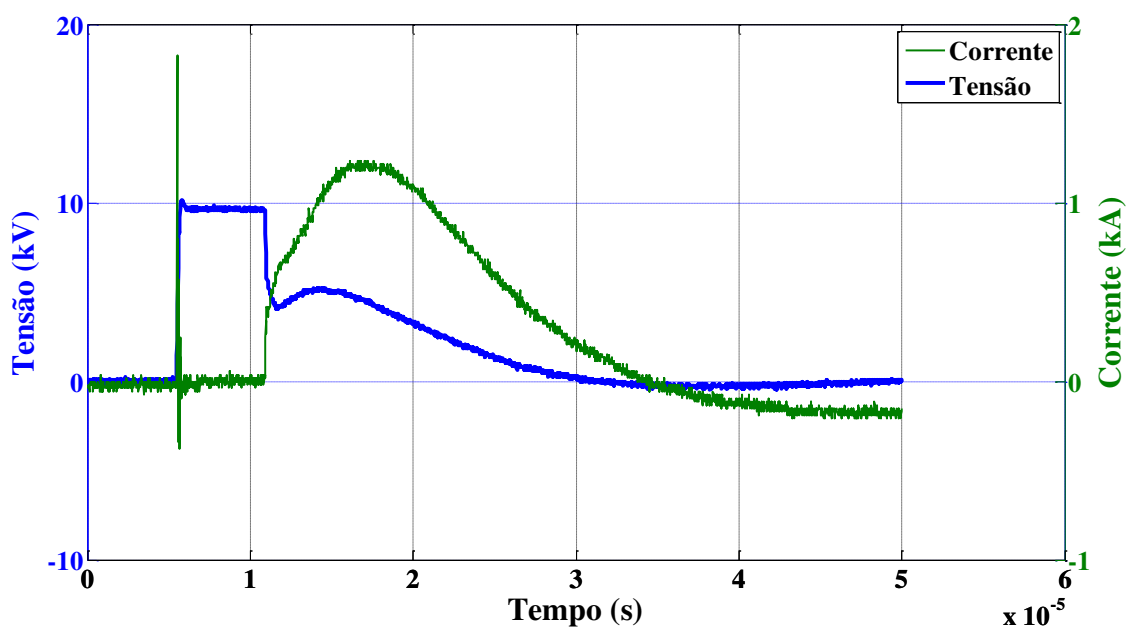


Figura 15. Comportamento de tensão e corrente para a haste concretada L1-2 para um impulso típico com tensão de carregamento de 10 kV.

Uma fotografia evidenciando a ruptura causada pelo impulso de corrente na estrutura de concreto de uma das hastes ensaiadas no molde metálico é apresentada na Figura 16.



Figura 16. Fotografia de ruptura na estrutura de concreto em uma das hastes concretadas.

4.2.2 HASTES FINCADAS NO SOLO

Os ensaios com aplicação de impulsos de corrente nas hastes isoladas e nas malhas triangulares fincadas no solo foram realizados como descrito na seção 3.2.2. Os resultados foram organizados de acordo com a configuração de sistema de aterramento (hastes isoladas e malhas triangulares) e estão apresentados a seguir.

Foi analisado o comportamento das tensões desenvolvidas por cada sistema de aterramento, correspondentes aos impulsos de corrente aplicados, no que diz respeito a valores de pico, decaimento dessas tensões e potenciais de segurança (toque e passo). São apresentadas também, as análises realizadas para as impedâncias impulsivas de aterramento e para a suportabilidade da estrutura de concreto aos impulsos de correntes aplicados.

Deve-se ressaltar que, de maneira geral, o comportamento dos diferentes sistemas de aterramento desenvolvidos se apresentou, na verdade, muito semelhante. As pequenas diferenças observadas podem ser justificadas pelos diferentes níveis de umidade no solo, como também, pela anisotropia do solo onde se realizaram os ensaios com característica seca e muito rochosa.

4.2.2.1 ANÁLISE DAS HASTES ISOLADAS

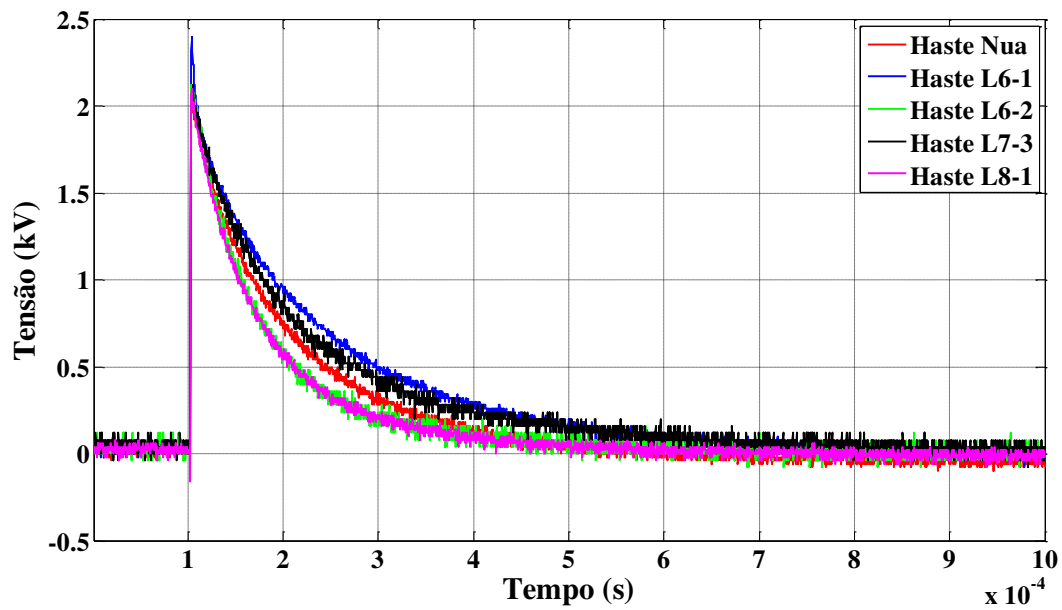
Esta análise é caracterizada pelos resultados dos ensaios com aplicação de impulsos de corrente nas hastes isoladas, ou seja, aplicação de impulsos em uma haste nua, nas hastes concretadas sem bentonita, L6-1 (que não sofreu processo de cura do

concreto) e L6-2 (que sofreu processo de cura do concreto), e nas hastes concretadas com níveis diferentes de dopagens de bentonita L7-3 (2%) e L8-1 (5%). Tem-se como objetivo avaliar o processo de concretagem e cura do concreto, além de analisar o efeito da concentração de bentonita misturada ao concreto no escoamento da corrente no solo. Pretende-se assim, identificar as principais diferenças entre os tipos de hastes e qual (is) seria(m) o(s) mais eficaz(es) para o uso em aterramento de sistemas elétricos, apresentando comportamento semelhante ou superior quando comparados a haste de aterramento convencional (nua).

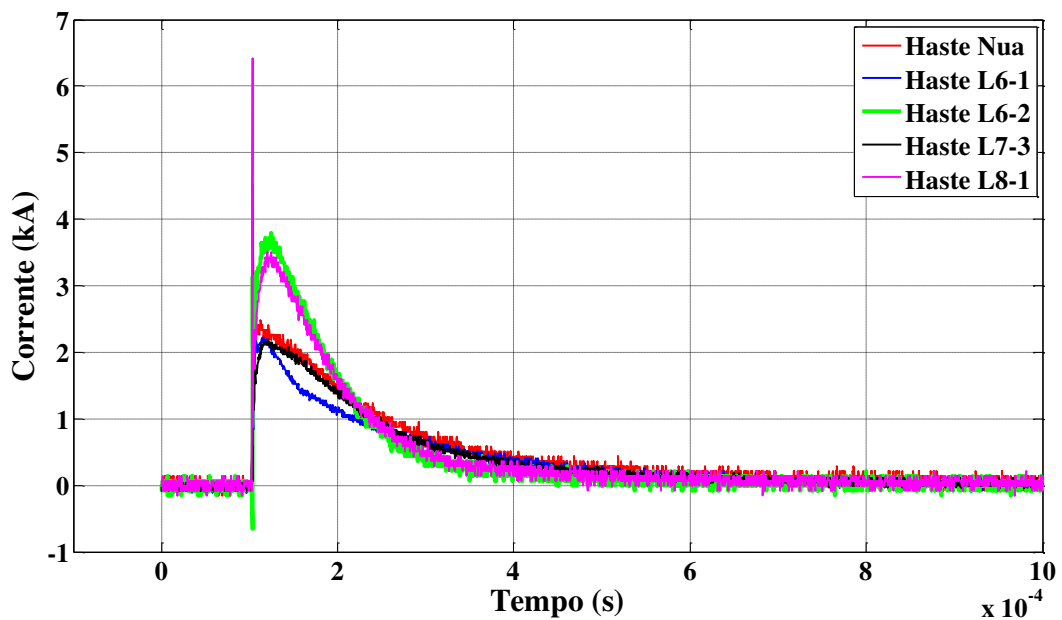
Os ensaios foram realizados no período de 02 a 05 de novembro para as hastes, nua, L6-1 e L6-2 e no período de 19 a 26 de novembro para as hastes L7-3 e L8-1. Observa-se na Figura 10 que ocorreram precipitações pluviométricas entre os períodos de realização dos ensaios. Portanto, as condições de temperatura e umidade do solo podem variar de um ensaio para outro.

Nos ensaios, a escala de tempo do osciloscópio foi ajustada para medir em 2,5 e 100 μs /divisão. Para um mesmo nível de tensão de carregamento dos capacitores, foram aplicados 3 impulsos com escala de tempo ajustada em 100 μs /divisão e mais 1 impulso com escala de tempo ajustada em 2,5 μs /divisão (totalizando 4 impulsos, para cada nível de tensão). Um total de 11 níveis de tensão de carregamento foi conseguido, variando os níveis a cada 5 kV, entre 10 e 60 kV.

Nas curvas apresentadas na Figura 17, verificam-se as formas de onda dos sinais de tensão e corrente obtidos em um impulso típico de corrente, com tensão de carregamento dos capacitores de 40 kV. De acordo com a metodologia adotada, foram obtidos os resultados apresentados a seguir.



(a)



(b)

Figura 17. Tensões e correntes para um impulso típico, com tensão de carregamento de 40 kV, aplicado nas hastes: nua, L6-1, L6-2, L7-3 e L8-1 (a) tensões; (b) correntes.

