



## Grounding Meshes Encapsulated by Concrete

---

Gabriel V. N. Bezerra, Fernando A. Moreira and  
Tarso V. Ferreira

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

November 2, 2023

# Malhas de Aterramento Encapsuladas por Concreto <sup>★</sup>

Gabriel V. N. Bezerra <sup>\*</sup> Fernando A. Moreira <sup>\*\*</sup> Tarso V. Ferreira <sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Bahia (IFBA). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), BA, Brasil, (e-mail: gabriel.vidal@ifba.edu.br).

<sup>\*\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica - UFBA, (e-mail: moreiraf@ufba.br)

<sup>\*\*\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe (UFS), SE, Brasil, (e-mail: tarso@academico.ufs.br)

---

**Abstract:** Although the technique of using concrete to improve grounding is already known in the literature, few studies have evaluated in depth the effectiveness of concrete in grounding meshes with different sizes, as well as which mesh electrodes are more promising for concreting: if horizontal or vertical electrodes (rods). Thus, seeking to contribute to the state of the art, this work presents an original study of concrete encapsulation around grounding mesh electrodes with two different sizes. In addition, situations of partial and total encapsulation of the mesh are studied, investigating several scenarios in order to discover which of them are more promising. More than that, such scenarios were evaluated considering soils with low, medium and high resistivity (300  $\Omega.m$  to 4000  $\Omega.m$ ). In all, 60 simulations were carried out and in each of these situations the grounding resistance values were obtained and the respective percentage reduction calculated in relation to a grid without concrete. As a result, it was observed that, from the point of view of resistance, the best cost-effective concreting situation was for the case in which only the vertical rods of the mesh are fully encapsulated. Finally, it was also observed that concreting is more effective for small meshes and less effective for meshes with a large area.

**Resumo:** Embora a técnica de utilização de concreto para melhoramento de aterramentos já seja conhecida na literatura, poucos estudos avaliam de forma aprofundada a efetividade do concreto em malhas de aterramento com diferentes tamanhos, bem como quais eletrodos da malha são mais promissores para a concretagem: se os eletrodos horizontais ou os verticais (hastes). Dessa forma, buscando-se contribuir com o estado da arte, neste trabalho é feito um estudo original do encapsulamento de concreto ao redor de eletrodos de malhas de aterramento com dois tamanhos distintos. Além disso, são estudadas situações de encapsulamento parcial e total da malha, averiguando-se vários cenários de forma a se descobrir quais deles são mais promissores. Mais que isso, tais cenários foram avaliados considerando solos com baixa, média e alta resistividade (300  $\Omega.m$  a 4000  $\Omega.m$ ). Ao todo, foram realizadas 60 simulações e em cada uma dessas situações foram obtidos os valores de resistência de aterramento e calculada a respectiva redução percentual em relação à uma malha sem concreto. Como resultado, observou-se que, do ponto de vista da resistência, a situação de concretagem com melhor custo benefício foi para o caso em que apenas as hastes verticais da malha são totalmente encapsuladas. Por fim, observou-se também que a concretagem é mais efetiva para malhas pequenas e menos efetiva para malhas com grande área.

*Keywords:* Concrete-Encased Grounding; Grounding Mesh; Grounding Resistance.

*Palavras-chave:* Aterramento; Concreto; Malha de Aterramento; Resistência de Aterramento.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Os aterramentos elétricos desempenham um importante papel no sistema elétrico de potência. Neste sentido, os principais objetivos do aterramento são: (i) fornecer um caminho de baixa resistência para o escoamento de correntes de falta à terra; (ii) manter os potenciais na superfície do solo dentro dos limites de segurança previstos em norma, de forma a proteger pessoas que circulam na instalação ou vizinhanças; (iii) facilitar a sensibilização da proteção e consequente aprimoramento na isolamento de faltas e (iv) escoar à terra correntes de descargas atmosféricas (Kindermann and Campagnolo, 1992).

Entre os diversos tipos de topologias possíveis, as malhas de aterramento são as mais utilizadas em subestações elétricas, uma vez que notoriamente tratam-se de instalações que possuem extensa área, além de serem povoadas por diversos equipamentos que necessitam de conexão à terra. Portanto, uma malha reticulada combinada com hastes verticais geralmente é a solução com melhor custo benefício técnico-econômico e, portanto, é sugerida em normas como a IEEE Std.80 (2013) e NBR 15751 (2013).

