

Software

TecAt Plus 6

Oficina de Mydia / Volts and Bolts

NBR 7117:2011

Revisão dos Exemplos - anexo B

Ed. Preliminar (incompleta) - 13/03/2016

Introdução

Em atenção a consultas de usuários, apresentamos aqui uma revisão dos exemplos da NBR 7117:2011, norma brasileira de medição de resistividade e estratificação do solo.

A questão é que a norma traz alguns exemplos cujos resultados diferem dos calculados com o **TecAt**; a resposta “curta” é que os métodos computacionais do **TecAt** são muito mais precisos que os métodos gráficos e manuais apresentados na referida norma.

Resposta “longa” - para demonstrar a maior precisão do **TecAt**, temos duas ferramentas:

1. o **TecAt** apresenta as diferenças - ou desvios - ponto a ponto com a medição, ou seja, para cada afastamento da planilha do terrômetro, o programa fornece o ponto correspondente na curva encontrada e o desvio percentual, sendo fornecido também a média RMS dos desvios da planilha toda.
2. como os métodos da norma não possuem essa função, usaremos o procedimento “**Resistividade - Inverso**” do **TecAt**, que, dadas as medições e uma estratificação - encontrada pelo método manual ou por outro software, calcula os tais desvios em cada ponto, permitindo assim a comparação direta dos métodos.

E qual a consequência dessas diferenças de precisão? Para verificar isso, vamos calcular a resistência de uma malha simples e, para uma malha complexa de subestação, vamos calcular a resistência e os potenciais de toque e passo; para uma melhor comparação, os cálculos de resistência e potencial serão efetuados aqui com o **TecAt** - no livro “**Malhas de Terra**” já demonstramos os problemas de precisão dos métodos manuais de cálculo de resistência e potenciais da norma IEEE-80, utilizado também na NBR-

1. Exemplo 1 do anexo B, item B.1 da NBR 7117:2011

1.1 - Planilha de medições

A tabela fornecida tem os valores de resistividade calculados pela fórmula simplificada ($\rho = 2 \times \pi \times R \times a$):

Medições:

espaçamento
[m]

linhas de medição:
[Ohm.m]

a	A	B	C	D	E	F	G	H
2,00	3389,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	1900,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	585,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,00	568,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32,00	823,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

1.2 - Método “simplificado” da NBR 7117:2011 (anexo A)

Segundo a norma, temos:

$$\rho_1 = 3550 \text{ Ohm.m}$$

$$h_1 = 3,1 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 630 \text{ Ohm.m}$$

1.3 - Cálculo da estratificação pelo TecAt 6 em duas camadas

Resultado:

N° de camadas: 2

camada #1: 5088,58 [Ohm.m] x 1,87 [m]

camada #2: 576,21 [Ohm.m] x

Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

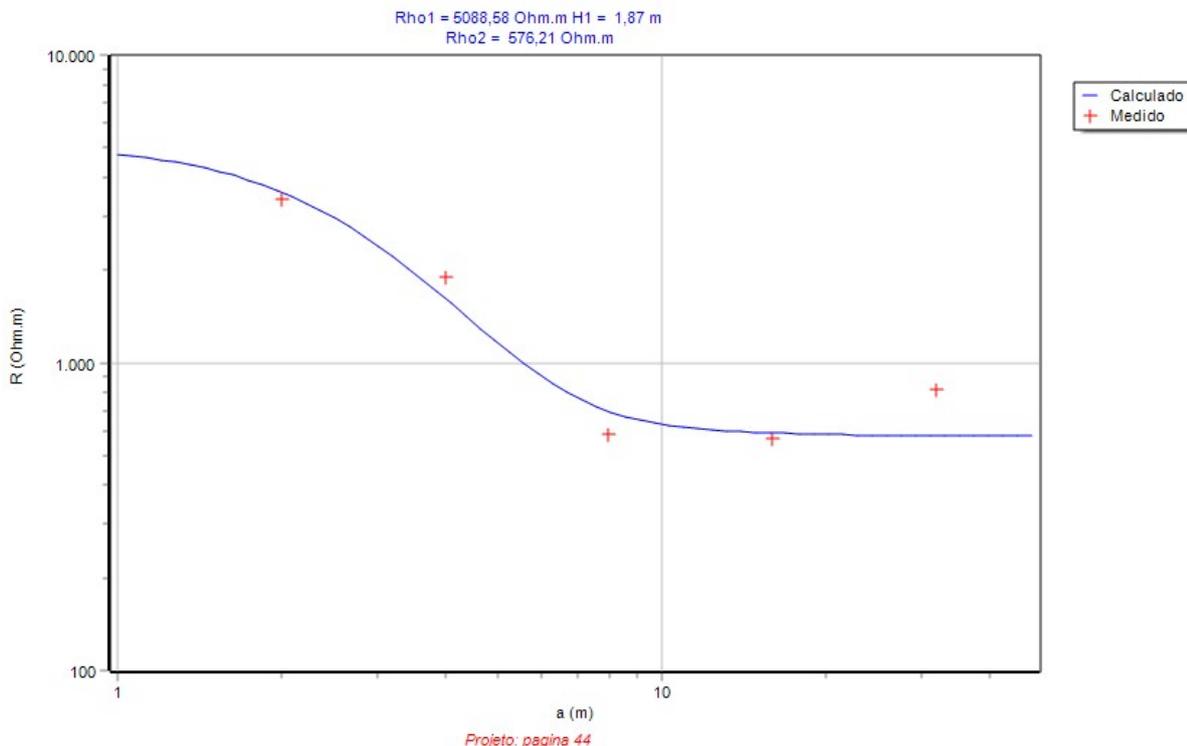
espaçamento [m]	medida [Ohm.m]	calculada [Ohm.m]	desvio %
2,00	3389,00	3594,21	-6,06
4,00	1900,00	1620,97	14,69
8,00	585,00	696,46	-19,05
16,00	568,00	591,42	-4,12
32,00	823,00	579,69	29,56

erro > 20% - recomendável utilizar modelo de 3 ou 4 camadas

erro RMS = 17 %

erro RMS > 15% - recomendável utilizar modelo de 3 ou 4 camadas

Notar que a resistividade calculada para o afastamento 32m tem desvio de 29%, portanto acima dos 20% máximos recomendado, então o TecAt já avisa que seria melhor utilizar uma estratificação em 3 ou 4 camadas; isso pode ser comprovado no erro RMS acima de 15%, ou seja, não é só um ponto que não se ajusta bem ao modelo de 2 camadas, mas todo o conjunto.



No gráfico, podemos visualizar como os pontos medidos (em vermelho) 2 e 16m estão bem próximos à curva (azul) calculada, os pontos 4 e 8m um pouco afastados e o ponto 32m está bem afastado (notar que a escala é logarítmica).