A Tabela 5 apresenta os valores das correntes máximas estabelecidas em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Tabela 5. Correntes máximas estabelecidas em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Tensão de Carregamento (kV)	Corrente Máxima Estabelecida na Haste (kA)				
	Haste Nua	L6-1	L6-2	L7-3	L8-1
10	0,646	0,369	0,490	0,355	0,437
15	0,897	0,620	0,909	0,551	0,716
20	1,198	0,852	1,349	0,738	1,148
25	1,585	1,203	1,945	1,02	1,758
30	1,968	1,485	2,423	1,275	2,282
35	2,168	1,558	3,038	1,731	2,902
40	2,350	2,178	3,713	2,168	3,499
45	2,893	2,592	4,342	2,565	4,063
50	3,038	3,052	5,002	3,048	4,733
55	3,508	3,408	5,453	3,685	5,398
60	3,836	4,068	6,405	4,045	6,409

Caso 1: Análise das tensões máximas estabelecidas em cada haste:

Com o objetivo de analisar a máxima tensão estabelecida (tensão residual) em cada haste, correspondente aos impulsos de corrente aplicados, foram utilizados os valores dos picos de tensão de todos os 44 impulsos. Para cada um dos 11 níveis de tensão de carregamento (10 kV, ... , 60 kV), com quatro impulsos para cada nível de tensão, foi calculado um valor médio dos picos da tensão estabelecida em cada haste. Com os 11 níveis de tensão de carregamento do gerador de impulsos e os 11 valores de pico de tensão (em cada haste) médios calculados, foi construída uma curva máxima tensão estabelecida na haste versus tensão de carregamento dos capacitores. A Figura 18 apresenta essa curva.

Na Figura 18 é mostrada que a tensão estabelecida nos terminais das hastes é proporcional ao aumento da tensão de carregamento. Na análise com os diferentes tipos de hastes, verificou-se que as hastes concretadas permitem a dissipação da corrente, de forma semelhante à haste nua. Com esta análise, constatou-se que a haste concretada L6-1, que não sofreu processo de cura do concreto, apresentou os maiores picos de tensão, nas maiores tensões de carregamento. As hastes: nua; concretada L6-2, que sofreu processo de cura do concreto e concretada L8-1, com 5% de bentonita apresentaram comportamento semelhante para os vários níveis de tensão de carregamento.

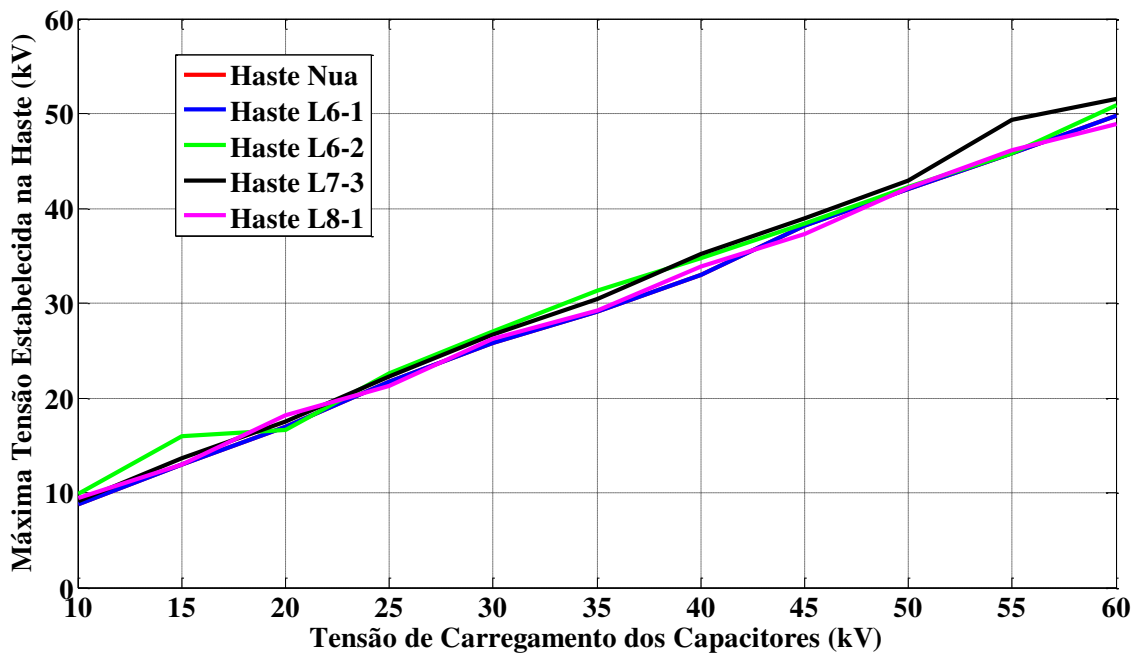


Figura 18. Tensões máximas estabelecidas em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Pela Figura 18 pode-se observar que os níveis das tensões aplicadas ainda não sofreram efeitos de outros mecanismos físicos, como a ionização do solo. Como as medições foram realizadas antes das chuvas do mês de janeiro, não se pode observar o efeito da diminuição das resistências das hastes concretadas com bentonita L7-3 e L8-1.

Caso 2: Análise do decaimento da onda de tensão em cada haste:

Com o objetivo de analisar o decaimento da onda de tensão estabelecida em cada haste, correspondente aos impulsos de corrente aplicados, foram utilizados os valores dos tempos de cauda da onda (correspondente as tensões de 50%), de 33 impulsos de corrente aplicados. Para cada um dos 11 níveis de tensão de carregamento (10 kV, ... , 60 kV), com três impulsos para cada nível de tensão, foi calculado um valor médio dos tempos de cauda. A Tabela 6 apresenta os 11 tempos de cauda médios de cada haste para os 11 níveis de tensão de carregamento do gerador de impulsos.

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram, para todas as hastes (nua e concretadas), que o aumento da tensão de carregamento, por conseguinte da tensão estabelecida nos terminais das hastes, proporciona uma redução no tempo de cauda da onda de tensão. A redução dos tempos de cauda evidencia que outro mecanismo físico esteja favorecendo a propagação da corrente no solo ou a absorção de carga pelo solo.

Uma hipótese para o mecanismo físico seria que a elevação da tensão proporcionaria a formação de íons no solo, isto é, promoveria a ionização do solo.

Tabela 6. Tempos de cauda da onda de tensão para as hastes isoladas.

Tensão de Carregamento (kV)	Tempo de Cauda da Onda de Tensão (10^{-4} s)				
	Haste Nua	L6-1	L6-2	L7-3	L8-1
10	1,822	2,131	1,727	2,277	2,060
15	1,757	2,058	1,688	2,156	1,892
20	1,735	1,984	1,645	2,052	1,712
25	1,699	1,904	1,578	1,955	1,607
30	1,689	1,884	1,526	1,866	1,552
35	1,670	1,789	1,512	1,775	1,538
40	1,656	1,774	1,483	1,738	1,502
45	1,627	1,692	1,474	1,683	1,479
50	1,607	1,685	1,450	1,627	1,466
55	1,603	1,648	1,435	1,598	1,451
60	1,567	1,613	1,410	1,579	1,393

Quando se compara os resultados de hastes concretadas que sofreram processo de cura (L6-2) e que não sofreram processo de cura (L6-1), torna-se evidente que o processo de cura do concreto reduz o tempo de cauda, para as mesmas tensões de carregamento. Pela Tabela 6, pode-se observar que a haste L6-2 apresentou escoamento mais rápido da tensão.

Já na comparação do tempo de cauda da tensão estabelecida na haste nua e nas hastes concretadas com a presença de bentonita (L7-3 e L8-1), mostra-se que o tempo de cauda é aumentado para a haste concretada com bentonita, com dopagem de 2% (L7-3). Quando se compara os tempos de cauda da haste nua com a haste concretada dopada com 5% (L8-1), observa-se que a haste apresenta valores de tempo de cauda inferiores aos da haste nua. Isto evidencia o efeito da dopagem com bentonita e que este mecanismo necessita ser melhor averiguado para permitir uma análise do efeito da quantidade percentual de dopantes na concretagem.

As teorias para explicar os mecanismos físicos que proporcionam a redução nos tempos de cauda nas hastes concretadas com e sem cura, e com a presença de bentonita necessitaria de estudos específicos e não se inclui nos objetivos deste trabalho.

Caso 3: Análise dos potenciais de toque em cada haste:

Com o objetivo de analisar o comportamento das hastes de aterramento desenvolvidas, perante os potenciais de toque, e em especial, os níveis dos potenciais nas hastes que poderiam comprometer os referenciais de isolamento de equipamentos e da proteção, foram idealizados experimentos com aplicação de impulsos de corrente nas hastes desenvolvidas. Os sinais de tensão obtidos nas hastes foram utilizados para comparar com os potenciais de toque e passo máximos calculados pelas expressões descritas na seção 3.2.3. Como não se conhece uma expressão para determinação da tensão de toque aplicável a impulsos de corrente, recorre-se a equação 2, que normalmente é utilizada no cálculo de potenciais de toque na condição de curto-circuito.

Na Figura 19 são apresentadas seis curvas: a curva em verde escuro, considera a curva de potencial de toque máxima permitida, no tempo, obtida utilizando a Equação 2. As outras cinco curvas representam, para cada haste, a média das tensões estabelecidas com correntes injetadas no solo obtidas com a aplicação dos 4 impulsos de corrente com tensão de carregamento de 60 kV.