Embora as malhas de aterramento destinem-se a reduzir a resistência à terra, bem como as tensões de passo e de toque, nem sempre é uma tarefa simples projetar uma malha que forneça resistências e tensões superficiais que satisfaçam os requisitos do projeto, bem como as normas pertinentes. Essa dificuldade se avulta quando o solo possui elevada resistividade, o que claramente produz elevadas resistências de aterramento e elevados potenciais na superfície do solo.

Nesse ínterim, uma das técnicas conhecidas que possibilita a redução da resistência de aterramento em solos de média e alta resistividade é a utilização de materiais de baixa resistividade no entorno dos eletrodo de aterramento. Tais materiais também são conhecidos na literatura como *Low Resistivity Material* (LRM) ou *Ground Enhancing Compound* (GEC) e entre eles os mais conhecidos são o concreto, a bentonita e sais condutivos (ou aditivos químicos) (Ufer, 1964; Fagan and Lee, 1970; He et al., 2013; Androvitsaneas et al., 2014). Estudos têm indicado que dentre esses três materiais o concreto é o que possui melhor estabilidade quando submetido a variações climáticas e pluviométricas, tornando-o uma das melhores alternativas para o melhoramento de aterramentos (Androvitsaneas et al., 2014, 2017; Tronchoni et al., 2017).

A concretagem de eletrodos da malha de aterramento é prevista explicitamente na norma IEEE Std.80 (2013), contudo é apresentada apenas a opção de encapsulamento das hastes da malha (conforme esboçado na Fig. 1, lado direito: Malha B), ficando de fora os eletrodos horizontais. Além disso, observou-se uma escassez de trabalhos que avaliam o encapsulamento parcial da malha. Ou seja, situações em que: (I) apenas os eletrodos horizontais são encapsulados; apenas as hastes são encapsuladas pela (II) metade ou (III) completamente; (IV) os eletrodos horizontais são encapsulados, estando as hastes encapsuladas pela

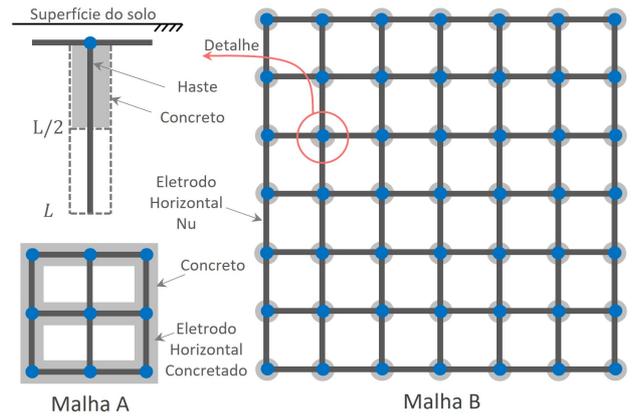


Figura 1. Esboço das malhas a serem estudadas. À esquerda: Malha A, com dimensões 5 m x 5 m, na situação de eletrodos horizontais concretados. À direita: Malha B, com dimensões 15 m x 15 m, na situação em que apenas as hastes são concretadas.

metade. Poucos estudos avaliam também a efetividade da concretagem em relação ao tamanho ou área da malha de aterramento.

Dessa forma, o presente trabalho visa contribuir com o estado da arte apresentando um estudo original da efetividade do concreto em relação ao tamanho da malha, além de avaliar situações de encapsulamento parcial e total da malha, para solos com resistividade de 300  $\Omega \cdot m$  a 4000  $\Omega \cdot m$ . Para a realização das análises é feito um estudo da resistência de aterramento da malha e respectiva redução percentual da resistência em relação a uma malha sem concreto.

A seguir, na Seção 2 são apontados os materiais e métodos utilizados, incluindo uma descrição das malhas e situações estudadas, ferramenta computacional adotada, arranjos de simulação e a modelagem eletromagnética. Em seguida, na Seção 3 são apresentados os resultados e tecidas as respectivas considerações, indicando-se os achados do trabalho. Finalmente, na Seção 4 é feita uma conclusão do trabalho resumindo-se as contribuições e trabalhos futuros.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a metodologia adotada para realização do presente estudo, indicando os arranjos de simulação bem como o equacionamento para modelagem do problema.

