

POLITECNICO DI TORINO

Elettromagnetismo Applicato



Tesina

Campi di Corrente

Gruppo 2

Componenti

Alex Aiello 336698

Eduardo Cipolletta 346566

Andrea Campanella 286921

Anno Accademico 2024-2025

Indice

1	Esercizio 1: Dispersore sferico immerso in terreno omogeneo	3
1.1	Dati	3
1.2	Modello	4
1.3	Richieste	4
1.3.1	Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica	4
1.3.2	Andamento delle grandezze	5
1.3.3	Analisi delle mappe cromatiche	7
1.3.4	Verifica tensione tra punti	9
2	Esercizio 2: Dispersore emisferico immerso in terreno omogeneo	10
2.1	Dati	10
2.2	Modello	10
2.3	Verifiche	13
2.3.1	Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica	13
2.3.2	Andamento delle grandezze	14
2.3.3	Analisi delle mappe cromatiche	15
2.3.4	Verifica tensione di passo	17
3	Esercizio 3: Dispersore emisferico immerso in terreno non omogeneo (doppio strato).	19
3.1	Dati	19
3.2	Modello	20
3.3	Verifiche	20
3.3.1	Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica	20
3.3.2	Andamento delle grandezze	21
3.3.3	Analisi delle mappe cromatiche	23
3.3.4	Verifica tensione di passo	24
4	Esercizio 4: Dispersore a picchetto in terreno omogeneo	26
4.1	Dati	26
4.2	Modello	27
4.3	Richieste	28

4.3.1	Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica	28
4.3.2	Andamento delle grandezze	29
4.3.3	Analisi delle mappe cromatiche	32
4.3.4	Verifica tensione tra punti	34
4.3.5	Codice MATLAB per il calcolo dei valori	36
5	Esercizio 5: Dispersore a picchetto affiorante in terreno omogeneo	37
5.1	Dati	37
5.2	Modello	38
5.3	Richieste	38
5.3.1	Valore della resistenza del conduttore e confronto con formula analitica	38
5.3.2	Andamento delle grandezze	39
5.3.3	Analisi della mappe cromatiche	41
5.3.4	Verifica della tensione di passo	43

Capitolo 1

Esercizio 1: Dispersore sferico immerso in terreno omogeneo

1.1 Dati

- Raggio dispersore: $R_0 = 0.5 * (1 + \frac{2}{20}) = 0.55m$
- Resistività del terreno: $\rho = 100 \frac{\Omega}{m}$
- Corrente dispersa: $I = 1 * (1 + \frac{2}{20}) = 1.1A$
- Raggio del terreno analizzato: $R_e = 10m$
- Potenziale su R_e : $V_{ext} = 0$

1.2 Modello

Il modello FEMM di tipo assialsimmetrico è riportato di seguito.

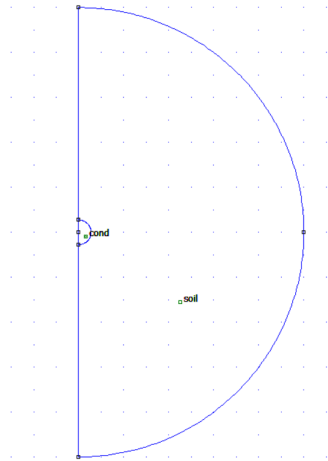


Figura 1.1: Modello FEMM dispersore sferico immerso in terreno omogeneo

Per l'analisi è stata impostata una mesh nel conduttore di 0.005m e nel suolo di 0.1m.

1.3 Richieste

1.3.1 Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica

Per prima cosa si esegue il modello con l'opportuna mesh; dopodiché si calcola il valore di resistenza del conduttore attraverso l'apposita funzione FEMM.