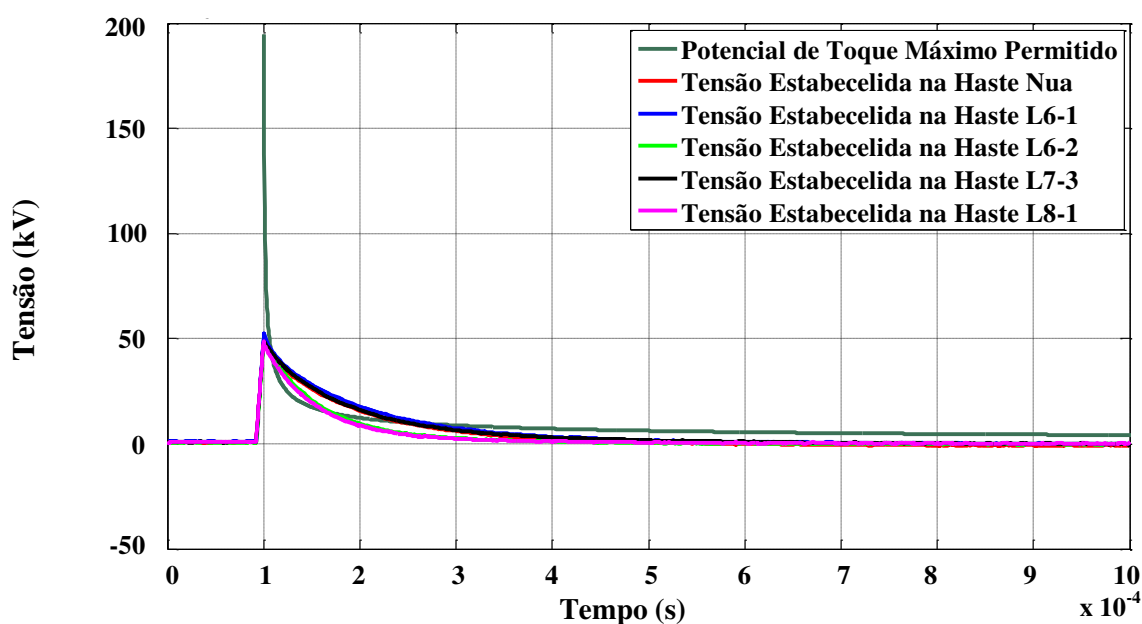


Figura 19. Curvas do potencial de toque máximo permitido, no tempo, e da tensão estabelecida na haste L6-1.

De acordo com a Figura 19, verifica-se que o sinal de tensão estabelecida, no tempo, em todas as hastes, é superior aos valores da tensão de toque máxima permitida, no tempo.

Caso 4: Análise dos potenciais de passo em cada haste:

Com o objetivo de analisar o comportamento das hastes de aterramento desenvolvidas, perante os potenciais de passo, os sinais de tensão obtidos nas hastes foram utilizados para comparar com os potenciais de passo e potenciais de passo máximos calculados pela Equação 3, descrita na seção 3.2.3. Como não se conhece uma expressão para determinação da tensão de passo aplicável a impulsos de corrente, recorre-se a Equação 3, que normalmente é utilizada no cálculo de potenciais de passo na condição de curto-circuito.

Na Tabela 7 estão apresentados os potenciais de passo máximos permitidos para o solo onde se realizaram os ensaios. Os potenciais de passo máximos foram calculados a partir da Equação 3, apresentada na seção 3.2.3, adotando-se um tempo t de $0,05 \mu\text{s}$ e atribuindo-se à resistividade superficial do solo (ρ_s) o valor da resistividade da primeira camada do solo (ρ_1). O seu valor, dado pelo software TecAt, foi de $43,19 \Omega\text{m}$.

Tabela 7. Limites de potenciais de segurança (potencial de passo).

Potencial de Passo	Massa Média do Indivíduo	
	50 kg	70 kg
	653,201 kV	884,074 kV

O potencial de passo aproximado, no instante da ocorrência do impulso de corrente, pode ser calculado a partir das curvas da tensão estabelecidas, obtidas nas medições, em cada haste. Foi considerada uma velocidade de propagação no solo de $20 \times 10^6 \text{ m/s}$. Este valor foi obtido em medições realizadas no próprio solo. Assim, conhecendo-se o valor da velocidade de propagação do impulso de corrente no solo, foi calculado o tempo que o impulso levaria, a partir do momento do pico, para se propagar no solo a uma distância aproximada de 1 metro. Este tempo foi calculado em $0,05 \mu\text{s}$. Considerando que a determinação dos potenciais de passo, é calculada pela maior diferença de tensões no tempo, e analisando-se as curvas obtidas nas medições, escolheu-se o intervalo de tempo e a diferença de potencial, após a ocorrência do pico da tensão. Na Tabela 8 estão apresentados os potenciais de passo máximos obtidos em cada haste para esse intervalo de tempo.

Pela Tabela 8, pode ser observado que nenhuma das hastes, apresentou variações de tensão maiores do que o potencial de passo máximo calculado (Tabela 7), tanto

considerando uma pessoa com 50 kg, como para uma pessoa com 70 kg. Ou seja, nenhuma das hastes apresentou potenciais de passo elevados, pondo em risco a segurança de pessoas.

Tabela 8. Potenciais de passo verificados para as hastes isoladas.

Tensão de Carregamento (kV)	Potencial de Passo Máximo na Haste (V)				
	Haste Nua	L6-1	L6-2	L7-3	L8-1
10	1,63	6,75	4,00	5,25	2,63
15	28,75	27,75	15,00	6,25	3,75
20	15,00	37,50	8,75	3,75	10,00
25	18,75	48,75	8,75	3,75	13,75
30	16,25	23,75	17,50	2,50	23,75
35	8,75	17,50	5,00	2,50	22,50
40	10,00	20,00	13,75	13,75	5,00
45	7,50	32,50	17,50	8,75	35,00
50	33,75	38,75	8,75	28,75	3,75
55	8,75	42,50	17,50	61,25	30,00
60	33,75	48,75	38,75	21,25	35,00

Caso 5: Análise da impedância impulsiva de aterramento

Com o objetivo de analisar o comportamento da impedância impulsiva das diversas hastes fincadas no solo, utilizou-se a Equação 1. Assim, a Tabela 9 apresenta os valores calculados para as impedâncias impulsivas para as hastes considerando os vários níveis da tensão de carregamento. A Figura 20 apresenta as curvas de variação da impedância impulsiva em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Tabela 9. Impedância impulsiva de aterramento determinada para as hastes isoladas.

Tensão de Carregamento (kV)	Impedância Impulsiva (Ω)				
	Haste Nua	L6-1	L6-2	L7-3	L8-1
10	13,601	23,625	20,081	25,780	21,522
15	14,440	21,024	17,589	24,755	18,167
20	14,117	21,626	12,292	23,774	15,858
25	13,715	18,196	11,594	21,838	12,076
30	13,090	18,074	11,168	20,965	11,496
35	13,433	18,742	10,319	17,603	10,083
40	14,043	15,909	9,362	16,236	9,683
45	13,189	14,843	8,854	15,171	9,178
50	13,850	14,615	8,445	14,093	8,896
55	13,064	14,783	8,392	13,381	8,543
60	12,969	12,736	7,952	12,754	7,621

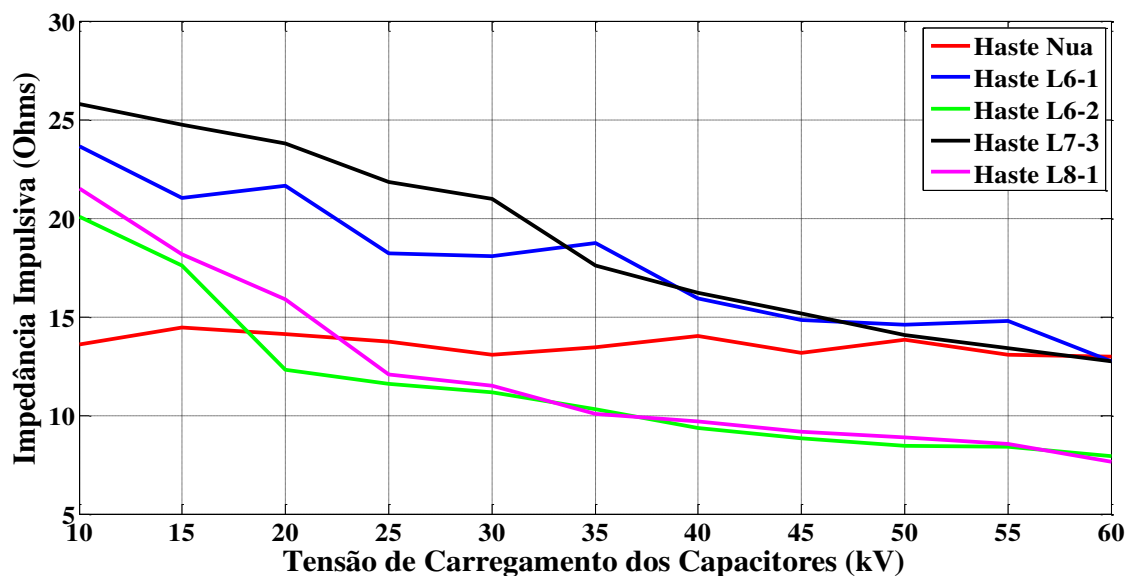


Figura 20. Curvas de variação da impedância impulsiva para cada nível de tensão de carregamento aplicado, para as hastes isoladas.

Pela Tabela 9 e pelas curvas da Figura 20 pode-se observar que todas as hastes concretadas apresentaram redução nos valores da impedância impulsiva com o aumento da tensão de carregamento, enquanto que a haste nua apresentou uma maior constância nos valores, mesmo com o aumento da tensão de carregamento.

Segundo, Visacro Filho *et al.* (2011), com os valores da impedância impulsiva, pode-se estimar o maior nível de sobretensão desenvolvido em um sistema de aterramento, conhecendo-se o valor da corrente impulsiva que o atingiu. Sendo assim, para a haste nua, por apresentar constância nos valores da impedância, a afirmação de Visacro pode ser considerada correta. Contudo, os resultados experimentais com as hastes concretadas, mostram que a impedância impulsiva varia com a tensão estabelecida nos seus terminais. Sendo assim, a afirmação não pode ser considerada, pois se supõem que outros mecanismos de condução da corrente possam estar presentes.

Comparando os valores de resistência em baixa frequência medidos (Tabela 3) com os valores das impedâncias impulsivas determinados pela Equação 1, constatou-se que, em todos os casos, a resistência foi maior do que a impedância impulsiva. Assim, em concordância com Visacro Filho *et al.* (2011), isto evidencia o papel relevante desempenhado pelas correntes capacitivas no solo, responsáveis pela redução da impedância impulsiva em relação à resistência de aterramento.

Caso 6: Análise da suportabilidade das estruturas de concreto:

Com o objetivo de analisar a suportabilidade da estrutura de concreto das hastes concretadas sem bentonita, L6-1 (que não sofreu processo de cura do concreto) e L6-2 (que sofreu processo de cura do concreto), e das hastes concretadas com níveis diferentes de dopagens de bentonita L7-3 (2%) e L8-1 (5%), foram realizadas campanhas de ensaios com aplicação de impulsos de corrente. Desse modo pretende-se verificar se a estrutura de concreto das hastes é capaz de suportar os esforços provocados pelas altas correntes aplicadas, sem apresentar fissuras ou protuberâncias. A análise da suportabilidade da estrutura de concreto foi realizada como descrito na seção 3.2.4.

