

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA**

CAMILA MADEIROS ALCANTARA PIMENTA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA DO SOLO E DE TIPOS DE
ENVELOPAMENTO NO SISTEMA DE
ATERRAMENTO ELÉTRICO DE SUBESTAÇÕES**

**CAMPINAS
2017**

CAMILA MADEIROS ALCANTARA PIMENTA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA DO SOLO E DE TIPOS DE
ENVELOPAMENTO NO SISTEMA DE
ATERRAMENTO ELÉTRICO DE SUBESTAÇÕES**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana, ao Programa de Pós Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira
Mota

PUC-CAMPINAS

2017

Ficha catalográfica elaborada por Marluce Barbosa – CRB 8/7313
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3744
P644a

Pimenta, Camila Madeiros Alcantara .

Avaliação da influência da resistividade elétrica do solo e de tipos de
envelopamento no sistema de aterramento elétrico de subestações /
Camila Madeiros Alcantara Pimenta. - Campinas: PUC-Campinas, 2017.
127f.

Orientadora: Lia Toledo Moreira Mota.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Cam-
pinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-
Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Inclui anexo e bibliografia.

1. Correntes elétricas. 2. Correntes elétricas - Aterramento. 3. Des-
cargas elétricas - Detectores. 4. Cabos elétricos. II. Mota, Lia Toledo
Moreira. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de
Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em
Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

CDD – 22.ed. t621.3744

CAMILA MADEIROS ALCANTARA PIMENTA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA DO SOLO E DE TIPOS DE
ENVELOPAMENTO NO SISTEMA DE ATERRAMENTO
ELÉTRICO DE SUBESTAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Toledo Moreira Mota

Dissertação defendida e aprovada em 15 de dezembro de 2017 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota

Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta

Universidade São Francisco - USF

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por me proporcionar o dom da vida e a minha família que me incentivou e me apoiou em todos os momentos dessa trajetória. Em especial, dedico este trabalho aos meus mestres, Professor Dr. Alexandre de Assis Mota (in memoriam) e a Professora Dr^a. Lia Toledo Moreira Mota por serem meus maiores exemplos de caráter e competência.

AGRADECIMENTOS

À professora Dr^a. Lia Toledo Moreira Mota,
Pela confiança, compreensão e competência. Por compartilhar seu conhecimento e pelo incentivo para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Dr. Alexandre de Assis Mota (*in memoriam*),
Por sempre confiar e acreditar em mim e estar presente nos momentos mais importantes da minha vida acadêmica, será sempre um exemplo a ser seguido.

A toda minha família,
Especialmente meus pais, Zuleide e Gilvan pela confiança que depositaram em mim em todas as fases da minha vida. Sempre com muita dedicação, carinho e amor.

Ao meu esposo Regis,
Pelo incentivo em prosseguir nessa jornada, pela compreensão e apoio em todos os momentos.

Aos professores do programa de pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana,
Pelo apoio e auxílio em todos os momentos do mestrado.

À professora Dr^a. Lia Lorena Pimentel,
Pelo auxílio nas questões e análises envolvidas na área da engenharia civil.

Aos amigos Roger Prior Gregio, Lígia Pereira Muniz Gäal e Olacir Cypriano Tomasini,
Pelo apoio emocional, amizade e pela contribuição na evolução do meu trabalho.

À todos os alunos da turma do mestrado,
Pela descontração e enriquecimento de conhecimento nas aulas.

Aos técnicos dos laboratórios de Meios de Transmissão e Redes e o laboratório de Materiais de Construção Civil e Estruturas,
Pela competência e presteza.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão, perder com classe
e vencer com ousadia, por que o mundo
pertence a quem se atreve. E a vida é muito
bela para ser insignificante.”
Charles Chaplin (1889-1977)

RESUMO

Pimenta, Camila Madeiros Alcantara. *Avaliação da influência da resistividade elétrica do solo e de tipos de envelopamento no sistema de aterramento elétrico de subestações*. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

O aterramento elétrico faz parte do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), cujas funções são fornecer um caminho para a circulação de corrente elétrica na terra, escoamento para a terra de cargas induzidas nas carcaças dos equipamentos elétricos e, em conjunto com os dispositivos diferenciais-residuais, possibilitar a detecção de uma possível falha entre os condutores energizados e a terra.

Para que o aterramento seja eficiente, algumas características devem ser levadas em consideração, tais como o tipo e a resistividade do solo. Neste sentido, medições da resistividade e a estratificação do solo são importantes para um dimensionamento correto do sistema de aterramento. Solos com alta concentração de água (baixa resistividade) são melhores condutores de corrente do que um solo seco, por exemplo. Solos com alta resistividade podem ocasionar uma corrente de retorno. Assim, algumas decisões visando o reforço do sistema de aterramento devem ser tomadas quando se tem solos com características inadequadas ao aterramento.

Portanto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a influência da resistividade elétrica do solo e de tipos de envelopamento utilizando tipos de concreto no sistema de aterramento elétrico de subestações através de simulações em *software*, levando em conta as características de resistividade do solo. Nas análises de tipos de envelopamento, foi possível observar que os concretos com maior quantidade de água em sua composição possuem uma resistividade elétrica mais baixa. A utilização do envelopamento de concreto é viável para solos com alta resistividade, como é o caso do terreno localizado na cidade de Campinas, e foi possível verificar que para solos com resistividade baixa sua utilização pode ser inviável já que outras opções como inclusão de mais cabos e instalação das hastes nas camadas com menor resistividade são suficientes e mais econômicas.

Palavras-chave: Aterramento Elétrico, SPDA, Subestação, Envelopamento, Concreto, Estratificação do Solo, Resistividade Elétrica, Potenciais de Passo, Potenciais de Toque.

ABSTRACT

PIMENTA, Camila Madeiros Alcantara. *Evaluation of the influence of the electrical resistivity of the soil and of the types of enveloping in the electrical grounding system of substations*. 2017. Master's thesis, the Master's course in Urban Infrastructure Systems, University of Campinas, Campinas, 2017.

Electrical grounding is part of the Atmospheric Discharge Protection System (ADPS), whose functions are to provide a path for the circulation of electric current in the ground and to enable the detection of a possible fault between the energized conductors and the earth.

For grounding to be efficient, some characteristics must be taken into account, such as soil type and resistivity. In this sense, measurements of resistivity and soil stratification are important for a correct sizing of the grounding system. Soils with high water concentration (low resistivity) are better current conductors than dry soils, for example. Soils with high resistivity can cause a return current. Thus, some decisions aimed at strengthening the grounding system should be taken when there are soils with inadequate grounding characteristics.

Therefore, this work aims to evaluate the influence of soil electrical resistivity and enveloping types using concrete types in the substation electrical grounding system through software simulations, taking into account soil resistivity characteristics. In the analysis of types of envelopment, it was possible to observe that the concretes with greater amount of water in their composition have a lower electrical resistivity. The use of concrete enveloping is feasible for soils with high resistivity, as in the case of the land located in the city of Campinas, and it was possible to verify that for soils with low resistivity its use may be impractical since other options such as inclusion of more cables and installation of the rods in the layers with less resistivity are sufficient and more economical.

Keywords: *Electrical Grounding, ADPS, Substation, Envelope, Concrete, Soil Stratification, Electrical Resistivity, Step Voltage, Touch Voltage*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Subsistemas do SPDA.....	4
Figura 2 – Curva do tempo x corrente	7
Figura 3 – Tensão de passo e circuito equivalente	8
Figura 4 – Tensão de toque e circuito equivalente.....	10
Figura 5 – Solo em camadas horizontais regulares homogêneas.	12
Figura 6 – Variações da resistência de terra em função do tempo para solo tratado e não tratado adjacente.....	14
Figura 7 – Sistema de aterramento envelopado com concreto	15
Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados natural e reciclado	18
Figura 9 – Corpos de prova sendo ensaiados por imersão	21
Figura 10 – Corpos de prova sendo ensaiados por capilaridade.....	21
Figura 11 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência a compressão axial	22
Figura 12 – Configuração de Wenner	22
Figura 13 – Detalhe do protótipo para o ensaio de resistividade elétrica	23
Figura 14 – Forma utilizada para os moldes prismáticos	23
Figura 15 – Corpos de prova em recipiente.....	24
Figura 16 – Procedimento de medição para o ensaio de resistividade elétrica	24
Figura 17 – Circuito equivalente para os ensaios de resistividade elétrica	25
Figura 18 – Tela inicial do <i>software</i>	26
Figura 19 – Parâmetros de saída	28
Figura 20 – Diagrama de distribuição de corrente.....	29
Figura 21 – Geometria da malha de aterramento.....	30
Figura 22 – Inclusão das características do solo	30
Figura 23 – Inclusão das características do solo para duas camadas.....	31
Figura 24 – Simulações.....	32
Figura 25 – Resultado do ensaio de absorção por imersão	34
Figura 26 – E volução da absorção por capilaridade	35
Figura 27 – Resultado do ensaio de compressão axial.....	36
Figura 28 – Resultado do ensaio de resistividade elétrica aparente	38
Figura 29 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança	42

Figura 30 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referência com envelopamento 1).....	44
Figura 31 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referência com envelopamento 2).....	46
Figura 32 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referência com envelopamento 3).....	48
Figura 33 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referência com envelopamento 4).....	50
Figura 34 – Comparação entre os limites de tensão de toque para Campinas	51
Figura 35 – Comparação entre os limites de tensão de passo para Campinas	52
Figura 36 – Comparação entre as resistências da malha para Campinas	52
Figura 37 – Comparação com relação a corrente na malha para Campinas	53
Figura 38 – Comparação com relação a corrente no cabo guarda para Campinas	53
Figura 39 – Malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros (Campinas).....	55
Figura 40 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)	55
Figura 41 – Malha ampliada, com recobrimento de brita, com envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros (Campinas)	57
Figura 42 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros)	57
Figura 43 – Malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros (Campinas)	59
Figura 44 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros)	59
Figura 45 – Malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros (Guariba).....	61
Figura 46 – Tensão de toque e passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)	62
Figura 47 – Malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros (Humaitá)	65

Figura 48 – Tensão de toque e passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)	65
Figura 49 – Malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros (Humaitá).....	66
Figura 50 – Tensão de toque e passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros).	67
Figura 51 – Malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros (São José do Rio Preto).....	69
Figura 52 – Tensão de toque e passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros).....	70
Figura 53 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)	77
Figura 54 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)	77
Figura 55 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	78
Figura 56 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	79
Figura 57 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	80
Figura 58 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	80
Figura 59 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	81
Figura 60 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	81
Figura 61 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	82
Figura 62 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	83
Figura 63 – Comparação entre os limites de tensão de toque para Guariba	83
Figura 64 – Comparação entre os limites de tensão de passo para Campinas	84
Figura 65 – Comparação entre as resistências da malha para Guariba	84

Figura 66 – Comparação entre a corrente na malha para Guariba	84
Figura 67 – Comparação entre a corrente no cabo guarda para Guariba.....	85
Figura 68 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com recobrimento de brita)	86
Figura 69 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com recobrimento de brita)	86
Figura 70 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	87
Figura 71 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	88
Figura 72 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	89
Figura 73 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	89
Figura 74 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	90
Figura 75 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	90
Figura 76 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	91
Figura 77 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	92
Figura 78 – Comparação entre os limites de tensão de toque para Humaitá	92
Figura 79 – Comparação entre os limites de tensão de passo para Humaitá	93
Figura 80 – Comparação entre as resistências da malha para Humaitá	93
Figura 81 – Comparação entre a corrente na malha para Humaitá	93
Figura 82 – Comparação entre a corrente no cabo guarda para Humaitá	94
Figura 83 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referênciã com recobrimento de brita)	95
Figura 84 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referênciã com recobrimento de brita)	95
Figura 85 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	96

Figura 86 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	97
Figura 87 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	98
Figura 88 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	98
Figura 89 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	99
Figura 90 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	99
Figura 91 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	100
Figura 92 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	101
Figura 93 – Comparação entre os limites de tensão de toque para São José do Rio Preto	101
Figura 94 – Comparação entre os limites de tensão de passo para São José do Rio Preto	102
Figura 95 – Comparação entre as resistências da malha para São José do Rio Preto	102
Figura 96 – Comparação entre a corrente na malha para São José do Rio Preto	102
Figura 97 – Comparação entre a corrente no cabo guarda para São José do Rio Preto	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito da corrente no corpo humano.....	6
Tabela 2 – Resistividade de materiais de revestimento (ps).....	9
Tabela 3 – Tipos de solo e respectiva resistividade elétrica.....	13
Tabela 4 – Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.....	13
Tabela 5 – Características dos agregados natural e reciclado.....	18
Tabela 6 – Traços de concreto	19
Tabela 7 – Medição da resistividade do Solo	27
Tabela 8 – Dados utilizados para a simulação.....	29
Tabela 9 – Parâmetros de linha	29
Tabela 10 – Resultado do ensaio de absorção por capilaridade	35
Tabela 11 – Evolução da resistividade no decorrer do tempo.....	38
Tabela 12 – Estratificação do solo para duas camadas	40
Tabela 13 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas.....	41
Tabela 14 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas	43
Tabela 15 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 1).....	43
Tabela 16 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 1).....	45
Tabela 17 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 2).....	45
Tabela 18 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 2).....	47
Tabela 19 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 3).....	47
Tabela 20 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 3, sem revestimento de brita)	48
Tabela 21 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 4).....	49
Tabela 22 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 4).....	50

Tabela 23 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)	55
Tabela 24 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)	56
Tabela 25 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros)	57
Tabela 26 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros)	58
Tabela 27 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros)	59
Tabela 28 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros)	60
Tabela 29 – Relação de material para ampliações da malha no terreno de Campinas.....	60
Tabela 30 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)	62
Tabela 31 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)	63
Tabela 32 – Relação de material para ampliação da malha no terreno de Guariba	63
Tabela 33 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)	65
Tabela 34 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)	66
Tabela 35 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)	67

Tabela 36 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)	67
Tabela 37 – Relação de material para ampliações da malha no terreno de Humaitá.....	68
Tabela 38 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)	70
Tabela 39 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)	70
Tabela 40 – Relação de material para ampliações da malha no terreno de São José do Rio Preto	71
Tabela 41 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com recobrimento de brita)	77
Tabela 42 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com recobrimento de brita).....	78
Tabela 43 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	78
Tabela 44 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	79
Tabela 45 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	79
Tabela 46 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	80
Tabela 47 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	81
Tabela 48 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita).....	82
Tabela 49 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	82
Tabela 50 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	83
Tabela 51 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com recobrimento de brita).....	86

Tabela 52 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com recobrimento de brita).....	87
Tabela 53 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita) ...	87
Tabela 54 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	88
Tabela 55 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita) ...	88
Tabela 56 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	89
Tabela 57 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita) ...	90
Tabela 58 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	91
Tabela 59 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita) ...	91
Tabela 60 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	92
Tabela 61 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com recobrimento de brita)	95
Tabela 62 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com recobrimento de brita)	96
Tabela 63 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	96
Tabela 64 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)	97
Tabela 65 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	97
Tabela 66 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)	98

Tabela 67 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	99
Tabela 68 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)	100
Tabela 69 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	100
Tabela 70 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
ADPS	<i>Atmospheric Discharge Protection Systems</i>
CP	Corpo de prova
AC	Relação água/cimento
AGR	Agregado Reciclável

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Organização do trabalho	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. Sistema de aterramento	4
2.2. Choque Elétrico	5
2.3. Tensão de Passo	7
2.4. Tensão de Toque	9
2.5. Resistividade elétrica do Solo	11
2.6. Tratamento Químico do Solo	14
2.7. Envelopamento	15
3. METODOLOGIA	17
3.1. Avaliação de diferentes tipos de envelopamento	17
3.1.1. Dosagem do concreto	18
3.1.2. Procedimento de mistura	19
3.1.3. Moldagem, cura e preparação dos corpos de prova	20
3.1.4. Características do Concreto	20
3.1.4.1. Propriedades físicas: absorção por imersão e por capilaridade	20
3.1.4.2. Propriedade mecânica: resistência à compressão axial	21
3.1.4.3. Característica física: ensaio de resistividade elétrica aparente	22
3.2. Análise da eficiência do sistema de aterramento de subestações em diferentes tipos de solo	26
3.2.1. Características do <i>Software</i>	26
3.2.2. Dados Utilizados	27
3.2.3. Simulações no <i>Software</i>	28

4. RESULTADOS	33
4.1. Análise de diferentes tipos de envelopamento para melhoria da eficiência do sistema de aterramento	33
4.1.1. Ensaio de absorção por imersão	33
4.1.2. Ensaio de absorção de água por capilaridade	34
4.1.3. Ensaio de resistência à compressão axial	36
4.1.4. Ensaio de resistividade elétrica aparente	37
4.2. Análise da eficiência do sistema de aterramento em diferentes tipos de resistividade de solo	39
4.2.1. Estratificação dos solos em duas camadas	39
4.2.2. Simulações para o terreno situado em Campinas	40
4.2.2.1. Simulações com a malha referência sem e com o recobrimento de brita	40
4.2.2.2. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1, sem e com o recobrimento de brita	43
4.2.2.3. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, sem e com o recobrimento de brita	45
4.2.2.4. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, sem e com o recobrimento de brita	47
4.2.2.5. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, sem e com o recobrimento de brita	49
4.2.2.6. Análises comparativas - Campinas	51
4.2.2.7. Simulações Finais para o Terreno de Campinas	54
4.2.2.7.1. Simulação com a malha final ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros	54
4.2.2.7.2. Simulações com a malha final ampliada, com recobrimento de brita, com hastes de 3 metros e com a utilização do envelopamento de traço 4	56

4.2.2.7.3.	Simulações com a malha final ampliada, com recobrimento de brita, com hastes de 6 metros e com a utilização do envelopamento de traço 4	58
4.2.2.7.4.	Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de Campinas	60
4.2.3.	Simulações para o terreno situado em Guariba	61
4.2.3.1.	Simulações Finais para o Terreno de Guariba	61
4.2.3.1.1.	Simulação com a malha final ampliada, com o recobrimento de brita e haste de 3 metros	62
4.2.3.1.2.	Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de Guariba	63
4.2.4.	Simulações para o terreno situado em Humaitá	64
4.2.4.1.	Simulações Finais para o Terreno de Humaitá	64
4.2.4.1.1.	Simulação com a malha final ampliada, com o recobrimento de brita e haste de 3 metros	64
4.2.4.1.2.	Simulação com a malha referência, com o recobrimento de brita e haste de 6 metros	66
4.2.4.1.3.	Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de Humaitá	68
4.2.5.	Simulações para o terreno situado em São José do Rio Preto	68
4.2.5.1.	Simulações Finais para o Terreno de São José do Rio Preto	69
4.2.5.1.1.	Simulação com a malha referência, com o recobrimento de brita e haste de 6 metros	69
4.2.5.1.2.	Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de São José do Rio Preto	71
5.	CONCLUSÃO	72
	Bibliografia	74
	Anexo A	77
A.1	Simulações com a malha referência com recobrimento de brita	77

A.2 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1 , com o recobrimento de brita	78
A.3 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, com o recobrimento de brita	79
A.4 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, com o recobrimento de brita	81
A.5 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, com o recobrimento de brita	82
A.6 Análises comparativas - Guariba	83
Anexo B	86
B.1 Simulações com a malha referência com recobrimento de brita	86
B.2 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1 , com o recobrimento de brita	87
B.3 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, com o recobrimento de brita	88
B.4 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, com o recobrimento de brita	90
B.5 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, com o recobrimento de brita	91
Anexo C	95
C.1 Simulações com a malha referência com recobrimento de brita	95
C.2 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1 , com o recobrimento de brita	96
C.3 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, com o recobrimento de brita	97
C.4 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, com o recobrimento de brita	99
C.5 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, com o recobrimento de brita	100

1. INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico faz parte do sistema de distribuição de energia, tem importância no que se refere à segurança de pessoas, animais e equipamentos. O aterramento é uma ligação intencional a terra para fornecer um caminho de escoamento da corrente, seja ela causada por uma falha (curto-circuito) ou por descarga atmosférica. (BEZERRA, 2011).

Aterrar significa colocar as instalações e equipamentos no mesmo potencial, de modo que a diferença de potencial entre a terra e o ponto desejado do objeto seja nula, estabelecendo um caminho para a circulação de corrente que irá permitir a detecção de uma ligação indesejada entre os condutores vivos e a terra. (VISACRO, 2002).

Existem diversas funções para o sistema de aterramento, tais como, proteger o indivíduo de uma falha na instalação, como um curto-circuito, mantendo, no limite de segurança, o potencial produzido pelas correntes de falta, para não causar choque elétrico; desligamento automático de dispositivos de proteção, através de baixa impedância para o retorno da corrente à terra e oferecimento de um caminho seguro para o escoamento da corrente à terra (KINDERMANN, 2011b).

O sistema de aterramento é composto por cabos, hastes e conexões, que são instalados em certa profundidade no solo. Sua geometria dependerá da importância e do tipo de local para a instalação, além de características do solo, tais como, resistividade, estratificação em camadas, umidade e temperatura (KINDERMANN, 2011b).

Cada solo possui um perfil de organização, possuindo características que facilitam ou não a passagem de corrente. Por isso, a importância da estratificação do solo na concepção do projeto de malha de aterramento.

O conjunto dessas características influencia os parâmetros de tensões de passo e toque, o que significa que a corrente elétrica pode passar pelo corpo humano quando o mesmo é submetido a uma diferença de potencial, podendo levar o indivíduo a receber um choque elétrico, até mesmo com risco de óbito (BELTANI, 2007).

Solos com alta concentração de água são melhores condutores de corrente do que um solo seco, por exemplo. Solos com alta resistividade podem ocasionar uma corrente de retorno, sendo assim, algumas decisões devem ser tomadas quando se tem esse tipo de solo, no sentido de melhorar as características elétricas do sistema de aterramento.

O tratamento químico do solo e a utilização de concreto no envelopamento de hastes e cabos são alternativas para um aterramento eficiente quando se tem um solo com alta resistividade elétrica (KINDERMANN, 2011 b).

Nesse contexto, este trabalho objetiva avaliar, a partir de simulações, diferentes tipos de envelopamento (baseados em diferentes traços de concreto), visando à melhoria da eficiência do sistema de aterramento. Essas simulações tornam-se possíveis com base em ensaios realizados em corpos de prova com diferentes tipos de traço de concreto, objetivando a caracterização desses traços do ponto de vista físico, mecânico e elétrico. Em especial, a resistividade elétrica desses traços, determinada nos ensaios mencionados, é utilizada diretamente no *software* de simulação *AutoGrid Pro*.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como propósito geral avaliar a possibilidade da melhoria da eficiência do sistema de aterramento de subestações a serem construídas nos 4 locais distintos (com solos de características diferentes), a partir do envelopamento dos cabos de aterramento, alteração da profundidade das hastes e inclusão de cabos.

1.1.2. Objetivo Específico

Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- Construção de diversos corpos de prova, com diferentes traços de concreto
- Realização de ensaios laboratoriais nesses corpos de prova para determinação de suas características físicas, mecânicas e elétricas

- Com base na resistividade elétrica determinada para os diferentes tipos de traço, nos ensaios laboratoriais, simular, utilizando o *software AutoGrid Pro*, o envelopamento dos cabos de aterramento de subestações a serem construídas em 4 cidades, com diferentes tipos de solo.
- Fazer proposições para a melhoria da eficiência do sistema de aterramento, levando em consideração outras possibilidades, além do envelopamento, como por exemplo, a utilização de uma maior quantidade de cabos em regiões específicas da malha de aterramento, dentre outros.

1.2. Organização do trabalho

No Capítulo 2, é realizada uma revisão da literatura, apresentando os conceitos de aterramento elétrico, tratamento químico do solo e tipos de traços de concreto.

A metodologia e técnicas utilizadas no trabalho são descritas no Capítulo 3. Os resultados são apresentados no Capítulo 4, além de uma avaliação das simulações e, por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 5.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Sistema de aterramento

O sistema de aterramento é composto pela junção de condutores, cabos, hastes e conectores interligados, com a função de dissipação da corrente imposta por descargas atmosféricas ou por uma falha a esse sistema para a terra (AURÉLIO, LEON, 1982). Esse sistema faz parte do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) que é dividido em três itens segundo a NBR 5419:2015 (ABNT, 2015):

- Subsistema de Captação;
- Subsistema de Descidas;
- Subsistema de Aterramento. A Figura 1 ilustra esses três subsistemas do SPDA.

Figura 1 – Subsistemas do SPDA



Fonte: Adaptada (SUETA, 2005)

O subsistema de captação tem como função interceptar descargas atmosféricas, utilizando elementos metálicos, tais como, hastes, condutores em

malha e cabos. Já o subsistema de descida tem como objetivo conduzir a descarga atmosférica que é interceptada pelo subsistema de captação para o subsistema de aterramento. Finalmente, o subsistema de aterramento tem como objetivo conduzir e dispersar a descarga no solo (NBR 5419, 2015).

O aterramento possui uma ampla gama de funções, podendo ser utilizadas configurações diversificadas, associadas a diversos fatores, tais como questões de segurança de seres vivos, proteção de equipamentos e desempenho do sistema (VISACRO, 2002). As configurações do sistema de aterramento podem ser na forma de uma haste vertical, hastes em triângulo, hastes em quadradas, hastes em paralelo, circulares e na forma de malha, (BEZERRA, 2011).

A resistência do sistema de aterramento deve ser a mais baixa possível para proporcionar um escoamento à terra da corrente. Os potenciais elétricos devem estar dentro dos limites de segurança para não causar fibrilação ventricular do coração de usuários da rede elétrica e para possibilitar o correto funcionamento dos dispositivos de proteção (KINDERMANN, 2011b; VISACRO, 2002; NBR 5419, 2015).

2.2. Choque Elétrico

O choque elétrico é provocado pela passagem de corrente elétrica pelo corpo humano e sua gravidade dependerá de vários fatores, tais como, teor de umidade da pele, intensidade da corrente elétrica, tempo de duração, percurso da corrente elétrica, entre outros. (KINDERMANN, 2011b).

Ao passar pelo indivíduo, os efeitos podem ser variados, de acordo com os fatores mencionados. Com relação à intensidade da corrente elétrica e o tempo de duração da passagem da corrente, o efeito no corpo varia, indo de um formigamento até a morte do indivíduo. A Tabela 1 indica o efeito da corrente no corpo humano, levando em consideração sua intensidade.

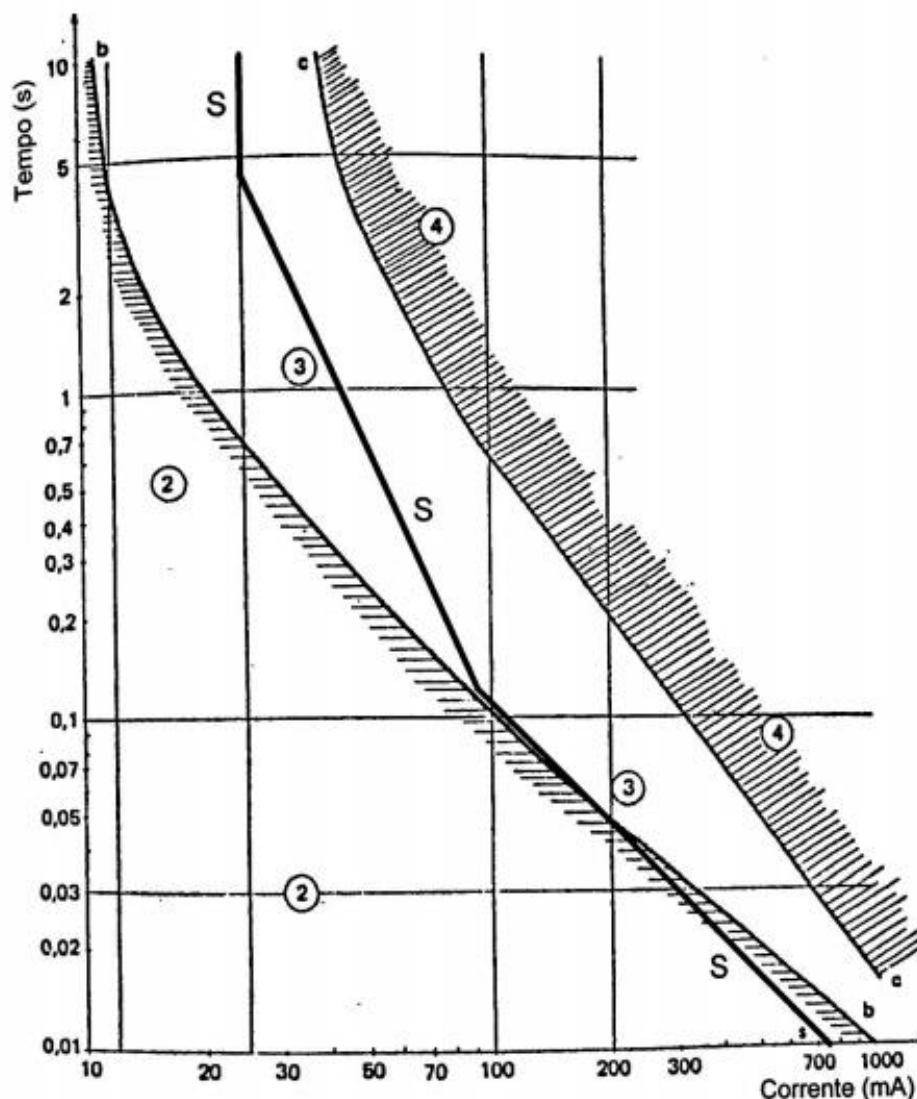
Tabela 1 – Efeito da corrente no corpo humano

I(mA)		Reação Fisiológica	Consequência	Salvamento	Resultado Final mais Provável
CA	DC				
Até 25	Até 80	1mA (CA): sensação de formigamento 5-15mA (CA): contração muscular 15-25mA (CA): -Contrações violentas, impossibilidade de soltar o fio; -Problemas respiratórios	Se a corrente for próxima de 25mA (CA), poderá haver problemas respiratórios e consequentemente a morte aparente	Respiração Artificial	Restabelecimento
25-80	80-300	-Sensação insuportável; -Contrações violentas; -Asfixia	Morte aparente	Respiração Artificial	Restabelecimento
Ordem de Ampères		-Queimaduras; -Necrose do tecido; -Fibrilação ventricular; -Asfixia imediata; -Danos posteriores provenientes da eletrólise	-Morte aparente; -Dependendo da extensão das queimaduras, sequelas ou morte.	-Respiração artificial; -Massagem cardíaca; -Tratamento hospitalar	-Hospital; -Desfibrilação ventricular; -Recuperação difícil; -Atrofia muscular -Outros danos

Fonte: (KINDERMANN, 2011b)

A Figura 2 indica a curva de tempo em função da corrente, indicando, assim, os efeitos no corpo humano. A Zona 2 indica que nenhum efeito patofisiológico é perigoso, ao contrário da Zona 3 que indica a ocorrência de algum efeito perigoso, havendo chances de problemas pulmonares e até fibrilação ventricular. A Zona 4 é a mais perigosa, ocorrendo fibrilação ventricular em mais de 50% das pessoas. Já a Zona S, é a curva de segurança e indica que, em torno de 0,5% dos acidentes, pode ocorrer a fibrilação ventricular. (KINDERMANN, 2011b)

Figura 2 – Curva do tempo x corrente



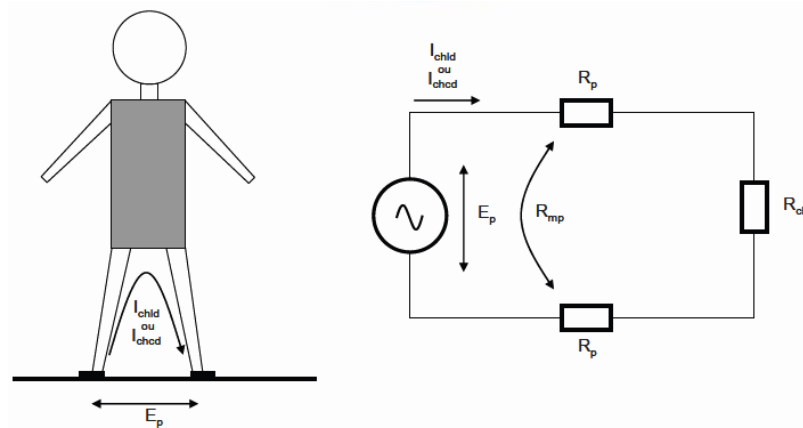
Fonte: (KINDERMANN, 2011b).

Em um projeto de malha de aterramento, os fatores de tempo de duração da corrente e sua intensidade são levados em consideração. Outros fatores que influenciam nesse dimensionamento são os valores permissíveis de tensão de passo e toque.