### 2.1 Malhas e Situações Estudadas

Para o desenvolvimento do trabalho duas malhas de aterramento foram avaliadas. A primeira malha possui dimensão de 5 m X 5 m de comprimento, tendo duas células na largura e duas no comprimento, totalizando quatro células (conforme a Fig. 1). Além disso, em cada vértice ou interseção entre cabos horizontais há uma haste vertical com 2,4 m. A malha está enterrada a uma profundidade de 0,5 m em relação a superfície do solo e todos os eletrodos, tanto horizontais quanto verticais (hastes), são feitos de cobre, possuindo um raio de 7 mm. A segunda malha avaliada possui características similares à primeira malha,

\* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Instituto Federal da Bahia (IFBA).

diferindo apenas na sua dimensão que é de 15 m X 15 m, possuindo seis células na largura seis no comprimento, totalizando trinta e seis células (segundo indica a Fig. 1). Vale salientar que a Fig. 1 apresenta apenas um esboço de algumas das configurações de encapsulamento parcial da malha, mas não indica todas as situações que serão estudadas, conforme será mencionado em seguida.

Nos casos em que é utilizado um encapsulamento de concreto, considerou-se que o mesmo possui formato cilíndrico, tendo raio de 10 cm. Esse encapsulamento envolve o eletrodo de cobre, ficando este último exatamente no eixo do invólucro cilíndrico de concreto. Quanto à resistividade do concreto, vários trabalhos mencionam valores diferentes. Ufer (1964), que foi o precursor no estudo de aterramentos concretados, indica uma resistividade de 30  $\Omega$ .m para o concreto; já He et al. (2013) menciona uma resistividade entre 30 e 90  $\Omega$ .m; por outro lado a IEEE Std.80 (2013) cita uma resistividade de 30 a 200  $\Omega$ .m. Diante dessas possibilidades, no presente estudo, considerou-se a resistividade do concreto como sendo 60  $\Omega$ .m, considerando como sendo um valor aproximadamente médio em relação aos valores mencionados.

As configurações de malha estudadas são apresentadas na Tabela 1 e contemplam as seguintes situações: zero concretagem (situação H0V0: malha convencional), concretagem parcial (situações H0Vm, H0V1, H1V0 e H1Vm) e concretagem total (situação H1V1). Vale salientar que todas essas situações foram estudadas para cada uma das malhas. Assim, por exemplo, para o caso particular da malha B sob uma situação H1V0, chamaremos doravante de caso B-H1V0.

Tabela 1. Situações de concretagem estudadas e respectivos volumes de concreto ( $m^3$ ).

Situação	Concretagem dos Eletrodos		Volume de Concreto ( $m^3$ )	
	Horizontal	Vertical	Malha A	Malha B
H0V0		Não	0	0
H0Vm	Não	Sim (Metade)	0,34	1,85
H0V1		Sim (Completa)	0,68	3,69
H1V0	Sim	Não	0,92	6,37
H1Vm		Sim (Metade)	1,26	8,22
H1V1		Sim (Completa)	1,60	10,07

De forma a tornar o estudo abrangente, para cada uma das duas malhas e para cada um dos 6 tipos de concretagem utilizadas ('H0V0' a 'H1V1') foram analisados solos homogêneos com resistividade de 300, 600, 1000, 2000 e 4000  $\Omega$ .m. Portanto, no total, foram realizadas 60 simulações (2 tipos de malhas, 5 resistividades de solo e 6 formas de concretagem).

## 2.2 Modelagem e Arranjo de Simulação

Para a realização de todas as simulações relativas aos casos mencionados na seção anterior, foi utilizado o *software Comsol Multiphysics* (Comsol, 2017), que consiste em uma ferramenta de simulação de campos eletromagnéticos através do método dos elementos finitos (MEF). Cada geometria de aterramento estudada foi descrita no ambiente gráfico do *Comsol*, levando em consideração ao disposto na Fig. 1 e na Tabela 1.

Para se representar o solo, utilizou-se uma prisma retangular com dimensões 130 m x 130 m x 65 m, no qual

foi inserido a malha de aterramento, na região centro-superior. Dessa forma, para todos os casos, a distância entre o aterramento e as condições de contorno do solo, foi maior ou igual a 50 m, distância geralmente utilizada para simulações de aterramentos.

As simulações consistiram basicamente na injeção de uma corrente contínua de 1000 A no centro da malha, sendo obtida a respectiva resistência vista do ponto de injeção.