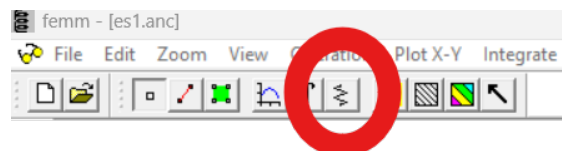


Figura 1.2: Icona per calcolo resistenza

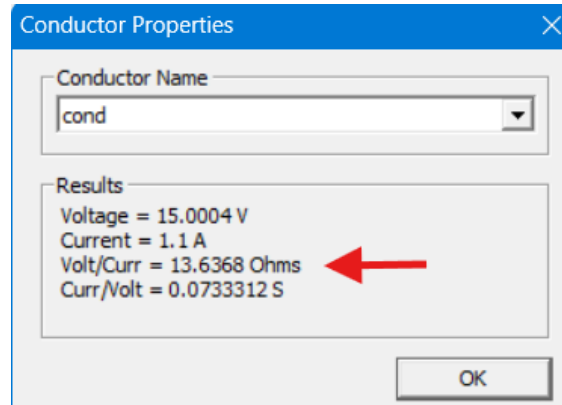


Figura 1.3: Valore resistenza conduttore

A questo punto, è necessario confrontare tale valore con quello ricavato tramite la formula analitica di un dispersore sferico:

Calcolo della resistenza:

$$R_t = \frac{\rho}{4\pi R_0} = 14.4686\Omega \quad (1.1)$$

Il risultato proveniente dalla simulazione differisce da quello trovato per via analitica a causa della ristrettezza del dominio considerato (se avessimo scelto R_e tendente all'infinito avremmo ottenuto un valore molto più vicino a quello previsto). È comunque da ritenersi verificata la fedeltà del modello. L'errore percentuale che otteniamo è

$$\epsilon = \frac{|14.4686 - 13.6368|}{|14.4686|} \approx 5.75\% \quad (1.2)$$

1.3.2 Andamento delle grandezze

Ci si aspetta che all'interno del conduttore il potenziale V sia costante, mentre campo elettrico E e densità di corrente J nulle. All'esterno del conduttore, invece il potenziale decresce in modo inversamente proporzionale al raggio e le altre due grandezze in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal centro del dispersore.