1.4 - Cálculo da estratificação pelo TecAt 6 em três camadas

Resultado:

N° de camadas: 3

camada #1: 4089,13 [Ohm.m] x 2,7 [m]

camada #2: 48,46 [Ohm.m] x 1,2 [m]

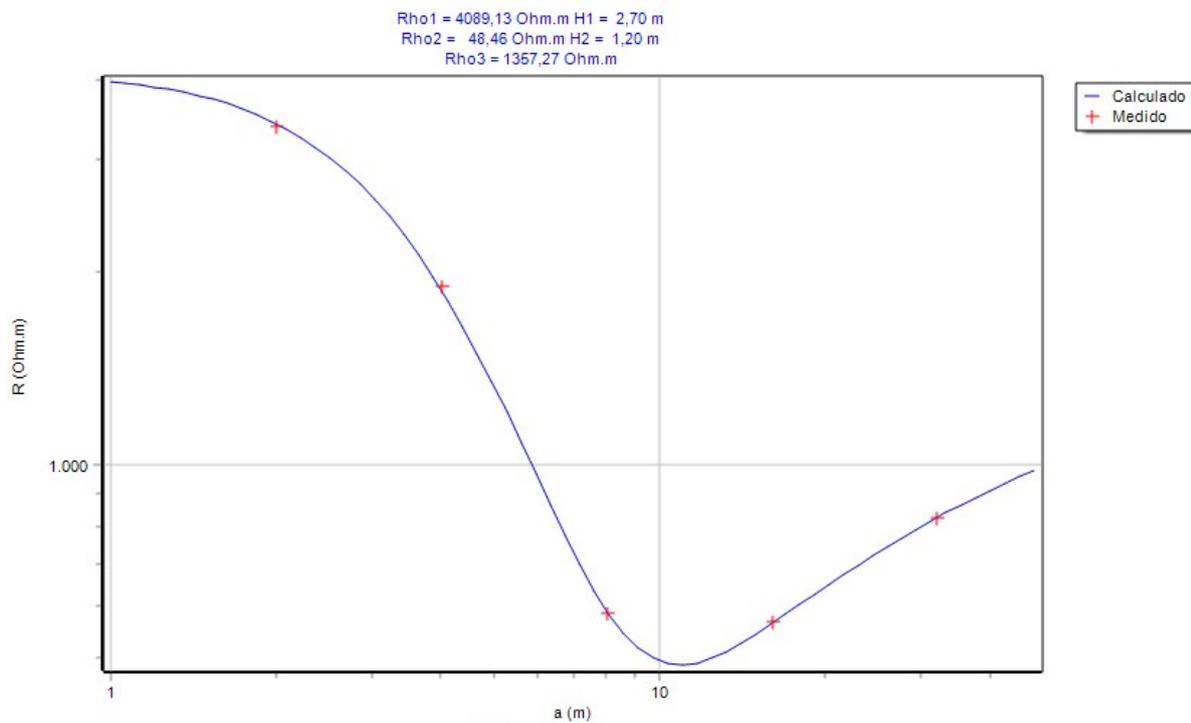
camada #3: 1357,27 [Ohm.m] x

Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

espaçamento	medida	calculada	desvio
[m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	%
2,00	3389,00	3416,86	-0,82
4,00	1900,00	1874,42	1,35
8,00	585,00	590,45	-0,93
16,00	568,00	563,74	0,75
32,00	823,00	825,48	-0,30

erro RMS = 1 %

O ajuste é praticamente perfeito, com desvios abaixo de 1%; no gráfico, a curva de 3 camadas encontrada passa quase exatamente sobre os pontos medidos:



1.5 - Verificação da estratificação da norma

Rodando o cálculo Resistividade - Inverso, temos:

Resultado:

N° de camadas: 2

camada #1: 3550 [Ohm.m] x 3,1 [m]

camada #2: 630 [Ohm.m] x

Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

espaçamento	medida	calculada	desvio
[m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	%
2,00	3389,00	3226,48	4,80
4,00	1900,00	2294,48	-20,76
8,00	585,00	1105,38	-88,95

erro > 20% - acima do admissível

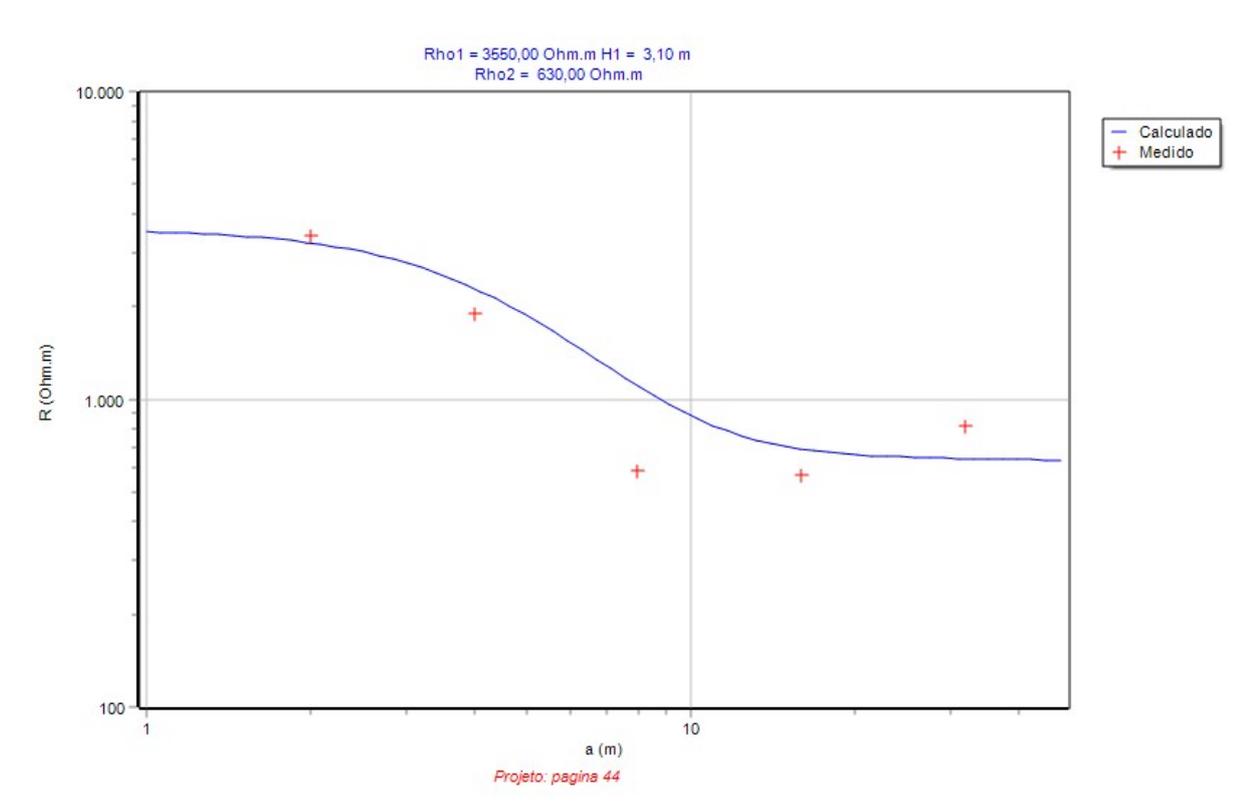
erro > 20% - acima do admissível

```

16,00    568,00    690,07    -21,49
erro > 20% - acima do admissível
32,00    823,00    640,72    22,15
erro > 20% - acima do admissível
erro RMS = 43 %
erro RMS > 15% - acima do admissível

```

Verifica-se aqui que, embora a aparência geral da curva seja semelhante, 4 das 5 medidas estão acima dos 20% de desvio, com uma delas acima de 88%, resultando num erro RMS do conjunto de 43%.