Todas as 60 situações anteriormente mencionadas foram avaliadas considerando uma modelagem eletromagnética que considera apenas os efeitos resistivos e capacitivos, mas não indutivos. Pois o custo computacional de simulações que consideram o acoplamento magnético entre todos eletrodo da malha é alto, o que dificultaria consideravelmente o estudo, principalmente para uma malha com 15 m x 15 m.

As malhas escolhidas para o estudo são quadradas e propositalmente apresentam simetria em dois planos de corte. Dessa forma, pode-se tirar vantagem dessa simetria e simular apenas um quadrante da malha, pois todos os fenômenos que ocorrem em um dado quadrante da malha são exatamente iguais aos que ocorrem em cada um dos outros três. Assim, o custo computacional é reduzido em um quarto, sendo necessário apenas que a corrente injetada no quadrante de malha seja dividida por quatro (conforme indicado na Fig. 2), uma vez que a corrente que 'alimenta' cada quadrante é um quarto da corrente total injetada na malha completa.

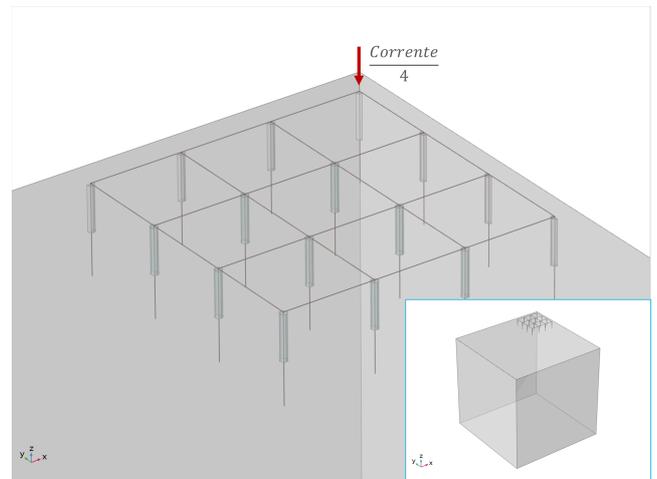


Figura 2. Detalhe da geometria de um quarto da malha 15 m x 15 m (concretagem: situação H0Vm) A seta vermelha indica o ponto de injeção de 1/4 da corrente total a ser injetada na malha completa.

## 2.3 Modelagem Eletromagnética e Discretização

O sistema de equações governantes do problema eletromagnético a ser resolvido pelo MEF é o seguinte:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_E \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (3)$$

Tabela 2. Parâmetros da discretização dos domínios de simulação. Comprimento máximo e mínimo dos elementos finitos ( $C_{max}$  e  $C_{min}$ ) e taxa de crescimento ( $\Delta G$ ).

Domínio	$C_{max}$	$C_{min}$	$\Delta G$
Solo	5 m	0.6 m	1.5
Concreto	0.05 m	0.05 m	1.5
Eletrodos	1 m	0.007 m	1.7

em que  $\mathbf{J}$  é a densidade de corrente;  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico;  $\mathbf{J}_E$  a densidade de corrente gerada externamente;  $\sigma$  é a condutividade elétrica do meio;  $V$  é o potencial escalar elétrico.

O MEF é um método que resolve equações diferenciais (no caso, Eqs. 1 a 3) para uma forma discretizada do problema a ser simulado, no caso, o aterramento mais o solo que o envolve. Assim, uma das principais etapas consiste na discretização do domínio de simulação em "elementos finitos", o que geralmente é feito utilizando-se tetraedros ou prismas. Nesse ínterim, buscando-se uma elevada precisão na resolução da simulação, adotou-se uma discretização extremamente refinada. Na Tabela 2 são apresentados os valores de tamanho máximo e mínimo dos elementos finitos ( $C_{max}$  e  $C_{min}$ ), bem como a taxa de crescimento ( $\Delta G$ ). Já na Fig. 3 é apresentado o respectivo resultado da discretização adotada, indicando o nível de detalhamento utilizado.