Foi realizada uma inspeção visual nas hastes isoladas que seriam submetidas aos impulsos de corrente antes da aplicação dos impulsos. Após a aplicação de todos os 44 impulsos, as hastes foram retiradas do solo para uma nova inspeção visual da estrutura de concreto. Notou-se que todas as hastes suportaram bem as solicitações impostas, não apresentando evidências de danos ou fissuras na inspeção visual.

A Figura 15 mostra as formas de onda da tensão e corrente quando da ocorrência de uma ruptura do concreto. Assim, outra maneira de se analisar a suportabilidade das estruturas de concreto é o uso das respostas obtidas das curvas de tensão e corrente. As formas de onda não mostraram evidências de degradação do revestimento das hastes concretadas, pois não ocorreram oscilações ou *spikes* em nenhum ponto das curvas. A Figura 21 apresenta a evolução das correntes para a haste concretada L7-3 para três impulsos típicos com três níveis de tensão de carregamento aplicados (10, 35 e 60 kV), evidenciando que não houve dano a estrutura de concreto. Os *spikes* positivos e negativos observados no início do impulso, em algumas curvas, foram considerados como sendo ruídos inerentes às medições.

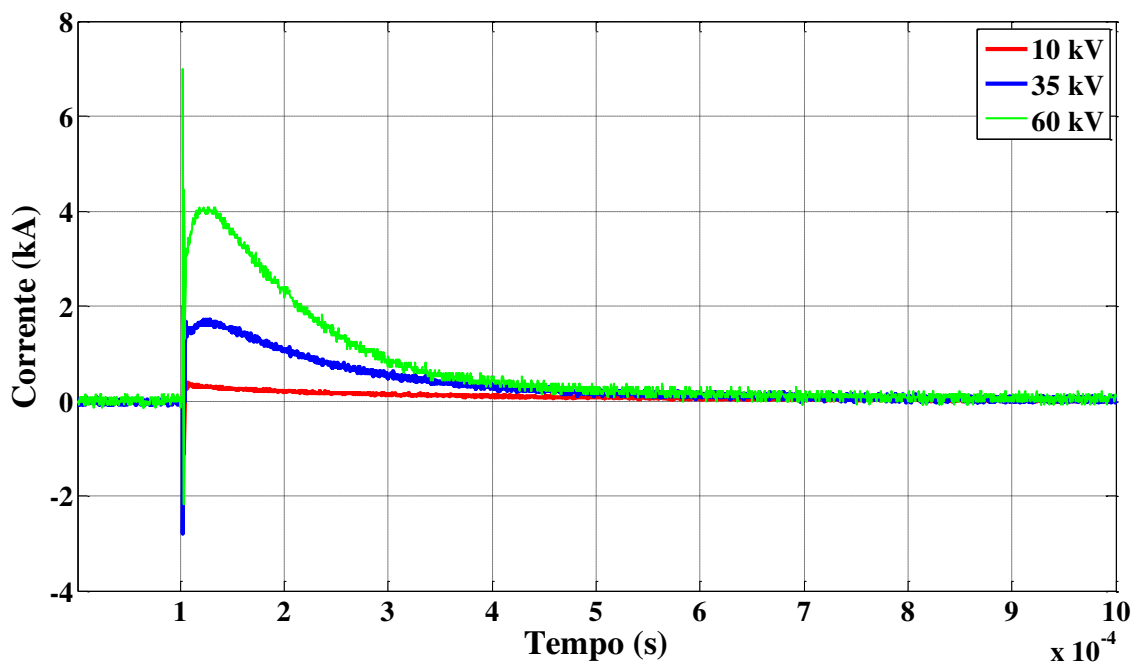


Figura 21. Formas de onda das correntes para a haste L7-3 para impulsos aplicados com tensões de carregamento de 10, 35 e 60 kV.

4.2.2.2 ANÁLISE DAS MALHAS

Esta análise é caracterizada pelos resultados dos ensaios com aplicação de impulsos de corrente nas três malhas triangulares, com hastes nuas, hastes concretadas sem bentonita, e hastes concretadas com 5% de dopagem de bentonita. Tem-se como objetivo analisar o efeito da concentração de bentonita misturada ao concreto no escoamento da corrente no solo. Pretende-se assim, identificar as principais diferenças entre os tipos de malhas e qual (is) seria (m) o (os) mais eficaz (es) para o uso em aterramento de sistemas elétricos, apresentando comportamento semelhante ou superior quando comparados a malha de aterramento convencional (com hastes nuas).

Os ensaios foram realizados no período de 26 de novembro a 03 de dezembro. Observa-se na Figura 10 que houve precipitação pluviométrica dias antes do período de realização dos ensaios, mas que não houve precipitação durante o período. Ainda assim, como os experimentos não foram todos realizados em um mesmo dia, as condições de temperatura e umidade do solo podem variar de um ensaio para outro.

Nesses ensaios, a escala de tempo do osciloscópio foi ajustada para medir em 2,5 e 50 μs /divisão. Para um mesmo nível de tensão de carregamento dos capacitores, foram aplicados 3 impulsos com escala de tempo ajustada em 50 μs /divisão e mais 1 impulso com escala de tempo ajustada em 2,5 μs /divisão (totalizando 4 impulsos, para cada nível

de tensão). Um total de 11 níveis de tensão de carregamento foi conseguido, variando os níveis a cada 5 kV, entre 10 e 60 kV.

Nas curvas apresentadas na Figura 22, verificam-se as formas de onda dos sinais de tensão e corrente obtidos para um mesmo impulso típico de corrente, com tensão de carregamento dos capacitores de 40 kV. De acordo com a metodologia adotada, foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

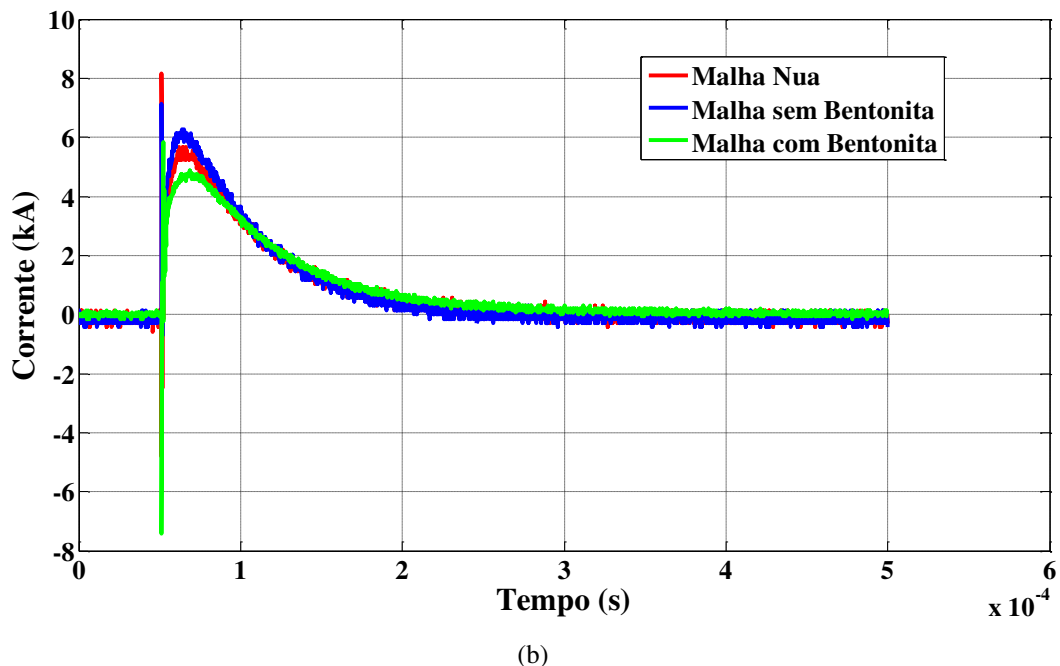
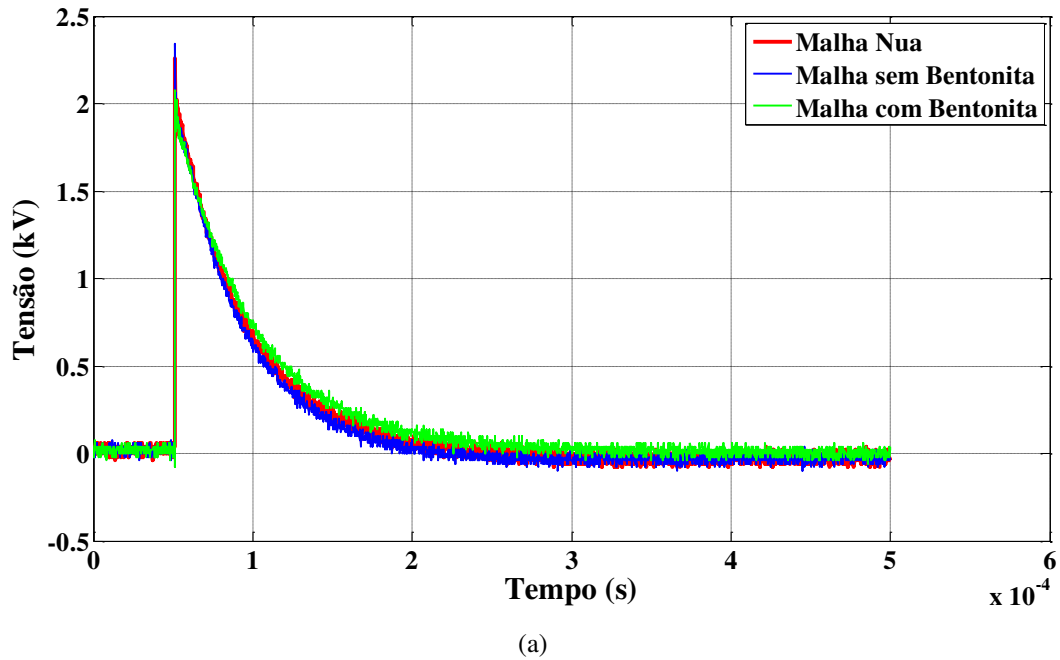


Figura 22. Tensões e correntes para um impulso típico, com tensão de carregamento de 40 kV, aplicado nas malhas triangulares: com hastes nuas, com hastes sem bentonita e com hastes com bentonita (a) tensões; (b) correntes.