1.6 - Resistência de uma malha em anel típica de edifícios ou indústrias

Supondo um anel retangular de 20 x 30 m, com profundidade 0,5 m, com 4 hastes de 3 m de comprimento com a cabeça na superfície (profundidade = 0):

1.6.1 - Resistência com os resultados da norma: 51 Ω

1.6.2 - Resistência com os resultados do TecAt em 2 camadas: 45 Ω

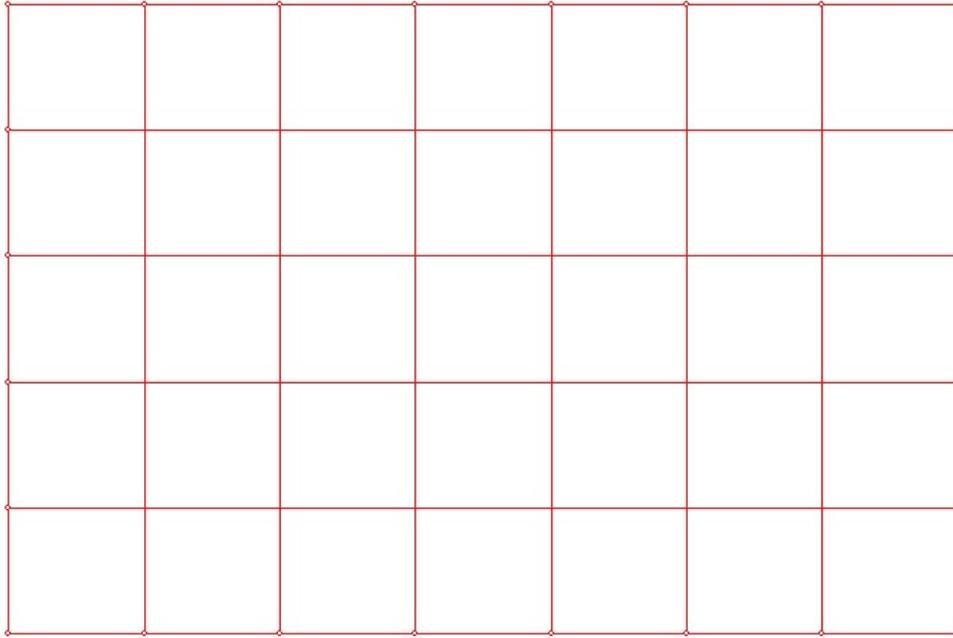
1.6.3 - Resistência com os resultados do TecAt em 3 camadas: 25 Ω

1.7 - Resistência e potencial de toque de uma malha típica de subestação

Obs: não vamos fazer um cálculo completo da malha de uma subestação (veja o tutorial que temos disponível sobre isso e o livro Malhas de Terra), apenas alguns cálculos para comparar as diferentes estratificações.

Supondo a seguinte malha, também de 20 x 30 m porém com diversos cabos e hastes:

y↑



→
x

1.7.1 - Resistência com 3 camadas:

N° de camadas: 3
camada #1: 4089,13 [Ohm.m] x 2,7 [m]
camada #2: 48,46 [Ohm.m] x 1,2 [m]
camada #3: 1357,27 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,016 s
Resistência da Malha [Ohm] = 9,98
Máximo potencial da Malha [V] = 19955,19

1.7.2 - Resistência com 2 camadas, estratificação do TecAt:

N° de camadas: 2
camada #1: 5088,58 [Ohm.m] x 1,87 [m]
camada #2: 576,21 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,016 s
Resistência da Malha [Ohm] = 15,38
Máximo potencial da Malha [V] = 30767,30

1.7.3 - Resistência com 2 camadas, estratificação da NBR 7117:

N° de camadas: 2
camada #1: 3550 [Ohm.m] x 3,1 [m]
camada #2: 630 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,000 s
Resistência da Malha [Ohm] = 20,78
Máximo potencial da Malha [V] = 41563,75

1.8 - Comparação dos resultados e comentários

1.8.1 - Anel retangular com 4 hastes:

Considerando que o ajuste em 3 camadas é o correto (erro abaixo de 1%), vemos um resultado típico de tentar forçar um modelo de 2 camadas num solo de 3 camadas: se a curva cai e depois sobe (como neste exemplo), o cálculo em 2 camadas é pessimista e a malha resultante ficará mais cara que o necessário - já no caso onde a curva sobe e depois desce, o resultado seria oposto, com a malha subdimensionada (otimista).

Quando rodamos o TecAt com 2 camadas, ele informa os desvios e avisa que (neste caso específico) está acima do limite tolerável, daí basta rodar com 3 camadas e obtemos o resultado correto; já o método manual não oferece nenhuma resposta (feedback) para o projetista saber se e quanto está errado.

1.8.2 - Malha de subestação, resistência:

Como esperado, o resultado relativo é semelhante ao do anel simples: 10 Ohm para o cálculo correto em 3 camadas, 15 para o cálculo com a estratificação em 2 camadas do TecAt e 21 Ohm para a estratificação da NBR 7117.

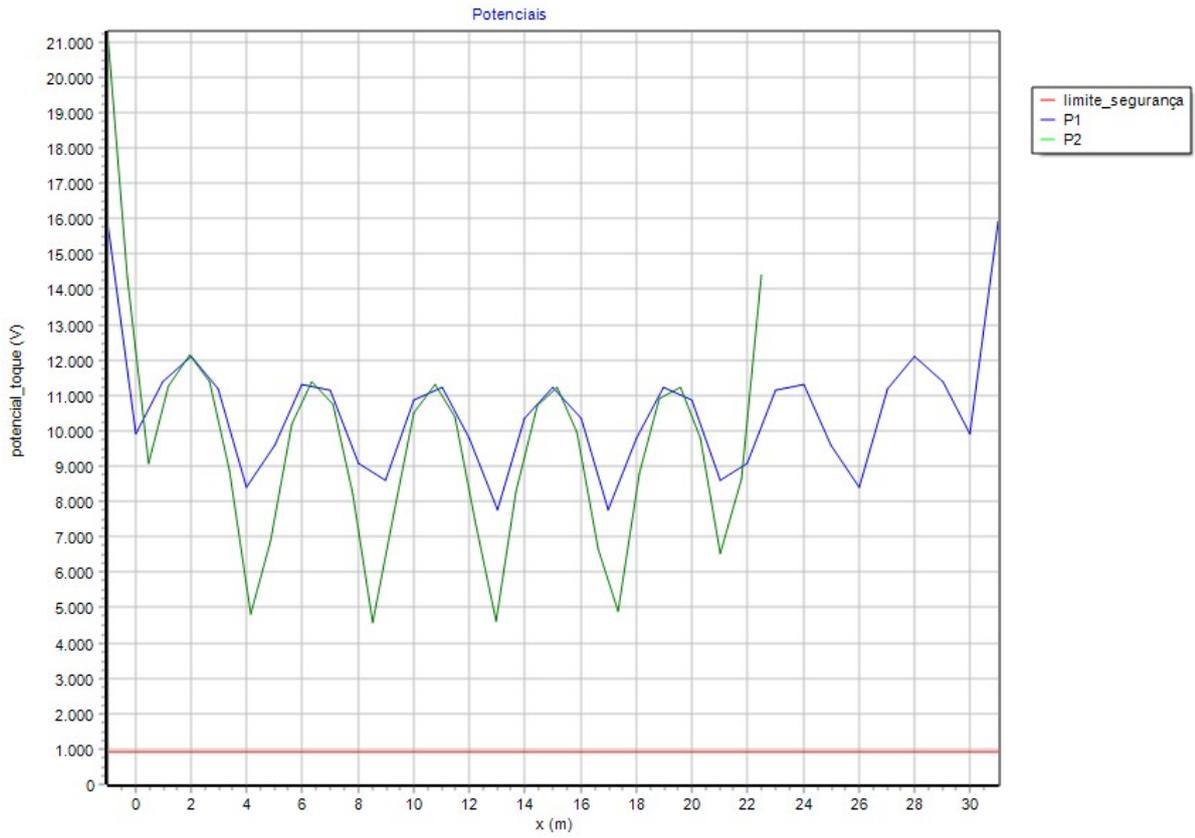
1.8.3 - Malha de subestação, potencial de toque:

Para uma mesma corrente de malha (corrente de curto ajustada), a GPR (máximo potencial de malha) é diretamente proporcionais à resistência da malha (lei de Ohm); estipulando uma corrente de 2 kA para exemplificar, temos, para os 3 casos, uma GPR (máximo potencial de malha) de 20 kV, 31 kV e 42 kV.