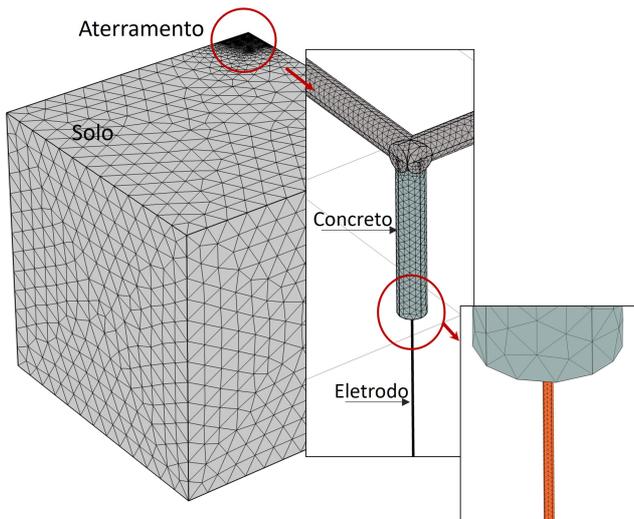


Figura 3. Detalhamento da discretização adotada para a realização das simulações através do MEF, considerando-se 1/4 da malha de aterramento (na situação H1Vm).

Além de uma discretização extremamente refinada, utilizou-se como critério de convergência para a simulação um valor de tolerância igual a  $10^{-4}$ , o que é dez vezes menor que o valor  $10^{-3}$ , usualmente empregado para simulações usando o MEF. Tais medidas foram adotadas objetivando-se obter resultados confiáveis e precisos, mesmo que para isso o custo computacional fosse elevado.

### 3. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Após serem realizadas as simulações baseadas na metodologia apresentada na seção anterior, os resultados de resis-

tência de aterramento foram obtidos. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os resultados de resistência de aterramento para as Malhas A e B respectivamente, considerando solos com resistividade de 300 a 4000  $\Omega.m$ . Vale salientar que, nas Figuras 4 e 5, as situações de encapsulamento, foram dispostas em ordem decrescente de resistência de aterramento e por isso as situações de encapsulamento estão em ordem diferente das situações apresentadas na Tabela 1.

A primeira observação que pode ser feita analisando-se as Figuras 4 e 5, é que para a maioria dos casos, as situações que fornecem as menores resistências de aterramento em ordem decrescente são H0V0, H0Vm, H1V0, H1Vm, H0V1 e H1V1. Para corroborar com a análise, nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas as respectivas reduções percentuais na resistência de aterramento ( $\Delta R$ ) para cada situação de concretagem, em relação à situação de zero concretagem (H0V0). Assim, pode-se visualizar de forma mais clara, o ganho que cada situação de concretagem fornece.

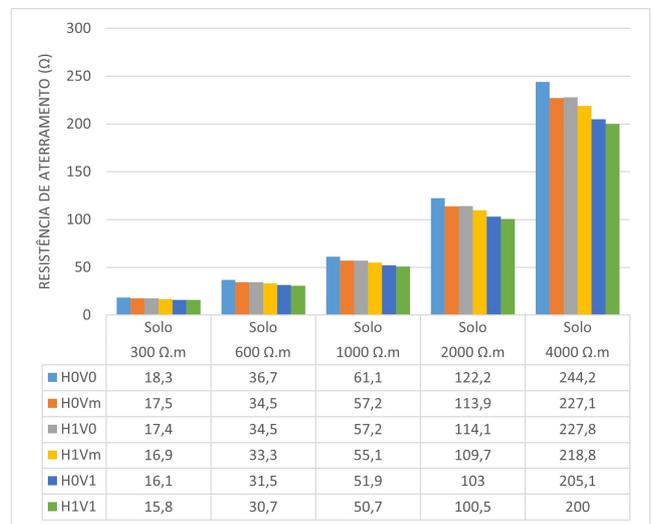


Figura 4. Malha A (5 m X 5 m): Resistências de aterramento em  $\Omega$  sob diferentes situações de encapsulamento de concreto e para solos com 300 a 4000  $\Omega.m$ .

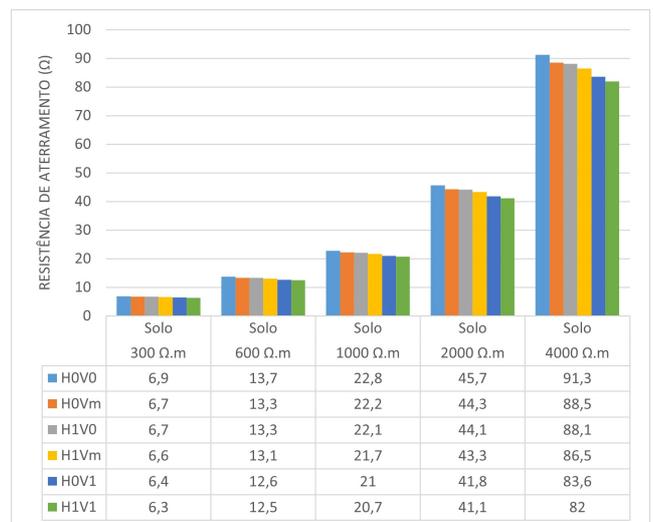


Figura 5. Malha B (15 m X 15 m): Resistências de aterramento em  $\Omega$  sob diferentes situações de encapsulamento de concreto e para solos com 300 a 4000  $\Omega.m$ .