A Tabela 10 apresenta os valores das correntes máximas estabelecidas em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Tabela 10. Correntes máximas estabelecidas em cada malha triangular, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Tensão de Carregamento (kV)	Corrente Máxima Estabelecida na Malha (kA)		
	Hastes Nuas	Hastes Concretadas sem Bentonita	Hastes Concretadas com Bentonita
10	1,558	1,667	0,892
15	2,136	2,442	1,435
20	2,865	3,252	2,127
25	3,549	3,986	2,843
30	4,359	4,847	3,644
35	4,989	5,608	4,519
40	5,767	6,045	4,805
45	6,514	6,906	5,525
50	7,288	7,831	5,990
55	8,140	8,623	6,920
60	8,883	8,901	7,685

Caso 1: Análise das tensões máximas estabelecidas em cada malha:

Com o objetivo de analisar a máxima tensão estabelecida (tensão residual) em cada malha triangular, correspondentes aos impulsos de corrente aplicados, foram utilizados os valores dos picos de tensão de todos os 44 impulsos. Para cada um dos 11 níveis de tensão de carregamento (10 kV, ... , 60 kV), com quatro impulsos para cada nível de tensão, foi calculado um valor médio dos picos da tensão estabelecida em cada malha. Com os 11 níveis de tensão de carregamento do gerador de impulsos e os 11 valores de pico de tensão (em cada malha) médios calculados foi construída uma curva máxima tensão estabelecida na malha versus tensão de carregamento dos capacitores. A Figura 23 apresenta essa curva.

Na Figura 23 é mostrada que a tensão estabelecida nos terminais das malhas também é proporcional ao aumento da tensão de carregamento. Na análise com os diferentes tipos de malhas, verificou-se que as malhas com hastes concretadas, com e sem bentonita, permitem a dissipação da corrente, de forma semelhante à malha com hastes nuas. Com essa análise, constatou-se que a malha com hastes concretadas, com bentonita, apresentou os menores picos de tensão, nas maiores tensões de carregamento. E que a malha com hastes nuas apresentou os maiores picos de tensão, nas maiores tensões de carregamento.

Pela Figura 23 pode-se observar que os níveis das tensões aplicadas ainda não sofreram efeitos de outros mecanismos físicos, como a ionização do solo.

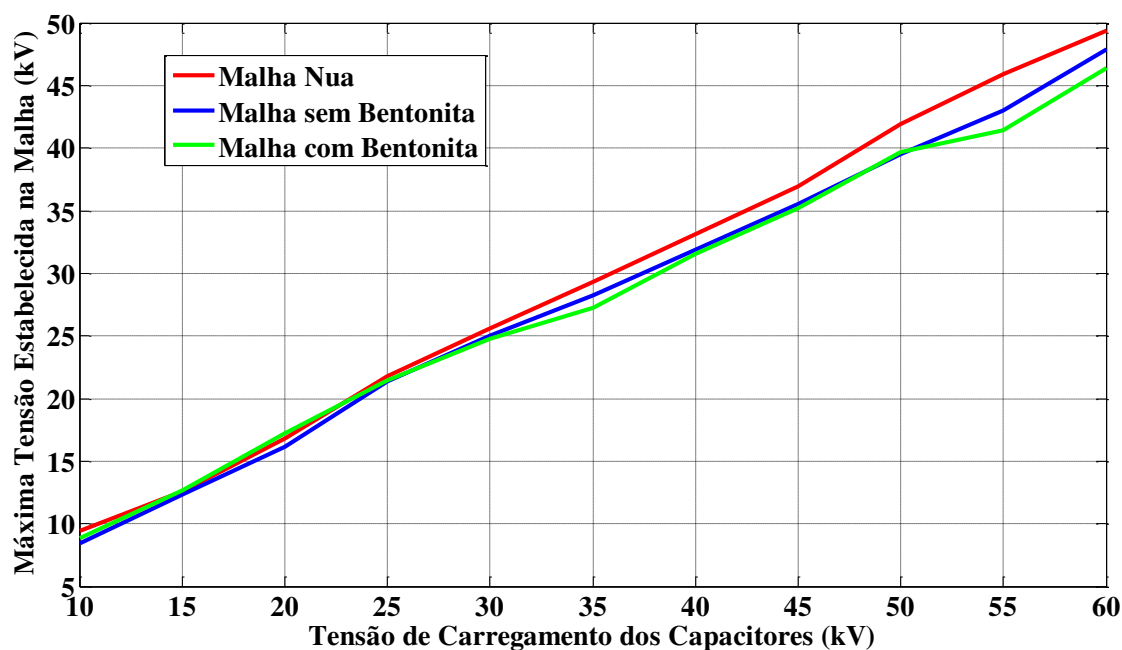


Figura 23. Tensões máximas estabelecidas em cada malha triangular, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Caso 2: Análise do decaimento da onda de tensão em cada malha:

Com o objetivo de analisar o decaimento da onda de tensão estabelecida em cada malha, correspondente aos impulsos de corrente aplicados, foram utilizados os valores dos tempos de cauda (correspondente a tensão de 50%), de 33 impulsos de corrente aplicados. Para cada um dos 11 níveis de tensão de carregamento (10 kV, ... , 60 kV), com três impulsos para cada nível de tensão, foi calculado um valor médio dos tempos de cauda. A Tabela 11 apresenta os 11 tempos de cauda médios de cada malha para os 11 níveis de tensão de carregamento do gerador de impulsos.

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram, para todas as malhas construídas (com hastes nuas e concretadas), que o aumento da tensão de carregamento, por conseguinte da tensão estabelecida nos terminais das malhas, proporciona uma redução no tempo de cauda da onda de tensão. A redução dos tempos de cauda evidencia que outro mecanismo físico esteja favorecendo a propagação da corrente no solo ou a absorção de carga pelo solo. Uma hipótese para o mecanismo físico seria que a elevação da tensão proporcionaria a formação de íons no solo, isto é, promoveria a ionização do solo.

Tabela 11. Tempos de cauda da onda de tensão para as malhas triangulares.

Tensão de Carregamento (kV)	Tempo de Cauda da Onda de Tensão (10^{-4} s)		
	Hastes Nuas	Hastes Concretadas sem Bentonita	Hastes Concretadas com Bentonita
10	1,639	1,616	2,066
15	1,634	1,606	1,926
20	1,621	1,598	1,812
25	1,609	1,589	1,740
30	1,604	1,586	1,721
35	1,594	1,583	1,701
40	1,591	1,580	1,701
45	1,584	1,577	1,691
50	1,573	1,574	1,668
55	1,566	1,566	1,667
60	1,559	1,558	1,655

Pela Tabela 11 pode-se observar ainda que, para as malhas confeccionadas e ensaiadas com aplicação de impulsos de alta corrente, a presença de bentonita aumenta o tempo para a onda de tensão atingir o tempo de cauda em comparação com a malha com hastes nuas e com hastes concretadas sem bentonita. A malha com hastes concretadas sem bentonita apresentou os menores tempos de cauda.

Caso 3: Análise dos potenciais de toque em cada malha:

Com o objetivo de analisar o comportamento das malhas triangulares desenvolvidas, perante os potenciais de toque, e em especial, os níveis dos potenciais nas malhas que poderiam comprometer os referenciais de isolamento de equipamentos e da proteção, foram idealizados experimentos com aplicação de impulsos de corrente nas malhas construídas. Os sinais de tensão obtidos nas malhas foram utilizados para comparar com os potenciais de toque e passo máximos calculados pelas expressões descritas na seção 3.2.3. Como não se conhece uma expressão para determinação da tensão de toque aplicável a impulsos de corrente, recorre-se a equação 2, que normalmente é utilizada no cálculo de potenciais de toque na condição de curto-circuito.

Na Figura 24 são apresentadas quatro curvas: a curva em verde escuro, considera a curva de potencial de toque máxima permitida, no tempo, obtida utilizando a Equação 2. As outras três curvas representam, para cada malha, a média das tensões estabelecidas com correntes injetadas no solo obtidas com a aplicação dos 4 impulsos de corrente com tensão de carregamento de 60 kV.

De acordo com a Figura 24, verifica-se que o sinal de tensão estabelecida, no tempo, em todas as malhas, é superior aos valores da tensão de toque máxima permitida, no tempo.

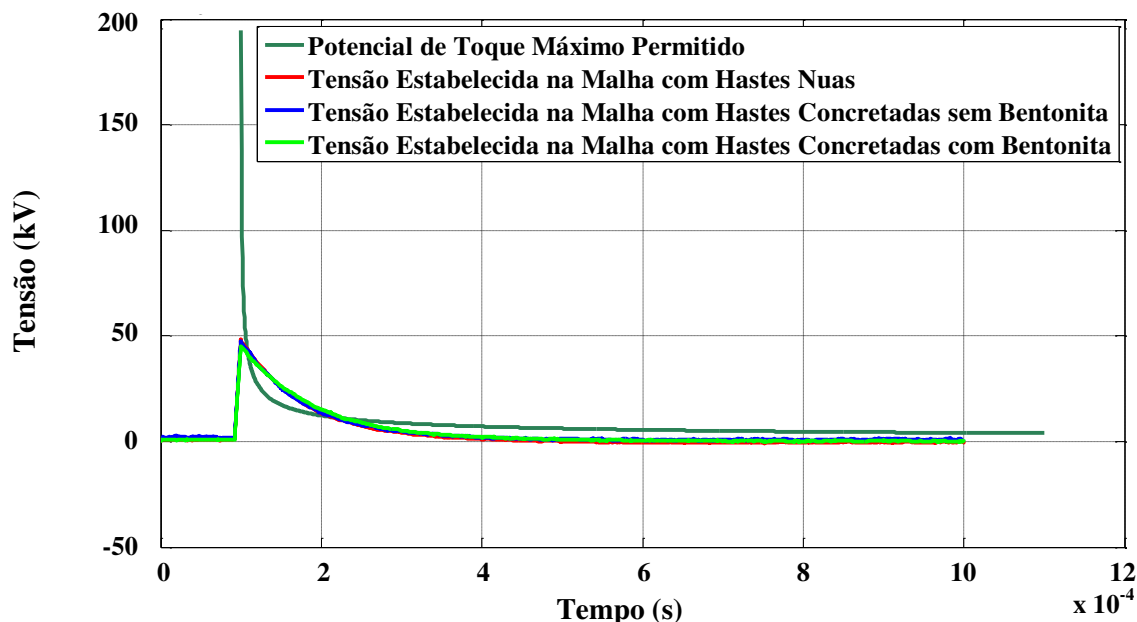


Figura 24. Curvas do potencial de toque máximo permitido, no tempo, e da tensão estabelecida na malha concretada com bentonita.