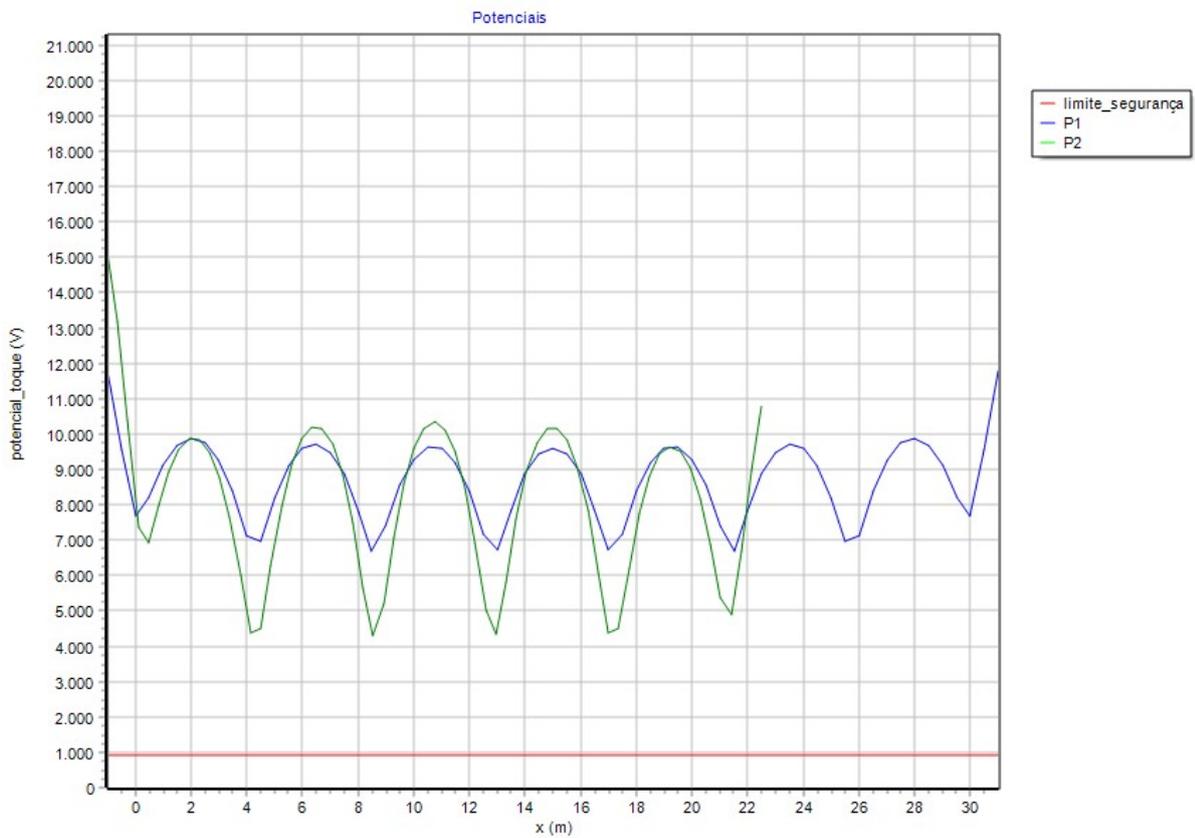
Isso significa que, ao usar a estratificação da norma, teríamos que colocar um número muito maior de eletrodos do que o necessário, com custo e prazo da malha também bem maiores, somente para, no ensaio de comissionamento, descobrir que a malha está superdimensionada! Lembrando sempre que estamos usando esses dados propostos na norma, cada solo terá um comportamento diferente, em outro local pode ser que a norma acerte ou forneça um resultado otimista, este é o conceito de precisão, ou seja, chegar o mais próximo possível da realidade.

Voltando ao nosso caso exemplo, não somente a GPR é menor, como o comportamento das distribuições de potenciais é diferente no caso das 3 camadas, então a GPR é diretamente proporcional à resistência, porém os potenciais de toque ou passo vão apresentar curvas diferentes; ao calcularmos os potenciais de toque ao longo de uma linha típica temos os resultados a seguir.

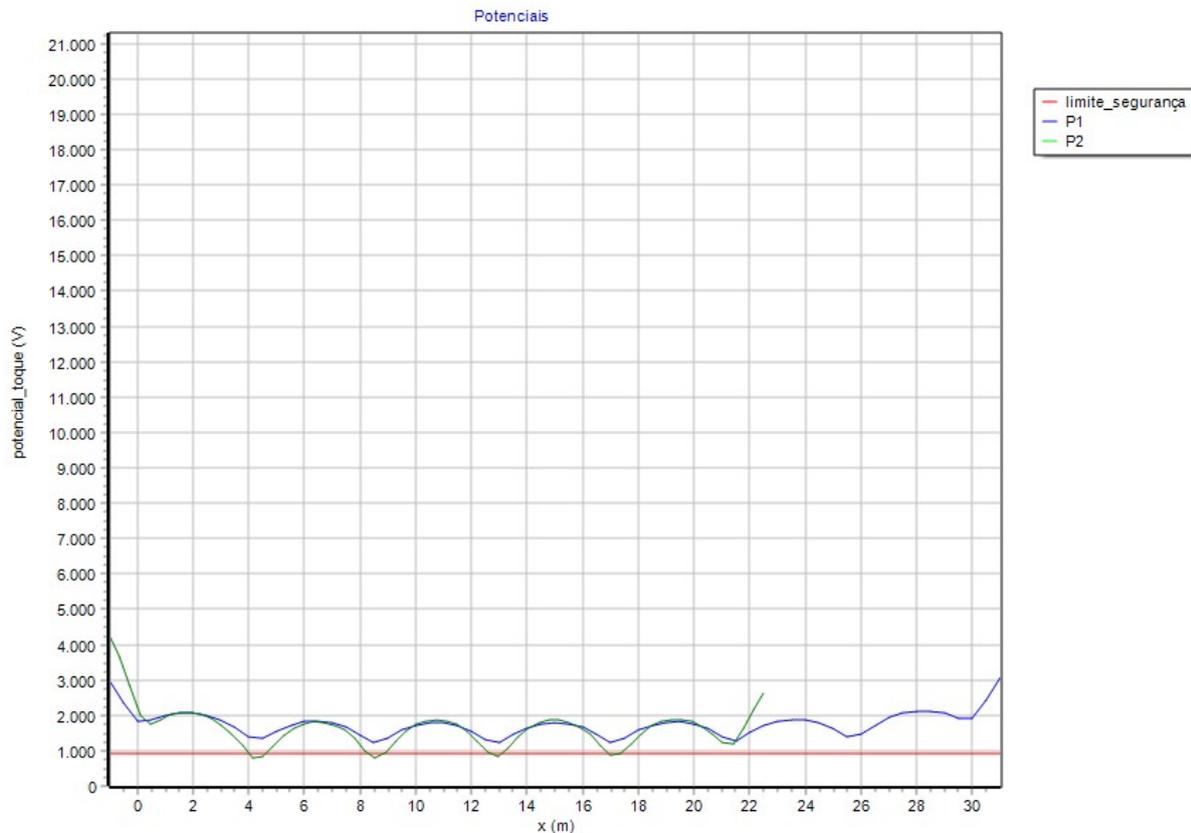
Com a estratificação da NBR:



Com a estratificação em 2 camadas do TecAt:



Com a estratificação em 3 camadas:



Os potenciais de toque ainda estão acima do admissível, porém já bem mais baixos.