Tabela 3. Malha A: Redução percentual na resistência ( $\Delta R$ ) de cada situação de concretagem em relação à situação de zero concretagem (H0V0). Volume de concreto ( $m^3$ ) para cada situação.

Situação	Vol. de Concreto ( $m^3$ )	$\Delta R$				
		Resistividade do Solo ( $\Omega.m$ )				
		300	600	1000	2000	4000
H0V0	0	-	-	-	-	-
H0Vm	0,34	4%	6%	6%	7%	7%
H1V0	0,92	5%	6%	6%	7%	7%
H1Vm	1,26	8%	9%	10%	10%	10%
H0V1	0,68	12%	14%	15%	16%	16%
H1V1	1,60	14%	16%	17%	18%	18%

Tabela 4. Malha B: Redução percentual na resistência ( $\Delta R$ ) de cada situação de concretagem em relação à situação de zero concretagem (H0V0). Volume de concreto ( $m^3$ ) para cada situação.

Situação	Vol. de Concreto ( $m^3$ )	$\Delta R$				
		Resistividade do Solo ( $\Omega.m$ )				
		300	600	1000	2000	4000
H0V0	0	-	-	-	-	-
H0Vm	1,85	3%	3%	3%	3%	3%
H1V0	6,37	3%	3%	3%	4%	4%
H1Vm	8,22	4%	4%	5%	5%	5%
H0V1	3,69	7%	8%	8%	9%	8%
H1V1	10,07	9%	9%	9%	10%	10%

Um fato importante observado nas Tab. 3 e 4 é que concretar completamente apenas os eletrodos verticais (situação H0V1) fornece a segunda menor resistência de aterramento entre todas as demais configurações (em ambas as malhas e em todos os tipos de solos), abaixo apenas da situação em que toda a malha é totalmente encapsulada (situação H1V1). Mais que isso, a situação H0V1 fornece valores de  $\Delta R$  muito próximos aos fornecidos pela situação H1V1, sendo necessário um volume de concreto muito menor que o utilizado na situação H1V1. Observa-se também que a situação H0V1 é mais favorável que as situações H1V0 e H1Vm, nas quais são utilizadas maior volume de concreto. Para exemplificar, considerando um solo com 1000  $\Omega.m$ , o caso A-H0V1 consome um volume de concreto de 0,68  $m^3$  e fornece um  $\Delta R$  de 14%, já para o caso A-H1V1 consome-se 1,60  $m^3$  de concreto (mais que o dobro de concreto), sendo fornecido um  $\Delta R$  de 16% (ou seja, ganho incremental de apenas 2%). Portanto, um dos resultados importantes deste trabalho é o achado de que a configuração de concretagem H0V1 (eletrodos horizontais sem concreto e hastes verticais totalmente concretadas) possui o melhor custo benefício técnico do ponto de vista da resistência de aterramento, em relação a todas as outras opções de concretagem.

Curiosamente, embora a IEEE Std.80 (2013) não tenha comentários a respeito de qual seria a melhor configuração de concretagem para malhas de aterramento (nem sequer mencione as possibilidades de encapsulamento parcial e total dos eletrodos), a única figura da norma que esboça uma malha concretada trata-se justamente da situação H0V1 (Figura 26 da Seção 14.6 da referida norma), a qual

após as investigações do presente trabalho demonstrou-se o tipo de concretagem com melhor custo-benefício técnico.

Avaliando a Malha B (Tab. 4), nota-se que esse comportamento se repete. Contudo, observa-se uma maior disparidade entre o aumento do volume de concreto e respectivo ganho incremental de  $\Delta R$  entre as situações H0V1 e H1V1. Por exemplo, considerando novamente um solo de 1000  $\Omega.m$ , o caso B-H0V1 requer 3,69  $m^3$  de concreto para fornecer um  $\Delta R$  de 8%. Já para o caso B-H1V1 é requerido 10,07  $m^3$  de concreto (quase o triplo) para ser fornecido um  $\Delta R$  de 9% (o que significa um ganho incremental de 1%).