2.3. Tensão de Passo

De acordo com a norma técnica de Sistema de Aterramento de Subestações (NBR 15751,2013), a tensão de passo é “a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de 1,0m” A Figura 3 indica a tensão de passo e o circuito equivalente.

Figura 3 – Tensão de passo e circuito equivalente



Fonte: (NBR 15751,2013).

Onde,

R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1 000 Ω , expressa em ohms (Ω);

R_p é a resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto, expressa em ohms (Ω);

R_{mp} é a resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms (Ω);

I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

I_{chld} é a máxima corrente de longa duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

A Eq. (1) é equivalente para o cálculo da máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano é dada pela equação abaixo (NBR 15751, 2013).

$$E_{ch} = (R_{ch} + 6 * \rho_s * C) * I_{chcd} \text{ (V)} \quad (1)$$

Onde,

ρ_s é a resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega.m$), conforme tabela 2;

Caso não haja recobrimento, utilizar resistividade da camada superficial do solo.

C é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, cuja Eq. (2) simplificada é a fórmula abaixo:

$$C \cong 1 - 0,106 * \left[\frac{1 - \frac{\rho 1}{\rho s}}{2 * h_s + 0,106} \right] \quad (2)$$

Onde,

$\rho 1$ é a resistividade da 1ª camada ($\Omega.m$);

ρs é a resistividade do recobrimento da camada superficial (em $\Omega.m$), conforme tabela 2;

h_s é a espessura da camada de revestimento superficial (m);

A Tabela 2 indica a resistividade de materiais de recobrimento. Para este trabalho foi utilizado brita para fins de cálculos no dimensionamento e análises das simulações.

Tabela 2 – Resistividade de materiais de recobrimento (ρs)

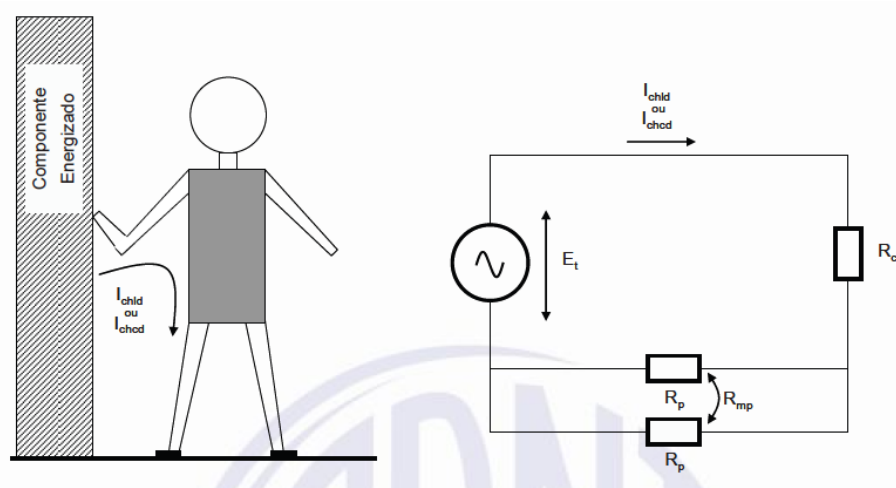
Material	Resistividade ($\Omega.m$)	
	seco	molhado
Brita	7×10^6	3000
Concreto	1200 a 2800	21 a 100
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10×10^3 a 6×10^6

Fonte: (NBR 15751, 2013; IEEE Std 80, 2000)

2.4. Tensão de Toque

Conforme a norma técnica de Sistema de Aterramento de Subestações (NBR 15751, 2013), a tensão de toque “diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionalmente igual a 1,0 m”. A Figura 4 ilustra o conceito de tensão de toque e o circuito equivalente.

Figura 4 – Tensão de toque e circuito equivalente



Fonte: (NBR 15751, 2013)

A Eq. (3) e Eq. (4) equivalente para o cálculo da máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano é dada pelas equações abaixo (NBR 15751, 2013).

- curta duração:

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 * \rho_s * C) * I_{chcd} \text{ (V)} \quad (3)$$

- longa duração:

$$E_{tld} = (R_{ch} + 1,5 * \rho_s * C) * I_{chld} \text{ (V)} \quad (4)$$

Onde,

E_{tcd} é a tensão de toque permissível pelo corpo humano em um tempo de curta duração, expressa em volts (V);

E_{tld} é a tensão de toque permissível pelo corpo humano em um tempo de longa duração, expressa em volts (V);

R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1 000 Ω , expressa em ohms (Ω);

I_{chcd} é a máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

I_{chld} é a máxima corrente de longa duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

C é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento;

ρ_s é a resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega.m$), conforme tabela 2.

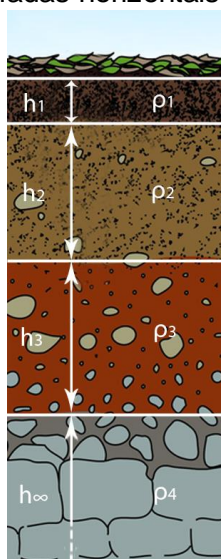
Tensões de passo e de toque elevadas podem gerar risco ao indivíduo que circula no local. Assim, o dimensionamento adequado limita as tensões induzidas ou tensões aplicadas nas partes metálicas, diminuindo e mitigando o risco de choque elétrico (BUSS, 2016).

2.5. Resistividade elétrica do Solo

Para a elaboração de um projeto de sistema de aterramento, é necessário o conhecimento acerca das características do solo no qual este sistema será implantado. Essas características podem ser obtidas através da estratificação do solo em duas ou mais camadas, mostrando, assim, a resistividade e a profundidade de cada camada. Cada tipo de solo possui uma resistividade, sendo que solos com alta resistividade devem ser levados em consideração, pois merecem uma análise e estudo mais detalhado ao se projetar a malha de aterramento. (KINDERMANN, 2011)

O solo é formado por diferentes tipos de substâncias dispostas em camadas horizontais, conforme Figura 5, sendo que a resistividade elétrica do solo varia conforme sua composição e a profundidade das camadas (BEZERRA, 2011; WENNER, 1916; PEREIRA, 2016). Por ser formado por características e composições diversificadas, cada solo reage de forma diferente com relação à condução de corrente elétrica. Um dos fatores que influenciam na condução de corrente é a presença de sais livres no solo, além da quantidade de água (FRIEDMAN, 2005).

Figura 5 – Solo em camadas horizontais regulares homogêneas.



Fonte: (PEREIRA, 2016).

Onde:

ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 e ρ_∞ é o valor de resistividade de cada camada;

h_1 , h_2 , h_3 e h_∞ é a profundidade de cada camada.

Segundo Gimenez (2013), pode-se identificar alguns tipos de caminhos para a condução da corrente elétrica no solo. O primeiro é a existência de condutância através de camadas alternadas de partículas e solução do solo, a segunda é a condução por canais contínuos de solução do solo.

Segundo Kindermann (2011b), além dessas características, outros fatores influenciam na resistividade do solo, tais como:

- Tipo de solo (arenoso, argiloso, granito, calcário, terra de jardim);
- Mistura de diversos tipos de solo;
- Solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes;
- Teor de umidade;
- Temperatura;
- Compactação e pressão;
- Composição química dos sais dissolvidos na água retida;
- Concentração de sais dissolvidos na água retida.

A Tabela 3 apresenta a resistividade elétrica de alguns tipos de solo. Porém, na elaboração de um projeto, a Tabela 3 não pode servir como único

parâmetro, pois a resistividade se altera, dependendo das condições do local, condições climáticas e teor de umidade.

Tabela 3 – Tipos de solo e respectiva resistividade elétrica

Tipos de Solo	Resistividade ($\Omega.m$)
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% umidade	140
Terra de jardim com 20% umidade	480
Argila Seca	1500 a 5000
Argila com 20% umidade	330
Argila com 40% umidade	80
Areia molhada	1300
Areia Seca	3000 a 8000
Calcário compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000

Fonte: (KINDERMANN, 2011b)

O teor de umidade é um parâmetro que tem grande influência na resistividade do solo. Como indicado na Tabela 4, pode-se identificar que, para um mesmo solo, alterando-se apenas a porcentagem de umidade, o valor da resistividade varia.

Tabela 4 – Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade

Teor de Umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$)
0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: (KINDERMANN, 2011b)

Essa variação da umidade faz com que solos mais úmidos tenham uma melhor dissolução de sais presentes, formando, assim, um meio eletrolítico, facilitando a passagem de corrente iônica (KINDERMANN, 2011b).

2.6. Tratamento Químico do Solo

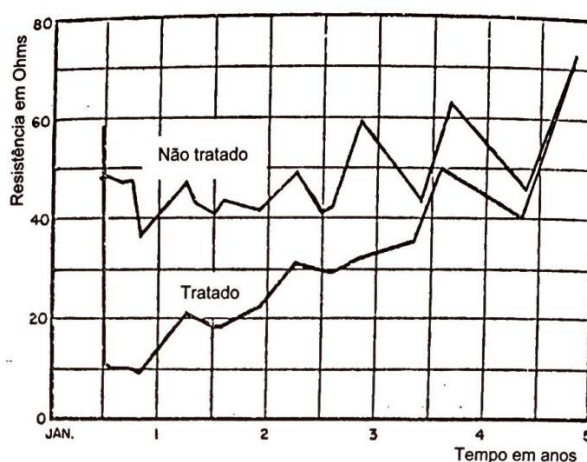
Quando o sistema de aterramento possui alta resistividade e o solo não favorece para melhor eficiência do sistema, o tratamento químico é utilizado. O tratamento químico do solo é utilizado em duas situações:

- quando o sistema de aterramento é existente e possui alta resistividade e não se pode ampliá-lo;
- quando o terreno escolhido possui alta resistividade e não se pode trocar de lugar (KINDERMANN, 2011b).

Os materiais mais utilizados para o tratamento do solo são a Bentonita, EARTRON e o Gel. Esses materiais possuem uma boa higroscopia, não são corrosíveis, possuem baixa resistividade elétrica, não são tóxicos, possuem alto teor de umidade e são quimicamente estáveis no solo (KINDERMANN, 2011b; BUSS, 2016).

Conforme Figura 6, o tratamento químico do solo possui uma vida útil, com variações da resistência de terra no decorrer do tempo.

Figura 6 – Variações da resistência de terra em função do tempo para solo tratado e não tratado adjacente



Fonte: (KINDERMANN, 2011b).

Da análise dessa figura, pode-se verificar que, com o tempo, o tratamento químico do solo deve ser refeito, pois seu efeito diminui, aumentando a resistência do sistema de aterramento.

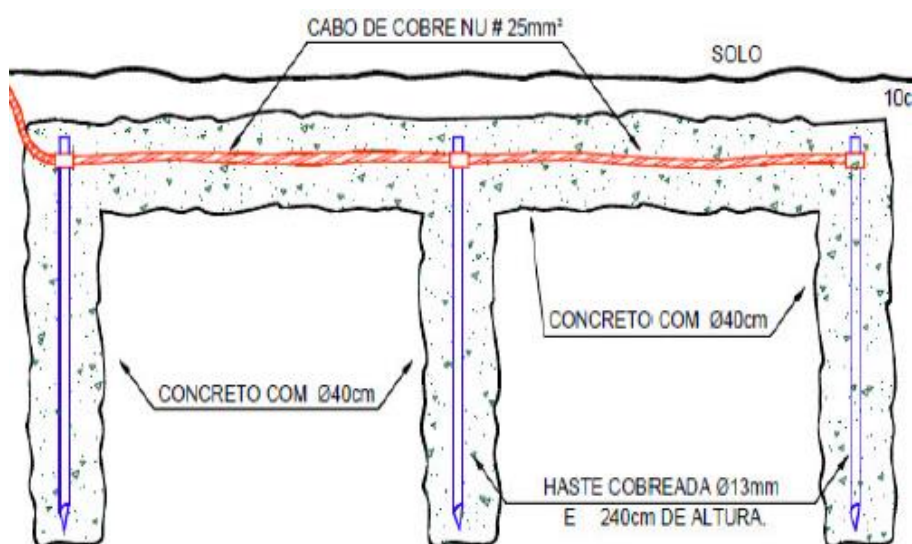
Nem sempre o tratamento químico do solo é suficiente para solos muito seco e com alta resistividade. A utilização de concreto, como envelopamento do aterramento para esses tipos de solos, é uma alternativa, pois além de ser uma proteção para os componentes, o concreto garante uma umidade ao redor do sistema (KINDERMANN, 2011b; BUSS, 2016).

2.7. Envelopamento

Conforme citado anteriormente, o tratamento químico do solo e a utilização de concreto correspondem a métodos utilizados para melhorar (diminuir) a resistência do sistema de aterramento (KINDERMANN, 2011b).

Outra possibilidade é a utilização do método de envelopamento, que é o recobrimento do envoltório de cabos e/ou hastes com material específico, tendo como objetivo diminuir a resistividade do sistema de aterramento e torná-lo mais eficiente, conforme ilustra a Figura 7 (CLAUSEN et al, 2004).

Figura 7 – Sistema de aterramento envelopado com concreto



Fonte: (CLAUSEN et al, 2004).

De acordo com Bezerra (2011), a utilização do concreto possui uma eficiência no sistema de aterramento, diminuindo a resistência de terra em torno de 33 a 38%.

A utilização do concreto para solos extremamente secos é uma alternativa, pois o concreto tem a capacidade de manter a umidade além de proporcionar a proteção dos cabos contra corrosão por causa do contato com a terra. (BUSS, 2016; KINDERMANN, 2011b).

Este trabalho tem como objetivo verificar a eficiência de diferentes traços de concreto tais como: utilização de agregado reciclado, carvão mineral e alterações na porcentagem de água. A partir de ensaios de resistividade elétrica de cada corpo de prova, foi caracterizada a resistividade elétrica para cada traço, com isso foi possível simular a utilização de diferentes tipos de concreto no sistema de aterramento verificando assim sua eficiência em solos com características diversificadas.

3. METODOLOGIA

Conforme citado anteriormente, o solo possui diferentes características que influenciam a eficiência da malha de aterramento. Atualmente, quando o solo possui baixa condutividade, é feito seu tratamento químico, fazendo com que sua resistividade diminua e a corrente seja dispersada de uma maneira mais eficaz pelo mesmo.

Dependendo do tipo de solo, algumas medidas devem ser tomadas para que não se tenha nenhuma falha da malha de aterramento. Segundo a referência (KINDERMAN, 2011b), a utilização de concreto no envelopamento dos cabos de solos com alta resistividade é adotada.

Neste trabalho, foram propostos cinco diferentes traços de concreto, os quais foram moldados e tiveram suas propriedades físicas, mecânicas e elétricas avaliadas (item 3.1) para, em um segundo momento, serem efetuadas simulações que permitissem verificar sua eficiência no sistema de aterramento (item 3.2).

3.1. Avaliação de diferentes tipos de envelopamento

Neste trabalho foram propostos 5 traços de concreto para as análises de envelopamento. Foram feitas alterações na relação água/cimento dos traços, pois segundo Real (2015) e Mostardeiro Neto (2011), a relação água/cimento tem influencia nas características físicas e mecânicas do concreto, além de influenciar na resistividade elétrica, quanto maior a relação água/cimento, menor a resistividade do concreto.

Além da alteração da relação água/cimento, foram elaborados 2 traços com a mesma relação água/cimento, um utilizando em sua composição o agregado reciclado e o outro utilizando o carvão mineral.

Conforme tabela 5 pode-se verificar que o agregado reciclável apresenta maior absorção de água em relação ao agregado natural miúdo e graúdo. De acordo com Puhl et al (2016) isso ocorre por ser um material mais poroso.

Puhl et al (2016) cita ainda que quanto maior a quantidade de poros no concreto, mais permeável e suscetível a sofrer ações de agentes externos se torna o material.

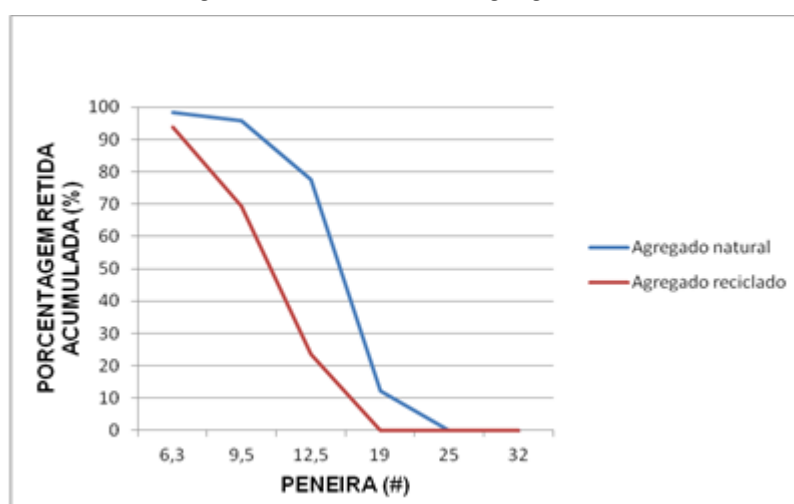
Tabela 5 – Características dos agregados natural e reciclado

Agregado	M. específica (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Natural Miúdo	2,33	0,8
Natural Graúdo	2,72	0,93
Reciclado Graúdo	2,57	5,49

Fonte: (Puhl et al, 2016).

Outra questão importante é a dimensão do grão dos agregados. A Figura 8 mostra que o agregado reciclado possui grãos menores que o agregado natural. Segundo Puhl et al (2016) quanto menor a dimensão do grão, maior a área de contato e maior e mais rápida a absorção de água.

Figura 8 – Curvas granulométricas dos agregados natural e reciclado



Fonte: (Puhl et al, 2016).

Para o traço utilizando o carvão mineral, sua escolha se deu por conta da utilização de algumas concessionárias de energia utilizarem o mesmo para diminuir a resistência de terra de sistemas de aterramento das linhas de transmissão.

3.1.1. Dosagem do concreto

Neste trabalho, foram executados cinco traços de concreto conforme apresentado a seguir.

- Traço 1: concreto convencional com relação água/ cimento (A/C) 0,7;

- Traço 2: concreto convencional com relação água/ cimento (A/C) 0,5;
- Traço 3: concreto convencional com relação água/ cimento (A/C) 0,4;
- Traço 4: concreto com 100% de substituição do agregado graúdo por agregado reciclado (ARC) e relação A/C 0,5;
- Traço 5: concreto com 50% de substituição do agregado miúdo por carvão mineral e relação A/C 0,5;

Foram moldados 6 corpos de prova de cada traço para atender à demanda dos ensaios realizados. Na Tabela 6, são descritos os traços utilizados para confecção dos corpos de prova.

Tabela 6 – Traços de concreto

Traço	Cimento (kg)	Agregado Miúdo (kg)	Agregado Graúdo (kg)	Agregado Miúdo (carvão) (kg)	Agregado Reciclado Graúdo (RCC) (kg)	Relação A/C
1	1	2,4	2,8	-	-	0,7
2	1	2,4	2,8	-	-	0,5
3	1	2,4	2,8	-	-	0,4
4	1	2,4	-	-	2,8	0,5
5	1	1,2	2,8	1,2	-	0,5

3.1.2. Procedimento de mistura

O procedimento de mistura dos concretos foi realizado, mecanicamente, através de betoneira, conforme as etapas a seguir.

- Colocou-se o agregado graúdo e metade da água;
- Agitou-se a mistura por 1 minuto;
- Colocou-se o cimento;
- Agitou-se a mistura por 1,5 minutos;
- Colocou-se o agregado miúdo e a outra metade da água;
- Agitou-se a mistura por 1,5 minutos.

É importante ressaltar que a umidade da areia foi calculada e computada como parte da água necessária para amassamento. Nos traços mais secos, foi

necessário introduzir aditivo plastificante para obter a fluidez necessária para moldagem dos corpos de prova.

3.1.3. Moldagem, cura e preparação dos corpos de prova

Após a mistura do concreto, os corpos de prova foram moldados, utilizando mesa vibratória para homogeneização. Para realização dos ensaios, foram moldados 5 corpos de prova prismáticos, nas dimensões 10x10x17 cm, um de cada tipo de traço, e 25 corpos de prova cilíndricos, nas dimensões 10x20 cm, sendo 5 de cada tipo de traço.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada em conformidade com o preconizado pela norma NBR 5738:2015 (ABNT, 2015). Os corpos de prova foram mantidos nas fôrmas por 24h, devidamente identificados, secando ao ar livre. Após este período, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em câmara climatizada por um período de 28 dias em uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e à umidade relativa de 95%. Apenas os corpos de prova para os ensaios de resistividade elétrica, após a desmoldagem, foram colocados em um recipiente com água para a coleta das medidas de resistividade elétrica, no 2°, 7°, 14°, 21° e 28° dias, verificando, assim, a evolução da resistividade elétrica no tempo.

3.1.4. Características do Concreto

O concreto produzido foi ensaiado no seu estado endurecido, segundo suas propriedades físicas (absorção de água por imersão e absorção por capilaridade) conforme NBR 9778:2005 (ABNT, 2005) e NBR 9779:2012 (ABNT, 2012), mecânicas (resistência a compressão axial) segundo NBR 5739:2007 (ABNT, 2007) e elétricas (resistividade elétrica aparente) conforme adaptação do método de Wenner (1916), NBR 7117 e citado em Mostardeiro Neto (2011), Hoppe (2005) e Rosa (2005). Os ensaios realizados são descritos a seguir.

3.1.4.1. Propriedades físicas: absorção por imersão e por capilaridade

O ensaio de absorção por imersão foi feito de acordo com a NBR 9778:2005 (ABNT, 2005), e o ensaio de absorção por capilaridade conforme a NBR

9779:2012 (ABNT, 2012). Todos os ensaios foram feitos aos 28 dias de idade do concreto, tendo sido utilizado dois corpos de prova de cada traço para cada ensaio. As Figuras 9 e 10, a seguir, ilustram os corpos de prova em seu procedimento de ensaio.

Figura 9 – Corpos de prova sendo ensaiados por imersão



Figura 10 – Corpos de prova sendo ensaiados por capilaridade



3.1.4.2. Propriedade mecânica: resistência à compressão axial

O desempenho mecânico dos concretos produzidos foi analisado com base na avaliação da resistência à compressão axial, feita conforme dispõe a NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), aos 28 dias de idade. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. O equipamento utilizado para o ensaio foi uma prensa universal, com capacidade de carga de 200 tf e velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Neste ensaio, foram utilizados 3 corpos de prova de cada traço. A Figura 11 ilustra a prensa utilizada nesse ensaio.

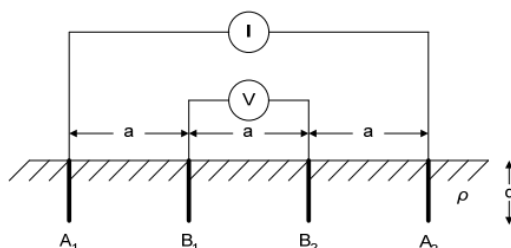
Figura 11 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência a compressão axial



3.1.4.3. Característica física: ensaio de resistividade elétrica aparente

O Método de Wenner (Método dos quatro eletrodos) é utilizado para o levantamento da curva da resistividade do solo. Esse método possibilita a modelagem do solo em duas camadas, simplificando a estratificação do solo. Ele é caracterizado pela utilização de 4 hastes cravadas no solo para a apresentação da resistência elétrica (NBR 7117, 2012). Conforme a Figura 12 é injetada uma corrente no ponto A1, que retorna pelo ponto A2. Os pontos B1 e B2 são eletrodos de potencial. A corrente que passa pelo ponto A1 e retorna pelo ponto A2 gera uma diferença de potencial entre os pontos B1 e B2 e, com isso, é obtida a resistividade elétrica do solo. (RAGGI, 2009)

Figura 12 – Configuração de Wenner

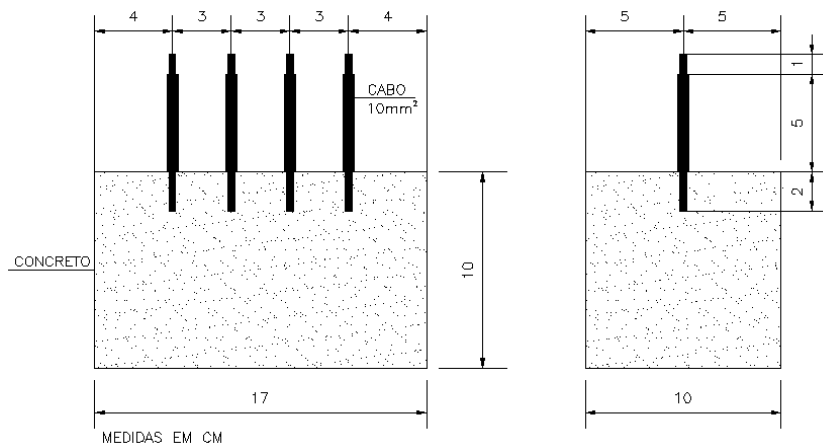


Fonte: (RAGGI, 2009).

Para determinar a resistividade elétrica do concreto, foi feita uma adaptação do método de Wenner para as medições em concreto que são indicadas por Mostardeiro Neto (2011), Hoppe (2005) e Rosa (2005).

Primeiramente, foi construído o molde de madeira para garantir a equidistância dos eletrodos conforme Figura 13.

Figura 13 – Detalhe do protótipo para o ensaio de resistividade elétrica



Fonte: Própria Autoria

Conforme ilustrado nessa figura, para os eletrodos, foram utilizados cabos de cobre de bitola 10mm². Os cabos foram desencapados nas extremidades (1 cm em uma ponta e 2 cm na outra ponta). O restante do cabo (5 cm) ficou com a isolação. A Figura 14 mostra os moldes onde são fixados os cabos, podendo verificar a equidistância na parte inferior.

Figura 14 – Forma utilizada para os moldes prismáticos



Para o ensaio de resistividade elétrica do concreto foi utilizado um gerador de funções de corrente alternada e dois multímetros. Os corpos de prova (CPs) ficaram no laboratório para facilitar as medições dentro de um recipiente com água cobrindo os corpos de prova, conforme Figura 15. As medidas foram feitas no 2°, 7°, 14°, 21° e 28° dias, além de medições com os CPs totalmente secos.

Figura 15 – Corpos de prova em recipiente



Os CPs foram retirados do recipiente com água e as medições foram realizadas conforme Figura 16.

Figura 16 – Procedimento de medição para o ensaio de resistividade elétrica

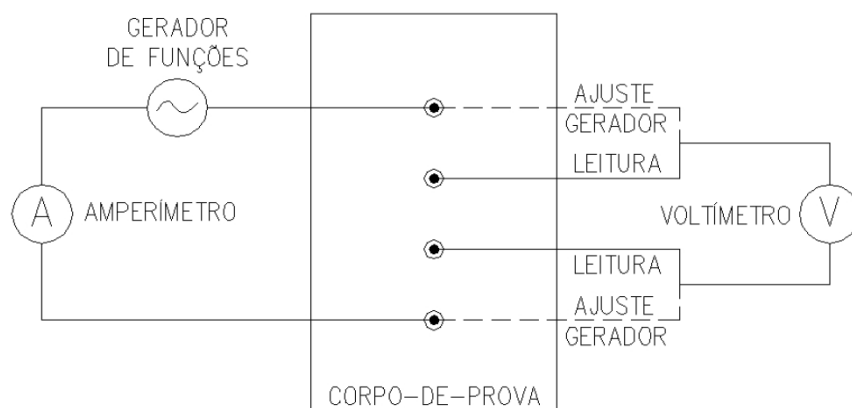


As configurações do gerador de funções foram ajustadas conforme segue.

- Frequência: 10Hz;
- 5,05VPP;
- *Offset* de 2,50 VDC;
- *Low Level*: -5,025V;
- *High-Level*: +25mV;
- Período: 100ms.

O circuito equivalente para as medições está representado na Figura 17.

Figura 17 – Circuito equivalente para os ensaios de resistividade elétrica



Fonte: (HOPPE, 2005).

Foram realizados dois ensaios em um intervalo de 10 minutos, extraindo as medidas de tensão e corrente. A resistividade é calculada através da Eq. (5) conforme NBR 7117: 2012 (ABNT, 2012).

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot V}{\left(1 + \frac{2 \cdot d}{\sqrt{d^2 + 4b^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + b^2}}\right) \cdot I} \quad (5)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica aparente do concreto, em ohm.cm (Ω .cm);

V = diferença de potencial, medida em Volts (V);

I = corrente medida em Ampere (A);

d = distância de separação entre os eixos dos eletrodos, em cm;

b = profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova, em cm.

Segundo Abreu (1998), o concreto pode ter diferentes resistividades, isso dependerá de seu material e sua composição (relação água/cimento, umidade e tipo de cimento), sua resistividade pode variar de 10 a $10^5 \Omega$.m. Além de que quanto maior a saturação dos poros menor a resistividade e que o agregado graúdo tem influência nessa característica. (ABREU, 1998; POLDER apud MOSTARDEIRO NETO, 2011; WHITTINGTON, MCCARTER E FORDE apud MOSTARDEIRO NETO, 2011).

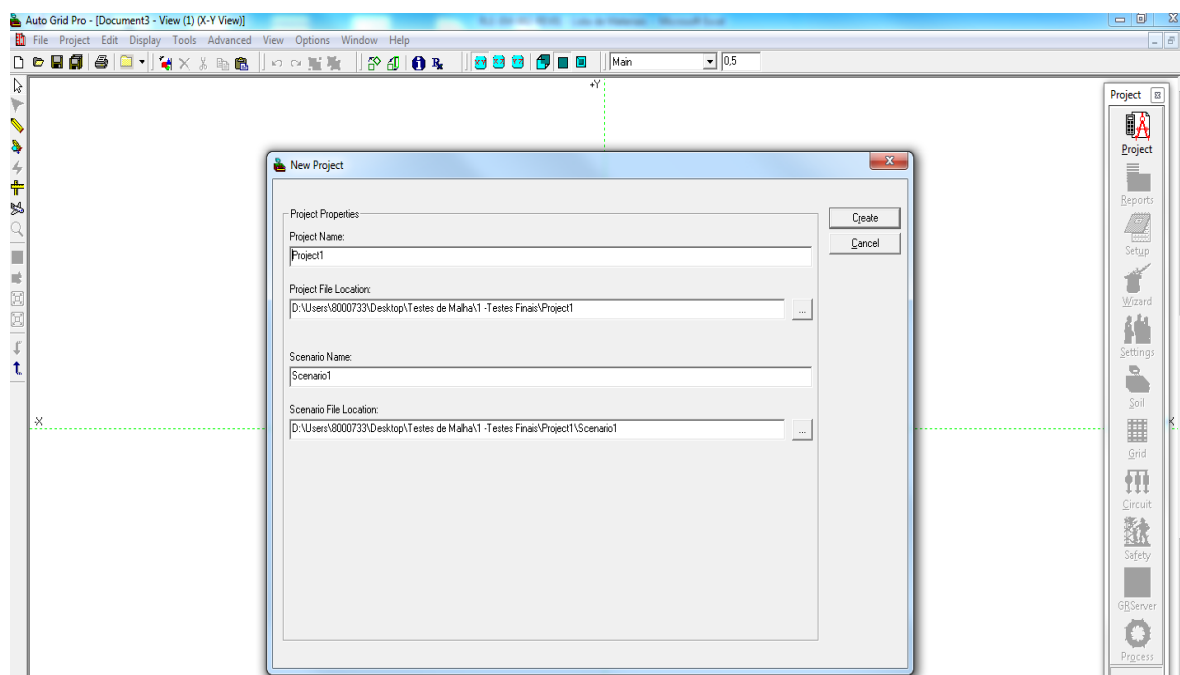
3.2. Análise da eficiência do sistema de aterramento de subestações em diferentes tipos de solo

Neste item, é detalhado o procedimento para as análises da influência da resistividade do solo no sistema de aterramento. Foram feitas análises utilizando diferentes tipos de envelopamento de concreto e identificando sua importância na eficiência da malha de aterramento.

3.2.1. Características do Software

O trabalho teve como princípio simulações em *software*. Para todos os cálculos e testes foi utilizado o programa AutoGrid Pro versão 15.1.3950.0, criado pela *Safe Engineering Services (SES)*, tendo sido desenvolvido, especificamente, para análises e estudos de malha de aterramento de subestações. O *software* possui características de geração de relatórios e gráficos que calculam potenciais da malha de aterramento, potenciais de passo e toque, resistência da malha, distribuição de corrente de falha nos circuitos adjacentes, além de outras grandezas associadas à malha de aterramento. A Figura 18 ilustra a tela inicial do *software* utilizado para as simulações.

Figura 18 – Tela inicial do *software*



3.2.2. Dados Utilizados

Para as medições, que foram feitas em terrenos onde serão instaladas futuras subestações de uma concessionária de energia, foi utilizado um terrômetro da Megabras, modelo EM-4055, para medir a resistividade do solo e elaborar a estratificação em diferentes cidades do estado de São Paulo, conforme Tabela 7.