2. Exemplo 2, anexo B, item B.2

2.1 - Planilha de medições

É apresentada a tabela em resistência e em resistividade, porém, como não foi fornecida a profundidade de cravação dos eletrodos, não é possível utilizar as medições em resistência e a formulação completa, assim, a tabela fornecida tem os valores de resistividade calculados pela fórmula simplificada ($\rho = 2 \times \pi \times R \times a$):

Medições:		linhas de medição:							
espaçamento		A	B	C	D	E	F	G	H
[m]	a	[Ohm.m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]
2,00	680,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	840,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	930,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,00	690,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32,00	330,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.2 - Método gráfico de curvas-padrão e auxiliar da NBR 7117:2011 (anexo A)

Segundo a norma, temos:

$$\rho_1 = 340 \text{ Ohm.m}$$

$$h_1 = 0,69 \text{ m}$$

$\rho_2 = 1020 \text{ Ohm.m}$
 $h_2 = 14,31 \text{ m}$
 $\rho_3 = 150 \text{ Ohm.m}$

2.3 - Cálculo da estratificação pelo TecAt 6 em três camadas

Resultado:

N° de camadas: 3

camada #1: 594,2 [Ohm.m] x 2,07 [m]

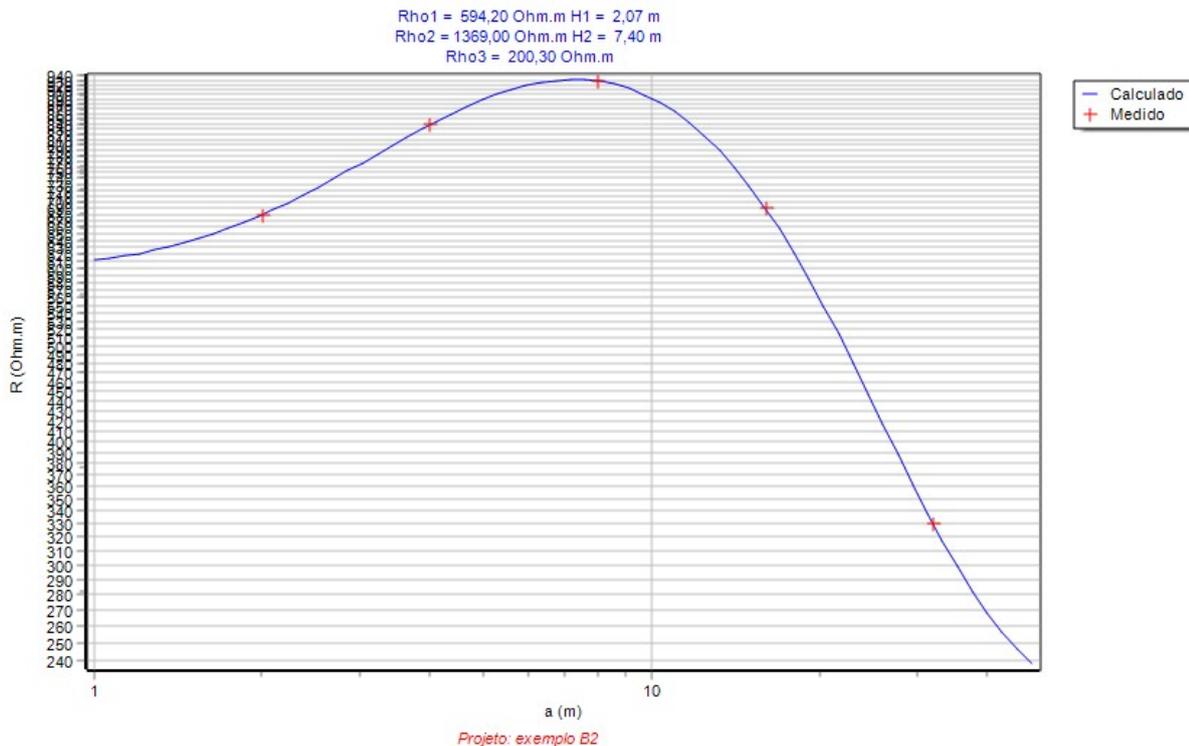
camada #2: 1369 [Ohm.m] x 7,4 [m]

camada #3: 200,3 [Ohm.m] x

Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

espaçamento [m]	medida [Ohm.m]	calculada [Ohm.m]	desvio %
2,00	680,00	679,48	0,08
4,00	840,00	838,95	0,12
8,00	930,00	928,65	0,15
16,00	690,00	688,89	0,16
32,00	330,00	329,74	0,08

erro RMS = 0 %



Novamente um solo de 3 camadas; estratificando em duas camadas com o **TecAt** obtivemos um resultado aceitável, mas já com perda de precisão: 11% de desvio RMS. Como a estratificação da norma resultou em 3 camadas, vamos utilizar a estratificação do **TecAt** também em 3 camadas para comparação.

2.4 - Verificação da estratificação da norma

Resultado:

N° de camadas: 3

camada #1: 340 [Ohm.m] x 0,69 [m]

camada #2: 1020 [Ohm.m] x 14,31 [m]