Pode-se observar nas Tabelas 3 e 4 que, para ambas as malhas, à medida que se tem solos com resistividades maiores, a concretagem do aterramento aumenta levemente o  $\Delta R$ , indicando uma maior eficiência do concreto. Contudo, é evidente que esse fenômeno é mais pronunciado para a Malha A. Por exemplo, o caso A-H1V1 com um solo de 300  $\Omega.m$  fornece um  $\Delta R = 14\%$  e, considerando a mesma situação mas para um solo de 4000  $\Omega.m$  tem-se  $\Delta R = 18\%$ , ou seja, um incremento de 4% em relação ao solo de 300  $\Omega.m$ . Já para a Malha B, o caso B-H1V1 com solo de 300  $\Omega.m$  possui  $\Delta R = 9\%$ , enquanto para um solo de 4000  $\Omega.m$  tem-se  $\Delta R = 10\%$ , ou seja, um incremento de apenas 1% em relação ao solo de baixa resistividade (com 300  $\Omega.m$ ).

Outro comportamento observado foi que as reduções percentuais na resistência de aterramento ( $\Delta R$ ) são maiores para a Malha A que para a Malha B. Isso indica que a concretagem da malha é mais eficiente em malhas menores. Por exemplo, no caso A-H1V1 tem-se  $\Delta R = 18\%$ , enquanto para o caso B-H1V1 obteve-se  $\Delta R = 10\%$ . Esse comportamento foi observado não só para a situação H1V1, mas também para as demais situações.

Avaliando-se os dados da resistência de aterramento (Figuras 4 e 5) fica claro que, considerando-se uma situação de zero concretagem (H0V0), triplicado-se o comprimento do lado da Malha A (5 m x 5 m), o que equivale a multiplicar a área em nove vezes, obteremos a Malha B (15 m x 15 m), a qual fornece valores de resistência com aproximadamente um terço dos valores fornecidos pela Malha A na mesma situação (independentemente da resistividade do solo). Nesse sentido, fica evidente que o aumento da área de uma malha convencional (com zero de concretagem) pode promover reduções no valor da resistência muito mais pronunciadas que a concretagem de toda a malha. Por exemplo, a resistência para o caso A-H0V0 é de 61,1  $\Omega$  enquanto para o caso B-H0V0 é de 22,8  $\Omega$ , ou seja, uma redução de 67% (apenas com o aumento da malha: sem concretagem). Se a Malha A fosse toda concretada (situação A-H1V1) teríamos uma redução de 17% (conforme apresentado na Tabela 3), o que é muito inferior à redução de 67% obtida apenas com o aumento da área da malha. Dessa forma, observa-se que, do ponto de vista da resistência de aterramento, a concretagem da malha é uma alternativa viável quando se possui um terreno confinado, no qual não há espaço para construção de uma malha convencional de tamanho suficiente para obter a resistência de aterramento desejada. Uma situação típica na qual a concretagem da malha é uma alternativa promissora são as Subestações Isoladas

à Gás (GIS), nas quais o terreno disponível é reduzido e deseja-se um aterramento de alta confiabilidade.

Por outro lado, como o projeto de uma malha não depende exclusivamente da resistência de aterramento, mas também dos valores de tensão de passo e de tensão de toque, se faz necessário que trabalhos futuros investiguem as melhorias que a concretagem da malha traz observando-se tais parâmetros.

Vale salientar que, nas Figuras 4 e 5, embora as situações de concretagem tenham sido organizadas em ordem decrescente de resistência, existem duas situações que fogem à essa regra. São os casos A-H0Vm e A-H1V0 para os solos de 2000 e 4000  $\Omega$ .m. Contudo, como a diferença entre as resistências obtidas nessas duas situações é muito pequena (0,3  $\Omega$  para o solo de 2000  $\Omega$ .m e 0,6  $\Omega$  para o solo de 4000  $\Omega$ .m), optou-se por organizar as situações na sequência mais comum à maioria dos dados. Note-se que essas diferenças são tão pequenas que não alteram significativamente as respectivas reduções percentuais (ambas no valor de 7%), apresentadas na Tabela 3.