Caso 4: Análise dos potenciais de passo em cada malha:

Com o objetivo de analisar o comportamento das malhas de aterramento desenvolvidas, perante os potenciais de passo, os sinais de tensão obtidos nas malhas foram utilizados para comparar com os potenciais de passo e potenciais de passo máximos calculados pela Equação 3, descrita na seção 3.2.3. Como não se conhece uma expressão para determinação da tensão de passo aplicável a impulsos, recorre-se a Equação 3, que normalmente é utilizada no cálculo de potenciais de passo na condição de curto-circuito.

Os potenciais de passo máximos permitidos para o solo onde se realizaram os ensaios foram calculados a partir da Equação 3, apresentada na seção 3.2.3, adotando-se um tempo t de $0,05 \mu\text{s}$ e atribuindo-se à resistividade superficial do solo (ρ_s) o valor da resistividade da primeira camada do solo (ρ_1). O seu valor, dado pelo software TecAt, foi de $43,19 \Omega\text{m}$. Os valores, são os mesmos para as hastes isoladas e estão apresentados na Tabela 7.

O potencial de passo aproximado, no instante da ocorrência do impulso de corrente, pode ser calculado a partir das curvas da tensão estabelecidas, obtidas nas

medições, em cada malha. Foi considerando uma velocidade de propagação no solo de 20×10^6 m/s. Este valor foi obtido em medições realizadas no próprio solo. Assim, conhecendo-se o valor da velocidade de propagação do impulso de corrente no solo, foi calculado o tempo que o impulso levaria, a partir do momento do pico, para se propagar no solo a uma distância aproximada de 1 metro. Este tempo foi calculado em $0,05 \mu\text{s}$. Considerando que a determinação dos potenciais de passo, é calculada pela maior diferença de tensões no tempo, e analisando-se as curvas obtidas nas medições, escolheu-se o intervalo de tempo e a diferença de potencial, após a ocorrência do pico da tensão. Na Tabela 12 estão apresentados os potenciais de passo máximos obtidos em cada malha para esse intervalo de tempo.

Tabela 12. Potenciais de passo verificados para as malhas triangulares.

Tensão de Carregamento (kV)	Potencial de Passo Máximo na Malha (V)		
	Hastes Nuas	Hastes Concretadas sem Bentonita	Hastes Concretadas com Bentonita
10	1,63	6,75	4,00
15	28,75	27,75	15,00
20	15,00	37,50	8,75
25	18,75	48,75	8,75
30	16,25	23,75	17,50
35	8,75	17,50	5,00
40	10,00	20,00	13,75
45	7,50	32,50	17,50
50	33,75	38,75	8,75
55	8,75	42,50	17,50
60	33,75	48,75	38,75

Pela Tabela 12, pode ser observado que nenhuma das malhas, apresentou variações de tensão maiores do que o potencial de passo máximo calculado (Tabela 7), tanto considerando uma pessoa com 50 kg, como para uma pessoa com 70 kg. Ou seja, nenhuma das malhas apresentou potenciais de passo elevados, pondo em risco a segurança de pessoas.

Caso 5: Análise da impedância impulsiva de aterramento:

Com o objetivo de analisar o comportamento da impedância impulsiva das malhas enterradas no solo, utilizou-se a Equação 1. Assim, a Tabela 13 apresenta os valores calculados para as impedâncias impulsivas para as malhas considerando os vários níveis da tensão de carregamento. A Figura 25 apresenta as curvas de variação da

impedância impulsiva em cada haste, para cada nível de tensão de carregamento aplicado.

Tabela 13. Impedância impulsiva determinada para as malhas triangulares.

Tensão de Carregamento (kV)	Impedância Impulsiva (Ω)		
	Hastes Nuas	Hastes Concretadas sem Bentonita	Hastes Concretadas com Bentonita
10	6,037	5,376	9,909
15	5,897	5,354	8,834
20	5,855	5,277	8,094
25	6,129	5,163	7,535
30	5,880	5,141	6,800
35	5,876	5,064	6,037
40	5,741	5,056	6,565
45	5,670	5,043	6,371
50	5,751	5,031	6,625
55	5,642	4,988	5,985
60	5,563	4,955	6,033

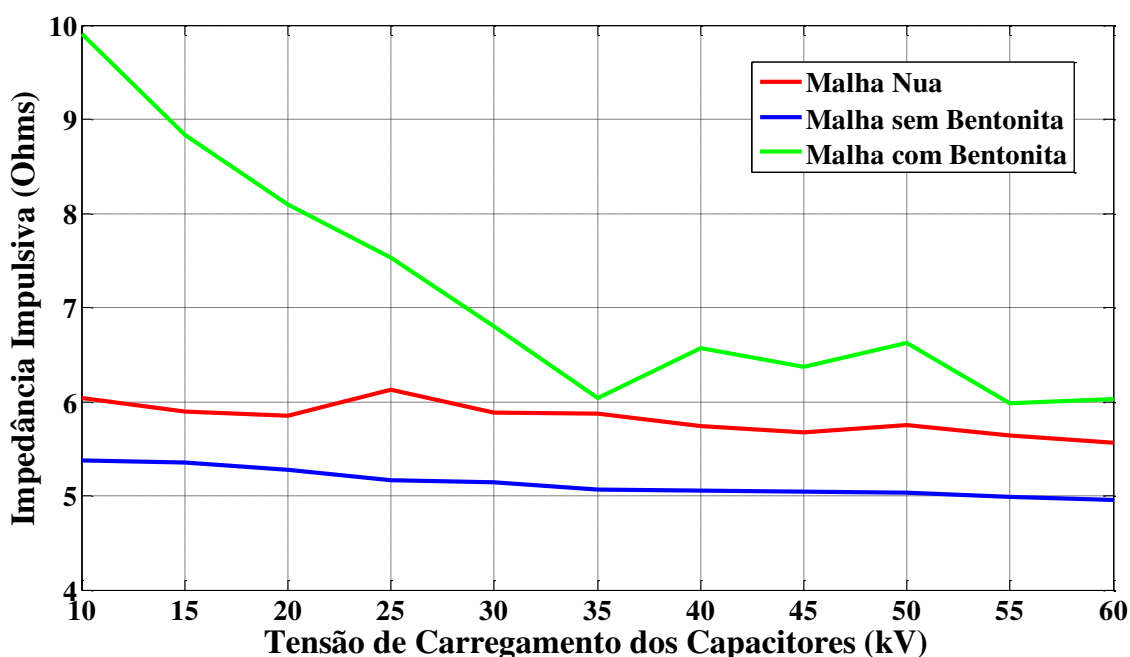


Figura 25. Curvas de variação da impedância impulsiva para cada nível de tensão de carregamento aplicado, para as malhas triangulares.

Pela Tabela 13 e pelas curvas da Figura 25 pode-se observar que as malhas com hastes concretadas com e sem bentonita apresentaram uma redução nos valores da impedância impulsiva com o aumento da tensão de carregamento, enquanto que a malha com hastes nuas apresentou uma maior constância nos valores, mesmo com o aumento da tensão de carregamento.

Segundo, Visacro Filho *et al.* (2011), com os valores da impedância impulsiva, pode-se estimar o maior nível de sobretensão desenvolvido em um sistema de aterramento, conhecendo-se o valor da corrente impulsiva que o atingiu. Sendo assim, para a malha com hastes nuas, por apresentar constância nos valores da impedância, a afirmação de Visacro pode ser considerada correta. Contudo, os resultados experimentais para as malhas com hastes concretadas, com e sem bentonita, mostram que a impedância impulsiva varia com a tensão estabelecida nos seus terminais. Sendo assim, a afirmação não pode ser considerada, pois se supõem que outros mecanismos de condução da corrente possam estar presentes.

Comparando os valores de resistência em baixa frequência medidos (Tabela 4) com os valores das impedâncias impulsivas determinados pela Equação 1, constatou-se que, para as malhas com hastes nuas e hastes concretadas sem bentonita, a resistência foi maior do que a impedância impulsiva. Assim, em concordância com Visacro Filho *et al.* (2011), isto evidencia o papel relevante desempenhado pelas correntes capacitivas no solo, responsáveis pela redução da impedância impulsiva em relação à resistência de aterramento. Para a malha com hastes concretadas com bentonita, houve uma tendência nos valores de impedâncias impulsivas de atingir os valores de resistência de aterramento em baixa frequência medidos com o terrômetro digital.

Caso 6: Análise da suportabilidade das estruturas de concreto:

Com o objetivo de analisar a suportabilidade da estrutura de concreto das malhas triangulares, com hastes concretadas sem bentonita, e hastes concretadas com 5% de dopagem de bentonita, foram realizadas campanhas de ensaios com aplicação de impulsos de corrente. Desse modo pretende-se verificar se a estrutura de concreto das malhas é capaz de suportar os esforços provocados pelas altas correntes aplicadas, sem apresentar fissuras ou protusões. A análise da suportabilidade da estrutura de concreto foi realizada como descrito na seção 3.2.4.

Antes da aplicação dos impulsos de corrente, foi realizada uma inspeção visual em todas as hastes que seriam utilizadas na confecção das malhas, e que seriam submetidas aos impulsos. Após a aplicação de todos os 44 impulsos, devido à maior complexidade deste sistema de aterramento, as hastes não foram retiradas do solo.

A Figura 15 mostra as formas de onda da tensão e corrente quando da ocorrência de uma ruptura do concreto. Assim, outra maneira de se analisar a suportabilidade das

estruturas de concreto é o uso das respostas obtidas das curvas de tensão e corrente. As formas de onda não mostraram evidências de degradação do revestimento das hastes concretadas, pois não ocorreram oscilações ou *spikes* em nenhum ponto das curvas. A Figura 26 apresenta a evolução das correntes para as hastes concretadas constituintes da malha sem bentonita para três impulsos típicos com três níveis de tensão de carregamento aplicados (10, 35 e 60 kV), evidenciando que não houve dano a estrutura de concreto. Da mesma forma, os *spikes* positivos e negativos observados no início do impulso, em algumas curvas, foram considerados como sendo ruídos inerentes às medições.