camada #3: 150 [Ohm.m] x

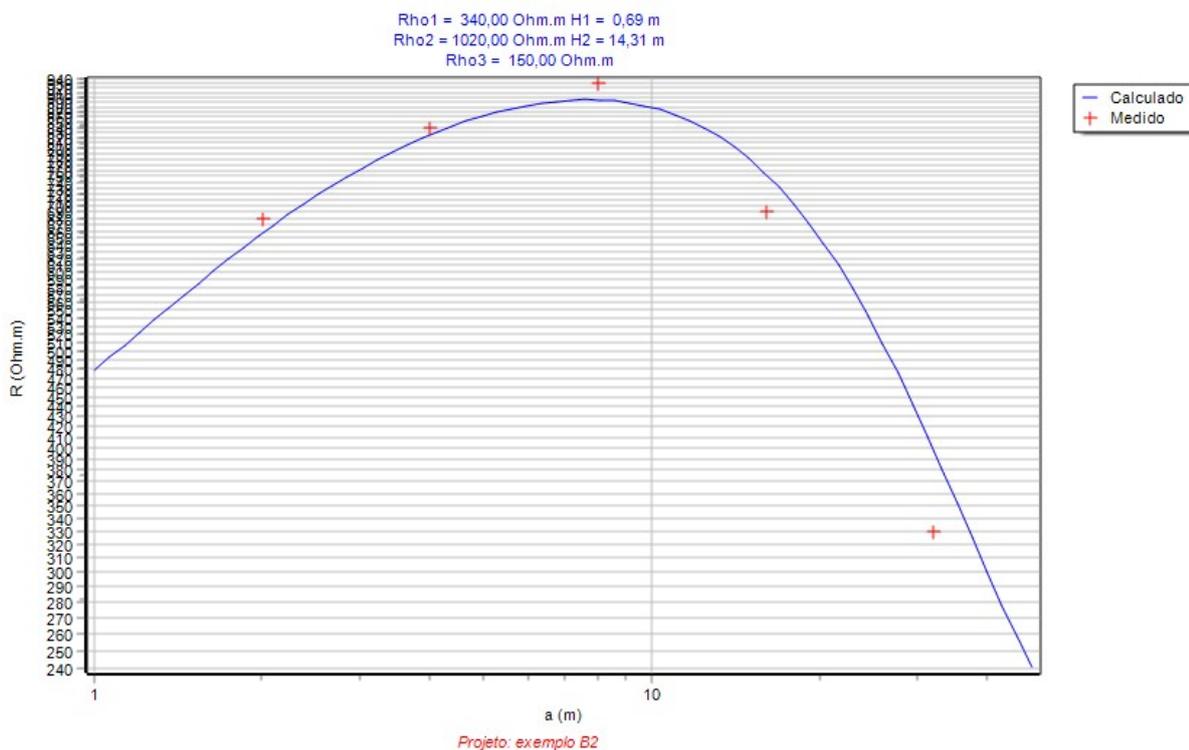
Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

espaçamento [m]	medida [Ohm.m]	calculada [Ohm.m]	desvio %
2,00	680,00	657,53	3,30
4,00	840,00	825,13	1,77
8,00	930,00	894,90	3,77
16,00	690,00	753,94	-9,27
32,00	330,00	398,24	-20,68

erro > 20% - acima do admissível

erro RMS = 10 %

Embora menor que no primeiro exemplo, o desvio aqui - 10% no conjunto e acima de 20% em uma das medidas - está relativamente aceitável, comparável à estratificação em duas camadas do TecAt (veja acima).



2.5 - Resistência de uma malha em anel típica de edifícios ou indústrias

2.5.1 - Estratificação da NBR 7117: 13,3 Ohm

2.5.2 - Estratificação do TecAt: 14,9 Ohm

2.6 - Resistência e potencial de toque de uma malha típica de subestação

2.6.1 - Estratificação da NBR 7117:

N° de camadas: 3

camada #1: 340 [Ohm.m] x 0,69 [m]

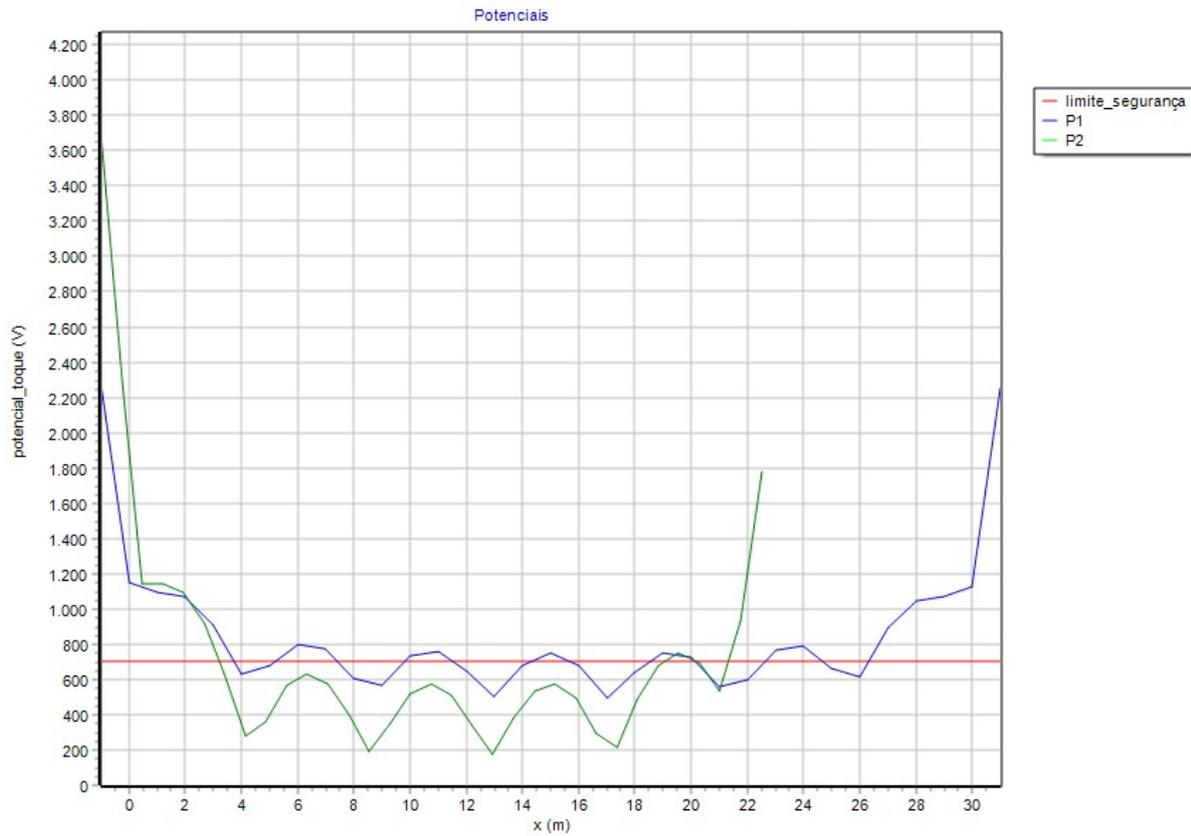
camada #2: 1020 [Ohm.m] x 14,31 [m]