#### 4. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizada uma análise da resistência de aterramento de malhas encapsuladas por concreto. Nesse sentido, realizou-se uma análise original considerando cinco diferentes situações de encapsulamento, avaliando-se tanto encapsulamentos parciais quanto encapsulamento total da malha. As situações de encapsulamento foram aplicadas a duas malhas de aterramento, a Malha A (5 m x 5 m) e a Malha B (15 m x 15 m), a qual possui nove vezes a área da Malha A. Para cada uma das malhas e para cada situação de encapsulamento, foram considerados solos com 300, 600, 1000, 2000 e 4000  $\Omega$ .m, totalizando 60 simulações. Em todos esses casos foi calculada a redução percentual na resistência de aterramento em relação à situação de zero concretagem.

Os resultados indicaram que a situação de encapsulamento com melhor relação entre volume de concreto usado e redução percentual na resistência de aterramento foi a situação H0V1, ou seja, quando apenas as hastes verticais da malha são encapsuladas por completo (e cabos horizontais sem concreto). Esse tipo de encapsulamento parcial da malha, forneceu valores de resistência menores que outros tipos de encapsulamento que usam mais concreto, como o H1V0 (apenas cabos horizontais concretados) e H1Vm (cabos horizontais concretados e hastes concretadas pela metade). Além disso, a configuração H0V1 usa muito menos concreto que a situação em que toda a malha é concretada (H1V1) e fornece uma redução de resistência de aterramento muito próxima.

Curiosamente, a IEEE Std.80 (2013) não cita as diferentes possibilidades de concretagem parcial e total das malhas de aterramento. Na verdade, na única figura da norma que esboça uma malha concretada é apresentada a situação H0V1, a qual, coincidentemente, é a situação de concretagem mais eficiente, conforme demonstrado no presente trabalho.

Também observou-se que a concretagem da malha tem eficiência reduzida à medida que se aumenta a área da malha. Além disso, o aumento da área da malha, sem utilizar

concreto, consegue fornecer reduções muito maiores que o encapsulamento total da malha. Portanto, isso indica que a técnica de concretagem de malha é viável principalmente para instalações com terreno pequeno, nos quais não é possível construir uma malha grande o suficiente para se obter uma baixa resistência de aterramento. As subestações isoladas a gás (GIS) são um exemplo dessa situação.

Quanto à resistividade do solo, observou-se que a concretagem da malha fornecerá maiores reduções de resistência tanto quanto maior for a resistividade do solo. Contudo, esse aumento de eficiência em relação a resistividade do solo é mais pronunciado para malhas de pequenas dimensões.

Trabalhos futuros devem investigar o efeito que as situações de concretagem estudadas tem na tensão de passo e toque, bem como malhas com hastes mais longas, situação geralmente encontradas em GIS. Além disso, testes devem avaliar a impedância harmônica de malhas encapsuladas por concreto e sua respectiva resposta transitória quando sujeitas a descargas atmosféricas.

#### REFERÊNCIAS

- Androvitsaneas, V.P., Gonos, I.F., and Stathopoulos, I.A. (2014). Transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. In *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. IEEE, Shanghai, China. doi:10.1109/ICLP.2014.6973148.
- Androvitsaneas, V.P., Gonos, I.F., and Stathopoulos, I.A. (2017). Research and applications of ground enhancing compounds in grounding systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(13), 3195–3201. doi:10.1049/iet-gtd.2017.0233.
- Comsol (2017). Comsol multiphysics reference manual. Technical report. URL [https://doc.comsol.com/5.3/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL\\_ReferenceManual.pdf](https://doc.comsol.com/5.3/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf).
- Fagan, E.J. and Lee, R.H. (1970). The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, IGA-6(4), 337–348. doi:10.1109/tiga.1970.4181193.
- He, J., Zeng, R., and Zhang, B. (2013). *Methodology and technology for power system grounding*. John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781118255001.
- IEEE Std.80 (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. doi:10.1109/ieeestd.2000.91902.
- Kindermann, G. and Campagnolo, J.M. (1992). *Aterramento elétrico*. Sagra-DC Luzzatto.
- NBR 15751 (2013). Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos.
- Tronchoni, A.B., Gazzana, D., Dias, G.A., Leborgne, R.C., Bretas, A.S., and Telló, M. (2017). Transient evaluation of grounding encased in concrete: a study based on real measurements in power systems configurations. In *2017 International Conference on Power Systems Transients (IPST)*. Seoul, Republic of Korea.
- Ufer, H.G. (1964). Investigation and testing of footing-type grounding electrodes for electrical installations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83(10), 1042–1048. doi:10.1109/tpas.1964.4765938.