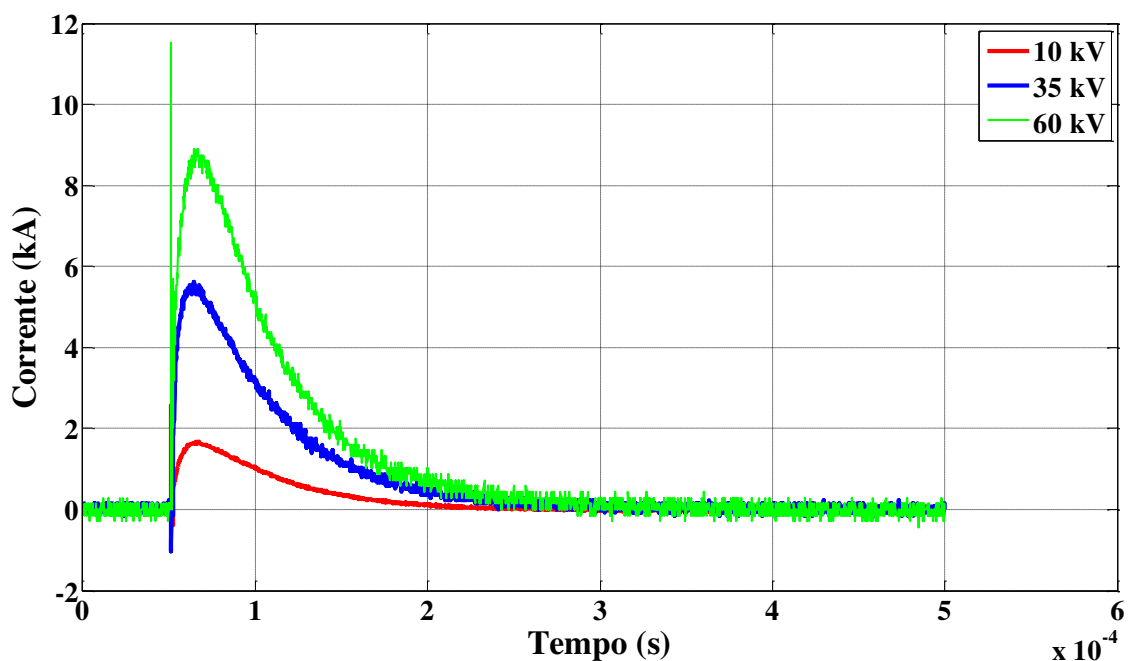


Figura 26. Formas de onda das correntes para a malha triangular com hastes concretadas sem bentonita para impulsos aplicados com tensão de carregamento de 10, 35 e 60 kV.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado um novo método de tratamento físico de sistemas de aterramento. O novo método surgiu da união de dois outros métodos de tratamento conhecidos para melhoria de sistemas de aterramento: tratamento químico do solo com bentonita e tratamento químico do solo com a concretagem de hastes de aterramento.

A partir da metodologia adotada, para as hastes isoladas, a haste convencional (nua) obteve valores mais baixos e mais constantes de resistência de aterramento em baixa frequência, com as variações de temperatura e umidade ao longo do tempo. As hastes concretadas sem bentonita, que sofreram ou não processo de cura do concreto, apresentaram inicialmente um comportamento crescente dos valores de resistência, no entanto, os valores tenderam a estabilização, à medida que o solo ao redor das hastes era compactado pela ação do tempo e das chuvas. As hastes com 2% e 5% de bentonita apresentaram inicialmente um comportamento crescente dos valores de resistência, no entanto, os valores foram consideravelmente reduzidos quando houve chuva, indicando capacidade de absorção de umidade pela estrutura de concreto.

Já para a configuração de malhas triangulares, as malhas com hastes nuas, hastes concretadas sem bentonita e hastes concretadas com bentonita apresentaram inicialmente um comportamento decrescente dos valores de resistência, no entanto, os valores tenderam a estabilização à medida que o solo ao redor das hastes era compactado pela ação do tempo e das chuvas. A malha com hastes concretadas sem bentonita apresentou a maior redução inicial nesses valores de resistência. Comparando estes resultados com os resultados obtidos das hastes isoladas, percebeu-se um comportamento melhor das hastes concretadas quando usadas em forma de malhas.

As hastes concretadas, com ou sem bentonita, dependem da acomodação do solo circunvizinho para a estabilização dos valores de resistência de aterramento. Essa acomodação do solo, muitas vezes é obtida com a incidência de chuvas. Assim, recomenda-se a aplicação de água no terreno onde se encontra o sistema de aterramento com hastes concretadas, para realizar a acomodação do solo desses sistemas de aterramento, antes da energização dos mesmos.

Para as aplicações de impulso realizadas nas hastes isoladas fincadas no solo, a haste concretada sem bentonita que sofreu processo de cura do concreto e a haste com 5% de bentonita permitem a dissipação da corrente de forma semelhante à haste nua, quando se analisam parâmetros como tensões máximas estabelecidas e tempos de cauda das ondas de tensão. A haste com maior concentração de bentonita (5%) se apresenta como uma alternativa que deve ser melhor estudada, observando que foi notada uma melhoria quando comparada com a haste com menor concentração de bentonita (2%). Nesta análise, o processo de cura do concreto se mostrou eficaz.

Para as aplicações de impulso realizadas nas malhas triangulares enterradas no solo, as malhas com hastes concretadas sem bentonita permite a dissipação da corrente de forma semelhante à malha com hastes nuas, quando se analisam parâmetros como tensões máximas estabelecidas e tempos de cauda das ondas de tensão. A malha com hastes concretadas com bentonita apresentou comportamento menos satisfatório quando comparada com a malha com hastes sem bentonita.

Para os impulsos de corrente aplicados, com valores de até 6,409 kA nas hastes isoladas e 8,901 kA nas malhas triangulares, a tensão de toque foi superior aos limites máximos permitidos, obtidos pela Equação 2. Já a tensão de passo, sempre apresentou valores bem abaixo dos limites máximos permitidos, obtidos pela Equação 3.

É possível determinar se ocorreram fissuras ou rupturas na estrutura de concreto das hastes analisando as formas de onda das correntes e tensões estabelecidas nas hastes concretadas. Todas as hastes concretadas, com e sem bentonita, se mostraram resistentes aos esforços provocados pelos impulsos de altas correntes aplicados.

Os resultados experimentais mostram que a adoção de Visacro Filho (2011), de utilizar o valor da impedância impulsiva de aterramento para estimar o maior nível de sobretensão desenvolvido em um sistema de aterramento, conhecendo-se o valor da corrente impulsiva que o atingiu, somente é válida para hastes e malhas de aterramento convencionais (com hastes nuas). Os resultados evidenciam uma redução substancial nos valores da impedância impulsiva de aterramento para hastes concretadas com e sem bentonita, tanto para as hastes isoladas como para as malhas triangulares, com o aumento da tensão de carregamento, conseqüentemente, com o aumento da tensão estabelecida nos terminais das hastes. Sendo assim, a afirmação não pode ser considerada, pois se supõem que outros mecanismos de condução da corrente no solo possam estar presentes.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros envolvem novos ensaios com aplicações de impulsos de corrente, já que foi observado que as diferenças no comportamento das tensões entre as hastes isoladas e entre as malhas triangulares foram muito sutis. O método desenvolvido pode ser melhorado variando parâmetros como:

- Os diâmetros das hastes concretadas;
- As configurações de moldes a serem utilizados na confecção das hastes concretadas (não somente circulares);
- Os tipos de cimento (incluindo cimentos especiais desenvolvidos pelas indústrias, com maior resistência mecânica, por exemplo);
- As composições (traços) da mistura de concreto;
- Os níveis de dopagens de bentonita acrescidos na mistura e a configuração de malha de aterramento (não somente malhas triangulares).

O processo de concretagem pode ser realizado no próprio buraco no solo onde as hastes serão fincadas, utilizando o próprio buraco como fôrma. No entanto, deve-se levar em consideração as vantagens e desvantagens deste método.

O mecanismo que justifica o comportamento das hastes concretadas, com respeito à impedância impulsiva necessita ser estudado.

Trabalhos futuros envolvem ainda a realização de ensaios com aplicação de tensões alternadas.

Avalia-se a viabilidade de utilização da bentonita sob a forma de nano materiais, bem como, a possibilidade de se descobrir outros nano materiais que possam ser aplicados no revestimento das hastes de cobre.

5.3 TRABALHOS PUBLICADOS

No decorrer do curso de mestrado foram publicados ou aceitos para publicação os seguintes artigos, relacionados com o trabalho desenvolvido:

1. RODRIGUES, M. A. O.; COSTA, E. G.; ANDRADE JR, G. V.; SILVA, J. M. C. L.; OLIVEIRA, R. M. L.; TROVÃO, L. G. C. Análise da Suportabilidade a Impulsos de Alta Corrente em Hastes Envolvidas por Concreto. In: Latin-American Congress:

Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2011. Mar del Plata, Argentina, 2011;

Foram aceitos para publicação os seguintes resumos, relacionados com o trabalho desenvolvido:

2. RODRIGUES, M. A. O.; COSTA, E. G.; Performance Evaluation of a New System Grounding. In: IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference – IPMHVC 2012. San Diego, USA, 2012.

Foram submetidos ainda os seguintes resumos e artigos completos que estão aguardando aceitação.

3. RODRIGUES, M. A. O.; COSTA, E. G.; Performance Evaluation of a New System Grounding Involved by a Concrete Coating. In: International Conference on High Voltage Engineering and Application – ICHVE 2012. Shanghai, China, 2012.

4. RODRIGUES, M. A. O.; COSTA, E. G.; CASTRO, M. S.; TROVÃO, L. G. C.; Avaliação do Desempenho de um Novo Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2012. Goiânia, Brasil, 2012.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Ammar, E., Khan, Y., Malik, N., & Wani, N. (2010). Development of Low Resistivity Material for Grounding Resistance Reduction. *IEEE International Energy Conference* , 700-703.

Al-Arainy, A. A., Khan, Y., Qureshi, M. I., Malik, N. H., & Pazheri, F. R. (2011). Optimized Pit Configuration for Efficient Grounding of the Power System in High Resistivity Soils using Low Resistivity Materials. *4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*. Kuala Lumpur, Malásia.

Associação Brasileira de Cimento Portland. (2002). *Guia Básico de Utilização do Cimento Portland*. São Paulo, Brasil.

Bardella, P. S., Barbosa, D. C., & Camarini, G. (2005). Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto-Forno com Utilização de Sílica Ativa. *1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado*. São Carlos, Brasil.

Battagin, A. F., Curti, R., Silva, C. O., & Munhoz, F. A. (2002). Influência das Condições de Cura em Algumas Propriedades dos Concretos Convencionais e de Alto Desempenho. *44º Congresso Brasileiro do Concreto*. Belo Horizonte, Brasil.

Bezerra, S. R., & Kanashiro, A. G. (2010). Sistema de Aterramento Elétrico com Hastes Envolvidas em Concreto. *SBSE*. Belém, Pará, Brasil.