Para a medição da resistividade do solo, foi utilizado o método de Wenner (Wenner, 1916), utilizando o terrômetro como aparelho para medição. Os dados foram coletados em período seco, após no mínimo 7 dias sem chuva, em 4 pontos de cada terreno, com exceção da cidade de Guariba, na qual foi possível realizar medições em 6 pontos do terreno. Os valores destacados em amarelo na Tabela 6 devem ser desconsiderados, pois possuem desvio maior que 50% em relação à média o que poderia resultar em análises errôneas. Os valores que foram incluídos no programa foram as médias calculadas conforme a Tabela 7. Esses dados foram disponibilizados pela concessionária de energia para serem utilizados como dados de entrada para as análises realizadas nessa dissertação.

Tabela 7 – Medição da resistividade do Solo

Campinas-SP					
Espaçamento entre as hastes (m)	Ponto A Resistência (Ω)	Ponto B Resistência (Ω)	Ponto C Resistência (Ω)	Ponto D Resistência (Ω)	Média Resistência (Ω)
1	958	356	562	523	523
2	691	323	343	216	323
4	319	55,5	74,3	67,8	67,8
Espaçamento entre as hastes (m)	Ponto A Resistência (Ω)	Ponto B Resistência (Ω)	Ponto C Resistência (Ω)	Ponto D Resistência (Ω)	Média Resistência (Ω)
8	89,6	29,4	27	26,4	27
16	68,3	5,4	5,77	9,65	5,585
Humaitá-SP					
Espaçamento entre as hastes (m)	Ponto A Resistividade (Ω.m)	Ponto B Resistividade (Ω.m)	Ponto C Resistividade (Ω.m)	Ponto D Resistividade (Ω.m)	Média Resistividade (Ω.m)
1	415,7	227,3	198,4	297,0	284,6
2	314,0	129,0	329,1	309,0	317,3
4	163,5	178,1	151,7	306,0	164,5
8	89,9	108,0	58,8	141,7	99,6
16	19,1	46,2	33,2	52,2	37,7

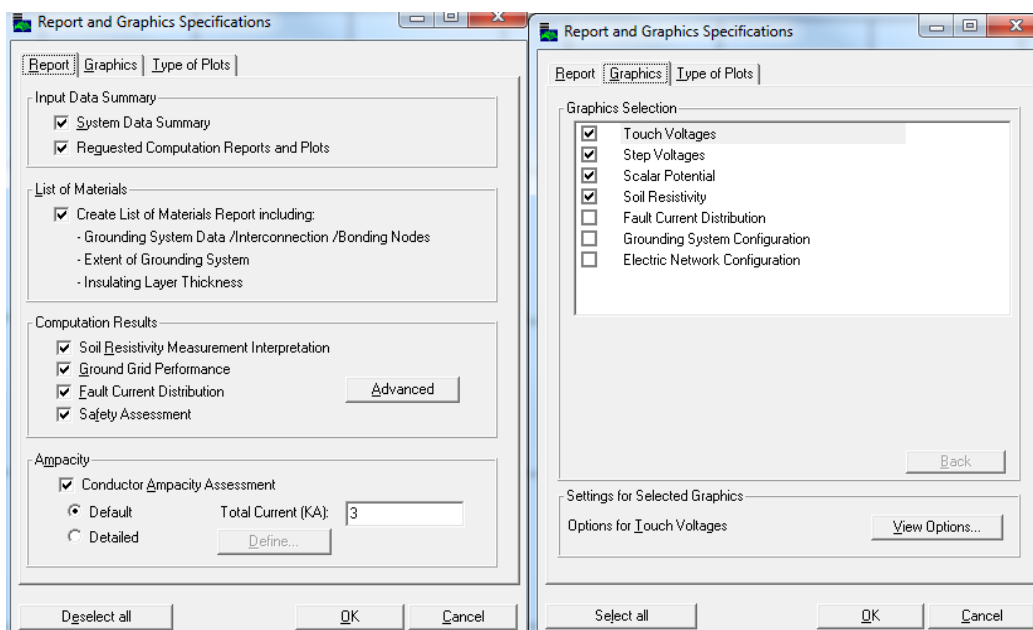
São José do Rio Preto-SP					
Espaçamento entre as hastes (m)	Ponto A Resistividade (Ω.m)	Ponto B Resistividade (Ω.m)	Ponto C Resistividade (Ω.m)	Ponto D Resistividade (Ω.m)	Média Resistividade (Ω.m)
1	581,5	341,6	618,6	488,0	507,4
2	694,6	388,1	842,8	555,2	620,2
4	708,4	259,5	849,1	535,1	697,5
8	1191	95,0	203,5	208,0	168,8
16	56,3	37,2	42,2	95,5	45,2

Guariba-SP							
Espaçamento entre as hastes (m)	Ponto A Resistividade (Ω.m)	Ponto B Resistividade (Ω.m)	Ponto C Resistividade (Ω.m)	Ponto D Resistividade (Ω.m)	Ponto E Resistividade (Ω.m)	Ponto F Resistividade (Ω.m)	Média Resistividade (Ω.m)
1	1729	355	625	665	321	409	475
2	1121	793	662	757	540	616	674
4	752	773	1033	778	720	600	776
8	1082	684	1090	804	926	963	925
16	827	745	1070	799	1031	925	900

3.2.3. Simulações no Software

Após a disponibilização das informações relativas às medições nos diferentes locais (Tabela 7), iniciou-se a inclusão dos parâmetros no software AUTOGRID PRO. Primeiramente, foram escolhidos os parâmetros de saída do programa, conforme Figura 19 (tensão de passo, tensão de toque, potencial escalar e resistividade do solo).

Figura 19 – Parâmetros de saída



As características informadas nas Tabelas 8 e 9 foram utilizadas em todas as simulações do *software*, alterando apenas a resistividade elétrica média do solo, conforme a Tabela 7.

Tabela 8 – Dados utilizados para a simulação

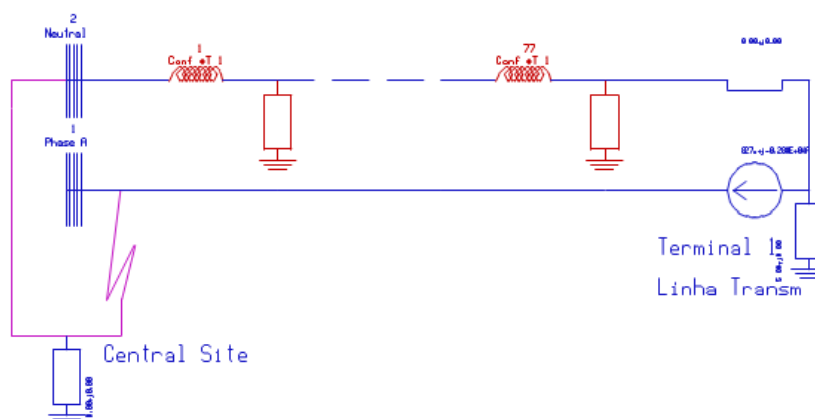
Propriedades	Dados de Entrada
Corrente Total	3 kA
Profundidade de Enterro	0,6 m
Material do Condutor	Cabo de cobre nu 50mm ²
Duração da Falta	0,5 segundos
Peso Corporal	70 kg
Frequência	60Hz
Temperatura Ambiente	20 °C
Método utilizado	Wenner

Tabela 9 – Parâmetros de linha

Propriedades	Dados de Entrada
Quantidade de Estruturas	77
Impedância do pé da torre	5.0000 +j 0.0000 ohms
Fonte atual	3000.0 Amps / -74.000 degrees
Vão médio entre as torres	294.00 m
Cabo guarda	7,94 mm EHS

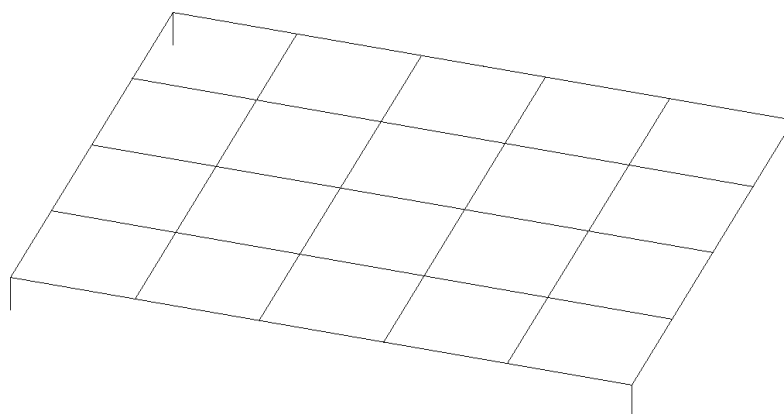
O módulo de cálculo das distribuições de corrente do *software* considera que todas as linhas devem chegar diretamente na subestação. Esses parâmetros de linha foram incluídos para verificar a distribuição de corrente entre a malha da subestação e o cabo guarda da linha de transmissão, verificando, assim, a influência da resistividade do solo nessa distribuição. A Figura 20 indica o diagrama resumido de distribuição de corrente.

Figura 20 – Diagrama de distribuição de corrente



Após a inclusão desses parâmetros, foi elaborado o desenho da malha de aterramento no *software*. A malha utilizada para as simulações tem dimensões de 50x40m, com espaçamento entre cabos de 10 metros, que é uma malha do tamanho aproximado de um terreno de uma subestação de clientes particulares, com instalação a 60 cm da superfície e com hastes de 3 metros de comprimento, conforme Figura 21, extraída do *software*.

Figura 21 – Geometria da malha de aterramento



Na sequência, foi feita a inclusão das características do solo para cada simulação, utilizando todos os parâmetros citados anteriormente. A Figura 22 e 23 indica o campo de inclusão desses parâmetros no *software*. Além da característica do tipo de solo, foi escolhido o método a ser utilizado (Wenner) para duas camadas, e se o dado obtido é a resistência ou a resistividade, dependendo dos dados obtidos pelo terrômetro.

Figura 22 – Inclusão das características do solo

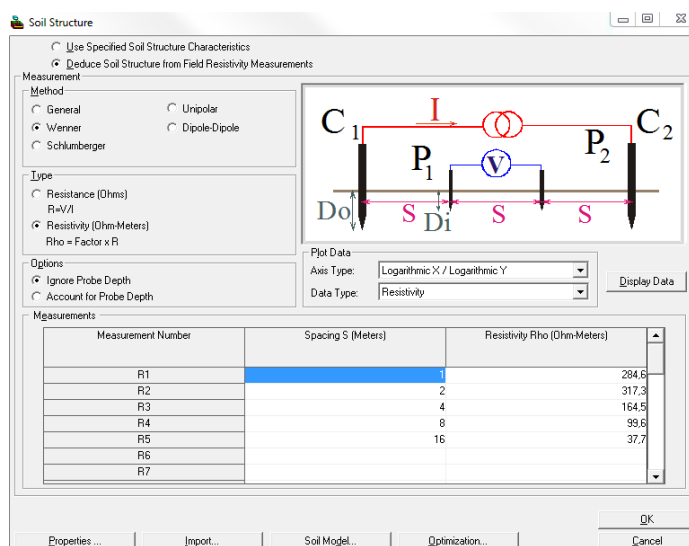
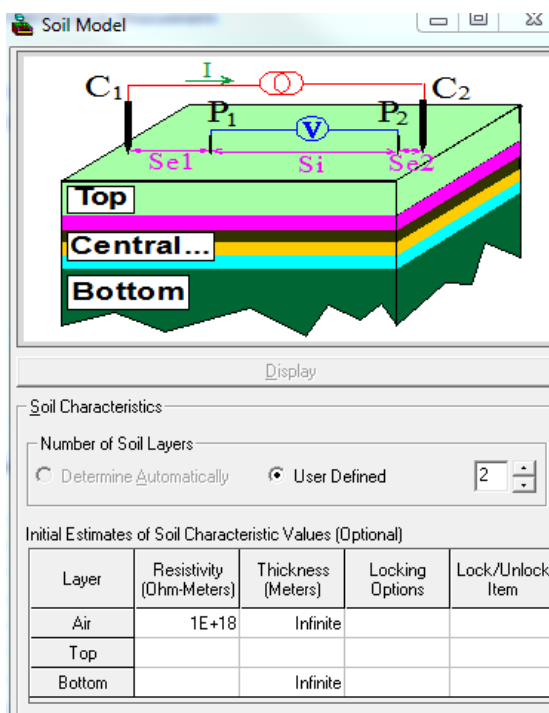


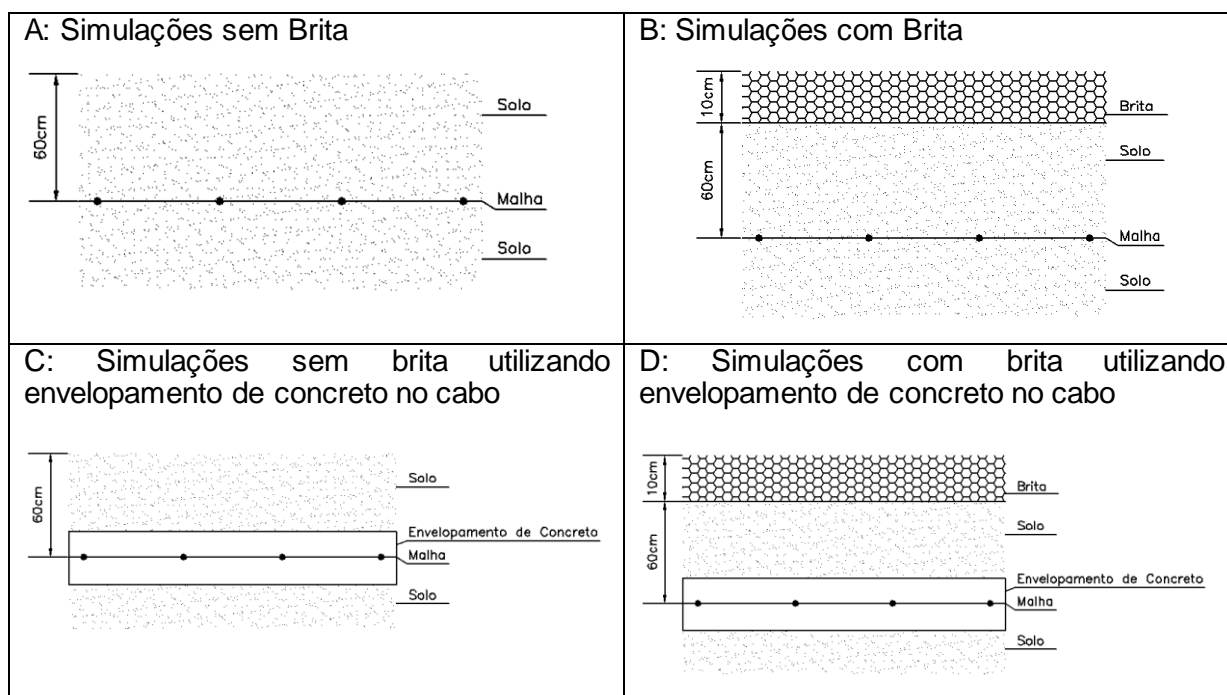
Figura 23 – Inclusão das características do solo para duas camadas



Após a inclusão dos dados no *software*, foram feitas as simulações para verificar a influência dos tipos de solo na malha de aterramento, verificando características de tensão de passo e toque, resistência da malha, potenciais absolutos.

Foram feitas diversas simulações, utilizando a malha referência conforme Figura 21. A Figura 24 indica as simulações elaboradas, o item A e B foram simulados com a malha referência, com e sem o recobrimento de brita. Já os itens C e D foram simulados utilizando os envelopamentos do traço 1, 2, 3 e 4, com e sem o recobrimento da brita. Além dos itens acima, foram feitas as simulações finais para melhorar a eficiência da malha referência, alterando o tamanho das hastes, incluindo cabos e utilizando o envelopamento com o concreto de traço 4, cada caso será avaliado para melhor atender a necessidade de cada terreno.

Figura 24 – Simulações



Como pode verificar, não será utilizado o traço 5 para as simulações pois a medição do corpo de prova seco foi comprometida devido a falta de contato do concreto com o cabo.

A brita na área da subestação é utilizada para aumentar a qualidade do nível de isolamento com o solo e aumentar a segurança de quem transita na área da subestação (correção dos potenciais de passo e de toque). Nas simulações, foi utilizado um recobrimento de 10cm de brita com resistividade de 3000 $\Omega.m$ (resistividade da brita). (NBR 15751, 2013)

A seguir será mostrado os resultados da metodologia 3.1 (análises dos concretos) e 3.2 (análise das simulações).

4. RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo identificar as características dos cinco diferentes traços. Serão identificadas suas características físicas, mecânicas e elétricas, esses dados serão utilizados para efetuar as simulações no sistema de aterramento.

4.1. Análise de diferentes tipos de envelopamento para melhoria da eficiência do sistema de aterramento

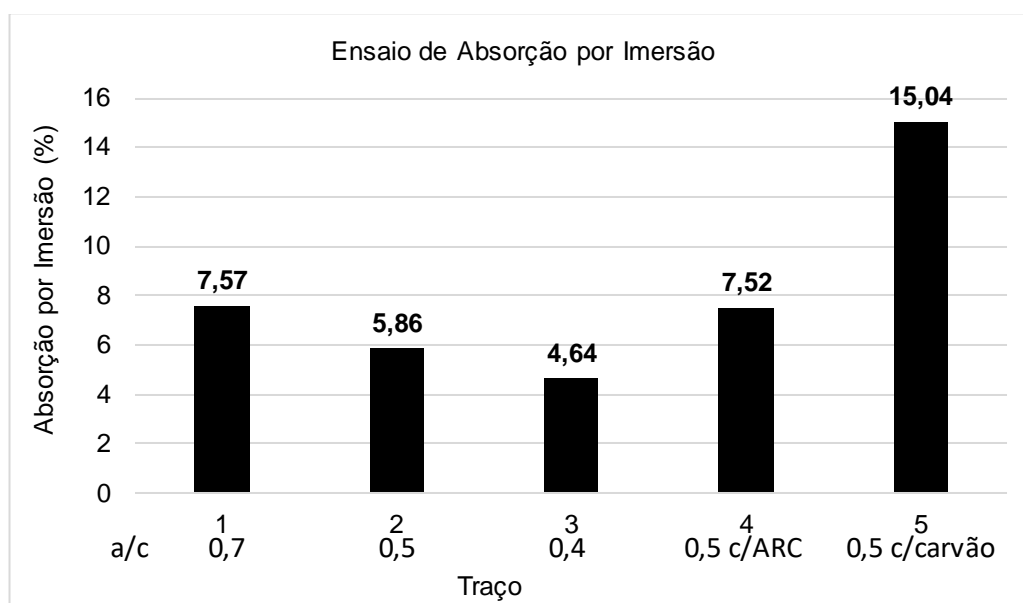
A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de absorção por imersão, absorção por capilaridade, resistência à compressão e resistividade elétrica dos corpos de prova de concreto moldados nos seguintes traços:

- Traço 1: concreto convencional com relação água/ cimento (A/C) 0,7;
- Traço 2: concreto convencional com relação água/ cimento (A/C) 0,5;
- Traço 3: concreto convencional com relação água/ cimento (A/C) 0,4;
- Traço 4: concreto com 100% de substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado (ARC) e relação A/C 0,5;
- Traço 5: concreto com 50% de substituição do agregado miúdo por carvão mineral e relação A/C 0,5;

4.1.1. Ensaio de absorção por imersão

Os resultados obtidos pelo ensaio de absorção por imersão estão indicados na Figura 25. As medições foram feitas aos 28 dias de idade do concreto, utilizando a média dos dois corpos de prova moldados para cada traço.

Figura 25 – Resultado do ensaio de absorção por imersão



É possível verificar que o traço 5, que possui carvão mineral em sua composição, apresentou a maior capacidade de absorção por imersão, muito superior aos demais, quase o dobro do que apresentou o traço 1. Isso se deve ao fato de o carvão ser um material de boa higroscopia.

Pode-se notar, também, que quanto maior a relação água cimento do concreto, maior a sua porosidade e, conseqüentemente, maior a sua absorção de água. Sendo assim, justifica-se o fato de o traço 1 ter apresentado alta capacidade de absorção e o traço 3 ter apresentado a menor capacidade de absorção do conjunto. Agregados reciclados, por sua vez, também apresentam maior porosidade que os agregados naturais, justificando a maior absorção de água do traço 4 em relação ao traço 2, que possui a mesma relação água cimento.

4.1.2. Ensaio de absorção de água por capilaridade

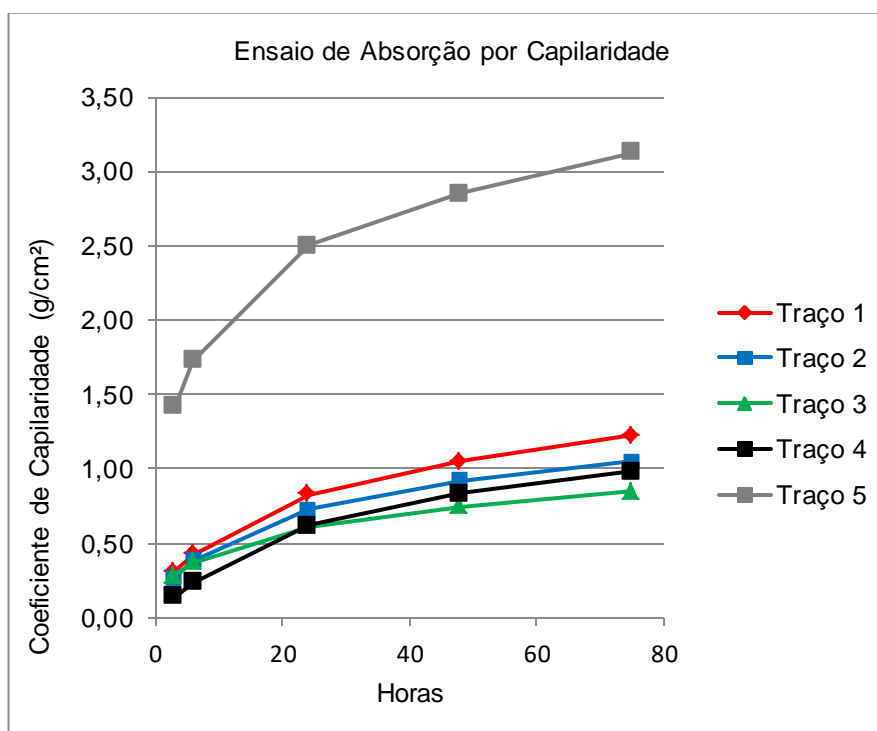
Os resultados obtidos pelo ensaio de absorção por capilaridade estão indicados na Tabela 10. As medições foram feitas no decorrer de 3, 6, 24, 48 e 72 horas do contato dos corpos de prova com água, após o período de cura de 28 dias. Utilizou-se a medida média dos dois corpos de prova para cada traço.

Tabela 10 – Resultado do ensaio de absorção por capilaridade

Traço	Coeficiente de Capilaridade (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
1	0,31	0,43	0,83	1,05	1,22
2	0,27	0,39	0,73	0,92	1,05
3	0,28	0,37	0,62	0,74	0,85
4	0,14	0,24	0,62	0,84	0,98
5	1,42	1,73	2,50	2,85	3,13

A Figura 26 ilustra a evolução da absorção por capilaridade ao longo do tempo.

Figura 26 – Evolução da absorção por capilaridade



Analisando a Tabela 10 e a Figura 26, verifica-se que, assim como no ensaio de absorção por imersão, o concreto de traço 5, com substituição de 50% do agregado miúdo por carvão, apresentou a maior absorção por capilaridade, diferenciando-se, significativamente, da curva dos demais traços. Tal resultado ressalta ainda mais a capacidade higroscópica deste material e o possível aumento na porosidade do concreto, justificando este aumento expressivo na absorção de água.

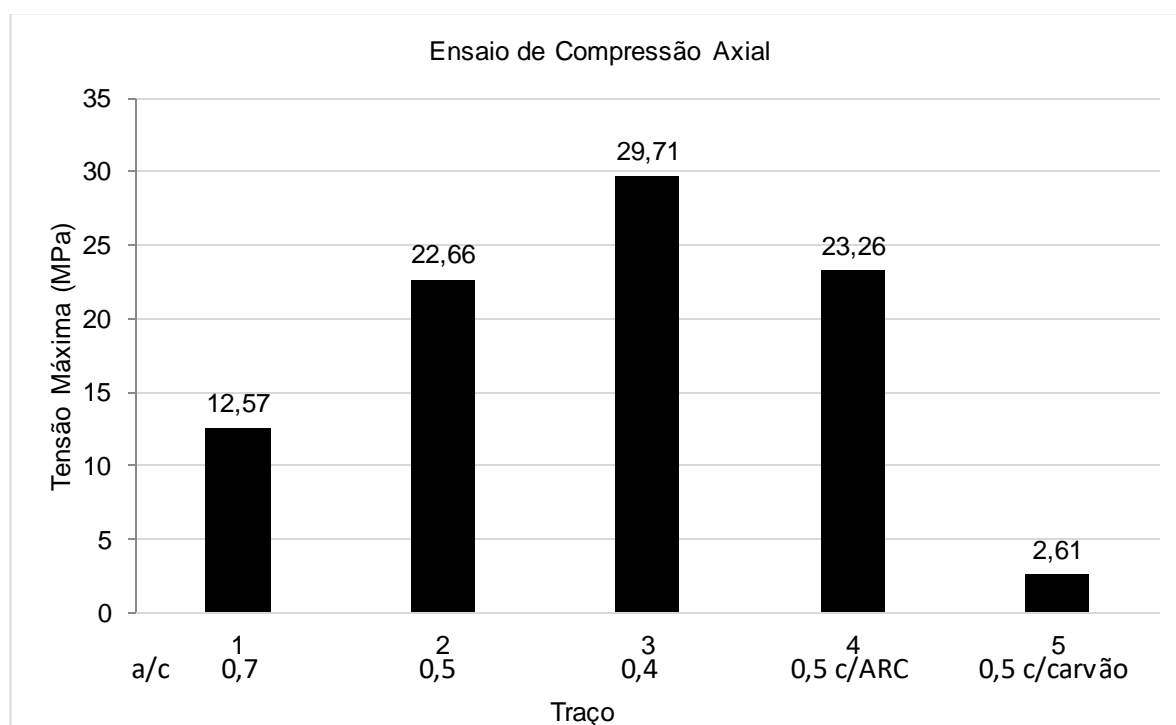
O traço 1, por sua vez, concreto convencional com maior relação água/cimento (0,7), apresentou a segunda curva de absorção de água por capilaridade mais significativa. Já os traços, 2 e 4, após o período total de 72 horas de contato dos corpos de prova com a água, atingiram, praticamente, o mesmo nível de absorção por capilaridade. Já o traço 3, concreto convencional com menor relação água/cimento (0,4), apresentou a curva de absorção de água por capilaridade mais baixa, o que era esperado por ser um concreto menos poroso.

Desta forma, ressalta-se que concretos com a estrutura mais porosa facilitam a penetração de água.

4.1.3. Ensaio de resistência à compressão axial

A Figura 27 indica os resultados do ensaio de compressão axial, que foram obtidos após os 28 dias de idade, utilizando a média dos três corpos de prova para cada traço.

Figura 27 – Resultado do ensaio de compressão axial



Mediante as análises dos dados obtidos a partir da Figura 27, pode-se verificar que a relação água/cimento influencia na resistência mecânica do concreto, sendo que, quanto maior a quantidade de água incorporada ao concreto, menor a

sua resistência à compressão. Esta característica pode ser verificada pela comparação dos três primeiros traços, que possuem a mesma composição, alterando-se apenas a relação água/cimento. O traço 3, que possui menor quantidade de água em sua composição (relação A/C igual a 0,4), apresentou maior resistência mecânica, seguido pelo traço 2 (relação A/C igual a 0,5) e traço 1 (relação A/C igual a 0,7).

O traço 2 (concreto convencional com relação água/ cimento 0,5) e o traço 4 (concreto com 100% de substituição do agregado graúdo por agregado reciclável (ARC) e relação A/C 0,5) possuem a mesma relação água/cimento e suas resistências são parecidas. O agregado reciclável não afetou significativamente a resistência à compressão.

Já o traço 5 (concreto com 50% de substituição do agregado miúdo por carvão e relação A/C 0,5), possui resistência baixa em relação aos demais, demonstrando que a substituição de 50% do agregado miúdo por carvão impactou em sua resistência.

Pensando na aplicação prática destes concretos, para a utilização em envelopamento, o traço 5 possui maior absorção de água por capilaridade e imersão, o que ajuda na dispersão da corrente no sistema de aterramento, porém sua resistência mecânica é baixa o que inviabilizaria sua utilização em determinados pontos da subestação como, por exemplo, na área de trânsito de veículos.

4.1.4. Ensaio de resistividade elétrica aparente

A Tabela 11 e a Figura 28 indicam os resultados para o ensaio de resistividade elétrica aparente do concreto nos corpos de prova prismáticos, que foram obtidos no decorrer de 28 dias, com medições no 2º, 7º, 14º, 21º e 28º dia, com o concreto saturado e no 139º dia de idade com o concreto totalmente seco. Foram feitas 2 medidas, uma inicial e outra após 10 minutos para verificar a estabilização da passagem da corrente pelo corpo de prova. Os valores indicados na Tabela 11 e Figura 28 correspondem aos dados medidos após a estabilização.

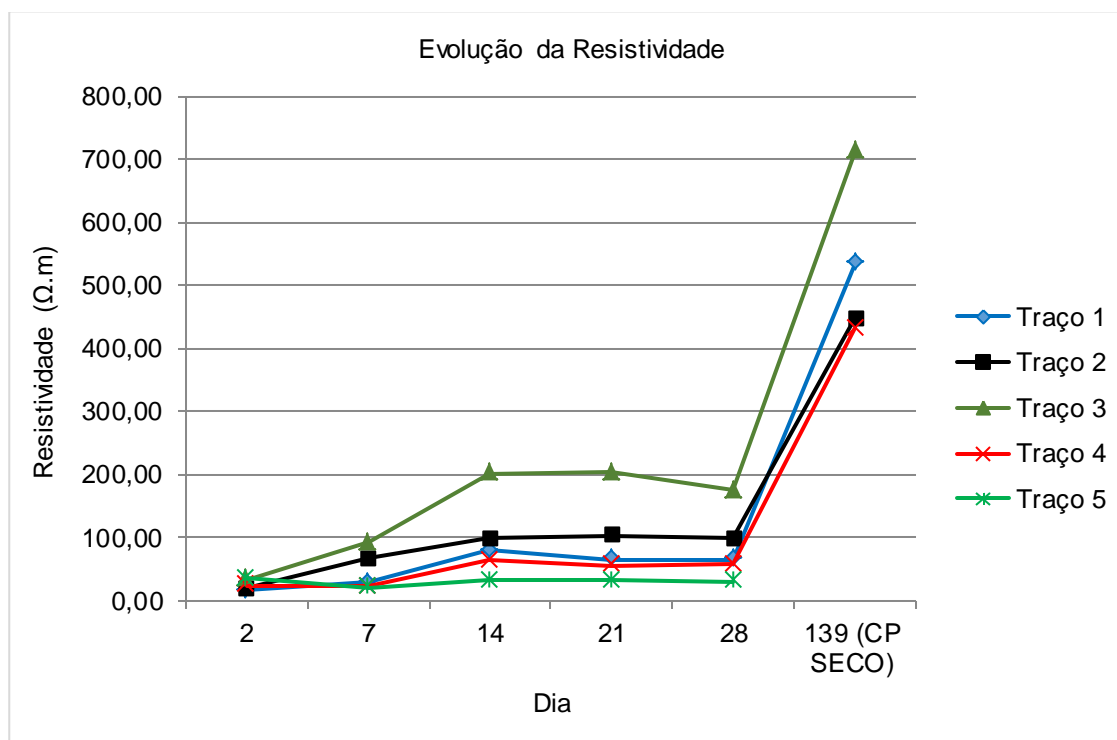
Ressalta-se que a medida feita com o corpo de prova seco foi necessária para as simulações, pois será utilizado o pior caso, ou seja, de maior resistividade.