camada #3: 150 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,015 s

Resistência da Malha [Ohm] = 10,47

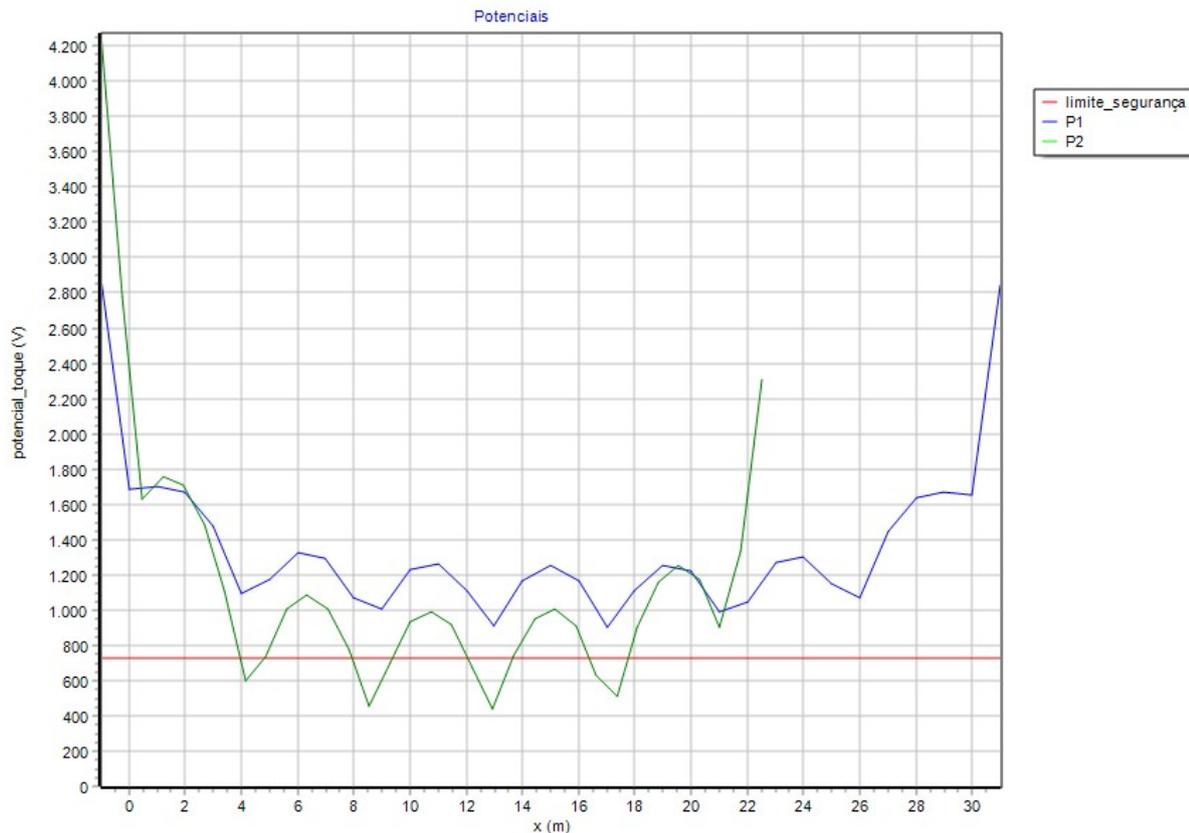
Máximo potencial da Malha [V] = 10472,26



2.6.2 - Estratificação do TecAt:

N° de camadas: 3
 camada #1: 594,2 [Ohm.m] x 2,07 [m]
 camada #2: 1369 [Ohm.m] x 7,4 [m]
 camada #3: 200,3 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,015 s
 Resistência da Malha [Ohm] = 10,88
 Máximo potencial da Malha [V] = 10884,35



2.7 - Comparação dos resultados e comentários

2.7.1 - Anel retangular:

A diferença de 10,7% no valor da resistência pode ser aceitável dependendo da finalidade da malha - por exemplo para o aterramento da baixa tensão e spda de um prédio residencial.

2.7.2 - Malha de subestação:

Neste caso temos o contrário do primeiro exemplo: a estratificação da norma gera um cálculo muito otimista, ou seja, se prosseguirmos o dimensionamento da malha até o potencial de toque baixar para o limite tolerável, se construirmos a malha e formos realizar o ensaio de comissionamento, o potencial estará acima do tolerável, obrigando a improvisar a instalação de mais cabos e hastes.

Assim, embora a diferença das resistências seja pequena - 10,47 x 10,88 Ohm - os potenciais são significativamente diferentes: por exemplo, no centro do primeiro mesh (coordenada $x = 1$, $y = 2$), temos 1700 V ao invés de 1150 V.

3. Exemplo 3, anexo B, item B.3

3.1 - Planilha de medições

É apresentada a tabela em resistência e em resistividade, porém, como não foi fornecida a profundidade de cravação dos eletrodos, não é possível utilizar as medições em resistência e a formulação completa, assim, a tabela fornecida tem os valores de resistividade calculados pela fórmula simplificada ($\rho = 2 \times \pi \times R \times a$):

Medições:		linhas de medição:							
espaçamento									
[m]									
a	A	B	C	D	E	F	G	H	
1,00	11938,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	15770,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	17341,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	11058,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,00	5026,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32,00	3820,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

3.2 - Método de Pirson da NBR 7117:2011 (anexo A)

Segundo a norma, temos 5 camadas:

$$\rho_1 = 8600 \text{ Ohm.m}$$

$$h_1 = 0,64 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 21575 \text{ Ohm.m}$$

$$h_2 = 0,29 \text{ m}$$

$$\rho_3 = 19146 \text{ Ohm.m}$$

$$h_3 = 3,47 \text{ m}$$

$$\rho_4 = 4460 \text{ Ohm.m}$$

$$h_4 = 7,4 \text{ m}$$

$$\rho_5 = 3151 \text{ Ohm.m}$$

Observar que é muito raro um solo que realmente necessite de 5 camadas.

3.4 - Cálculo da estratificação pelo TecAt 6 em três camadas

Resultado:

N° de camadas: 3

camada #1: 10138,8 [Ohm.m] x 1,16 [m]

camada #2: 57197,73 [Ohm.m] x 1,32 [m]

camada #3: 3650,77 [Ohm.m] x

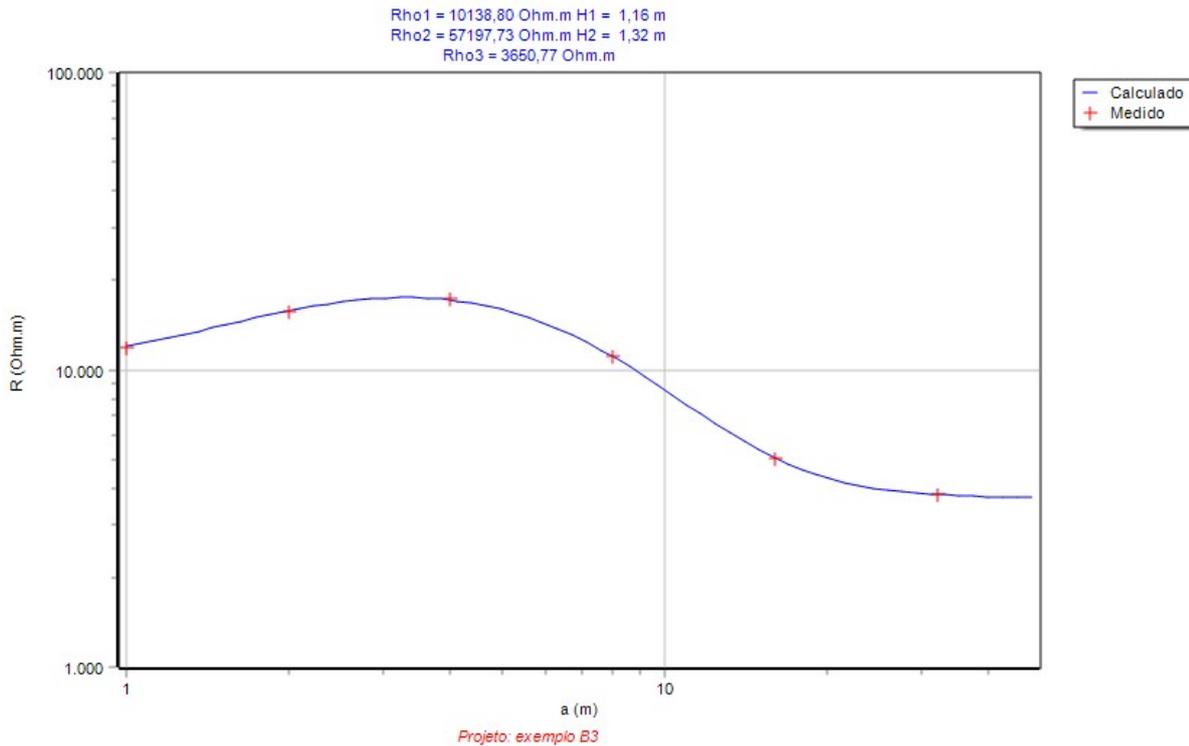
Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

espaçamento	medida	calculada	desvio
[m]	[Ohm.m]	[Ohm.m]	%
1,00	11938,00	12039,39	-0,85
2,00	15770,00	15785,48	-0,10
4,00	17341,00	17172,71	0,97
8,00	11058,00	11065,71	-0,07
16,00	5026,00	5055,15	-0,58
32,00	3820,00	3806,74	0,35

erro RMS = 1 %

A estratificação em 3 camadas já apresenta um resultado quase exato, com desvios sempre abaixo de 1% e desvio RMS também de 1%.