Cervo, T. C., & Balbo, J. T. (2004). Efeitos da Forma de Cura de Concretos de Alto Desempenho em sua Resistência à Tração na Flexão. *XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, (pp. 235-246). Florianópolis, Brasil.

Chen, L.-H., Chen, J.-F., Liang, T.-J., & Wang, W.-I. (2004). A Study of Grounding Resistance Reduction Agent Using Granulated Blast Furnace Slag. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 973-978.

Chen, S. D. (2004). Granulated Blast Furnace Slag used to Reduce Grounding Resistance. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution* , 361-366.

Clark, R. J., & Watkins, B. O. (1960). Some Chemical Treatments to Reduce the Resistance of Ground Connections. *AIEE Transmission and Distribution Committee - AIEE Pacific General Meeting*, (pp. 1016-1023). San Diego, Califórnia.

Coelho, J. M. (2009). *Contrato N° 48000.003155/2007-17: Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - Perfil da Bentonita*.

Coimbra, M. A., Libardi, W., & Morelli, M. R. (2006). Estudo da Influência de Cimentos na Fluência em Concretos para a Construção Civil. *Revista da Cerâmica*, 98-104.

Costa, E. G., Andrade Jr., G. V., Medeiros, K. P., Dias, A. D., de Araújo, F. J., Silva, J. M., et al. (2010). *Avaliação das Condições de Malhas de Aterramento em Instalações Energizadas*. UCFG/PaqTc PB/Energisa PB, Campina Grande.

de Souza, K. T., de Moura, R. F., & Cintra, G. (2007). Estudo de Alternativas para a Construção de Malhas de Aterramento num Solo com Alta Resistividade Elétrica. *Anais do II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica João Pessoa*, (pp. 1-8). João Pessoa, Paraíba, Brasil.

Dias, A. D. (2011). *Malhas de Aterramento em Subestações Energizadas: Medições e Análises*. Campina Grande, Paraíba, Brasil, PB, Brasil.

Eduful, G., Cole, J. E., & Okyere, P. (2009b). Optimum Mix of Ground Electrodes and Conductive Backfills to Achieve a Low Ground Resistance. *2nd International Conference on Adaptive Science & Technology*, (pp. 140 – 145). Accra, Gana.

Eduful, G., Cole, J., & Tetteh, F. (2009a). Palm Kernel Oil Cake as an Alternative to Earth Resistance-Reducing Agent. *IEEE Power Systems Conference and Exposition*, (pp. 1-4). Seattle, USA.

El Mghairbi, A., Ahmeda, M., Harid, N., Griffiths, H., & Haddad, A. (2011). Current and Voltage Distribution in Horizontal Earth Electrodes and a Technique to Increase Effective Length. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, Germany.

El Mghairbi, A., Harid, N., Griffiths, H., & Haddad, A. (2010). A New Method to Increase the Effective Length of Horizontal Earth Electrodes. *45 th International Universities Power Engineering Conference*. Cardiff, UK.

F. J. L. Araújo, J. M. (2010). Avaliação de Potenciais no Solo Devido a Impulsos de Corrente em Malhas de Aterramento. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Belém, Brasil.

Fagan, E. J., & Lee, R. H. (1970). The Use of Concrete-Enclosed Reinforcing Rods as Cv Grounding Electrodes. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, IGA-6, 337-348.

Faraday Pára-Raios. (s.d.). *Empresa Faraday Pára-Raios*. Acesso em 09 de Dezembro de 2010, disponível em Faraday Pára-Raios: http://www.faraday.srv.br/n_empr.htm

Farren, E. J., & Hallmark, C. L. (2000). Why a Low Resistance to Remote Earth Is Desirable and How to Obtain It. *Twenty-second International Telecommunications Energy Conference*, (pp. 644 - 651). Phoenix, USA.

Gomes, G. L. (Abril de 2007). Sistema de Aterramento e Proteção contra Raios Utilizando Ferragens do Concreto Armado. *Eletricidade Moderna* , 54-65.

Gonos, I. F., Antonioy, M. K., Tbpalis, F. V., & Stathopulos, I. A. (1998). Behaviour of a Grounding System Under Impulse Lightning Current. *Optimization of Electrical and Electronic Equipments*, (pp. 171-174). BraSov, Romênia.

Gopinath, T. R., Cruz, V. C., & Freire, J. A. (2003). Estudo Comparativo da Composição Química e as Variedades de Argilas Bentoníticas da Região de Boa Vista, Paraíba. *Revista de Geologia* , 35-48.

Grcev, L. (2009). Impulse Efficiency of Ground Electrode. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 441-445.

Habjanic, A., Trlep, M., & Pihler, J. (2007). The Influence of an Additional Substance in the Trenches Surrounding the Grounding Grid's Conductors on the Grounding Grid's Performance. *IEEE Transactions on Magnetics* , 1257-1260.

Hallmark, Clayton L - American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. (2000). The Use of Conductive Cement to Extend and Protect Made Ground Electrodes. *AREMA Proceedings of the 2000 Annual Conference*. Dallas, USA.

He, J., Yu, G., Yuan, J., Zeng, R., Zhang, B., Zou, J., et al. (2005). Decreasing Grounding Resistance of Substation by Deep-Ground-Well Method. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 738-744.

Huai-Liang, Y. (1991). Research on the Mechanism of Grounding Resistance-Reducing Agent and the Used Quantity. *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, (pp. 1230-1233). Tokyo, Japan.

IEEE. (2000). *Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

Jones, W. R. (1980). Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation in Problem Soils. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* , PAS-99, 1343-1346.

Khan, Y., Malik, N. H., Al-Arainy, A. A., Qureshi, M. I., & Pazheri, F. R. (2010). Efficient Use of Low Resistivity Material for Grounding Resistance Reduction in High Soil Resistivity Areas. *IEEE TENCON*, (pp. 620-624). Fukuoka City, Japan.

Kindermann, G., & Campagnolo, J. M. (1995). *Aterramento Elétrico* (3ª ed.). (S.-D. Luzzatto, Ed.) Porto Alegre, RS: Sagra - D.C. Luzzatto Editores.

Kostic, M., Radakovic, Z., Radovanovic, N., & Tomasevic-Canovic, M. (1999). Improvement of Electrical Properties of Grounding Loops by using Bentonite and Waste Drilling Mud. *IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution* , 1-6.

Kuffel, E., Zaengl, W., & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering Fundamentals*. Butterworth-Heinemann.

Kurtovic, M., & Vujevic, S. (2000). Earthing Grid Parameters with Conductor Surrounded by an Additional Substance. *IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution* , 57-61.

Leite, C. M., & Pereira Filho, M. L. (2007). *Malhas de Terra - Técnicas de Aterramentos Elétricos*. São Paulo, SP: Editora Oficina de Mydia.

Lira, G. R., Fernandes Jr., D., & Costa, E. G. (2010). Técnica de Estimaco de Parâmetros para Modelos Dinâmicos de Pára-Raios de Óxido de Zinco. *SBSE*. Belém, Pará, Brasil.

Meng, Q., He, J., Dawalibi, F. P., & Ma, J. (1999). A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 911-916.

NBR 13571. (1996). *Haste de Aterramento Aço-cobreada e Acessórios*. ABNT.

NBR 15749. (2009). *Medico de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento*. ABNT.

NBR 5738. (2003). *Moldagem e Cura de Corpos-de-prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto*. ABNT.

NBR 7117. (1981). *Medico da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner)*. ABNT.

NBR 7211. (2005). *Agregados para concreto - Especificaco*. ABNT.

Nor, N. M. (2006b). Characteristics of Sodium Chloride (NaCl) under DC, AC and Impulse Conditions. *IEEE 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, (pp. 926-931). Bali, Indonésia.

Nor, N. M. (2006c). Effect of Enhancement Materials when Mixed with Sand under High Impulse Conditions. *IEEE 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, (pp. 916-919). Bali, Indonésia.

Nor, N. M., Haddad, A., & Griffiths, H. (2006a). Performance of Earthing Systems of Low Resistivity Soils. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 2039-2047.

Officina de Mydia. (2011). *Officina de Mydia Engineering Reloaded*. Acesso em 05 de Agosto de 2011, disponível em Site da Officina de Mydia: <http://www.mydia.com/tecat/>

Pancieria Jr, A., Freire, E. S., Manfrinato, J., & Cagnon, J. A. (2011). Estudo da Utilização de Betonita Sódica no Aterramento de Postos de Transformações. *9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission*. Mar del Plata, Argentina.

Power System Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society. (1983). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Radakovic, Z. R., & Kostic, M. B. (2001). Behaviour of Grounding Loop with Bentonite During a Ground Fault at an Overhead Line Tower. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 148, 275-278.

Rezende, M. M. (2008). *Sumário Mineral Brasileiro - Bentonita*. Distrito Federal, Brasil: DNPM.

Santana, L. L., & Costa, F. N. (2009). Análise da Resistência à Compressão de Concretos com Cura Úmida e sem Cura.

Tao, Y., Wen-xia, S., Cai-wei, Y., & Qing, Y. (2008). Experimental Investigation on the Impulse-Current Distribution of Grounding Electrodes with Various Structures. *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, (pp. 269-272). Chongqing, China.

Telló, M., Dias, G. A., Raizer, A., Almaguer, H. D., Mustafa, T. I., & Coelho, V. L. (2007). *Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixa e Alta Frequências*. Porto Alegre, RS: Edipucrs.

Tu, Y., He, J., & Zeng, R. (2006). Lightning Impulse Performances of Grounding Devices Covered With Low-Resistivity Materials. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1706-1713.

Velev, G., Weinsläder, A., Tenbohlen, S., & Petrov, P. K. (2011 B). A New Approach for Analysis of Nonconventional Grounding Installations by Means of FEM. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, Germany.

Velev, G., Weinsläder, A., Tenbohlen, S., & Petrov, P. K. (2011 A). Verification of Analytical Expressions for Calculation of the Resistance to Ground of Single Conductive Concrete Encased Grounding Electrodes by FEM. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, Germany.

Visacro Filho, S. (2002). *Aterramentos Elétricos - Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento*. São Paulo: Artliber Editora.

Visacro Filho, S. (2005). *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*. Artliber Editora.

Visacro, S. (2007). A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery* , 381-386.

Visacro, S., & Rosado, G. (2009). Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* , 161-164.

Yamane, H., Ideguchi, T., Tokuda, M., & Koga, H. (1990). Long-Term Stability of Reducing Ground Resistance with Water-Absorbent Polymers. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, (pp. 678-682). Washington, DC , USA.