Tabela 11 – Evolução da resistividade no decorrer do tempo

Traço	Resistividade do Traço					
	Dia 2	Dia 7	Dia 14	Dia 21	Dia 28	Dia 139 (CP seco)
1	16,5 $\Omega.m$	28,15 $\Omega.m$	78,74 $\Omega.m$	65,45 $\Omega.m$	64,84 $\Omega.m$	534,7 $\Omega.m$
2	18,64 $\Omega.m$	66,44 $\Omega.m$	98,74 $\Omega.m$	103,64 $\Omega.m$	99,29 $\Omega.m$	446,51 $\Omega.m$
3	33,68 $\Omega.m$	91,86 $\Omega.m$	201,39 $\Omega.m$	203,07 $\Omega.m$	175,37 $\Omega.m$	711,76 $\Omega.m$
4	24,08 $\Omega.m$	22,78 $\Omega.m$	64,3 $\Omega.m$	55,75 $\Omega.m$	57,61 $\Omega.m$	431,19 $\Omega.m$
5	34,79 $\Omega.m$	20,92 $\Omega.m$	32,27 $\Omega.m$	31,4 $\Omega.m$	30,31 $\Omega.m$	-

Não foi possível obter o resultado da resistividade do traço 5 no 139º dia, devido a falta de contato do cabo com o concreto, inviabilizando a medição.

Figura 28 – Resultado do ensaio de resistividade elétrica aparente



Verifica-se que a resistividade do concreto aumentou no decorrer do tempo, isso se deve ao fato de o corpo de prova estar passando pelo processo de cura.

O traço 5, que utiliza carvão em sua composição, possui menor resistividade elétrica que os outros traços no decorrer do tempo. Isso ocorre por ele apresentar maior capacidade de absorção de água, conforme mostraram os ensaios de absorção por capilaridade e por imersão, além do fato de o carvão estar fazendo o papel de facilitador para a passagem da corrente.

Já o traço 1, de maior relação água/cimento, também apresentou menor resistividade elétrica por causa da maior quantidade de poros em sua estrutura, que facilita a percolação da água.

Com os resultados obtidos pelo ensaio de resistividade elétrica, os valores para cada traço, serão utilizados nos ensaios do item a seguir. Tendo em vista os resultados obtidos pelos ensaios, será utilizado na simulação o cabo de cobre nú envelopado com o concreto para a malha de aterramento. O cabo de cobre nu é um material que possui resistência aos fatores externos como oxidação e corrosão galvânica. (LÜBECK, 2008).

4.2. Análise da eficiência do sistema de aterramento em diferentes tipos de resistividade de solo

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações considerando o local de instalação de uma subestação em cada cidade: Campinas, Guariba, Humaitá e São José do Rio Preto.

Para a cidade de Campinas, serão apresentadas todas as simulações por ser o solo com maior resistividade (pior caso). Para as outras análises serão apresentados somente os resultados finais das simulações, com a utilização da brita, que é comumente utilizada nas subestações, uma vez que servem para melhorar a qualidade do nível de isolamento e corrige os potenciais de toque e passo aumentando assim a segurança dos indivíduos que transitam na subestação.

Para as simulações utilizando o envelopamento, os dados utilizados do concreto serão os dados obtidos no 139º dia com o corpo de prova seco.

4.2.1. Estratificação dos solos em duas camadas

Após as simulações, foram feitas as análises da influência da resistividade no sistema de aterramento. Conforme Tabela 11, extraída do *software*, foi verificada a estratificação em duas camadas de cada tipo de solo onde p_1 é a resistividade da primeira camada, p_2 é a resistividade da segunda camada e d_1 é a profundidade da primeira camada.

Tabela 12 – Estratificação do solo para duas camadas

Cidade	ρ_1 ($\Omega.m$)	ρ_2 ($\Omega.m$)	d1 (m)
Campinas	3485	572	2,82
Guariba	375	943	0,74
Humaitá	268	31	3,8
São José do Rio Preto	604	28	4,2

Mediante os resultados da Tabela 11, verifica-se que o terreno de Campinas é o que possui maior resistividade na primeira camada (3485 $\Omega.m$). A profundidade da primeira camada é de 2,82 metros, com isso a corrente de curto será levada para a camada com menor resistividade já que as simulações iniciais utilizam hastes de 3 metros.

O terreno localizado na cidade de Guariba possui uma resistividade na primeira camada menor que a segunda, além da profundidade da primeira camada ser de 0,74 metros. Nesse caso, a haste utilizada para as simulações (3m) se encontra na camada com maior resistividade, 943 $\Omega.m$.

Para o terreno na cidade de Humaitá, a segunda camada possui resistividade de 31 $\Omega.m$, sua primeira camada possui profundidade de 3,8 metros. Pode verificar que as duas resistividades são baixas e que a utilização da haste de 3 metros está localizada na camada com maior resistividade.

No terreno na cidade de São José do Rio Preto, a segunda camada possui resistividade menor que a primeira camada que possui profundidade de 4,2 metros. Nesse caso, a utilização de haste mais profunda seria uma alternativa para levar a corrente de falta para a camada com menor resistividade.

Com isso, pode-se verificar que cada terreno possui características diferentes e que, com essas informações, será possível analisar como essas características vão influenciar na malha de aterramento.

4.2.2. Simulações para o terreno situado em Campinas

4.2.2.1. Simulações com a malha referência sem e com o recobrimento de brita

A primeira simulação foi feita utilizando a malha referência (descrita no Capítulo 3), sem e com o recobrimento de brita para demonstrar também a importância da mesma para os parâmetros de tensão de passo e toque. Para a

simulação com a brita foi utilizada uma espessura de 10 cm para recobrir o terreno, com resistividade de 3000 Ω .m.

O limite de segurança de tensão de passo e toque é um valor que leva em consideração a resistividade da camada superficial e o tempo de eliminação do defeito (t). O sistema de aterramento se torna seguro quando atende esses limites para qualquer tipo de defeito (NBR 15751, 2013). Na Tabela 13, são apresentados os limites de segurança para o terreno de Campinas, determinados pelo *software*.

Tabela 13 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas

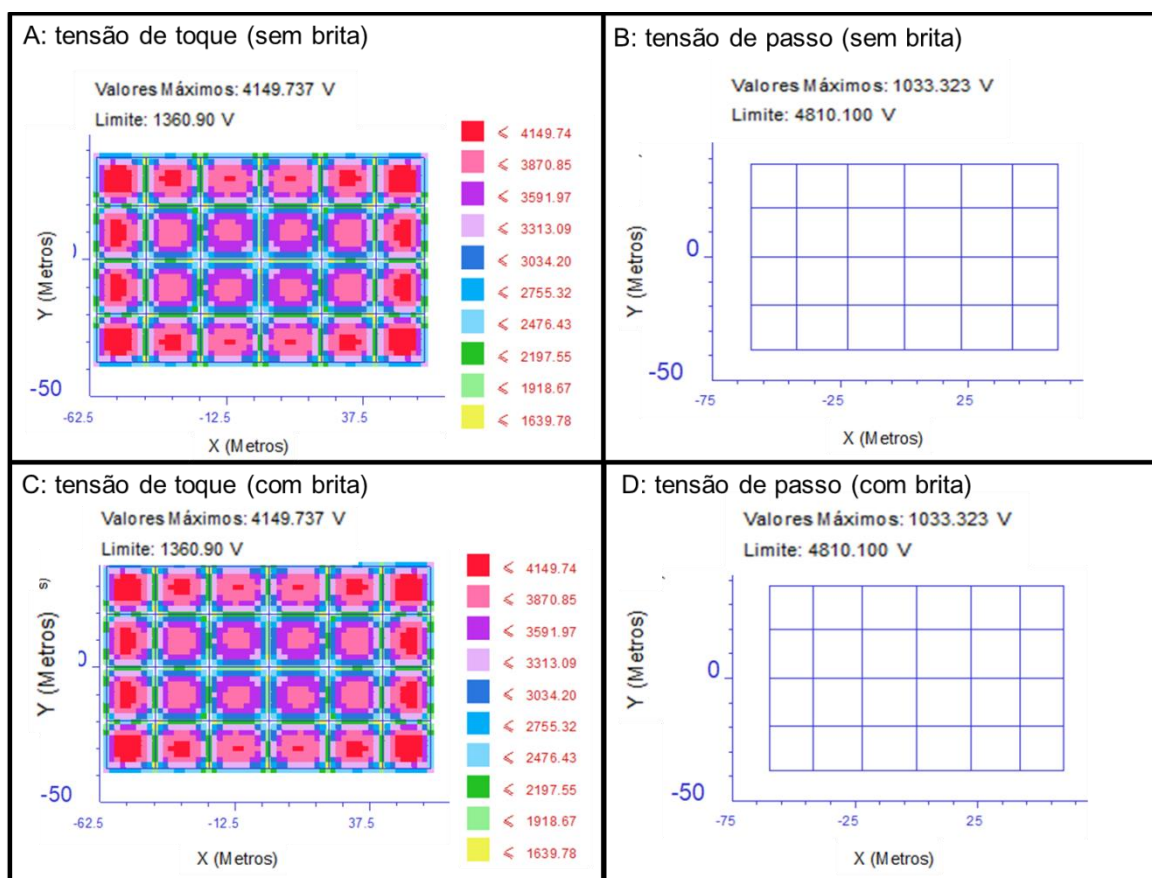
Recobrimento de brita	Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
Sem	1.360,9	4.810,1
Com	1.360,9	4.810,1

Pode-se verificar que os valores obtidos foram iguais, pois como a resistividade da primeira camada é de 3485 Ω .m e a da brita é de 3000 Ω .m, a brita não fez efeito nos quesitos de tensão de passo e toque.

Pode-se verificar que o terreno de Campinas possui valores de tensão de passo e toque altos. Isso ocorre porque o solo possui alta resistividade. Quanto maior esses valores, maior a elevação do potencial da subestação. O mau dimensionamento de uma malha que possui um solo com alta resistividade acarretaria na passagem de corrente pelo indivíduo que transita pelo local.

A Figura 29 indica os valores que estão fora do limite de segurança para tensão de toque e passo. Os valores na cor vermelha são característicos de potenciais altos e quanto mais próximos ao amarelo, mais baixos os potenciais. A cor branca significa que a malha está segura e dentro dos limites permitidos. Os eixos X e Y indicam as dimensões da malha (50x40m). Os itens A e B indicam os valores obtidos de tensão de toque e passo sem o recobrimento de brita e os itens C e D indicam os resultados com a brita.

Figura 29 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança



Para que a malha seja eficiente ela deve atender os limites permissíveis de tensão de toque e passo simultaneamente. A partir da análise dessa figura, foi possível identificar que essa geometria de malha não é suficiente para o terreno de Campinas, pois não protege contra tensão de toque (item A e C), uma vez que os valores estão acima do limite. Os itens B e D que indicam as tensões de passo sem e com brita, respectivamente, estão abaixo do limite permitido.

Neste caso como a resistividade da primeira camada é alta, a brita não aumentou a qualidade do nível de isolamento com o solo, com isso essa malha deve ser reforçada para atender os limites.

Outras características que foram verificadas e informadas pelo *software* foram: resistência da malha, a corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão. Esses dados estão informados na Tabela 14.

Tabela 14 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
6,34	1014	1986

Como pode-se verificar, a resistência da malha é de 6,34 Ω . Com relação a corrente, o curto utilizado para as simulações foi de 3000 A e, com isso, pode-se verificar que a maior parte dessa corrente retornará pelo cabo guarda. Isso ocorre porque a resistência da malha é maior que a da linha de transmissão.

4.2.2.2. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1, sem e com o recobrimento de brita

As simulações a seguir foram feitas com a malha referência, com envelopamento de concreto de traço 1 dos cabos da malha, sem e com recobrimento de brita.

O traço 1 possui resistividade de 534,7 Ω .m, valor menor que o da primeira camada estratificada de 3485 Ω .m. Nas simulações, o *software* considera a primeira camada como sendo a de concreto, com isso a resistividade da primeira camada será de 534,7 Ω .m.

A Tabela 15 apresenta os limites de segurança para o terreno de Campinas, utilizando o envelopamento do traço 1, fornecidos pelo *software*.

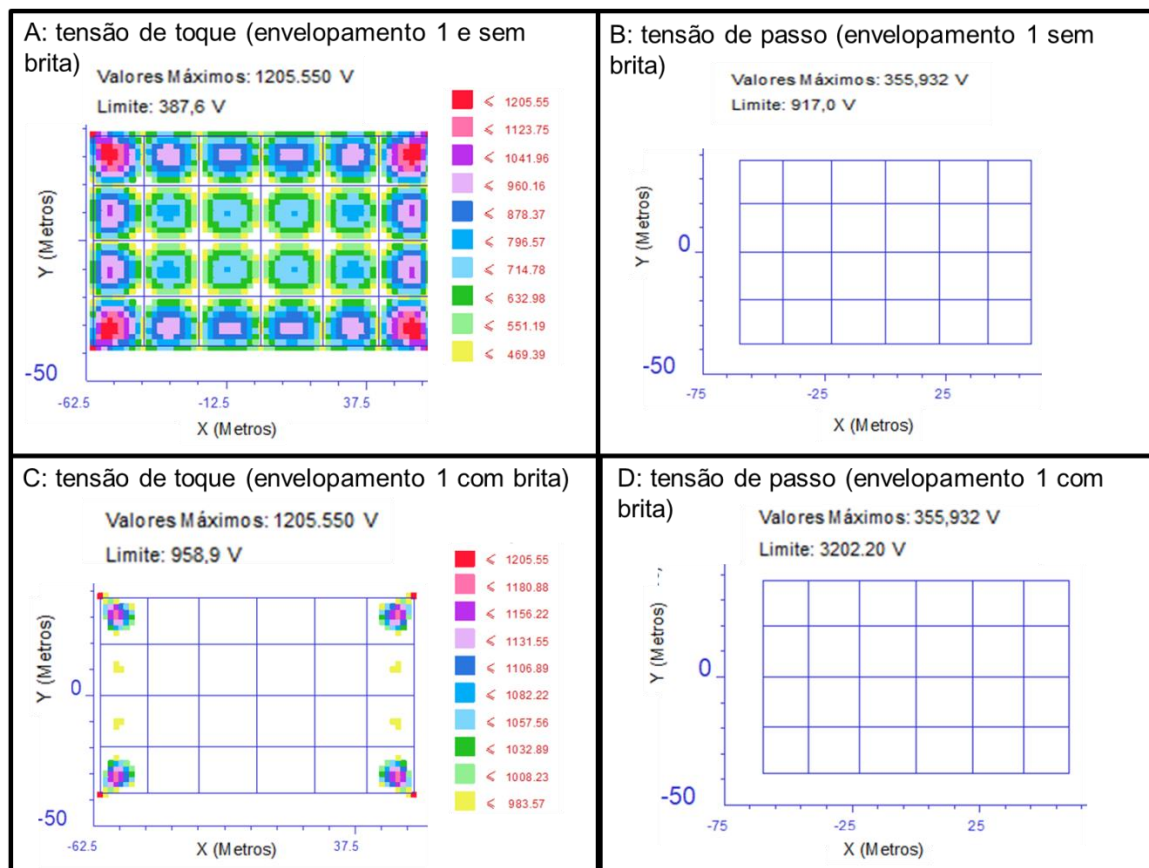
Tabela 15 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 1)

Recobrimento de brita	Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
Sem	387,6	917,0
Com	958,9	3.202,2

Pode-se verificar que, com a utilização do envelopamento com o traço 1, os valores limites de tensão de passo e toque são menores que os do item 4.2.2.1, pois o valor da resistividade da primeira camada influencia nesses resultados. Além disso, os limites com o recobrimento de brita são maiores do que sem a mesma.

A Figura 30 indica os valores que estão fora do limite de segurança para tensão de toque e passo com a utilização do envelopamento.

Figura 30 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referência com envelopamento 1)



A partir da análise dessa figura, foi possível identificar que a utilização do envelopamento melhorou a eficiência da malha em comparação ao sem envelopamento (item 4.2.2.1). Pode-se verificar que a utilização da brita melhorou a qualidade do sistema de aterramento como demonstra o item C (com envelopamento e brita) comparando-se com o item A (com envelopamento e sem brita). De acordo com os itens A e B (com envelopamento e sem brita), os valores de tensão de passo estão dentro do limite, porém para a tensão de toque os valores estão acima do permitido. O item C e D (com envelopamento e brita) tiveram melhores resultados que a simulação sem o recobrimento da brita, porém as extremidades da malha devem ser reforçadas para que o sistema de aterramento fique no limite permitido em toda sua extensão.

A Tabela 16 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 16 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 1)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
3,81	1360	1640

Como pode verificar a resistência é menor e a corrente que permanece na malha é maior comparando esses itens com o capítulo 4.2.2.1. Com relação à corrente, foi possível verificar que a corrente que circulará pela malha para um curto de 3000A é menor que a corrente que retorna pelo cabo guarda. Raggi (2009) cita que numa falta para a terra, valores menores da resistência de aterramento facilitam na passagem da corrente no solo.

4.2.2.3. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, sem e com o recobrimento de brita

As simulações a seguir foram feitas com a malha referência, com envelopamento de concreto de traço 2 dos cabos da malha, sem e com recobrimento de brita.

O traço 2 possui resistividade de 447 Ω .m, valor menor que o da primeira camada estratificada de 3485 Ω .m e menor que a resistividade do traço 1. A Tabela 17, apresenta os limites de segurança para o terreno de Campinas utilizando o envelopamento do traço 2, sendo que esses dados são resultados do *software*.

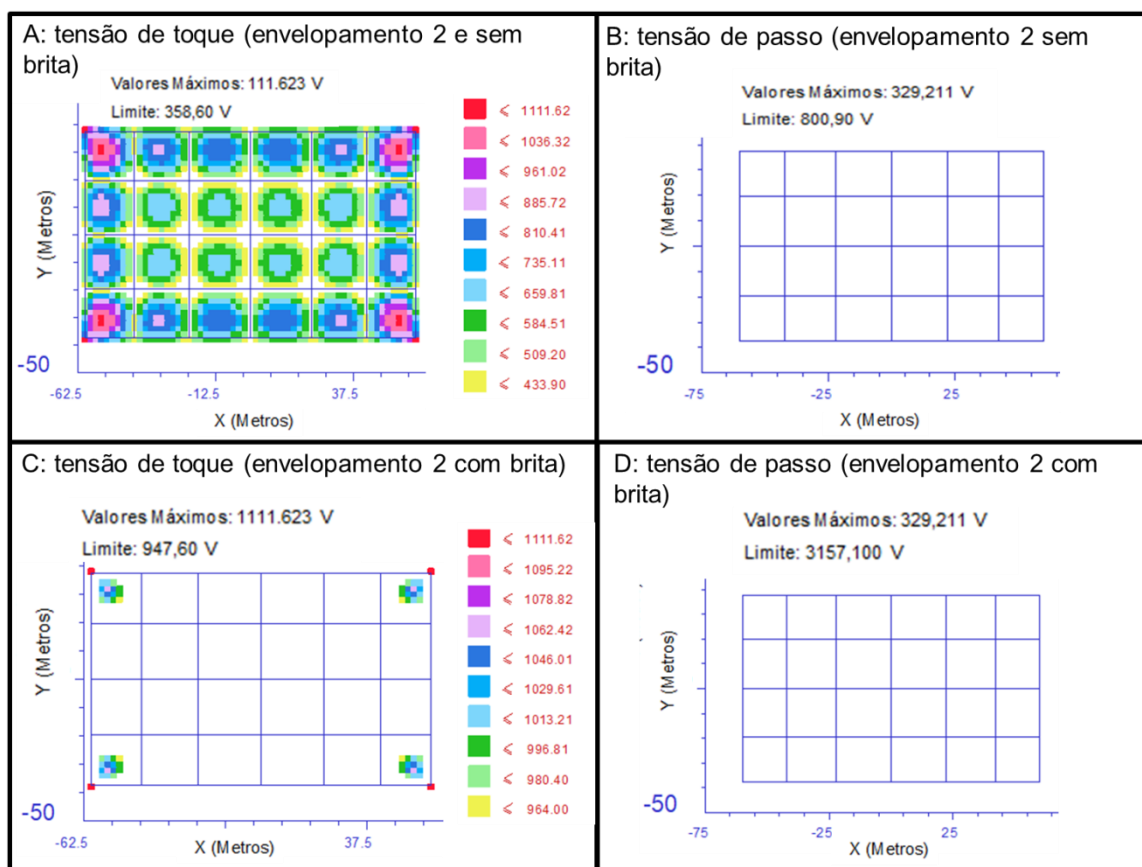
Tabela 17 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 2)

Recobrimento de brita	Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
Sem	358,6	800,9
Com	947,6	3.157,1

Verifica-se que a utilização do envelopamento com o traço 2, os valores limites de tensão de passo e toque são menores que os do item 4.2.2.1 e 4.2.2.2. Além disso, os limites com o recobrimento de brita são maiores do que sem brita conforme indica a Tabela 17.

A Figura 31 indica os valores que estão fora do limite de segurança para tensão de toque e passo com a utilização do envelopamento.

Figura 31 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referêcia com envelopamento 2)



Conforme demonstrado no item 4.2.2.2, o envelopamento melhorou o sistema de aterramento. De acordo com os itens A e B (com envelopamento e sem brita), os valores de tensão de passo estão dentro do limite, porém para a tensão de toque os valores estão acima do permitido. O item C e D (com envelopamento e brita) tiveram melhores resultados que a simulação sem o recobrimento da brita, porém as extremidades da malha devem ser reforçadas para que o sistema de aterramento fique no limite permitido em toda sua extensão.

A Tabela 18 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 18 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 2)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
3,69	1383	1617

Nota-se que a resistência é menor e a corrente que permanece na malha é maior comparando esses itens com o capítulo 4.2.2.1. Com relação à corrente, foi possível verificar que a corrente que circulará pela malha para um curto de 3000A é menor que a corrente que retorna pelo cabo guarda.

4.2.2.4. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, sem e com o recobrimento de brita

As simulações a seguir foram feitas com a malha referência, com envelopamento de concreto de traço 3 dos cabos da malha, sem recobrimento de brita.

O traço 3 possui resistividade de 712 Ω .m, valor menor que o da primeira camada estratificada de 3485 Ω .m e maior que a resistividade do traço 1 e 2. A Tabela 19 apresenta os limites de segurança para o terreno de Campinas, utilizando o envelopamento do traço 3.

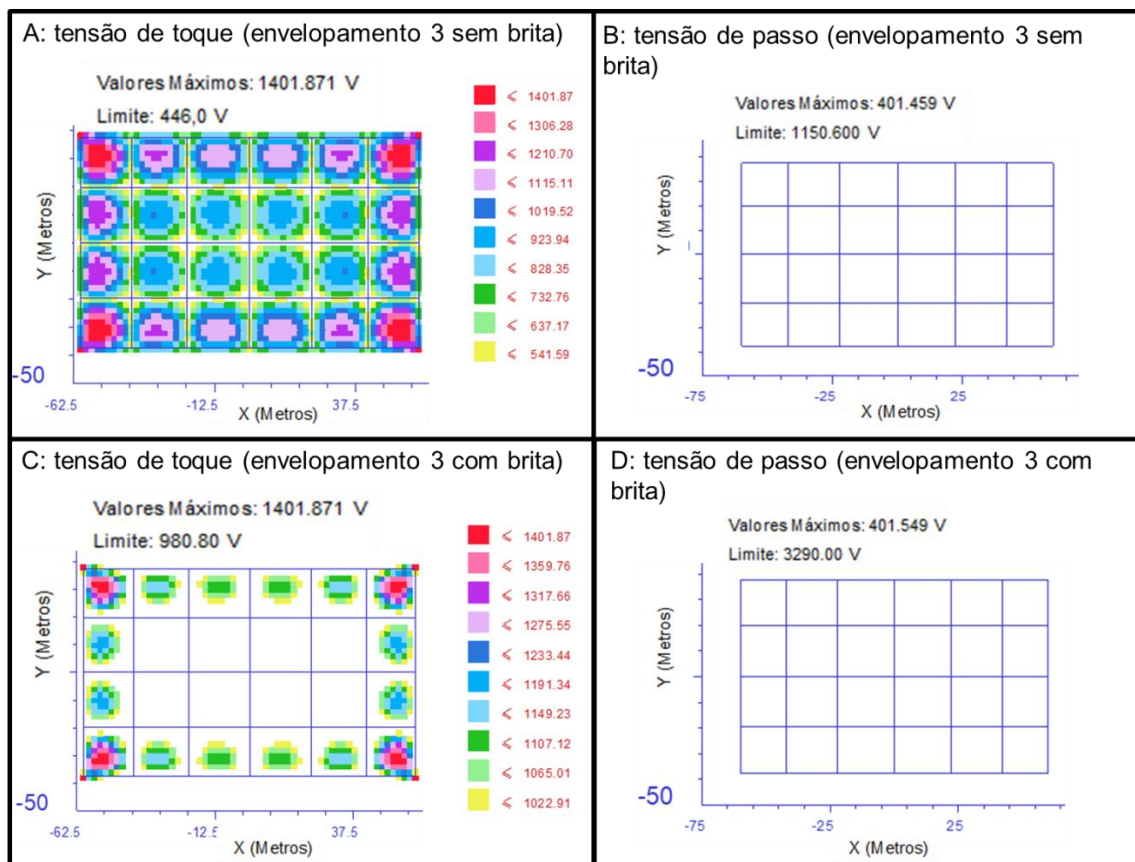
Tabela 19 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 3)

Recobrimento de brita	Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
Sem	446,0	1.150,6
Com	980,8	3.290,0

Pode-se verificar que, com a utilização do envelopamento 3, os valores limites de tensão de passo e toque são maiores que os do item 4.2.2.2, 4.2.2.3 e 4.2.2.5, pois o valor da primeira camada influencia nesses resultados.

A Figura 32 indica os valores que estão fora do limite de segurança para tensão de toque e passo com a utilização do envelopamento.

Figura 32 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referência com envelopamento 3)



De acordo com os itens A e B (com envelopamento e sem brita), os valores de tensão de passo estão dentro do limite, porém para a tensão de toque os valores estão acima do permitido. O item C e D (com envelopamento e brita) tiveram melhores resultados que a simulação sem o recobrimento da brita, porém as extremidades da malha devem ser reforçadas para que o sistema de aterramento fique no limite permitido em toda sua extensão. Comparando os resultados das simulações utilizando os envelopamentos 1, 2 e 4, o traço 3 possui uma resistividade maior, que possibilitou uma influência menor nos parâmetros de tensão de passo e toque, porém, superior que o sem envelopamento.

A Tabela 20 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 20 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 3, sem recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
4,02	1322	1678

Como pode verificar a resistência é menor e a corrente que permanece na malha é maior comparando esses itens com o capítulo 4.2.2.1. Com relação à corrente, foi possível verificar que a corrente que circulará pela malha para um curto de 3000A é menor que a corrente que retorna pelo cabo guarda.

4.2.2.5. Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, sem e com o recobrimento de brita

As simulações a seguir foram feitas com a malha referência, com envelopamento de concreto de traço 4 dos cabos da malha, sem e com recobrimento de brita.

O traço 4 possui resistividade de 431 Ω .m, valor menor que o da primeira camada estratificada de 3485 Ω .m e menor que a resistividade dos traços 1, 2 e 3.

A Tabela 21 apresenta os limites de segurança para o terreno de Campinas, utilizando o envelopamento do traço 4, sendo que esses dados são resultados do *software*.

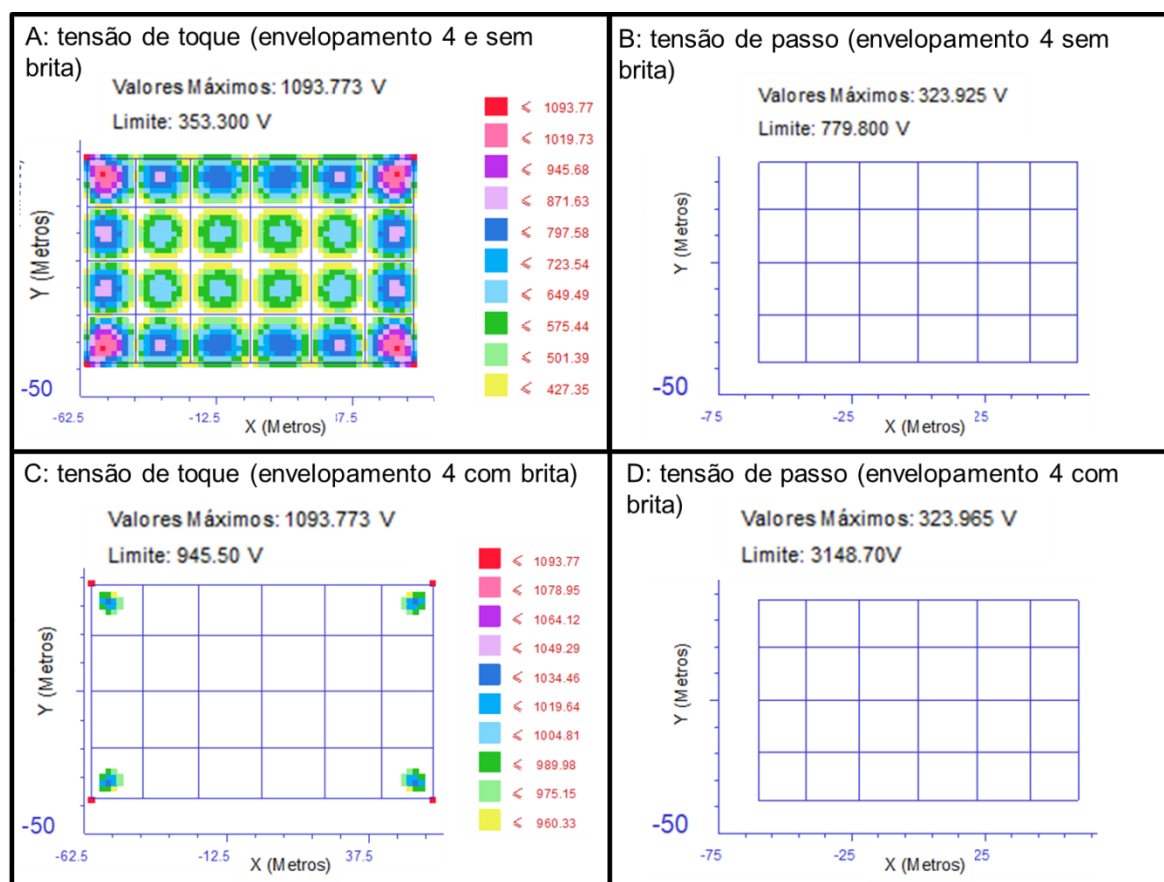
Tabela 21 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 4)

Recobrimento de brita	Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
Sem	353,3	779,8
Com	945,5	3.148,7

Pode-se verificar que, com a utilização do envelopamento 4, os valores limites de tensão de passo e toque são menores que os do item 4.2.2.1, 4.2.2.2, 4.2.2.3 e 4.2.2.4, pois o valor da resistividade da primeira camada influencia nesses resultados.

A Figura 33 apresenta a tensão de toque e passo fora do limite de segurança.

Figura 33 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha referência com envelopamento 4)



De acordo com os itens A e B (com envelopamento e sem brita), os valores de tensão de passo estão dentro do limite, porém para a tensão de toque os valores estão acima do permitido. O item C e D (com envelopamento e brita) tiveram melhores resultados que a simulação sem o recobrimento da brita, porém as extremidades da malha devem ser reforçadas para que o sistema de aterramento fique no limite permitido em toda sua extensão. Comparando os resultados utilizando os envelopamentos 1, 2 e 3, o traço 4 possui uma resistividade menor, que possibilitou uma influência maior nos parâmetros de tensão de passo e toque.

A Tabela 22 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 22 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 4)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
3,66	1387	1613

Como pode verificar a resistência é menor e a corrente que permanece na malha é maior comparando esses resultados com os itens: sem envelopamento, com envelopamento 1,2 e 3. Com relação à corrente, foi possível verificar que a mesma que circulará pela malha para um curto de 3000A é menor que a corrente que retorna pelo cabo guarda.

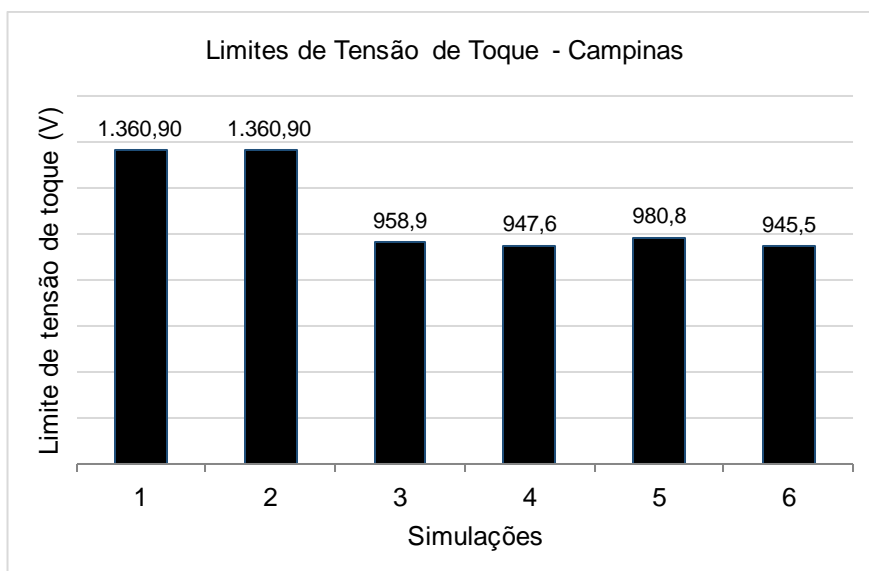
4.2.2.6. Análises comparativas - Campinas

Nas simulações a seguir, não foi utilizado o traço 5 pois a medição do corpo de prova seco foi comprometida por conta de falta de contato do concreto com o cabo além desse traço possuir uma resistência mecânica muito baixa.