Graficamente, é possível visualizar o bom ajuste da curva já para uma estratificação com 3 camadas:



3.5 - Cálculo da estratificação pelo TecAt 6 em quatro camadas

Rodando o **TecAt** com 4 camadas para conferir o resultado:

Resultado:

N° de camadas: 4

camada #1: 10127,25 [Ohm.m] x 1,17 [m]

camada #2: 63513,12 [Ohm.m] x 1,19 [m]

camada #3: 3640,43 [Ohm.m] x 31,99 [m]

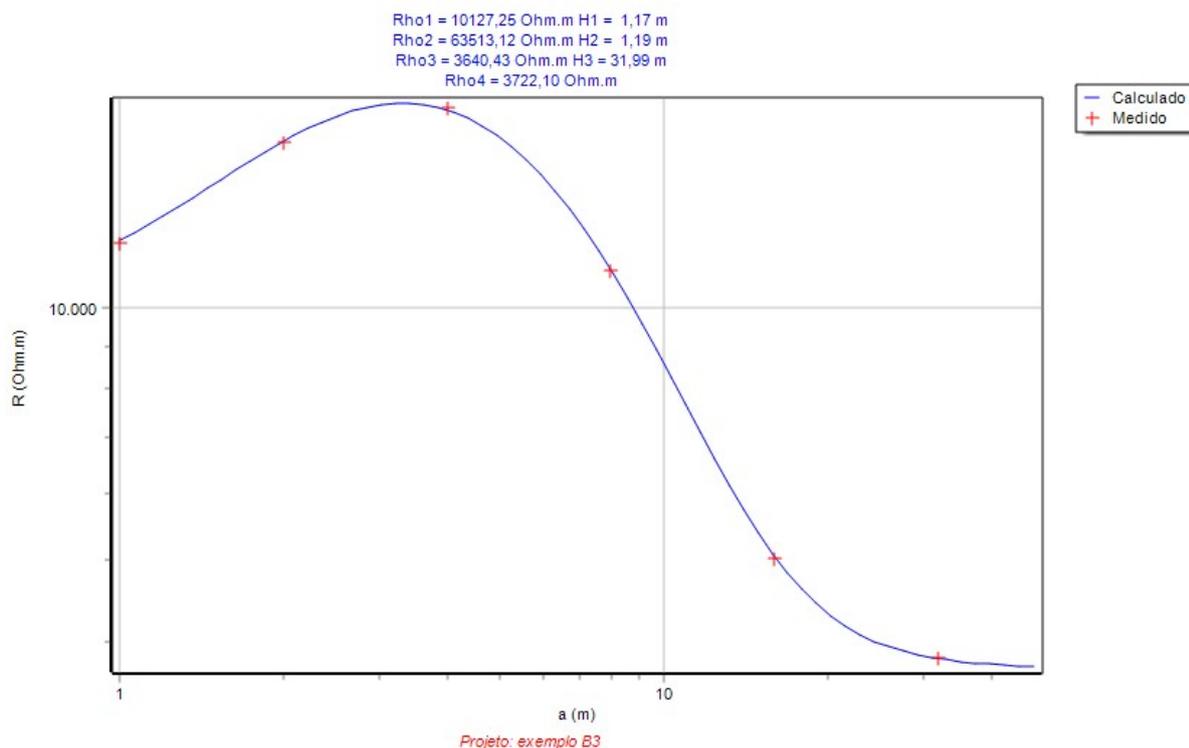
camada #4: 3722,1 [Ohm.m] x

Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

espaçamento [m]	medida [Ohm.m]	calculada [Ohm.m]	desvio %
1,00	11938,00	12020,91	-0,69
2,00	15770,00	15786,09	-0,10
4,00	17341,00	17202,02	0,80
8,00	11058,00	11086,00	-0,25
16,00	5026,00	5051,69	-0,51
32,00	3820,00	3810,26	0,25

erro RMS = 1 %

Como previsto, não há vantagem em passar de 3 para 4 camadas; notar que, nesses casos, sempre é interessante trabalhar com o número menor de camadas, pois geralmente os cálculos da resistência e dos potenciais será mais rápido.



3.6 - Verificação da estratificação da norma

Como o **TecAt** possui estratificação em até 4 camadas, não foi possível verificar o ajuste do resultado da norma em 5 camadas, porém notar que:

- Com três camadas já se atinge um resultado totalmente satisfatório, não são necessárias 4 ou 5 camadas
- Com os seis espaçamentos da amostra, não é possível, matematicamente, encontrar os 5 pontos de inflexão da curva, ou seja, há uma falha conceitual no exemplo da norma

4. Observações

4.1 - escalas dos gráficos dos exemplos da NBR 7117

Os gráficos de resistividade em função do afastamento são plotados em escala linear ou monolog, enquanto o padrão utilizado no mundo todo é o log-log, ou seja, $\log(\text{resistividade})$ em função do $\log(\text{afastamento})$; a plotagem log-log permite uma visualização muito melhor, por isso é a utilizada no software **TecAt**, além de ser a indicada na própria norma para o método das curvas padrão (que sempre se encontram em escala log-log).

4.2 - utilização da fórmula simplificada

A fórmula simplificada ($\rho = 2 \times \pi \times R \times a$) produz erros desnecessários quando o afastamento é menor que 10 vezes (aproximadamente) a profundidade de cravação dos eletrodos do terrômetro; a norma traz também a fórmula completa

4.3 - número de camadas

A priori, não se sabe em quantas camadas a estratificação do solo vai se ajustar; como pode ser visto no item (2), se 3 camadas já produzem um ajuste satisfatório, não há necessidade de refazer o cálculo para 4 camadas - o problema de um maior número de camadas vai aparecer na hora de calcular a resistência da malha - e, se for o caso de malha para subestações, no cálculo dos potenciais de toque e passo. Como mencionado, o **TecAt** trabalha com até 4 camadas; a maioria dos softwares trabalha com apenas duas camadas e somente o Malt, em sua versão mais cara, trabalha com 5 camadas.

Em geral, para solos reais em aplicações reais, uma camada é inaceitável, duas camadas são aceitáveis para malhas pequenas a médias usadas para baixa-tensão, telecomunicações, distribuição em media-tensão, proteção contra raios, etc. Porém, para malhas grandes e para malhas de subestações, ou onde o solo claramente não se ajuste dentro dos 15% na média de desvios RMS, é necessário utilizar 3 ou 4 camadas para obter a precisão necessária.

* * *

Officina de Mydia / Volts and Bolts

www.mydia.com
vendas@mydia.com