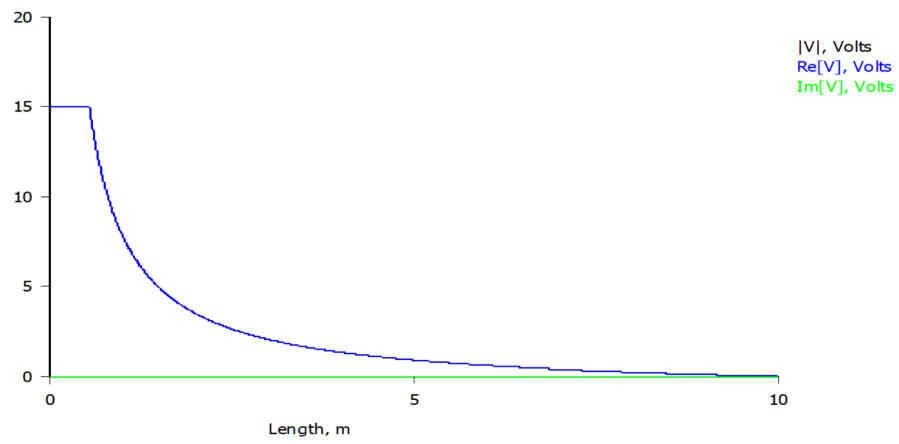


Figura 1.4: Grafico potenziale in funzione del raggio

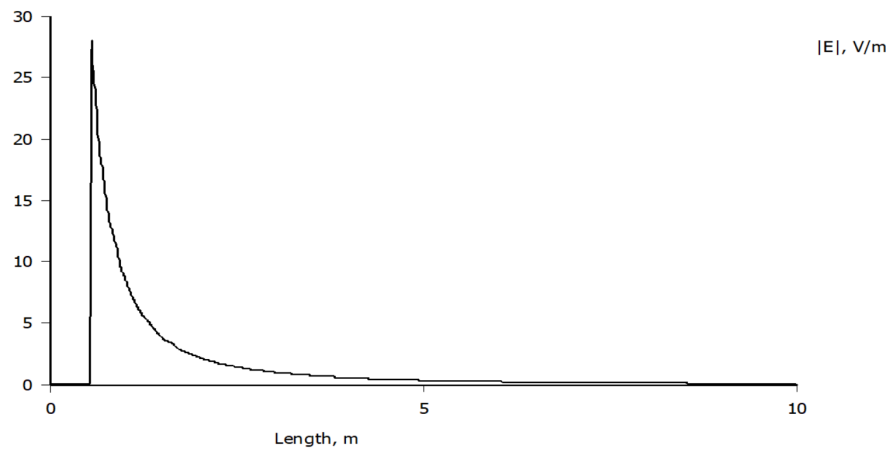


Figura 1.5: Grafico campo elettrico in funzione del raggio

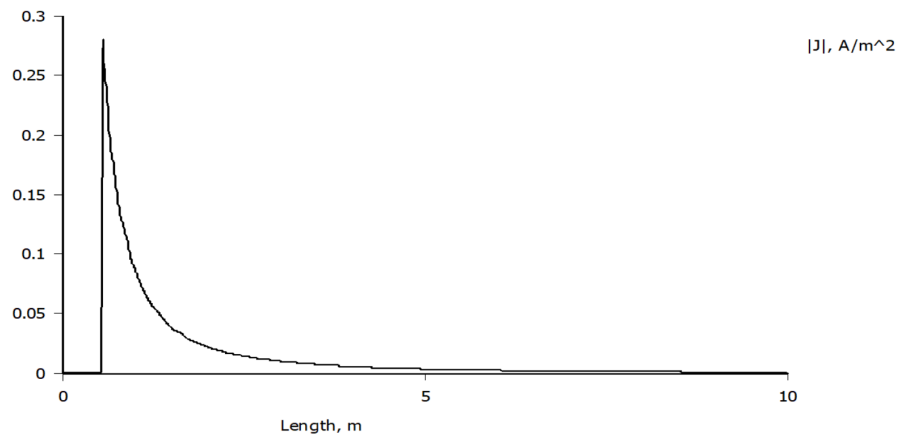


Figura 1.6: Grafico densità di corrente in funzione del raggio

1.3.3 Analisi delle mappe cromatiche

Il riscontro della correttezza degli andamenti è dato dalle mappe cromatiche delle tre grandezze. Infatti, mentre nel potenziale si nota un "nucleo" di colore molto acceso, per campo elettrico e densità di corrente il conduttore ha un colore azzurro, per identificare il valore zero.