As figuras deste item se referem às seguintes situações: malha referência sem brita (1), malha referência com brita (2), malha utilizando envelopamento do traço 1 com brita (3), malha utilizando envelopamento do traço 2 com brita (4), malha utilizando envelopamento do traço 3 com brita (5), malha utilizando envelopamento do traço 4 com brita (6).

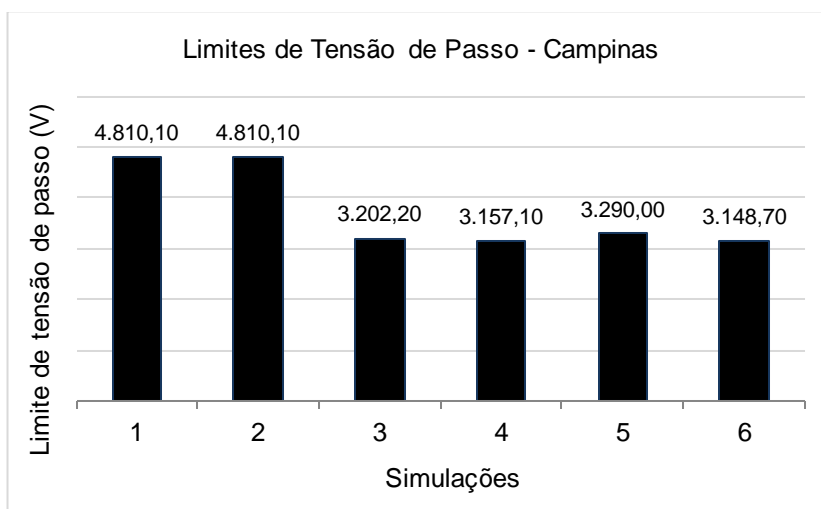
A Figura 34 compara os limites de tensão de toque.

Figura 34 – Comparação entre os limites de tensão de toque para Campinas



A Figura 35 compara os limites de tensão de passo.

Figura 35 – Comparação entre os limites de tensão de passo para Campinas

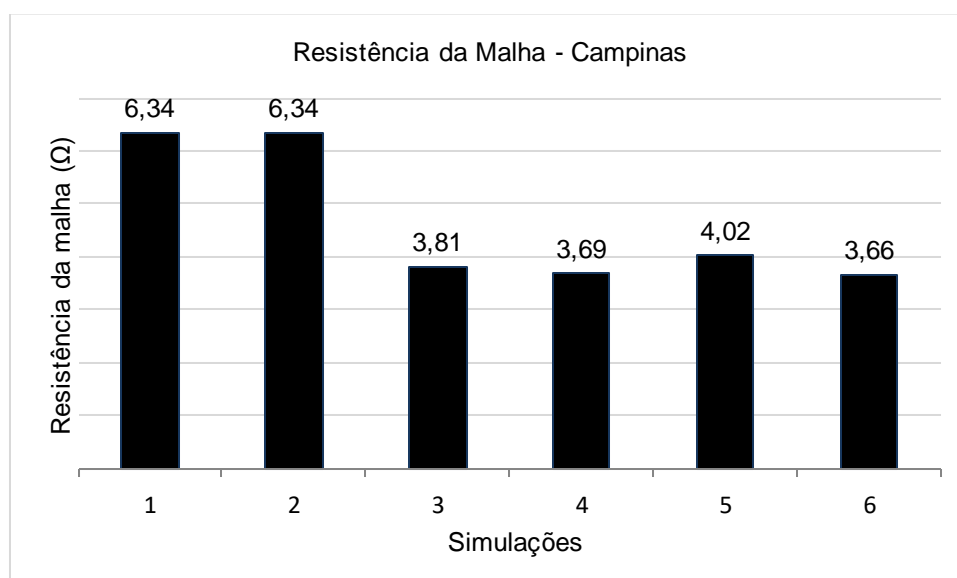


Pode-se notar, pelas Figuras 34 e 35 que os limites permissíveis variam de acordo com a resistividade da primeira camada. Nas simulações 1 e 2 os limites são maiores por conta da resistividade da primeira camada que é alta, consequentemente o valor máximo da elevação do potencial da malha é alto. Mesmo tendo um limite alto a elevação do potencial nesse caso é maior superando o limite permitido.

Com relação ao envelopamento nota-se que as simulações com o traço 4, com menor resistividade, possui um limite de tensão de passo e toque menor que os outros envelopamentos.

A Figura 36 compara a resistência da malha nas simulações.

Figura 36 – Comparação entre as resistências da malha para Campinas



Conforme Figura 36 pode-se verificar que quanto menor a resistividade do solo ou do envelopamento, menor a resistência da malha e melhor a injeção de corrente elétrica no solo.

As Figuras 37 e 38 comparam quanto de corrente que percorre a malha e quanto que segue para o cabo guarda da linha de transmissão.

Figura 37 – Comparação com relação a corrente na malha para Campinas

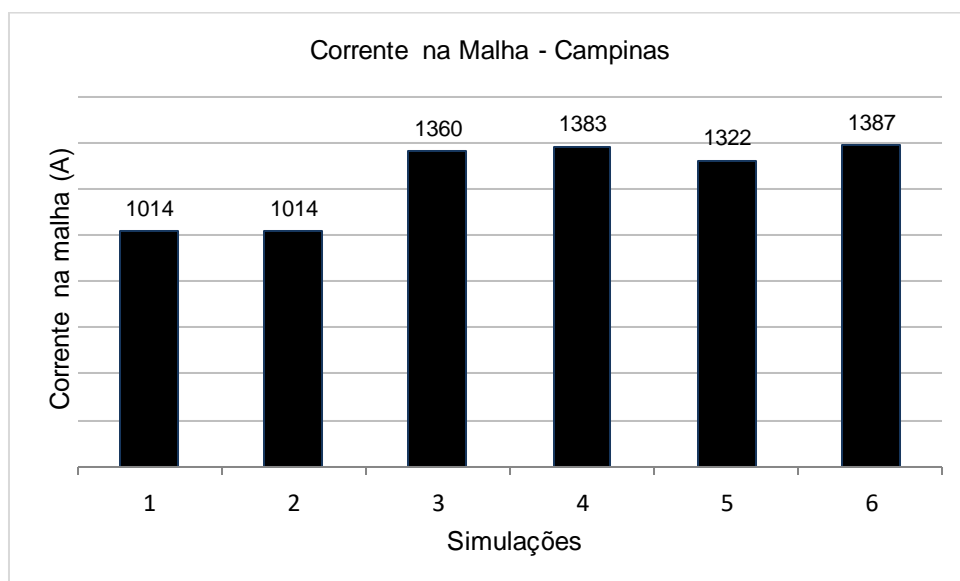
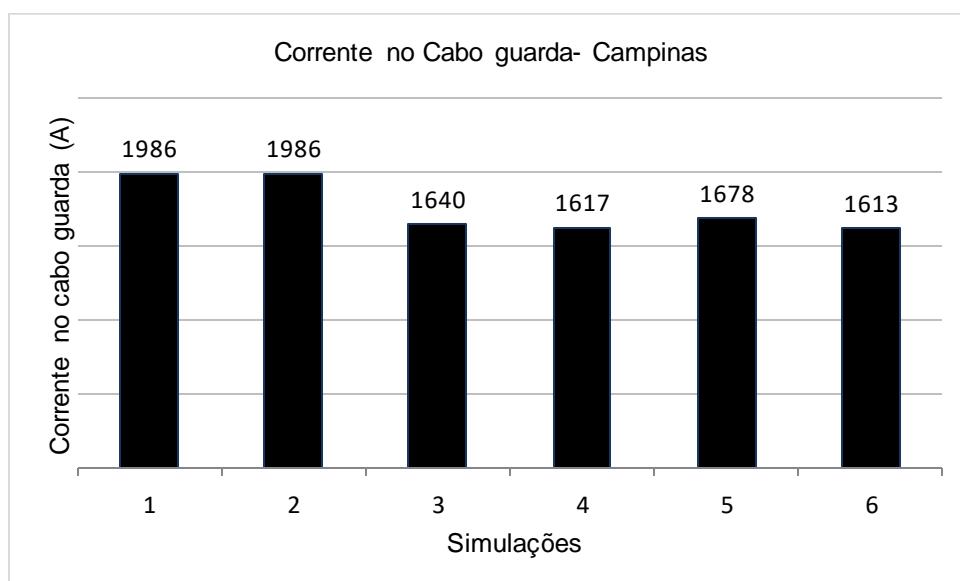


Figura 38 – Comparação com relação a corrente no cabo guarda para Campinas



Conforme as Figuras 37 e 38 verifica-se que quanto menor a resistividade do solo e a resistência da malha, maior a corrente que percorre a malha, diminuindo assim, o retorno da corrente pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Conclui-se que o traço 4 é o melhor no ponto de vista elétrico e pode ser utilizado, para essa aplicação na subestação, quando leva-se em conta os ensaios de compressão axial. Portanto que este será empregado nas simulações da malha final.

4.2.2.7. Simulações Finais para o Terreno de Campinas

Neste item, foram feitas simulações com a versão final da malha de aterramento. A versão final corresponde a uma malha que atenda os limites permissíveis de tensão de passo e toque.

O recobrimento de brita será empregado, em virtude dos resultados apresentados nos itens anteriores indicarem que esse recobrimento melhora o sistema de aterramento. Assim, serão comparados os seguintes casos:

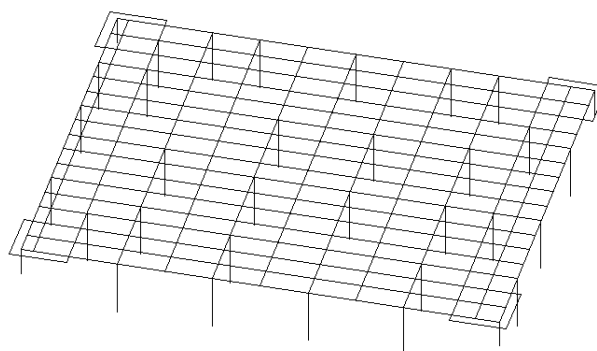
- Malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros;
- Malha ampliada, com recobrimento de brita, com hastes de 3 metros e com a utilização do envelopamento de traço 4;
- Malha ampliada, com recobrimento de brita, com hastes de 6 metros e com a utilização do envelopamento de traço 4;

Com base nas simulações anteriores (Item 4.2) e nos resultados dos testes do Item 4.1, será utilizado o traço 4 para as simulações finais.

4.2.2.7.1. Simulação com a malha final ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros

As simulações a seguir foram feitas com a malha final ampliada, acrescentando hastes de 6 metros e cabos, além do recobrimento de 10 cm de brita na área da malha. Não será utilizado nessa simulação o envelopamento para poder demonstrar como ficaria esta malha que possui alta resistividade, sem o auxílio do concreto. A Figura 39 ilustra a geometria da malha que atendeu os limites permissíveis de tensão de passo e toque.

Figura 39 – Malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros (Campinas)



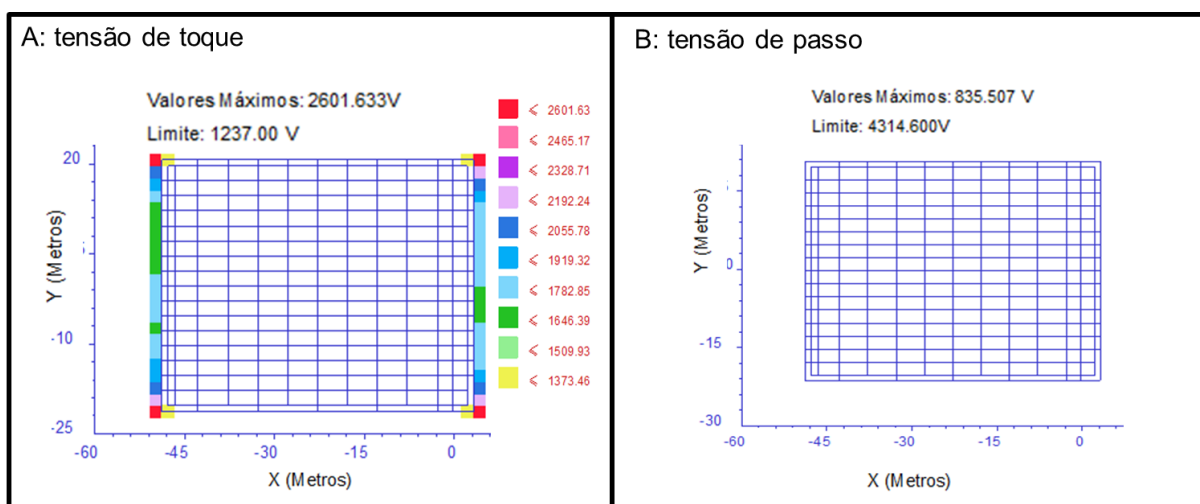
A Tabela 23 apresenta os limites de segurança para o terreno de Campinas, utilizando recobrimento de brita.

Tabela 23 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
1.237,0	4.314,6

A Figura 40 apresenta a tensão de toque e passo fora do limite de segurança.

Figura 40 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)



Da análise da Figura 40 pode-se observar que os limites de tensão de passo e toque foram atendidos para os itens A e B e que foi necessário o reforço da

malha com a inclusão de cabos, utilização de recobrimento de brita para aumentar o nível de isolamento com o solo, além da inclusão de hastes de 6 metros.

Outra questão são as extremidades que estão acima do limite permissível, porém foi incluído um cabo nessa extremidade a uma distância de 1 metro para que a área da malha esteja protegida.

A Tabela 24 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 24 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)

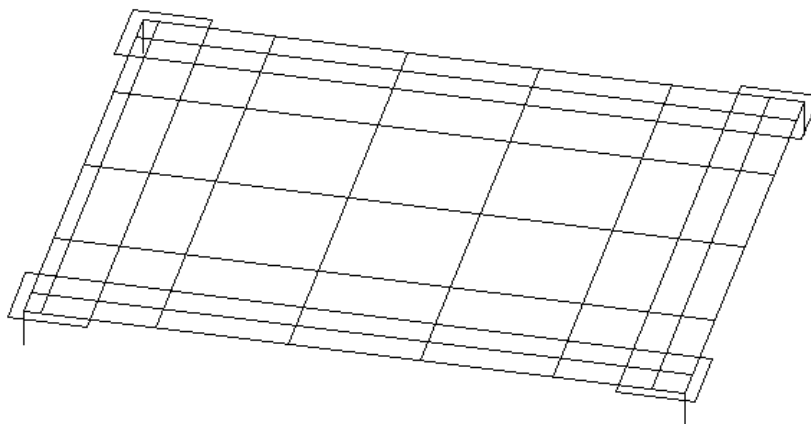
Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
7,11	940	2060

Verifica-se que devido as características de resistividade do solo, o valor da corrente que circula na malha será menor. Com relação à corrente, foi possível identificar que a corrente que circulará pela malha para um curto de 3000A é baixa, sendo que maior parte dessa falha retornará pelo cabo guarda.

4.2.2.7.2. Simulações com a malha final ampliada, com recobrimento de brita, com hastes de 3 metros e com a utilização do envelopamento de traço 4

As simulações a seguir foram feitas com a malha final ampliada, com hastes de 3 metros e cabos, utilizando o envelopamento do traço 4 e o recobrimento de 10 cm de brita na área da malha. A Figura 41 ilustra a geometria da malha que atendeu os limites permissíveis de tensão de passo e toque.

Figura 41 – Malha ampliada, com recobrimento de brita, com envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros (Campinas)



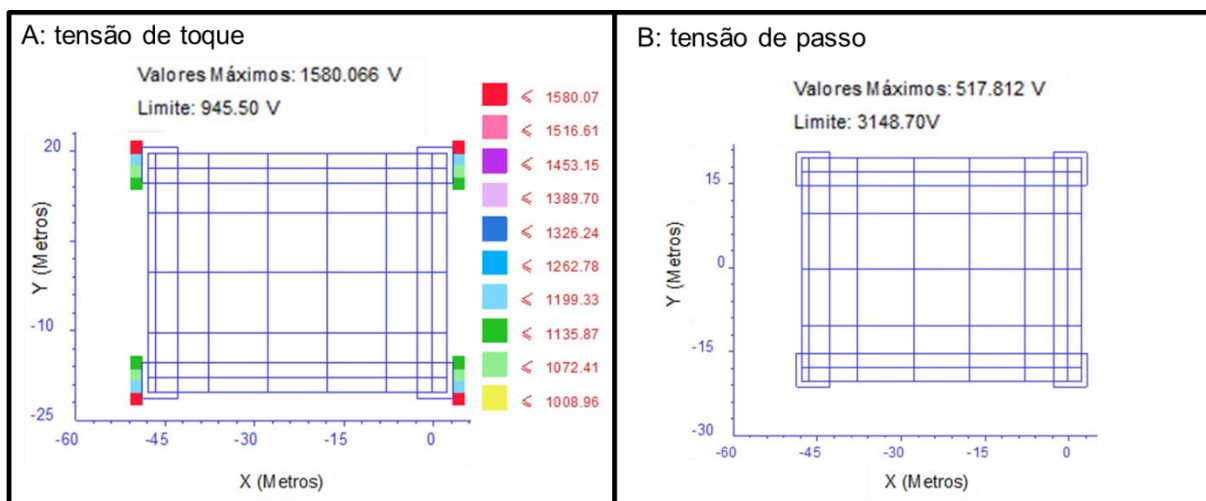
A Tabela 25 apresenta os limites de segurança para o terreno de Campinas, utilizando o envelopamento do traço 4, com recobrimento de brita para a versão final da malha.

Tabela 25 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
945,5	3.148,7

A Figura 42 apresenta a tensão de toque e passo fora do limite de segurança.

Figura 42 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros)



Sendo assim, é possível identificar que a utilização do envelopamento 4 e a brita melhoraram o sistema de aterramento. Comparando com a simulação da malha final ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros, a quantidade de cabos utilizados é menor. As extremidades estão acima do limite permissível, porém foi incluído um cabo nessa extremidade a uma distância de 1 metro para que a área da malha esteja protegida.

A Tabela 26 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 26 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 3 metros)

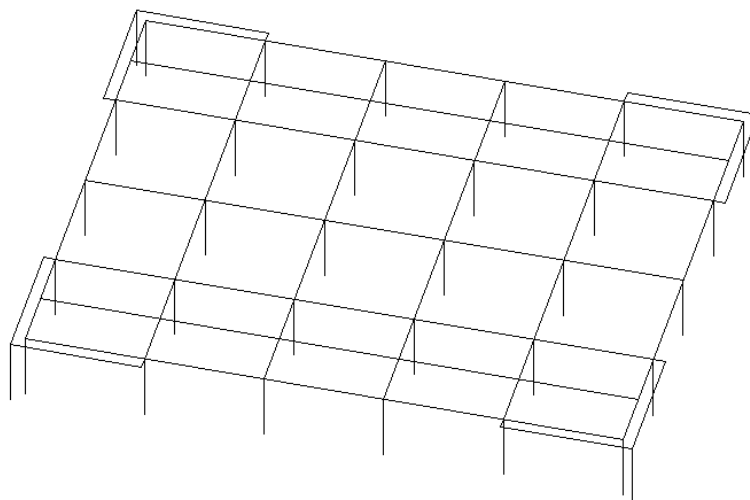
Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
6,98	952	2048

Como pode-se verificar, devido às características de resistividade do solo, o valor da corrente que circula na malha é menor. Com relação à corrente, foi possível verificar que a corrente que circulará pela malha para um curto de 3000A é baixa, sendo que maior parte dessa falha retornará pelo cabo guarda.

4.2.2.7.3. Simulações com a malha final ampliada, com recobrimento de brita, com hastes de 6 metros e com a utilização do envelopamento de traço 4

As simulações a seguir foram feitas com a malha final ampliada, com hastes de 6 metros e cabos, utilizando o envelopamento do traço 4 e o recobrimento de 10 cm de brita na área da malha. A Figura 43 ilustra a geometria da malha que atendeu os limites permissíveis de tensão de passo e toque.

Figura 43 – Malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros (Campinas)



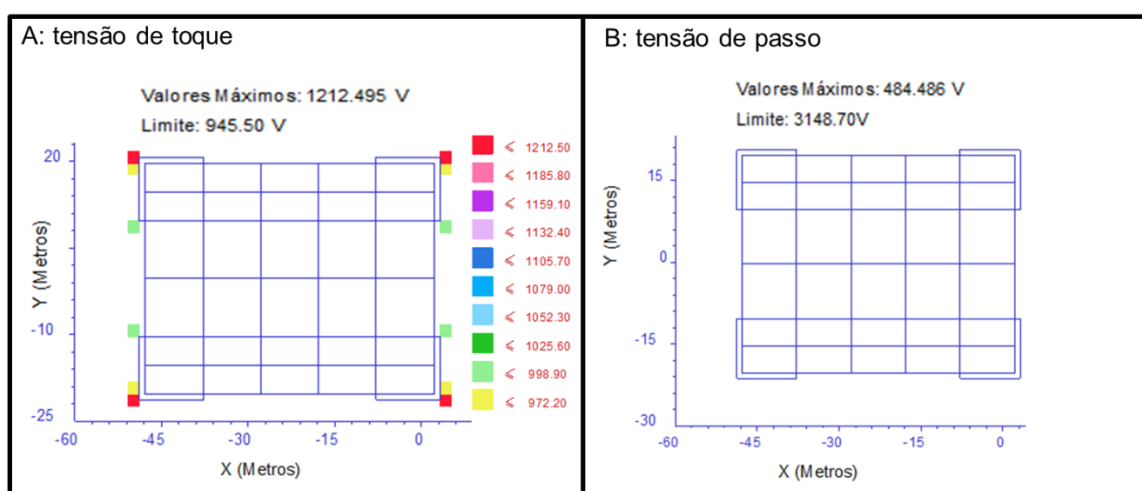
A Tabela 27 apresenta os limites de segurança para o terreno de Campinas utilizando o envelopamento do traço 4 com recobrimento de brita para a versão final da malha.

Tabela 27 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
945,5	3.148,7

A Figura 44 apresenta a tensão de toque e passo fora do limite de segurança.

Figura 44 – Tensão de toque e passo do terreno de Campinas fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros)



Da análise da Figura 44, é possível identificar que a utilização do envelopamento 4 e a brita melhoraram o sistema de aterramento em conjunto com hastes mais profundas por conta da segunda camada possuir menor resistividade. Comparando com as duas simulações anteriores, a quantidade de cabos para esta simulação é menor.

A Tabela 28 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 28 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha ampliada, com recobrimento de brita, envelopamento do traço 4 e com hastes de 6 metros)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
6,67	980	2020

Como pode-se verificar, a resistência da malha diminuiu em relação às duas análises anteriores.

4.2.2.7.4. Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de Campinas

Neste item, será comparada a relação de materiais para os 3 casos finais simulados anteriormente (itens 4.2.2.7.1 a 4.2.2.7.3).

A Tabela 29 indica o resultado das ampliações das malhas para atender os limites de tensão de passo e toque.

Tabela 29 – Relação de material para ampliações da malha no terreno de Campinas

Item	Cabo de cobre nú 50 mm²(m)	Hastes de 3 metros (unidade)	Hastes de 6 metros (unidade)	Concreto (m³)
4.2.2.7.1	1.558,00	4	30	-
4.2.2.7.2	946	4	-	151,36
4.2.2.7.3	590	-	35	94,4

Para o volume de concreto, foi considerado os cabos envelopados em uma área de 40x40 cm.

É possível analisar que o terreno de Campinas possui resistividade alta e, com isso, o reforço no sistema de aterramento é algo imprescindível para sua eficiência. Pela tabela 29, pode-se verificar que utilizando apenas o envelopamento

e hastes mais profundas (item 4.2.2.7.3), já que a segunda camada possui menor resistividade, a quantidade de cabos, em relação ao item 4.2.2.7.1 (ampliação com cabo e haste de 6 metros), seria 62,1% menor, economizando, assim, em cabos e materiais de conexões.

Comparando o item 4.2.2.7.3 (ampliação com cabo e haste de 6 metros) com 4.2.2.7.2 (ampliação com cabo e haste de 3 metros), ambos com envelopamento com o traço 4, pode-se verificar que a economia em relação ao cabo seria de 37,6%, porém a quantidade e profundidade das hastes aumentaria de 4 hastes de 3 metros para 35 hastes de 6 metros.

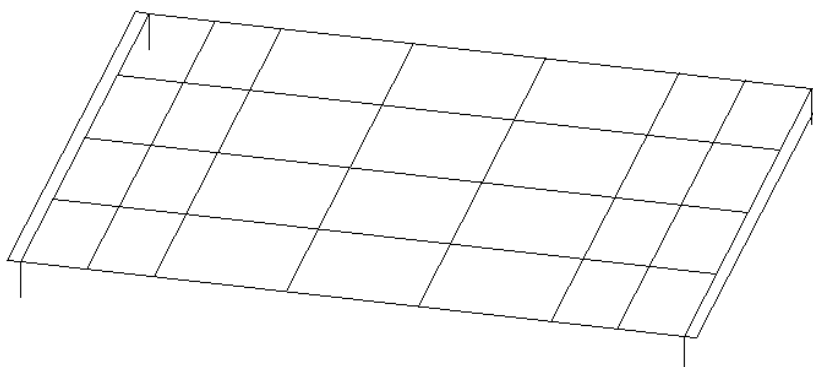
4.2.3. Simulações para o terreno situado em Guariba

Para as simulações do terreno localizado em Guariba, serão apresentados, neste capítulo, apenas os resultados finais das análises. Os resultados das simulações com a malha referência com recobrimento de brita, sem e com o envelopamento serão apresentados no anexo A.

4.2.3.1. Simulações Finais para o Terreno de Guariba

Neste item, serão feitas simulações com a versão final da malha de aterramento. A Figura 45 ilustra a geometria da malha que atendeu os limites permissíveis de tensão de passo e toque.

Figura 45 – Malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros (Guariba)



Nesse caso foi simulado o seguinte caso:

- Malha ampliada, com recobrimento de brita e hastes de 3 metros;

Não foram feitas simulações utilizando o envelopamento 4 pois a resistividade da primeira camada ($325\Omega.m$) é baixa e menor que a do concreto com traço 4 ($431\Omega.m$). Não foram feitas simulações com hastes mais profundas, pois a resistividade da segunda camada ($943\Omega.m$) é maior que a primeira.

4.2.3.1.1. Simulação com a malha final ampliada, com o recobrimento de brita e haste de 3 metros

As simulações a seguir foram feitas com a malha final ampliada, acrescentando cabos, hastes de 3 metros e o recobrimento de 10 cm de brita na área da malha.

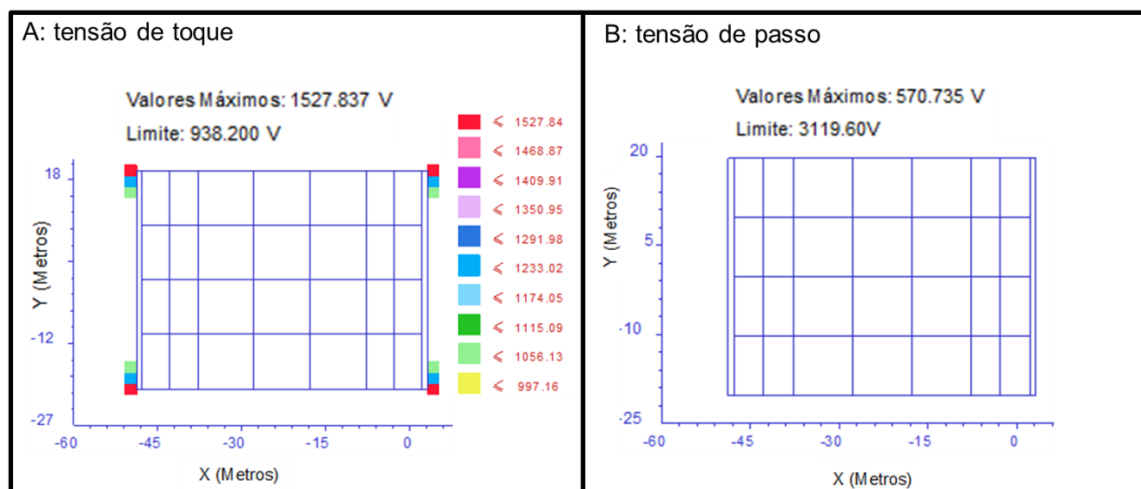
A Tabela 30 apresenta os limites de segurança obtidos para o terreno de Guariba, utilizando o recobrimento de brita.

Tabela 30 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
938,2	3.119,6

Na Figura 46, é apresentada a tensão de toque e passo fora do limite de segurança.

Figura 46 – Tensão de toque e passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)



Sendo assim, é possível identificar que a utilização da brita como fator de correção e a ampliação são suficientes.

A Tabela 31 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 31 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
8,44	836	2164

Como pode-se verificar, devido às características de resistividade do solo, o valor da corrente que circula na malha é menor. Com relação à corrente, foi possível verificar que a corrente que circulará pela malha para um curto de 3000A é baixa, sendo que maior parte dessa falha retornará pelo cabo guarda.

4.2.3.1.2. Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de Guariba

Neste item, será apresentada a relação de materiais para a malha ampliada.

A Tabela 32 apresenta esses materiais utilizados na ampliação da malha para atender os limites de tensão de passo e toque.

Tabela 32 – Relação de material para ampliação da malha no terreno de Guariba

Item	Cabo de cobre nú 50 mm²(m)	Hastes de 3 metros (unidade)
4.2.3.1.1	650	4

Como pode-se verificar pela Tabela 32, a malha teve um acréscimo de cabo em relação à malha referência (490 metros e 4 hastes de 3 metros) de 160 metros para que os limites fossem atendidos.

4.2.4. Simulações para o terreno situado em Humaitá

Para as simulações do terreno localizado em Humaitá, foram apresentados, neste capítulo, apenas os resultados finais das análises. Os resultados das simulações com a malha referência com recobrimento de brita, sem e com o envelopamento estão apresentados no anexo B.

4.2.4.1. Simulações Finais para o Terreno de Humaitá

Neste item, foram feitas simulações com a versão final da malha de aterramento. Nesse caso foram comparados os seguintes casos:

- Malha ampliada, com recobrimento de brita e hastes de 3 metros;
- Malha referência, com recobrimento de brita, com hastes de 6 metros;

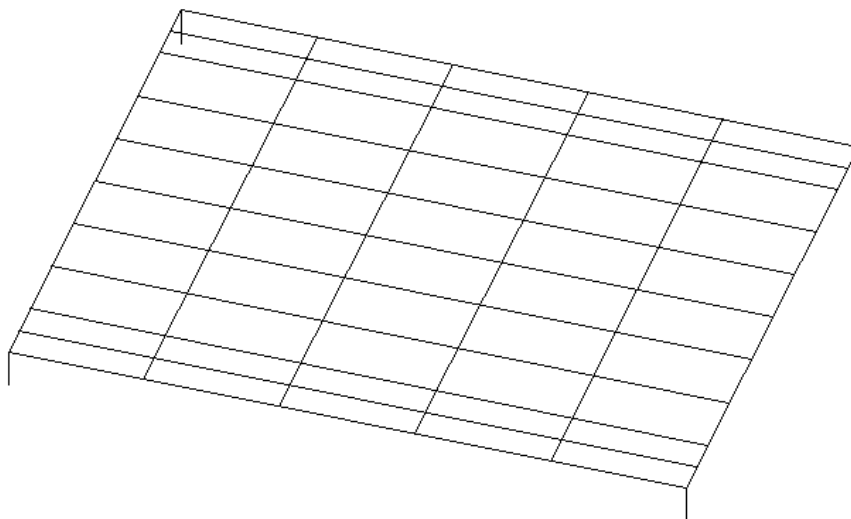
Não foi simulada a utilização do envelopamento, pois verificou-se nas simulações anteriores, que a utilização deste piora o sistema de aterramento, uma vez que a resistividade da primeira camada é menor em relação aos tipos de concreto.

Com relação ao tamanho da haste, foi feita a análise utilizando comprimento de 3 metros e 6 metros, verificando assim a sua eficiência, pois a primeira camada possui uma profundidade de 3,8 metros com resistividade de 268 $\Omega.m$ e a segunda camada de 31 $\Omega.m$.