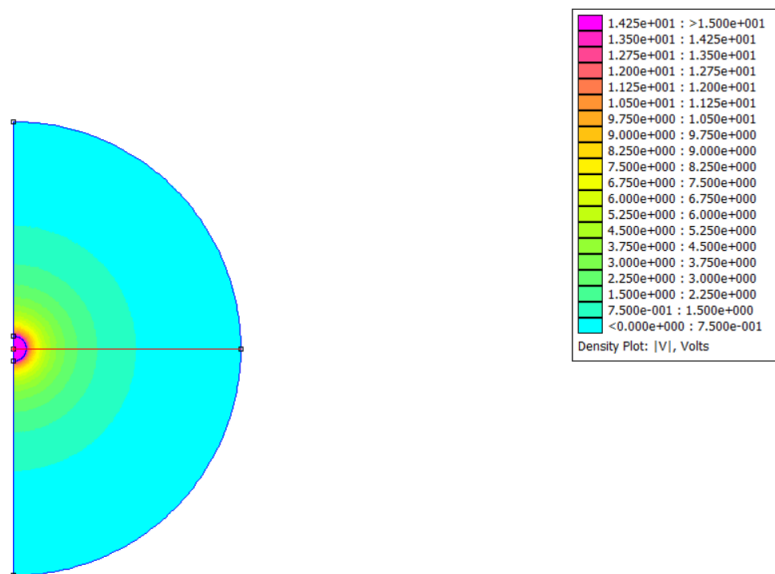


Figura 1.7: Mappa potenziale

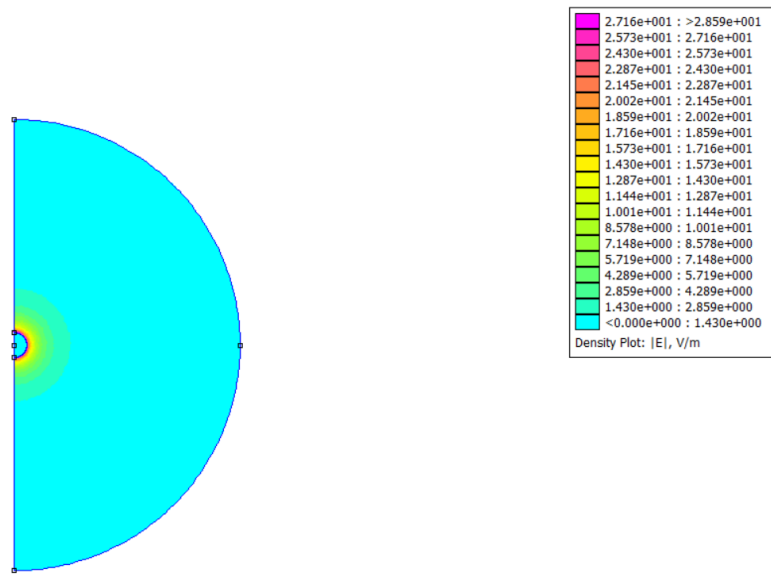


Figura 1.8: Mappa campo elettrico

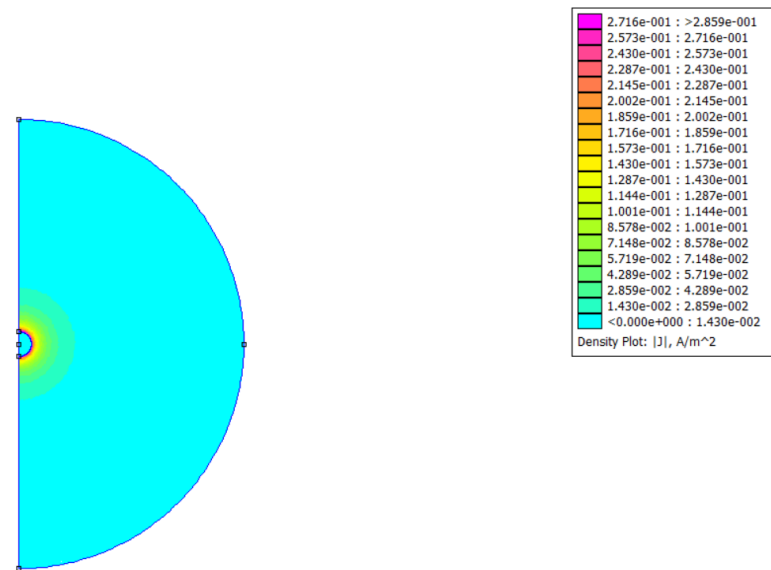


Figura 1.9: Mappa densità di corrente

1.3.4 Verifica tensione tra punti

Si considerino due punti: uno a contatto con il dispersore e un altro a distanza di 1 metro dal precedente.

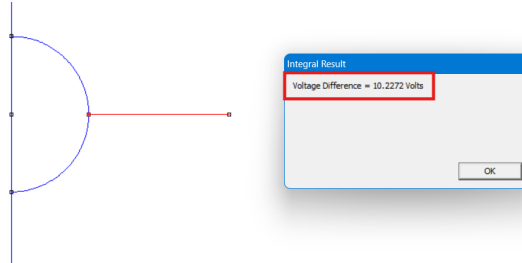


Figura 1.10: Tensione tra punti distanti 1 metro

Formula analitica:

$$V_{AB} = \frac{\rho I}{4\pi r_A} - \frac{\rho I}{4\pi r_B} = 10.2681V \quad (1.3)$$

Il risultato della simulazione conferma quello analitico.