4.2.4.1.1. Simulação com a malha final ampliada, com o recobrimento de brita e haste de 3 metros

As simulações a seguir foram feitas com a malha final ampliada, acrescentando cabos, hastes de 3 metros e o recobrimento de 10 cm de brita na área da malha. A Figura 47 ilustra a geometria da malha que atendeu os limites permissíveis de tensão de passo e toque.

Figura 47 – Malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros (Humaitá)



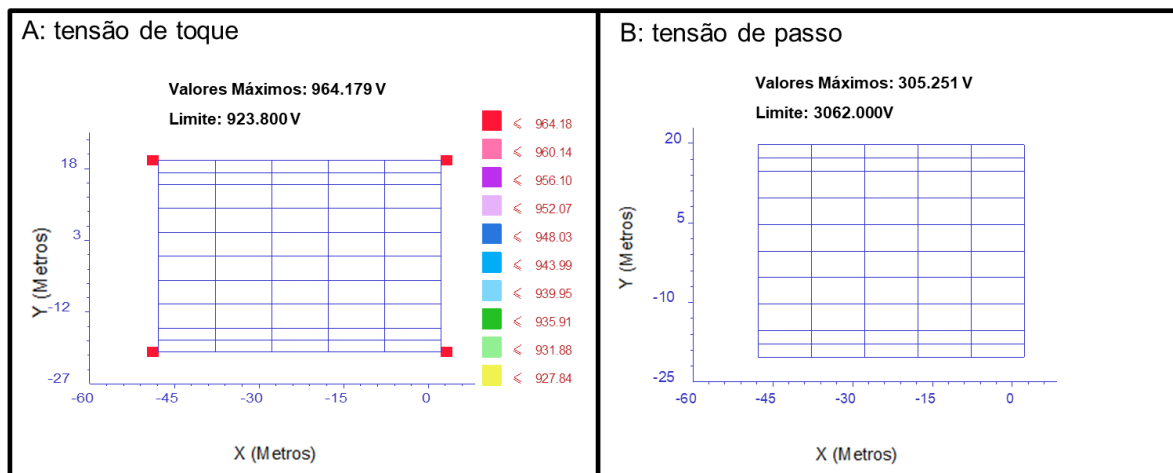
A Tabela 33 apresenta os limites de segurança obtidos para o terreno de Humaitá utilizando o recobrimento de brita.

Tabela 33 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
923,8	3.062,0

Na Figura 48, é apresentada a tensão de toque e passo fora do limite de segurança.

Figura 48 – Tensão de toque e passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)



Sendo assim, é possível identificar que a utilização da brita como fator de correção e a ampliação são suficientes. Os pontos em vermelho estão fora do limite, com isso a inclusão de cabos a 1 metro da malha será necessário para a malha ficar 100% protegida.

A Tabela 34 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 34 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha ampliada, com recobrimento de brita e com hastes de 3 metros)

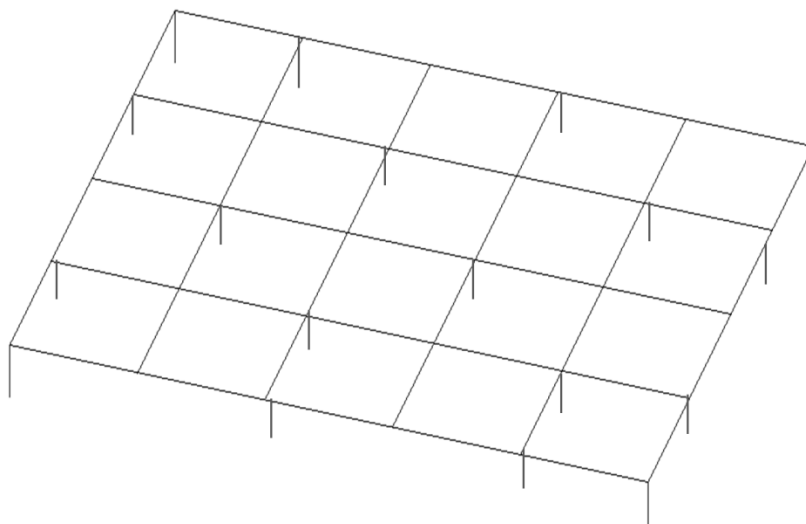
Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
0,89	2250	750

Como pode-se verificar pela Tabela 34, a resistência da malha é baixa, com isso a corrente que percorrerá pela malha, caso ocorra um curto ou uma falta, será maior que a corrente que retorna pelo cabo guarda.

4.2.4.1.2. Simulação com a malha referência, com o recobrimento de brita e haste de 6 metros

As simulações a seguir foram feitas com a malha referência (versão inicial) acrescentando apenas hastes de 6 metros e o recobrimento de 10 cm de brita na área da malha conforme Figura 49.

Figura 49 – Malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros (Humaitá)



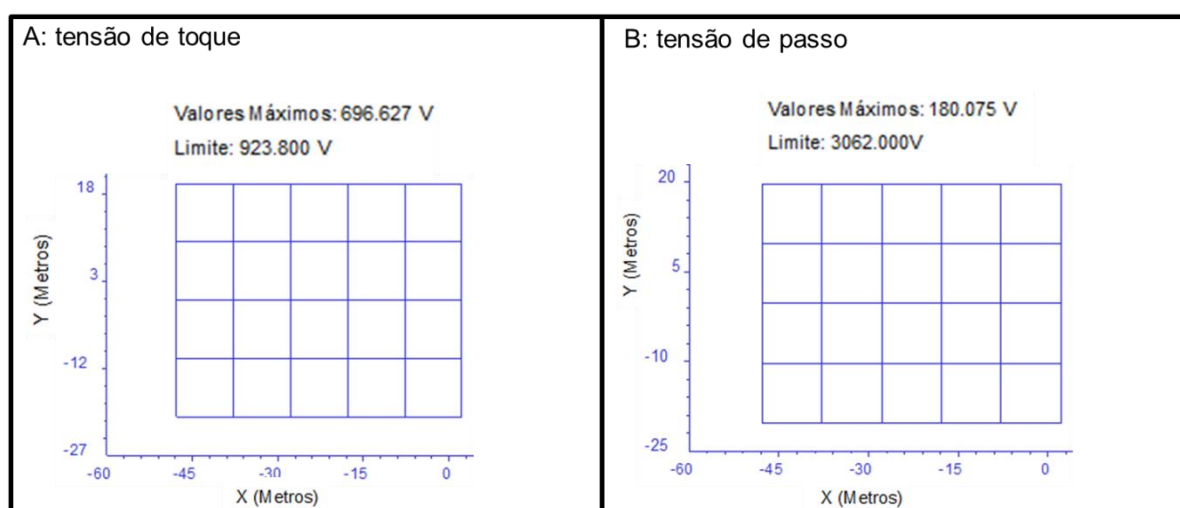
A Tabela 35 apresenta os limites de segurança obtidos para o terreno de Humaitá utilizando o recobrimento de brita.

Tabela 35 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
923,8	3.062,0

Na Figura 50, é apresentada a tensão de toque fora do limite de segurança.

Figura 50 – Tensão de toque e passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros).



Mediante a Figura 50, é possível identificar que a utilização da brita como fator de correção e a utilização das hastes de 6 metros foram suficientes para a malha atender os limites de tensão de passo e toque, não sendo necessário o reforço com cabos.

A Tabela 36 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 36 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
0,60	2400	600

Como pode-se verificar pela Tabela 34 e na simulação anterior, a resistência da malha é baixa, com isso a corrente que percorrerá pela malha, caso ocorra um curto ou uma falta, será maior que a corrente que retorna pelo cabo guarda.

4.2.4.1.3. Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de Humaitá

Neste item, é comparada a relação de materiais para os 2 casos finais.

A Tabela 37 apresenta o resultado das ampliações da malha para atender os limites de tensão de passo e toque.

Tabela 37 – Relação de material para ampliações da malha no terreno de Humaitá

Item	Cabo de cobre nú 50 mm²(m)	Hastes de 3 metros (unidade)	Hastes de 6 metros (unidade)
4.2.4.1.1	790	4	-
4.2.4.1.2	490	-	18

Pela tabela 37, pode-se verificar que utilizando apenas as hastes mais profundas, já que a segunda camada possui menor resistividade, a quantidade de cabo em relação ao item 4.2.4.1.1 (ampliação com cabo e haste de 3 metros) seria 37,9% menor, economizando assim em cabos, porém seria necessário o aumento de hastes.

Neste caso, seria necessário verificar a sondagem do terreno para identificar até que profundidade é impenetrável no solo por conta das hastes. Com isso, pode-se escolher um dos dois casos.

4.2.5. Simulações para o terreno situado em São José do Rio Preto

Para as simulações do terreno localizado em São José do Rio Preto, foram apresentados, neste capítulo, apenas os resultados finais das análises. Os resultados das simulações com a malha referência com recobrimento de brita, sem e com o envelopamento estão apresentados no anexo C.

4.2.5.1. Simulações Finais para o Terreno de São José do Rio Preto

Neste item, foram feitas simulações com a versão final da malha de aterramento. Nesse caso, as simulações foram feitas da seguinte forma:

- Malha referência, com recobrimento de brita, com hastes de 6 metros;

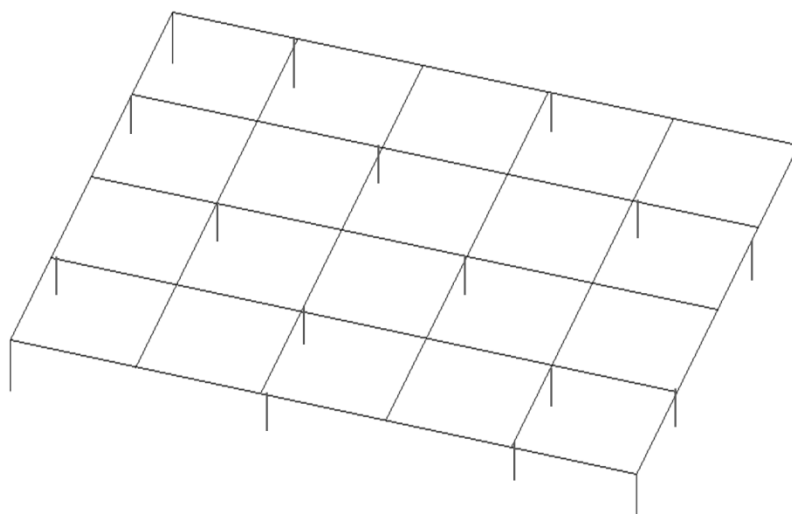
Não foi simulada a utilização do envelopamento, pois conforme verificado nas simulações anteriores, a utilização deste não tem efeito diferenciado no sistema de aterramento, pois a resistividade da primeira camada é semelhante aos tipos de concreto.

Com relação ao tamanho da haste, foi feita a análise com hastes de 6 metros, pois pela estratificação a primeira camada possui uma profundidade de 4,2 metros com resistividade de $604 \Omega \cdot m$ e a segunda camada de $28 \Omega \cdot m$.

4.2.5.1.1. Simulação com a malha referência, com o recobrimento de brita e haste de 6 metros

As simulações a seguir foram feitas com a malha referência (versão inicial) acrescentando apenas hastes de 6 metros e o recobrimento de 10 cm de brita na área da malha conforme Figura 51.

Figura 51 – Malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros (São José do Rio Preto)



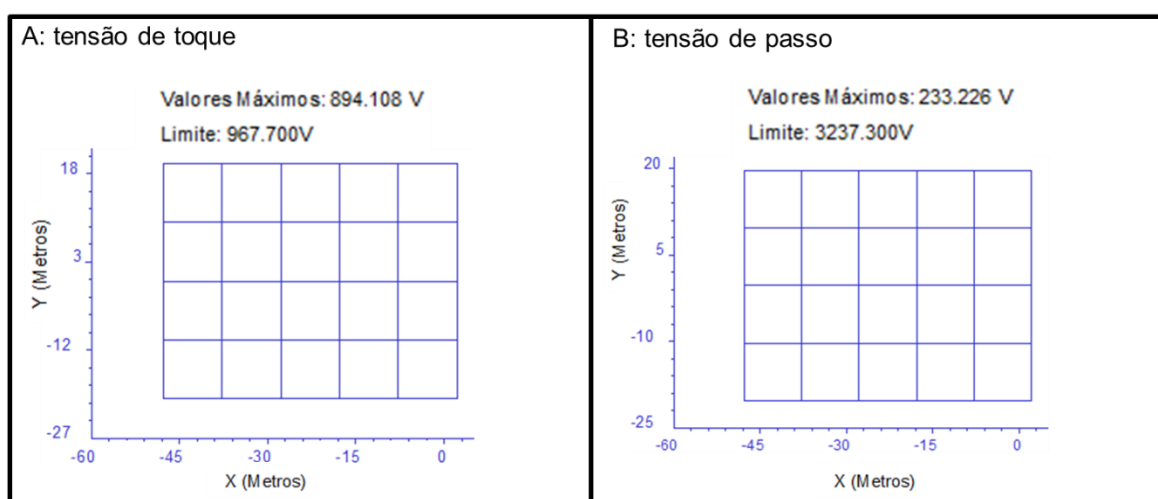
A Tabela 38 apresenta os limites de segurança obtidos para o terreno de São José do Rio Preto utilizando o recobrimento de brita.

Tabela 38 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
967,7	3.237,3

Na Figura 52, é apresentada a tensão de toque e passo fora do limite de segurança.

Figura 52 – Tensão de toque e passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros).



Mediante a Figura 51, é possível identificar que a utilização da brita como fator de correção e a utilização das hastes de 6 metros foram suficientes para a malha atender os limites de tensão de passo e toque, não sendo necessário o reforço com cabos.

A Tabela 39 mostra os resultados de resistência da malha, corrente que circula na malha e a corrente que retorna pelo cabo guarda da linha de transmissão.

Tabela 39 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência, com recobrimento de brita e com hastes de 6 metros)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
0,71	2341	659

Como pode verificar pela Tabela 39, a corrente que percorrerá pela malha, caso ocorra um curto ou uma falta, será maior que a corrente que retorna pelo cabo guarda.

4.2.5.1.2. Relação de materiais para a ampliação da malha do terreno de São José do Rio Preto

Neste item, será apresentada a relação de materiais para a simulação acima. A Tabela 40 apresenta o resultado da inclusão de hastes maiores na malha para atender os limites de tensão de passo e toque.

Tabela 40 – Relação de material para ampliações da malha no terreno de São José do Rio Preto

Item	Cabo de cobre nú 50 mm²(m)	Hastes de 6 metros (unidade)
4.2.5.1.1	490	18

Sendo assim, é possível verificar que a estratificação do solo tem grande importância ao tomar decisões no sistema de aterramento. Este caso indicava que a camada com menor resistividade estava a uma profundidade de 4,2 metros, com isso foi possível instalar apenas hastes mais profundas sem ter que reforçar a malha de aterramento.

5. CONCLUSÃO

O sistema de aterramento possui grande importância nas subestações. Assim, os parâmetros de segurança e limites de tensão de passo e toque devem atender às normas vigentes, pois sua violação proporciona riscos bastante sérios, até mesmo com a possibilidade de óbito, ao indivíduo que transita na área energizada.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, foi possível concluir que:

- A estratificação do solo em camadas tem grande importância no projeto do sistema de aterramento elétrico;
- Foi possível verificar que cada terreno tem características próprias, influenciando de forma significativa a eficiência do sistema de aterramento;
- Com relação aos tipos de envelopamento, foi possível verificar que concretos com maior quantidade de água em sua composição possuem resistividade elétrica mais baixa por serem mais porosos e conseqüentemente absorvem mais água o que facilita a passagem de corrente elétrica;
- O traço 4, que tem agregado reciclado em sua composição, possui resistividade elétrica menor que os outros 3 traços na medição com o CP seco;
- A utilização do envelopamento com concreto é importante para solos com alta resistividade como no caso do terreno de Campinas;
- Se a resistividade do solo for menor que a resistividade do traço do concreto a ser utilizado para o envelopamento, não se deve utilizar a técnica de envelopamento, uma vez que não haverá melhoria na eficiência da malha, conforme resultados mostrados nas simulações;
- A utilização de hastes levando em conta a estratificação é importante, pois sua instalação nas camadas com menor resistividade pode trazer economia em relação à quantidade de material utilizado;
- A utilização da brita na área da subestação é uma forma de diminuir os altos potenciais. Verificou-se que sua utilização pode gerar benefícios no dimensionamento e na quantidade de material da malha de aterramento.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se destacar:

- Verificação de outros tipos de traço de concreto com resistividade menor;
- Simulações utilizando apenas o carvão mineral e o carvão vegetal como envelopamento e verificar sua eficiência no sistema de aterramento para solos com alta resistividade;
- Melhorar o traço do concreto que utilizou carvão mineral, pois nos ensaios de resistividade elétrica, absorção por imersão e capilaridade este possuía boas características para o envelopamento, porém tinha baixa resistência mecânica.

Bibliografia

ABNT NBR 5419-2015 - Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas

ABNT NBR 5738-2015 – Concreto - Procedimento para Moldagem e cura de Corpos de Prova

ABNT NBR 5739-2007 – Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos

ABNT NBR 7117-2012 – Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, 2012

ABNT NBR 9778-2005 – Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

ABNT NBR 9779-2012 – Argamassa e Concreto Endurecidos — Determinação da Absorção de Água por Capilaridade

ABNT NBR 15751-2013 - Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos

ABREU, Aguida Gomes, Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais, 1998, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado

AURÉLIO, José; LEON, Moreno, Sistemas de aterramento, Editora Erico do Brasil, 4ª EDIÇÃO, 1982.

BELTANI, Juliano Munhoz, Medição de malha de terra em subestações energizadas, 2007, UNESP, Dissertação de Mestrado

BEZERRA, Sergio Ricardo Campos, Avaliação de Sistema de Aterramento considerando a utilização de condutores e hastes envolvidas em concreto, 2011, Universidade Estadual Paulista, Dissertação de Mestrado.

BUSS, Gabriel Augusto, Aterramento Elétrico: Aplicação em estabelecimentos assistenciais de saúde, 2016, Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado.

CLAUSEN, W. et. al. Nova técnica de aterramento para sistemas de distribuição. In.: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 16.; 2004, Brasília. Anais. Brasília: Companhia Energética de Brasília (CEB), 2004

FRIEDMAN, Shmulik P., Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review, 2005. Computers and Electronics in Agriculture, v.46, p. 45-70, Sept. 2005.

GAMITO, Marcus Aparecido Ruiz, A influência do sistema de aterramento na presença de distorção harmônica, 2016, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado.

GIMENEZ, Leandro Maria, Relação da condutividade elétrica aparente com algumas propriedades físico-hídricas e com a variabilidade espacial do solo, 2013, Universidade de São Paulo, Tese de doutorado.

HOPPE, Tiago Fernandes, Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz, 2005, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado

IEEE Std 80. IEEE guide for safety in ac substation grounding. IEEE Std 80, 2000

IEEE Std 142-1991, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems – Green Book, 1991

KINDERMANN, Geraldo. Choque Elétrico. Edição do autor, 3ª edição, 2005;

KINDERMANN, Geraldo. Curto-Circuito. Edição do autor, 5ª edição, 2010;

KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – Volume 1, Edição do autor, 3ª edição, 2011a;

KINDERMANN, Geraldo. Aterramento Elétrico – Edição do autor, 6ª edição, 2011b;

LOPES, Dalva dos Santos; Rodrigues da Silva Júnior, Amâncio. Aterramento considerando o tipo de solo e suas características, XI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 1992.

LÜBECK, André, Resistividade elétrica e concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno, 2008, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado.

MOSTARDEIRO NETO, Carlos Zinn, Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz e diferentes teores de carbono grafitico, 2011, Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado.

NR-10 – Instalações e Serviços em Eletricidade. Dezembro, 2004

PEREIRA, Will Roger, Estratificação De Solos Em Camadas Horizontais Utilizando Evolução Diferencial, 2016, Universidade Federal de Uberlândia, Tese de Doutorado

PUHL, T. C. O.; PIMENTEL, L. L.; BARBOSA, M. P.; FONTANINI, P. S..P.; RIZZO, G. F. Verificação do comportamento do concreto no estado endurecido produzido com agregado reciclado In Anais do 58º Congresso do Concreto, Belo Horizonte-MG, 2016

RAGGI, Livia Maria de Rezende; Projeto de malhas de aterramento contribuição ao cômputo da estratificação do solo, 2009, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado

REAL, Livia Vitória, Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial, 2015, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado

ROSA, Dalton Wegner, Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico, 2005, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado

SUETA, Hélio Eiji, Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descargas atmosféricas – Uma visão relativa aos danos físicos, 2005, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado.

Web Based Tutorial AutoGrid Pro. Disponível em:

< <http://www.sestech.com/Support/WebBasedTutorial> >. Acesso em: 03 abr. 2017.

WENNER, Frank, A Method of Measuring Earth Resistivity. Bulletin of the Bureau of Standards, 12, 469-478, 1916.

VICENTE, Osni. Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural, 2010, Universidade Estadual de Londrina, Dissertação de Mestrado.

VISACRO FILHO, Silvério, Aterramentos elétricos, conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento, Artliber Editora Ltda, 2002

Anexo A

A.1 Simulações com a malha referência com recobrimento de brita

Tabela 41 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
938,2	3.119,6

Figura 53 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)

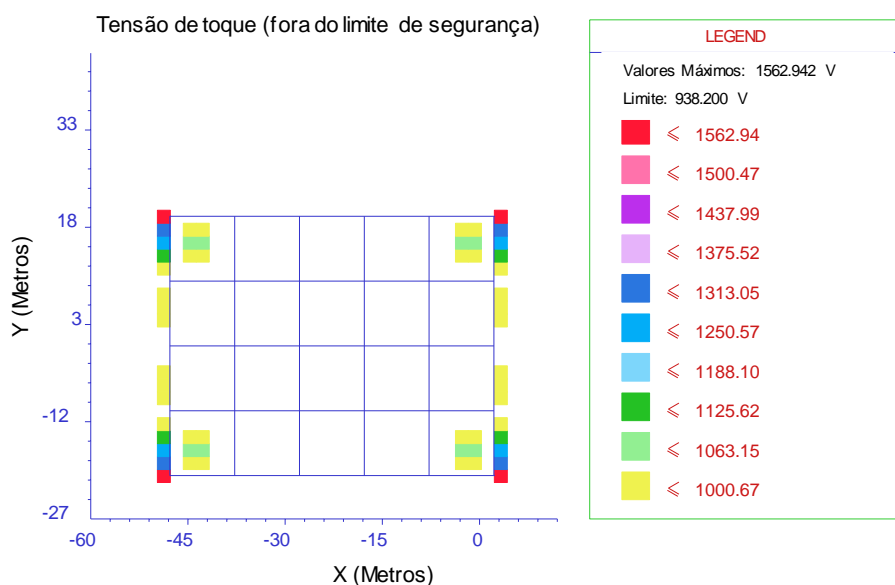


Figura 54 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)



Tabela 42 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
8,75	815	2185

A.2 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1, com o recobrimento de brita

Tabela 43 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
958,9	3.202,2

Figura 55 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

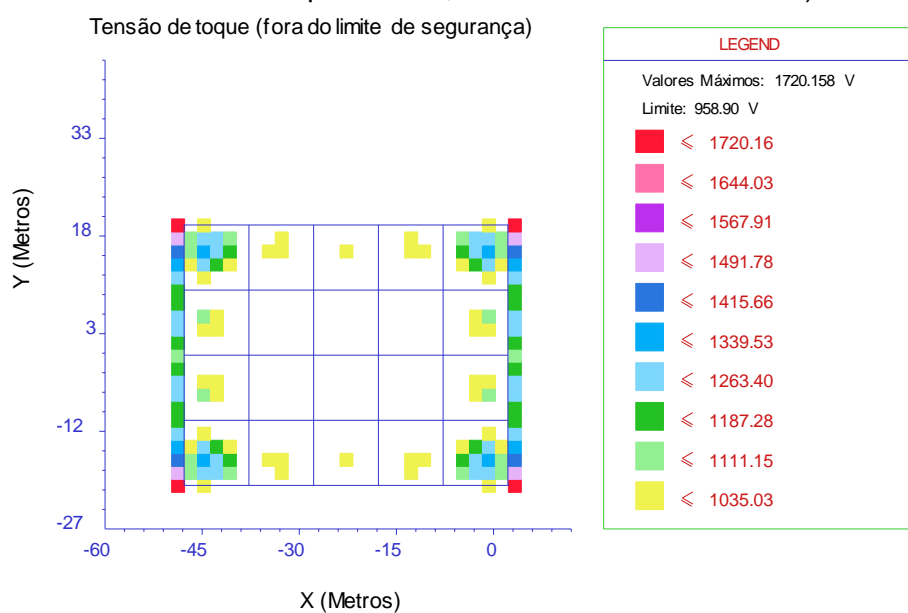


Figura 56 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)



Tabela 44 – Características da malha de aterramento para o terreno de Campinas (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
8,67	821	2179

A.3 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, com o recobrimento de brita

Tabela 45 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
947,6	3.157,1

Figura 57 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

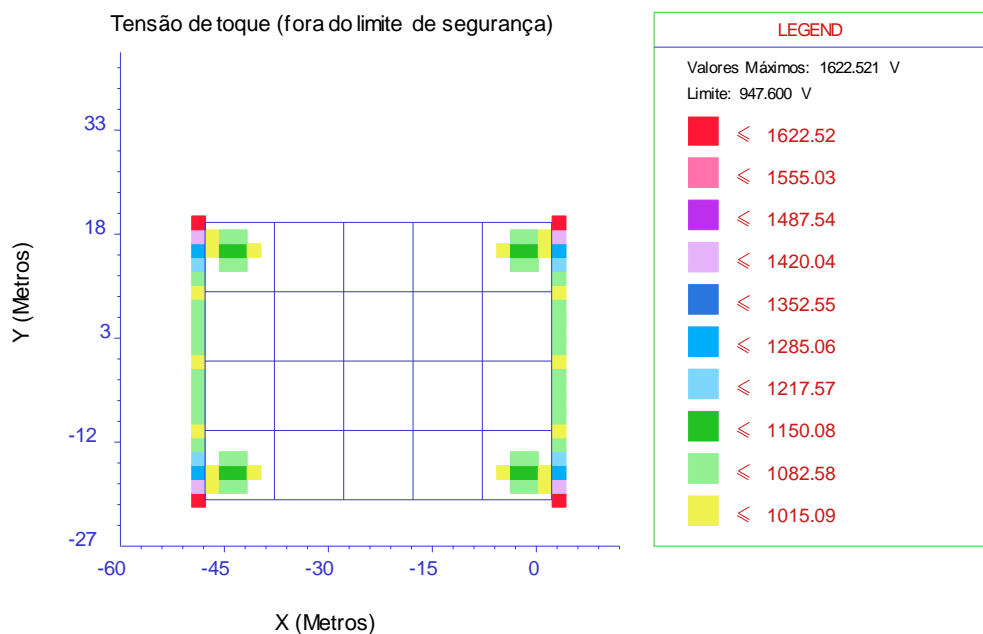


Figura 58 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

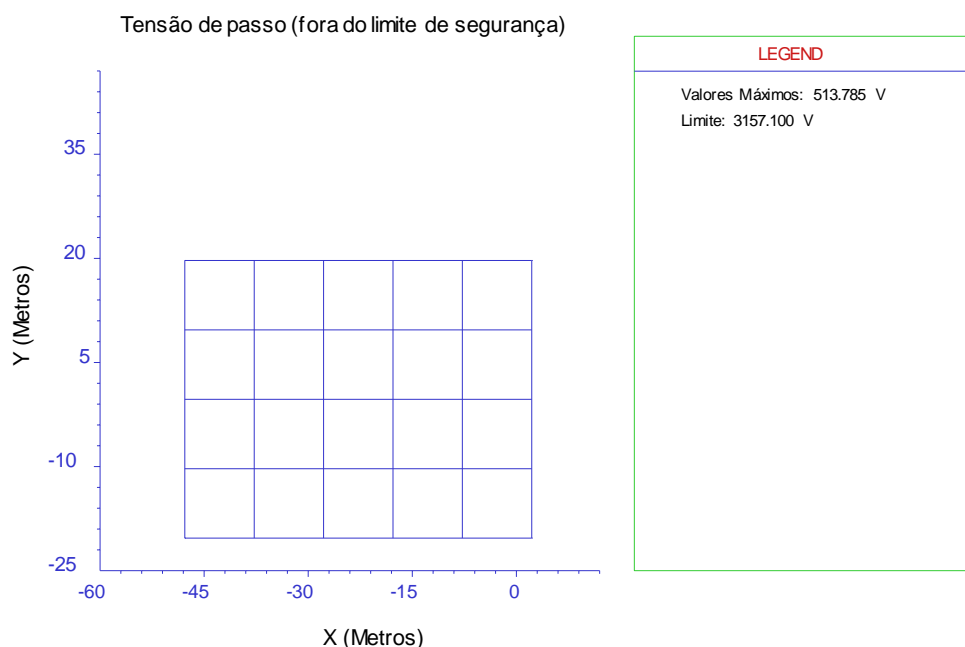


Tabela 46 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
8,52	830	2170

A.4 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, com o recobrimento de brita

Tabela 47 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
980,8	3.290,0

Figura 59 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)



Figura 60 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)



Tabela 48 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
8,31	845	2155

A.5 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, com o recobrimento de brita

Tabela 49 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
945,5	3.148,7

Figura 61 – Tensão de toque do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

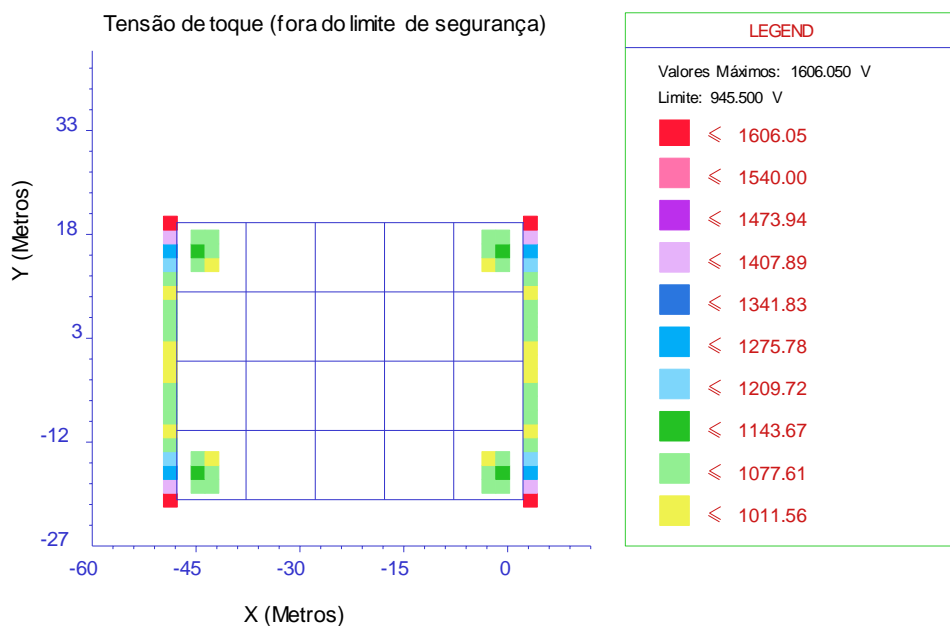


Figura 62 – Tensão de passo do terreno de Guariba fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

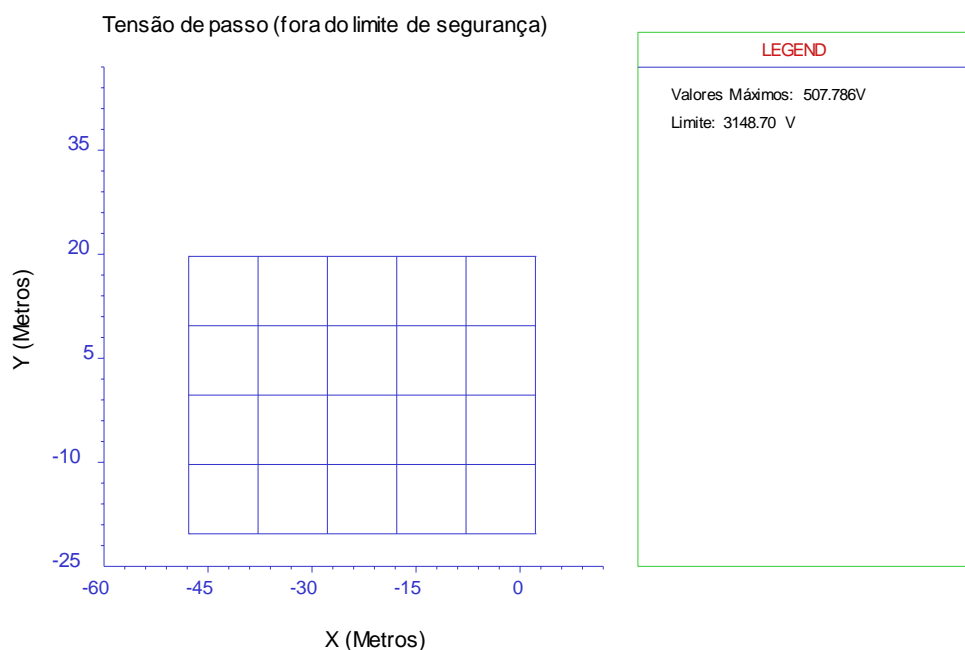


Tabela 50 – Características da malha de aterramento para o terreno de Guariba (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
8,89	806	2194

A.6 Análises comparativas - Guariba

Figura 63 – Comparação entre os limites de tensão de toque para Guariba

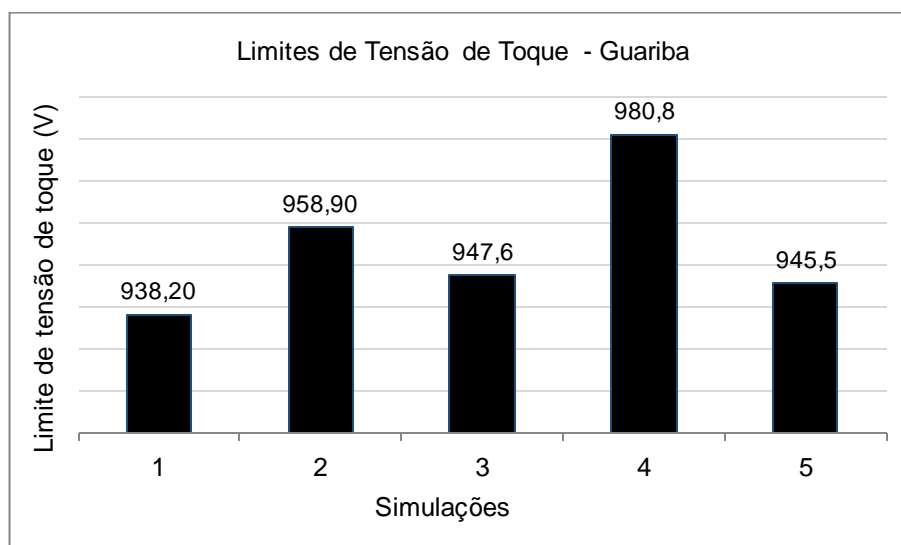


Figura 64 – Comparação entre os limites de tensão de passo para Campinas

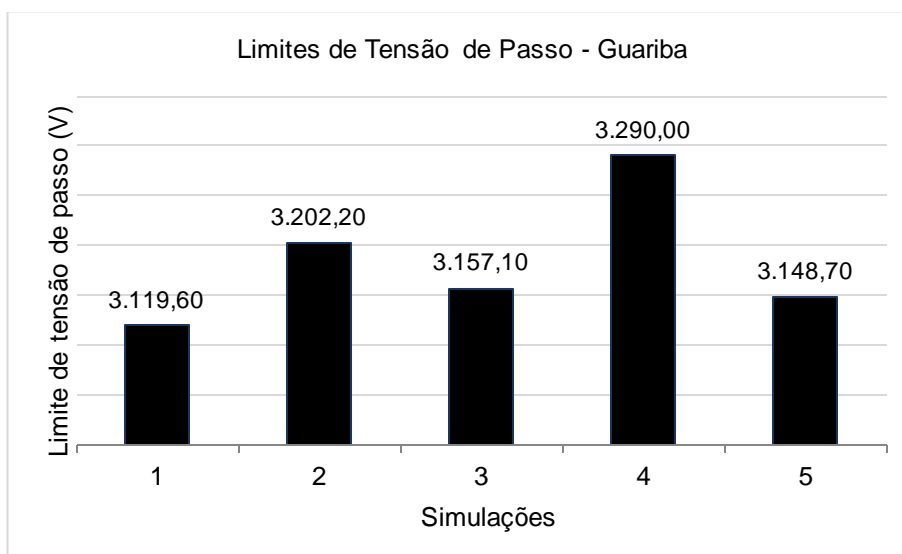


Figura 65 – Comparação entre as resistências da malha para Guariba

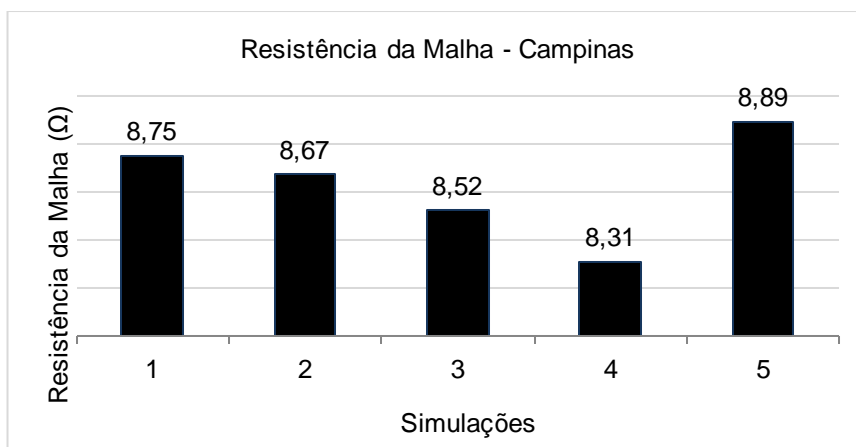


Figura 66 – Comparação entre a corrente na malha para Guariba

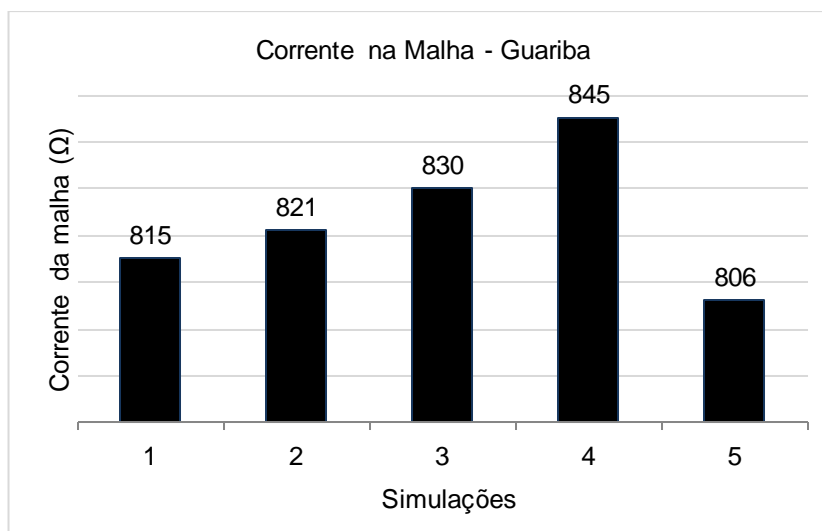
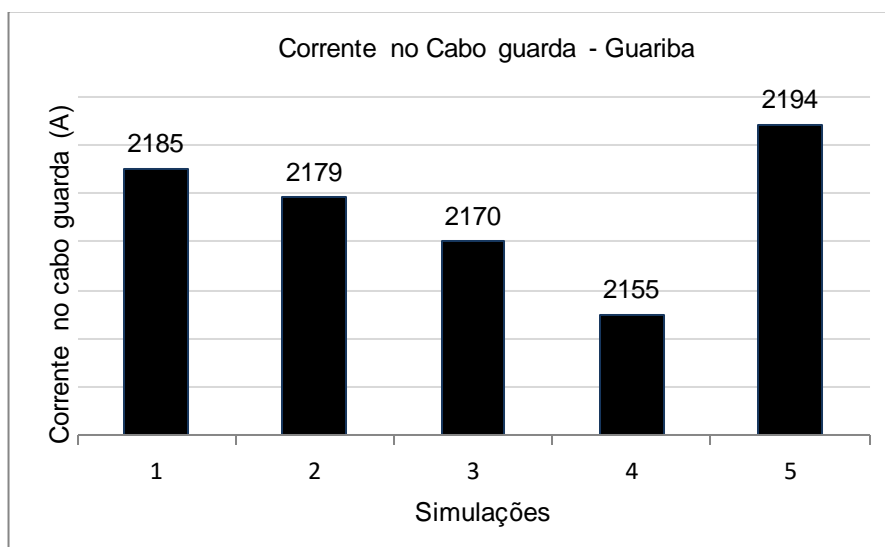


Figura 67 – Comparação entre a corrente no cabo guarda para Guariba



Anexo B

B.1 Simulações com a malha referência com recobrimento de brita

Tabela 51 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
923,8	3.062,0

Figura 68 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)

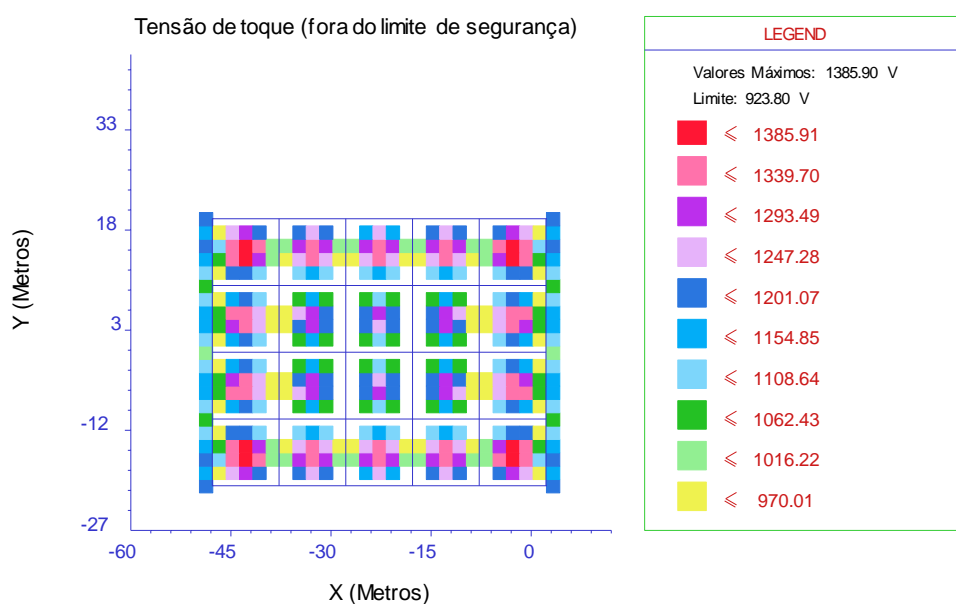


Figura 69 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)

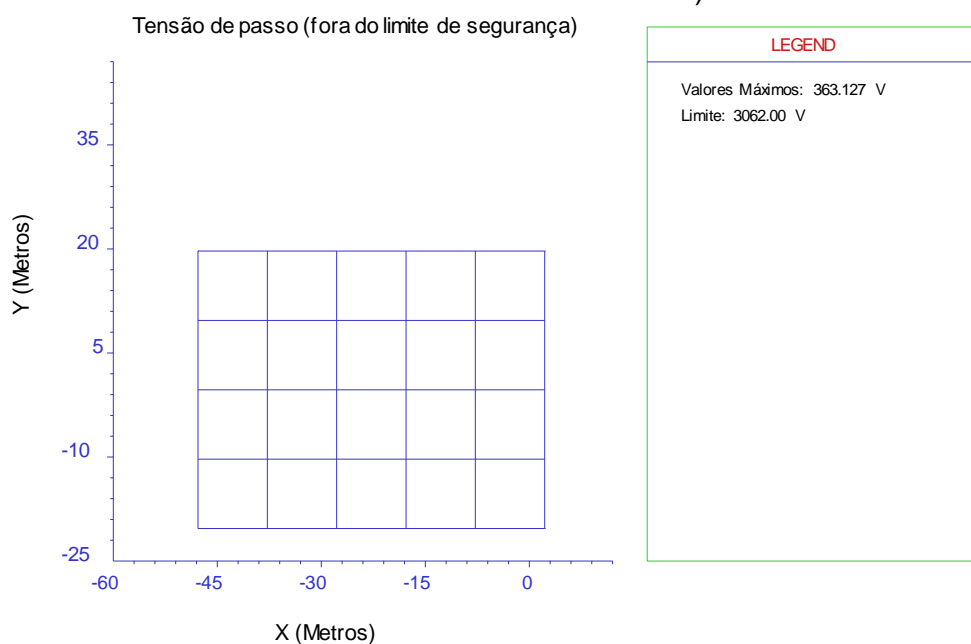


Tabela 52 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,06	2164	872

B.2 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1, com o recobrimento de brita

Tabela 53 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
958,9	3.202,2

Figura 70 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

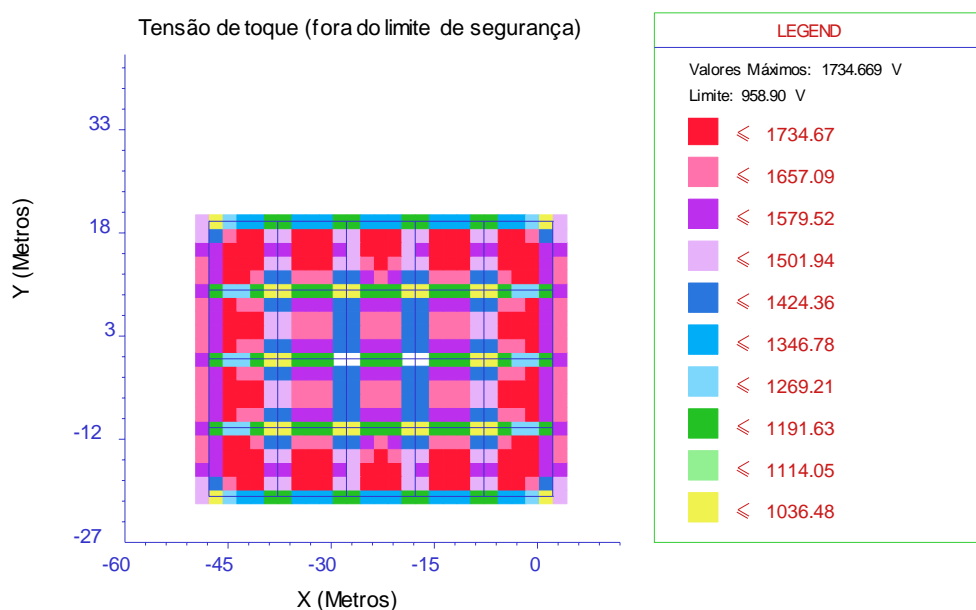


Figura 71 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

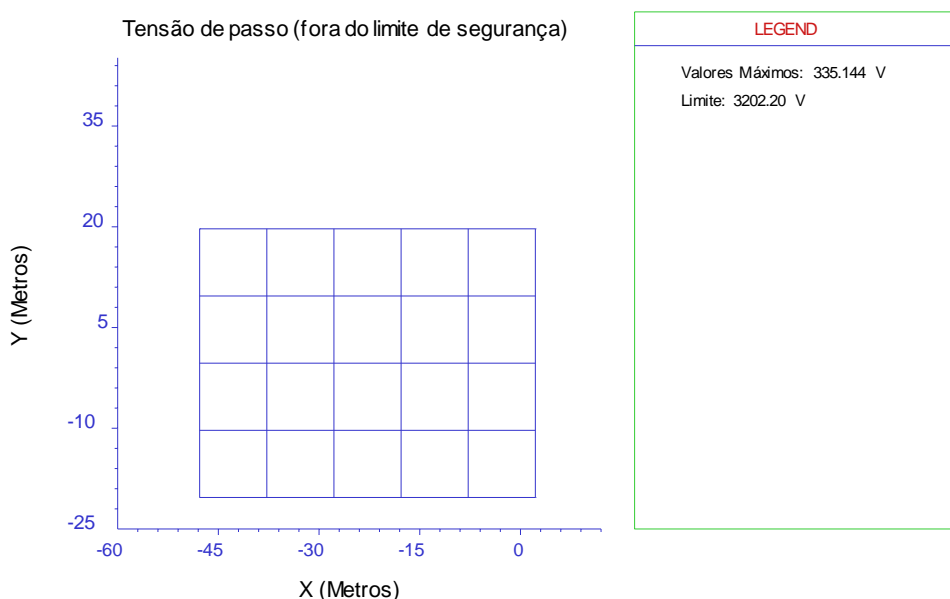


Tabela 54 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,24	2082	918

B.3 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, com o recobrimento de brita

Tabela 55 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
947,6	3.157,1

Figura 72 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

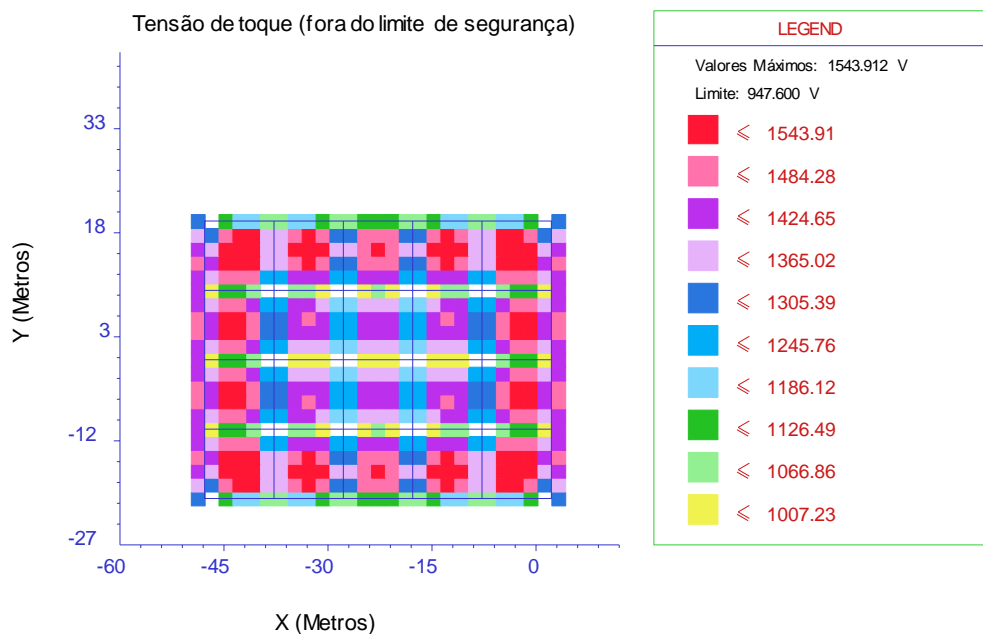


Figura 73 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

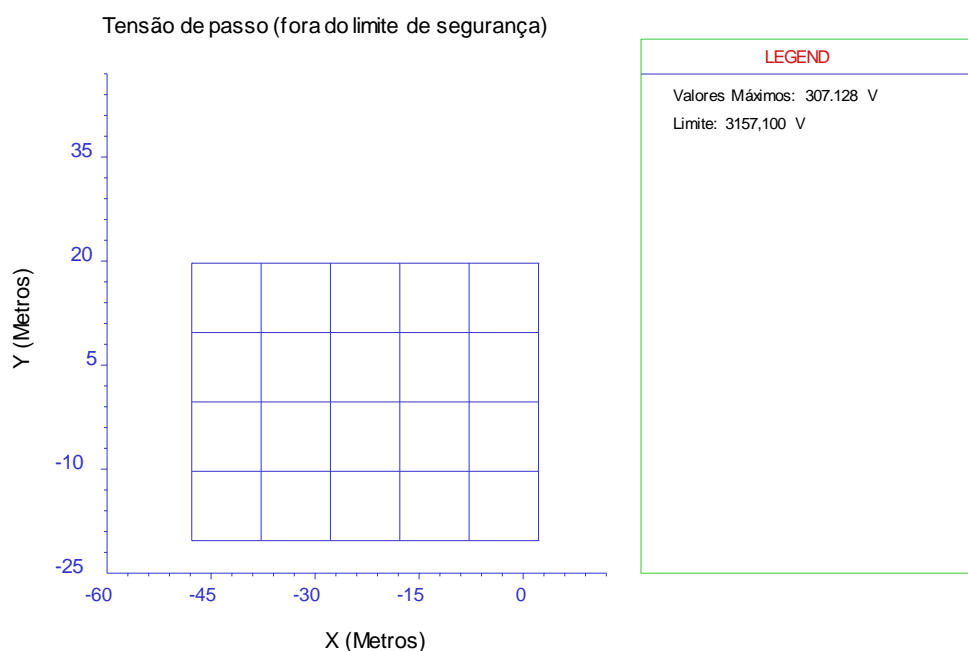


Tabela 56 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,14	2127	873

B.4 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, com o recobrimento de brita

Tabela 57 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

Cidade	Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
Humaitá	980,8	3.290,0

Figura 74 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

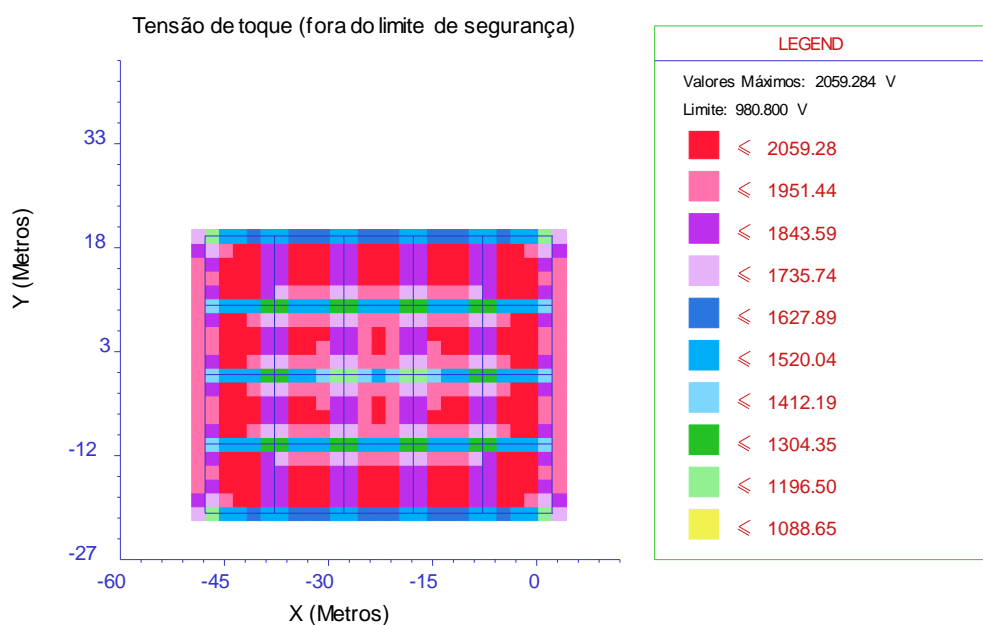


Figura 75 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

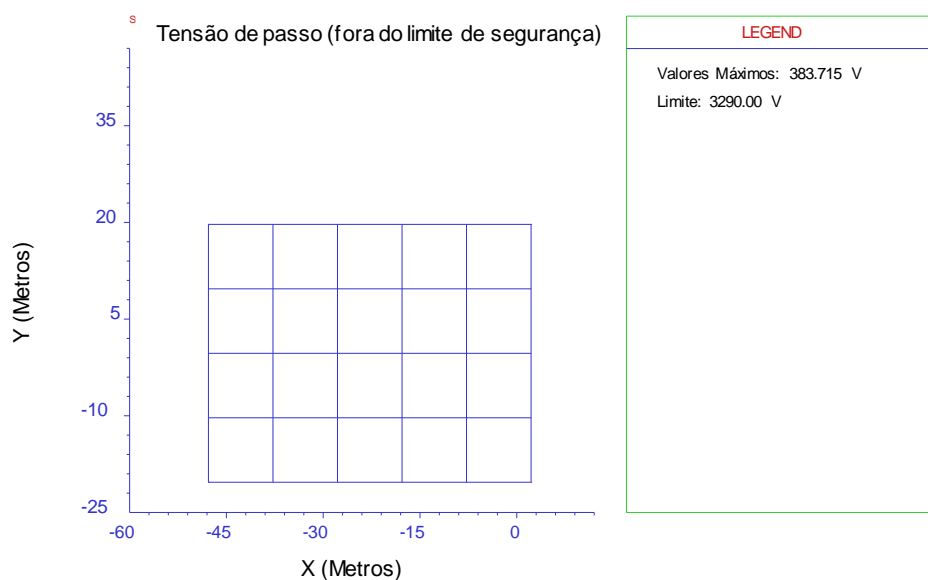


Tabela 58 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,43	2006	994

B.5 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, com o recobrimento de brita

Tabela 59 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
945,5	3.148,7

Figura 76 – Tensão de toque do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

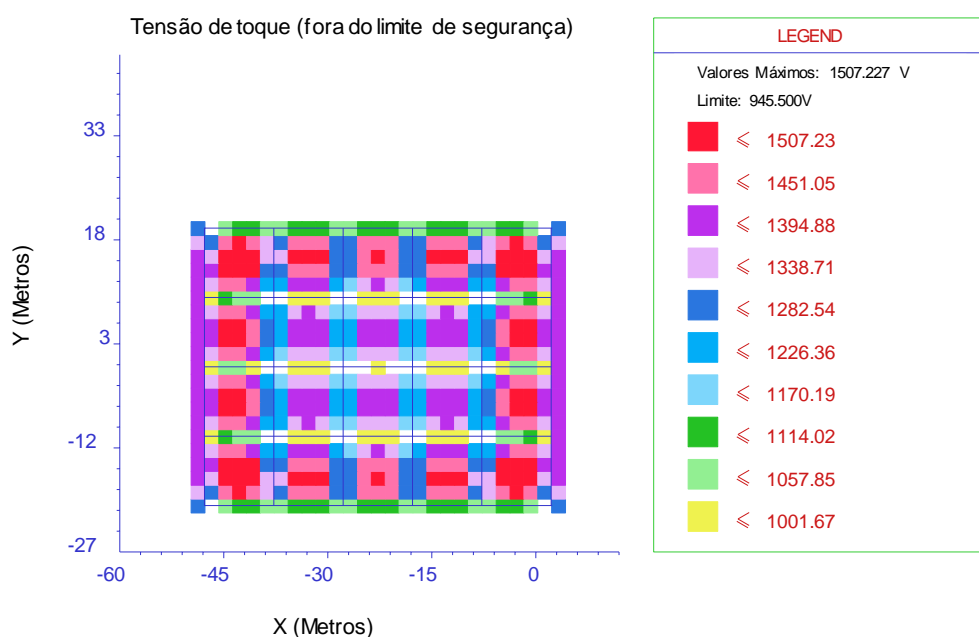


Figura 77 – Tensão de passo do terreno de Humaitá fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

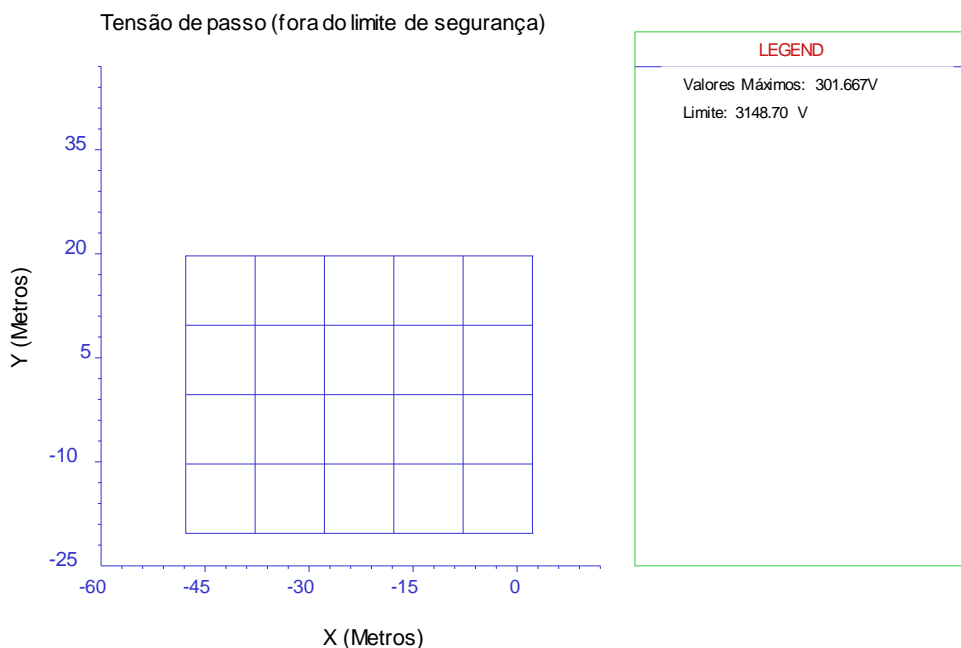


Tabela 60 – Características da malha de aterramento para o terreno de Humaitá (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,12	2136	864