Capitolo 2

Esercizio 2: Dispersore emisferico immerso in terreno omogeneo

2.1 Dati

- $R_0 = 0.5 * (1 + \frac{2}{20}) = 0.55m$ raggio del dispersore
- $\rho = 100 \frac{\Omega}{m}$ resistività del terreno
- $I = 1 * (1 + \frac{2}{20}) = 1.1A$
- Raggio del terreno analizzato: $R_{ext} = 10m$
- Potenziale su R_e : $V_{ext} = 0$

2.2 Modello

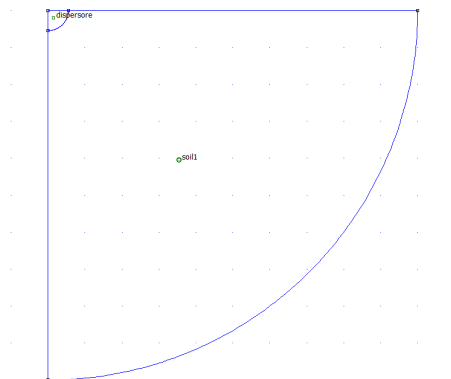


Figura 2.1: Modello FEMM.

Si è proceduto poi alla definizione delle boundary, in particolare

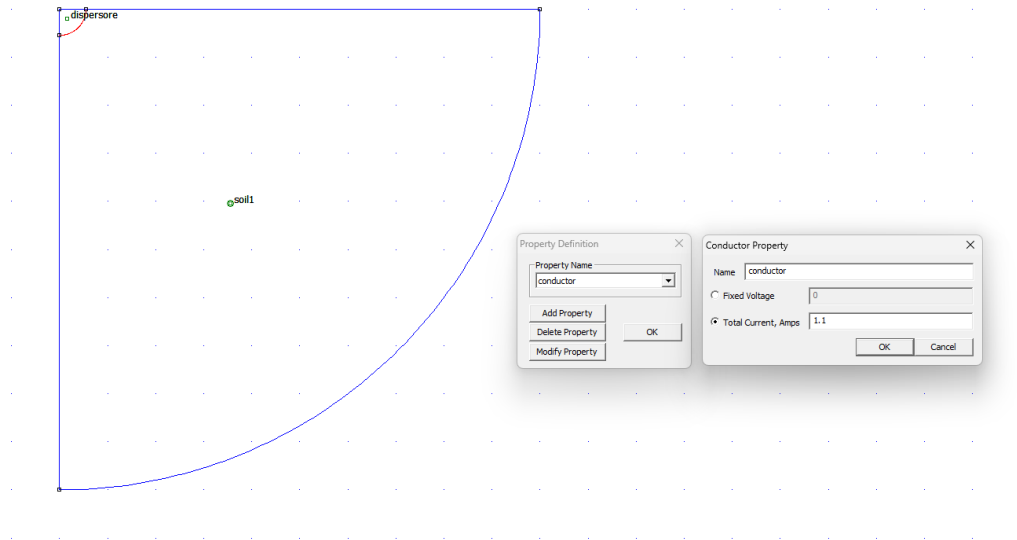


Figura 2.2: Conduttore

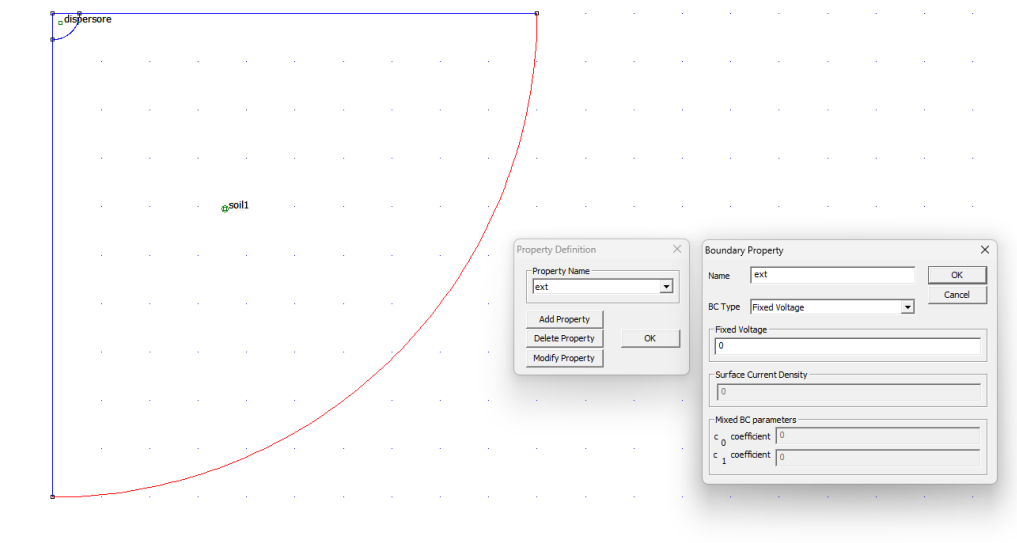


Figura 2.3: Bordo esterno

Si sono definiti e assegnati i materiali alle regioni del modello come mostrato in Fig.2.4 e in Fig.2.5