B.6 Análises comparativas - Humaitá

Figura 78 – Comparação entre os limites de tensão de toque para Humaitá

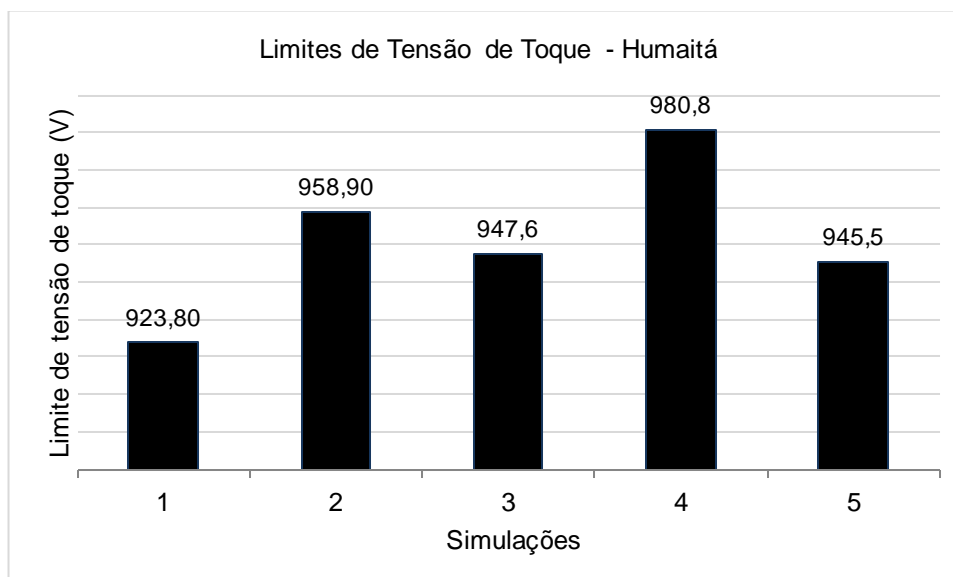


Figura 79 – Comparação entre os limites de tensão de passo para Humaitá

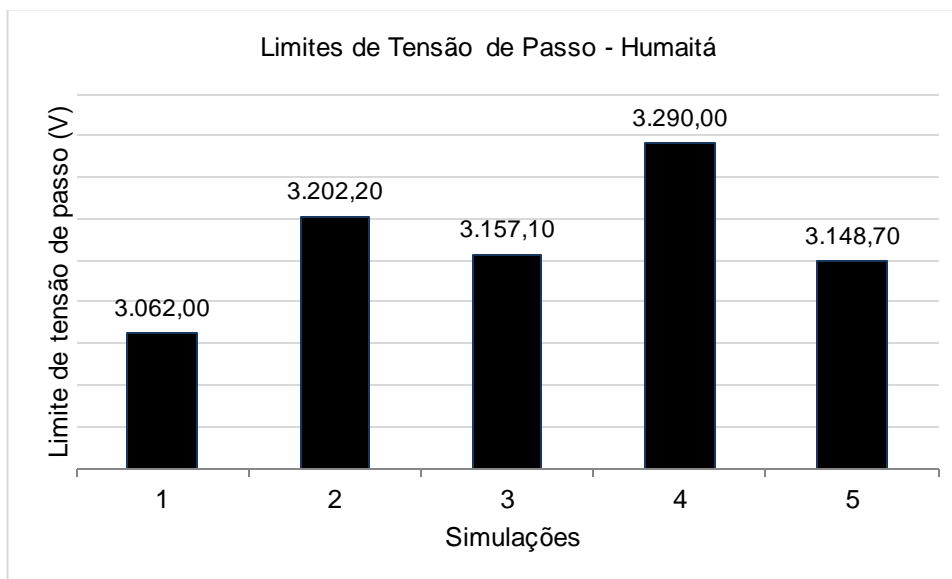


Figura 80 – Comparação entre as resistências da malha para Humaitá

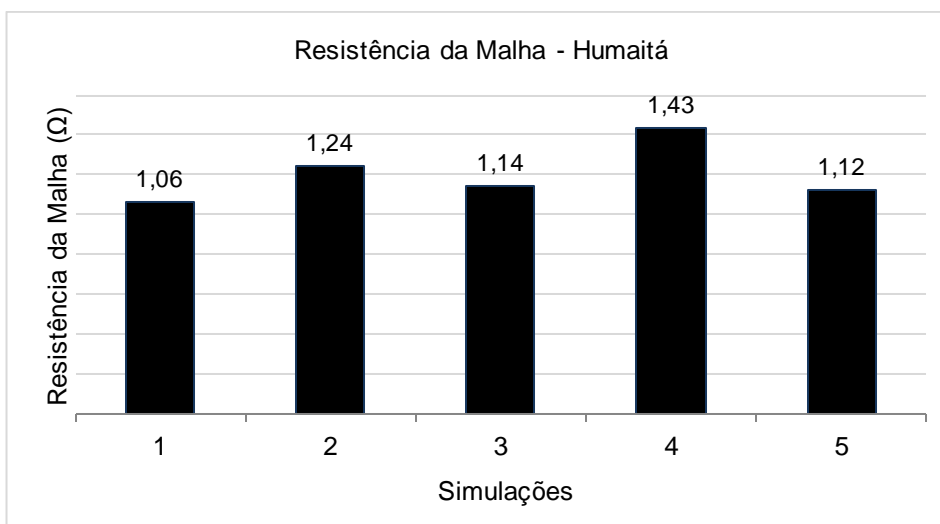


Figura 81 – Comparação entre a corrente na malha para Humaitá

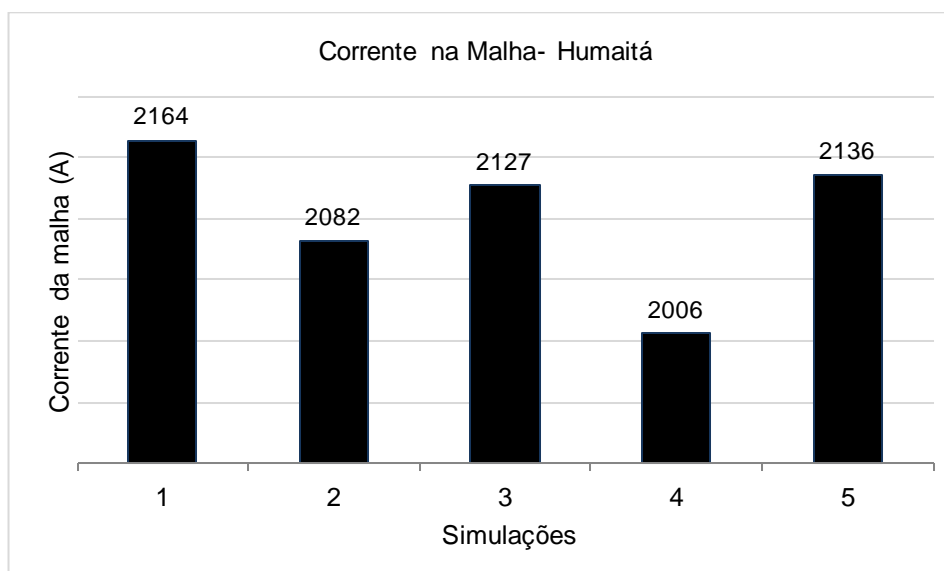
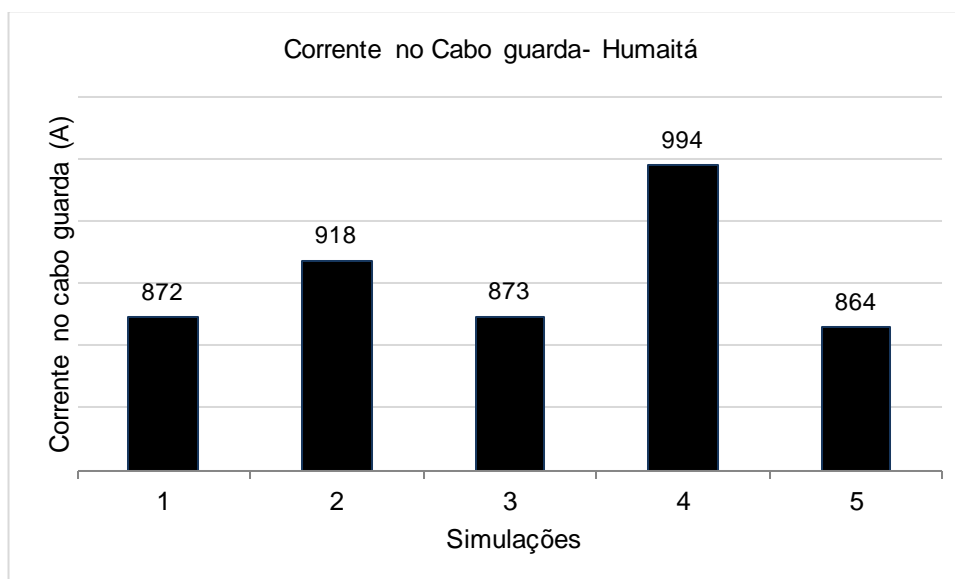


Figura 82 – Comparação entre a corrente no cabo guarda para Humaitá



Anexo C

C.1 Simulações com a malha referência com recobrimento de brita

Tabela 61 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
967,7	3.237,3

Figura 83 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)

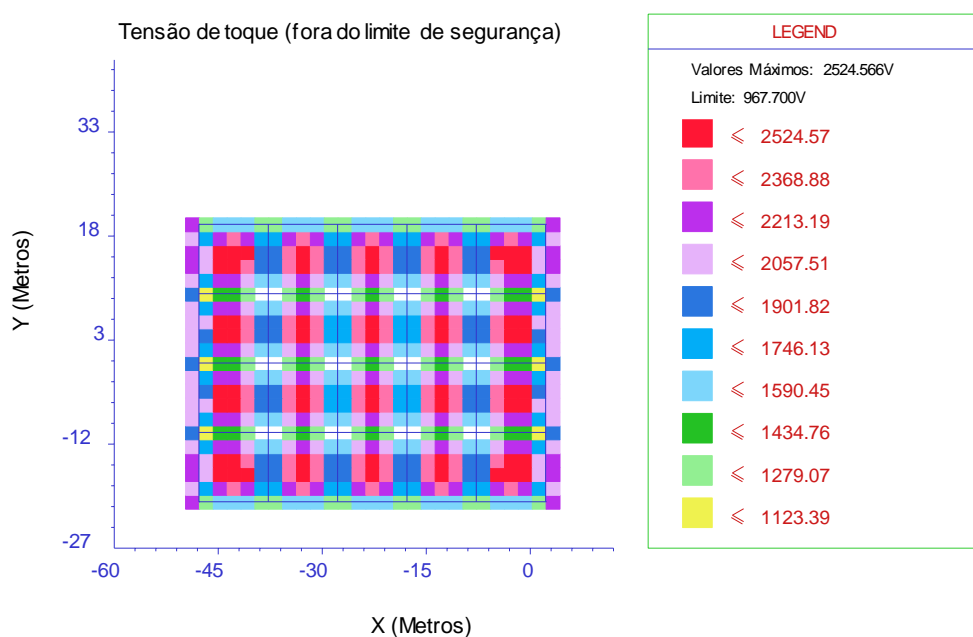


Figura 84 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com recobrimento de brita)

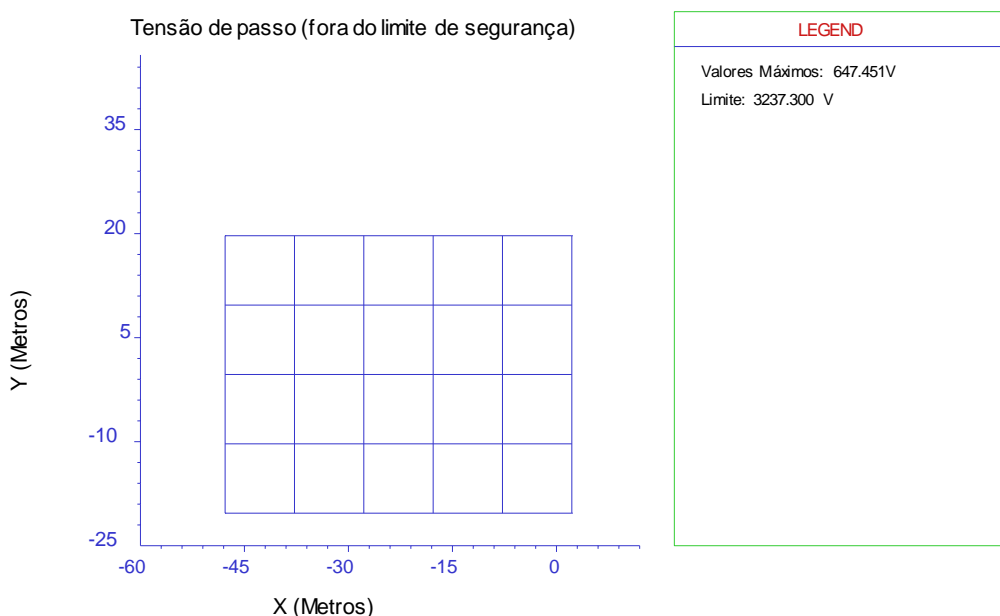


Tabela 62 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
2,1	1771	1229

C.2 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 1, com o recobrimento de brita

Tabela 63 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
958,9	3.202,2

Figura 85 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

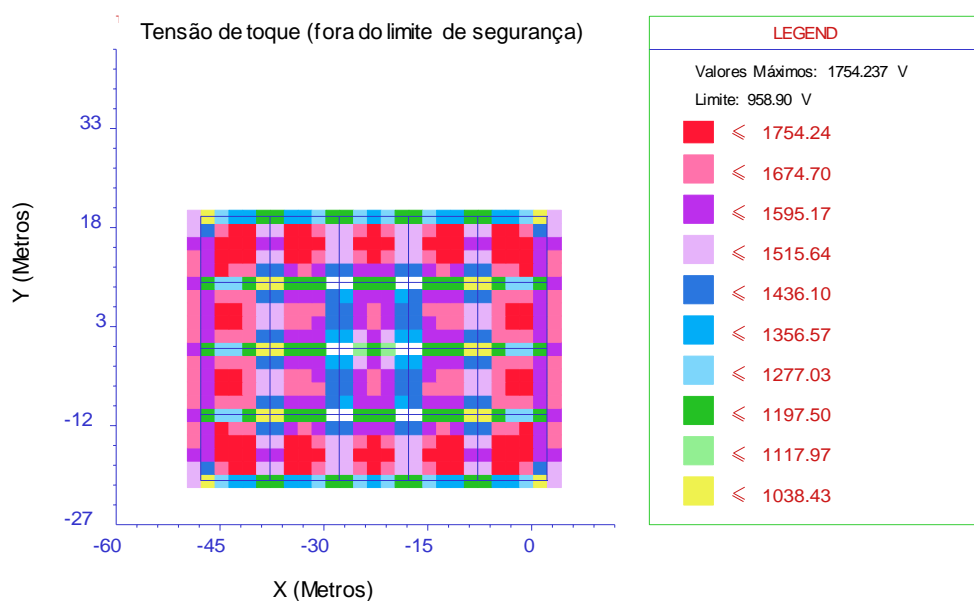


Figura 86 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

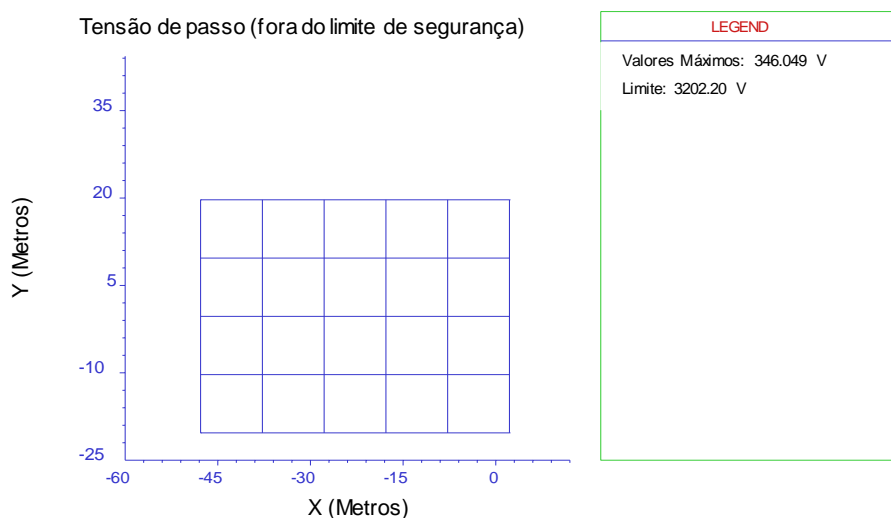


Tabela 64 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referênciã com envelopamento 1, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,33	2047	953

C.3 Simulações com a malha referênciã, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 2, com o recobrimento de brita

Tabela 65 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referênciã com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
947,6	3.157,1

Figura 87 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

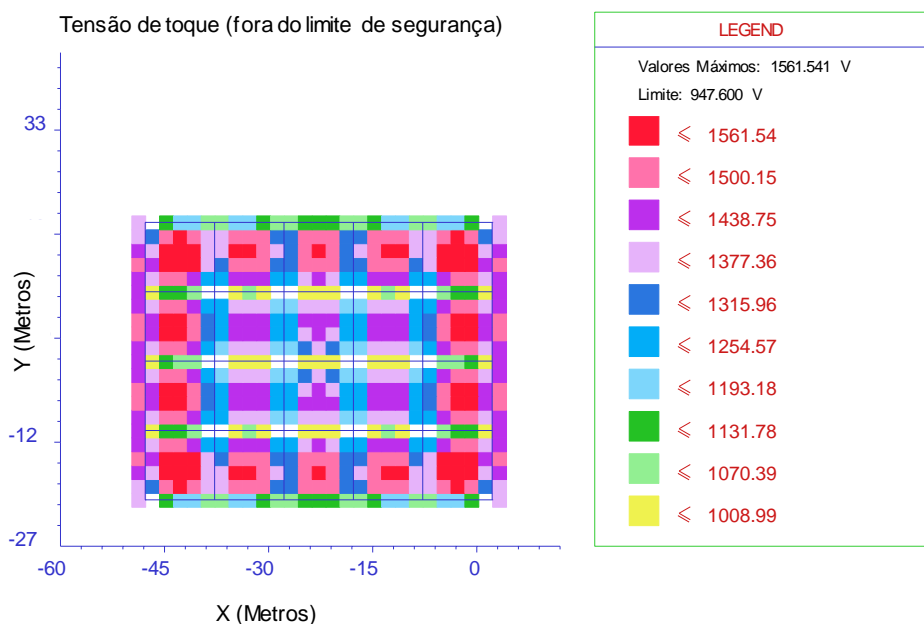


Figura 88 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referênciã com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

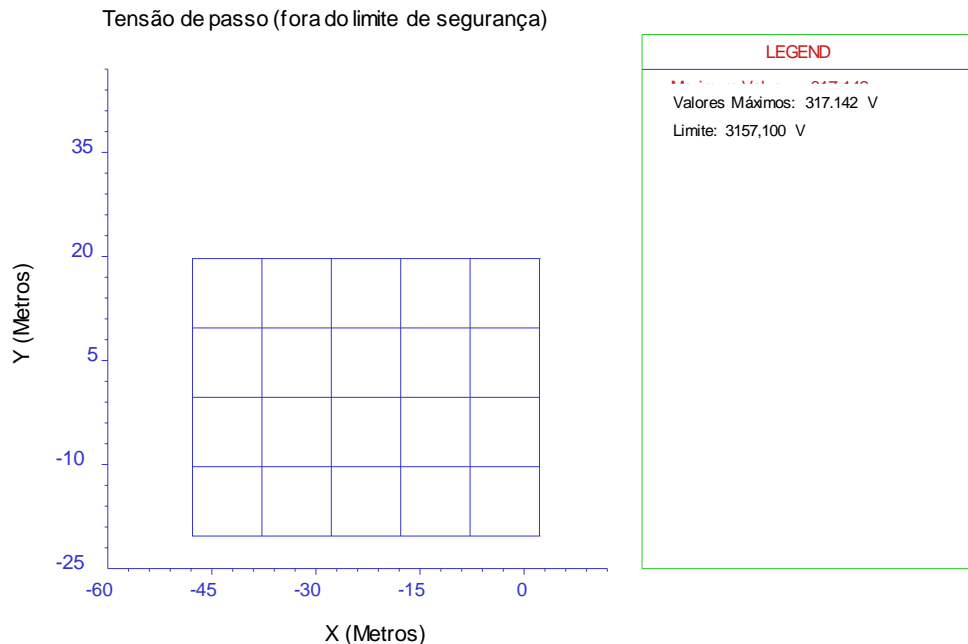


Tabela 66 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referênciã com envelopamento 2, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,22	2093	907

C.4 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 3, com o recobrimento de brita

Tabela 67 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
980,8	3.290,0

Figura 89 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

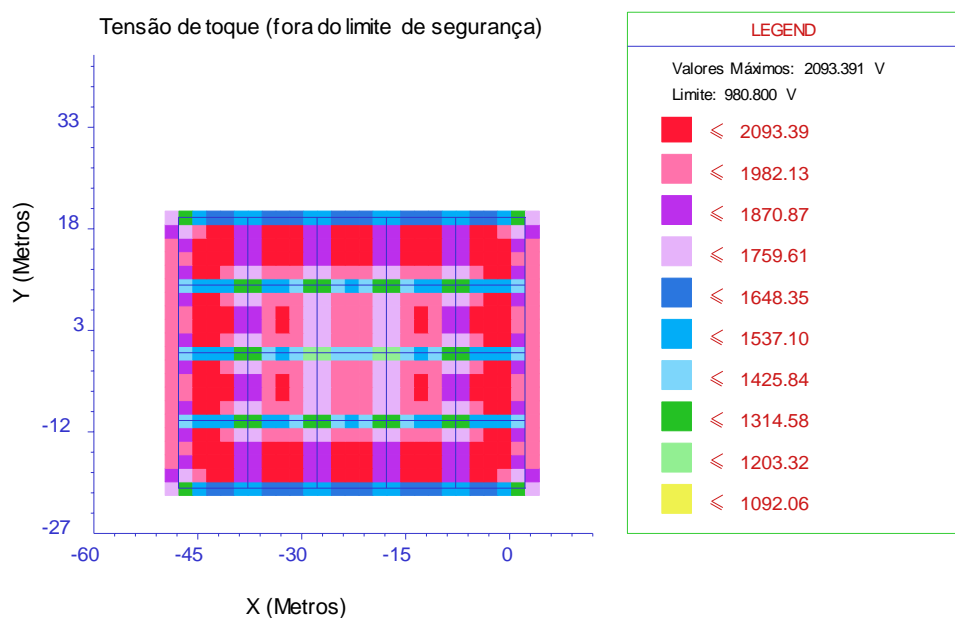


Figura 90 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

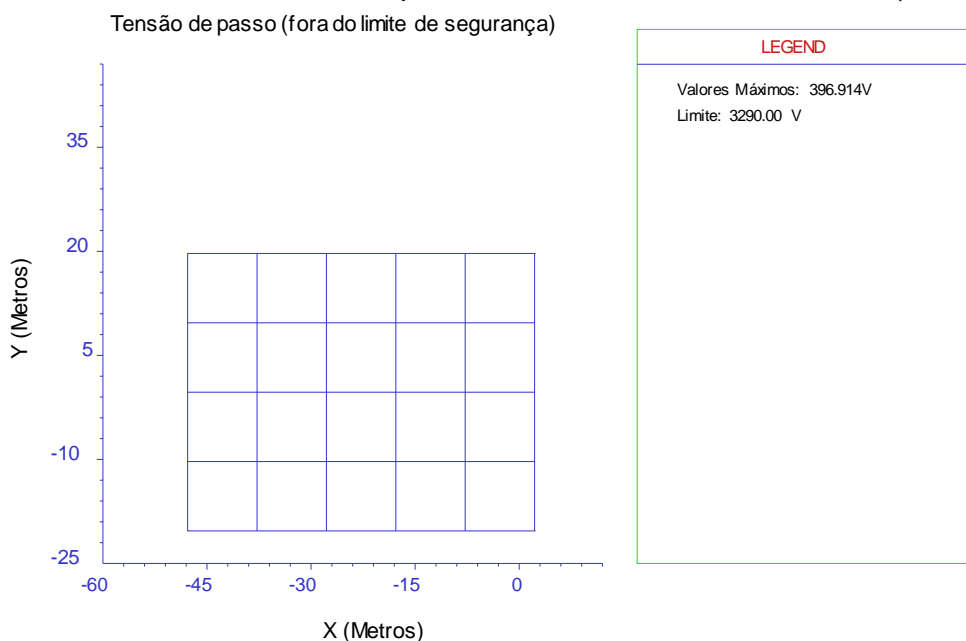


Tabela 68 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 3, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,53	1965	1035

C.5 Simulações com a malha referência, utilizando envelopamento dos cabos com o concreto de traço 4, com o recobrimento de brita

Tabela 69 – Limite de segurança de tensão de toque e passo para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

Tensão de Toque (V)	Tensão de Passo (V)
945,5	3.148,7

Figura 91 – Tensão de toque do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

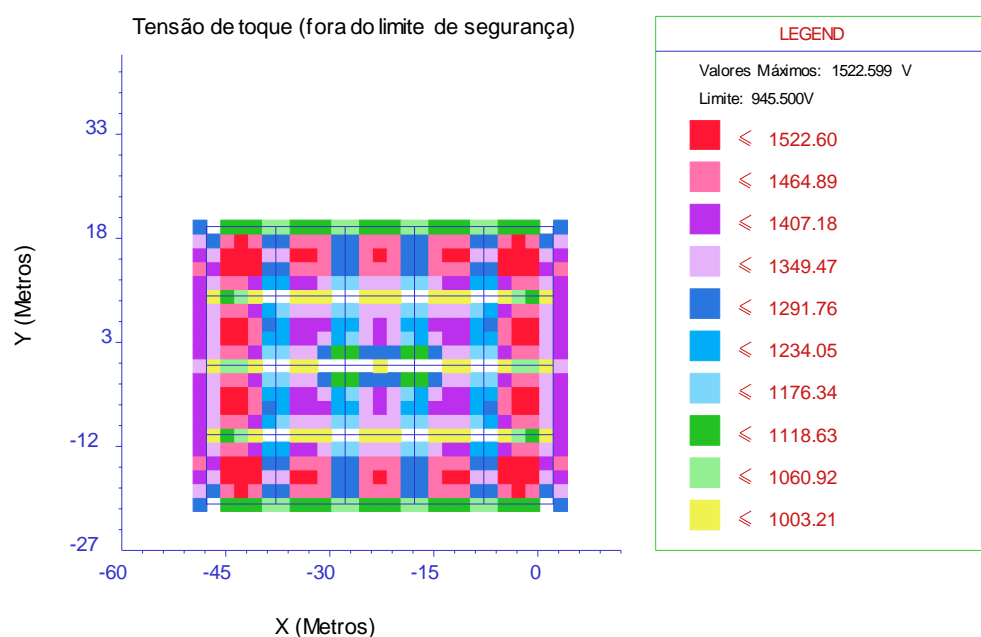


Figura 92 – Tensão de passo do terreno de São José do Rio Preto fora de segurança (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

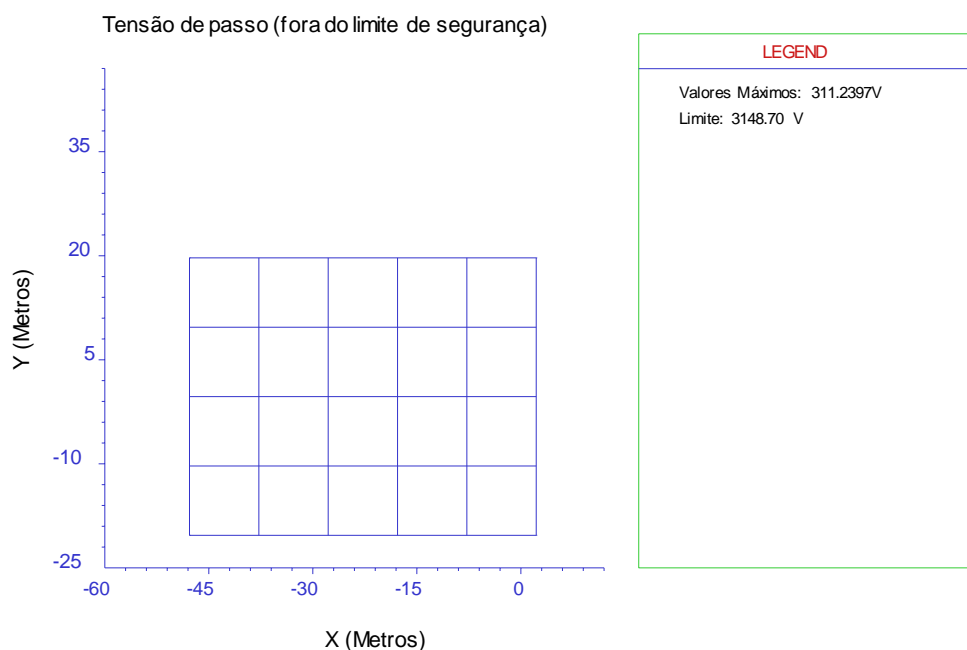


Tabela 70 – Características da malha de aterramento para o terreno de São José do Rio Preto (malha referência com envelopamento 4, com recobrimento de brita)

Resistência da Malha (Ω)	Corrente na malha (A)	Corrente no cabo guarda (A)
1,20	2102	898

C.6 Análises comparativas – São José do Rio Preto

Figura 93 – Comparação entre os limites de tensão de toque para São José do Rio Preto

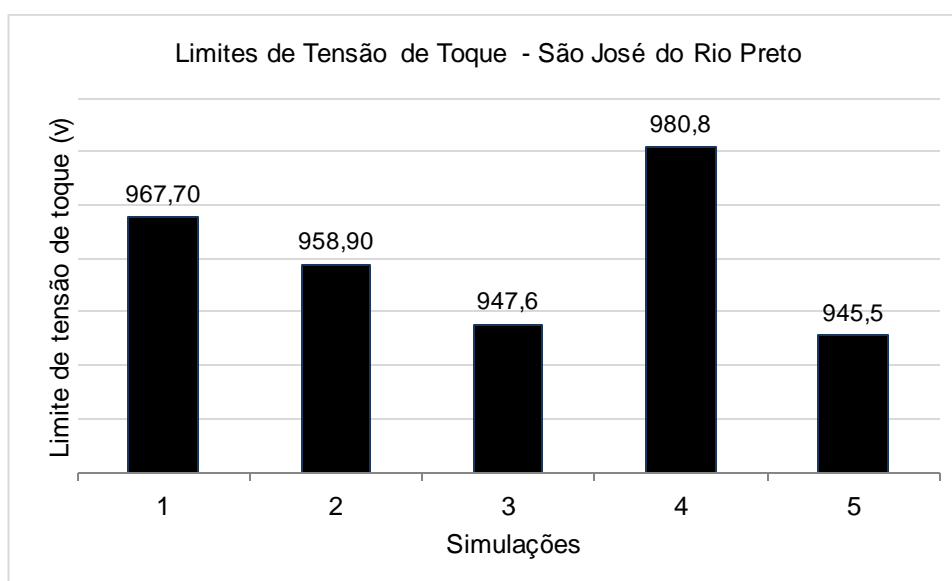


Figura 94 – Comparação entre os limites de tensão de passo para São José do Rio Preto

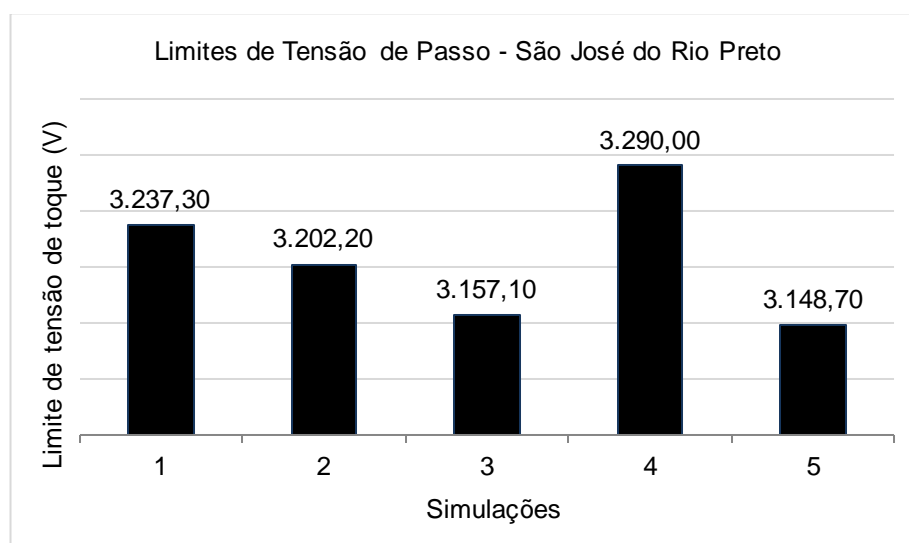


Figura 95 – Comparação entre as resistências da malha para São José do Rio Preto

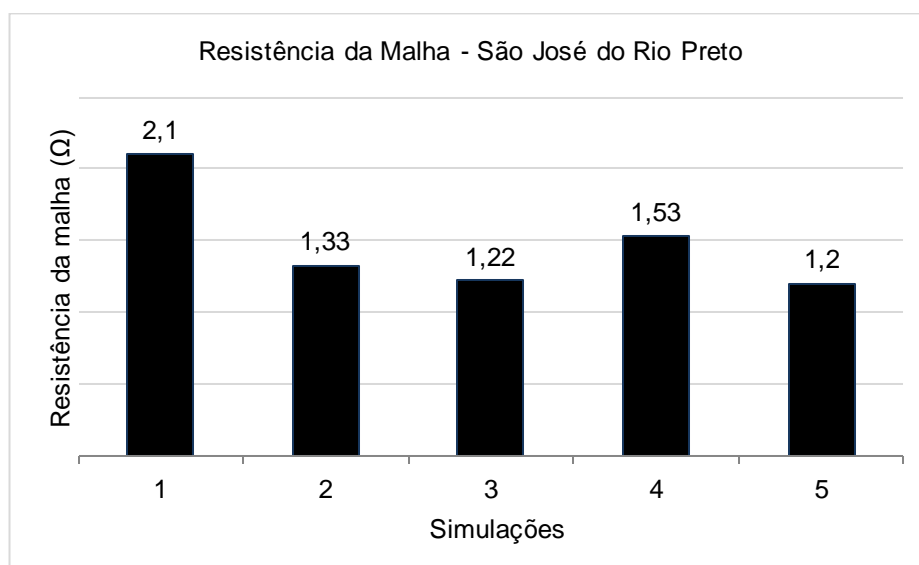


Figura 96 – Comparação entre a corrente na malha para São José do Rio Preto

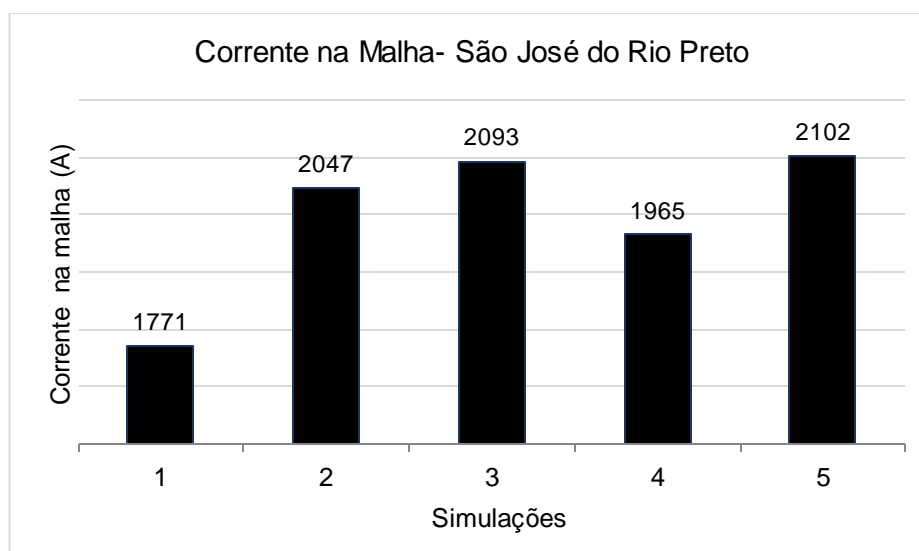


Figura 97 – Comparação entre a corrente no cabo guarda para São José do Rio Preto