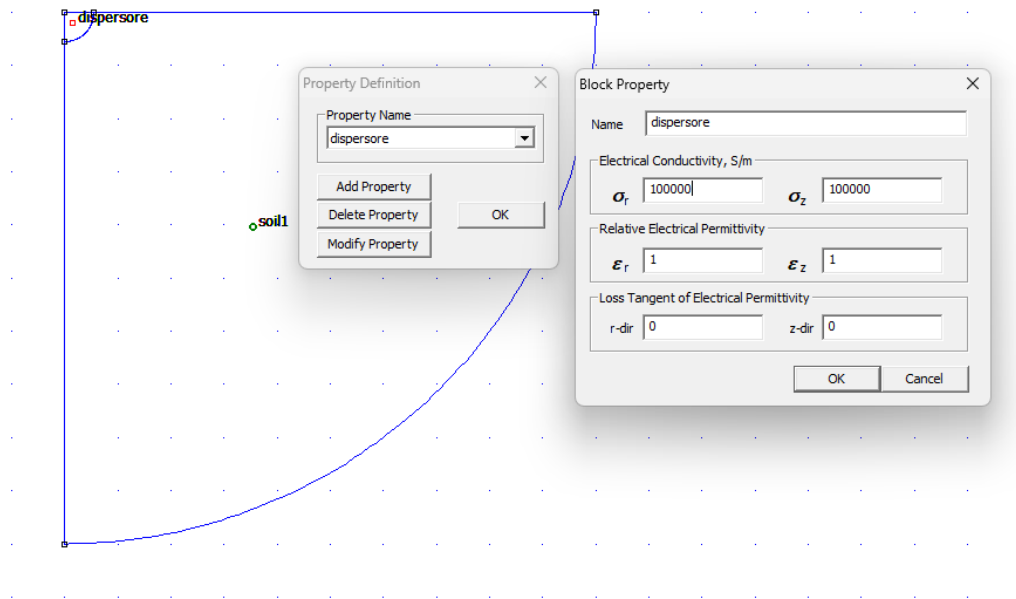


Figura 2.4: Dispensore

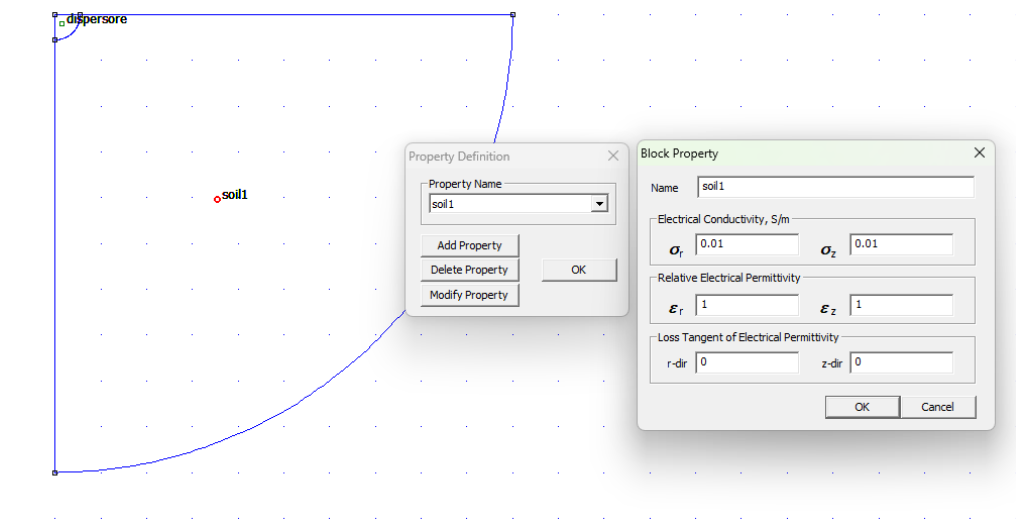


Figura 2.5: Soil1

È stata poi creata la mesh andando ad assegnare al dispersore una grandezza di 0.05 e al soil1 di 0.1.

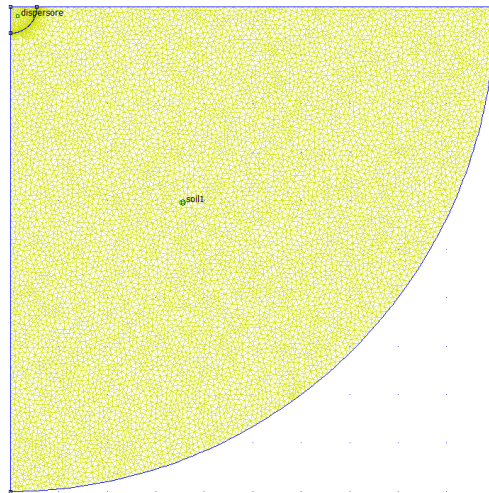


Figura 2.6: Mesh.

2.3 Verifiche

2.3.1 Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica

Si è verificato il valore di resistenza restituito da FEMM.

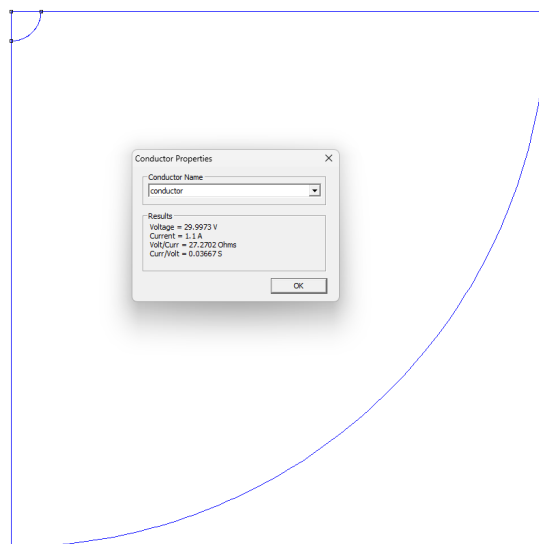


Figura 2.7: Resistenza

La formula analitica per il calcolo della resistenza di un dispersore emisferico è (2.1)

$$R = \frac{\rho}{2\pi R_0} \quad (2.1)$$

che nel nostro caso assume valore

$$R = \frac{100}{2\pi \cdot 0.55} = 28.937\Omega \quad (2.2)$$

osserviamo che otteniamo un discostamento di circa 1.6Ω dal risultato di FEMM. Ciò è dovuto al fatto che su FEMM è stata impostata un raggio esterno che ne limita il calcolo. L'errore percentuale che otteniamo è mostrato in (2.3)

$$\epsilon = \frac{|28.937 - 27.27|}{|28.937|} \approx 5.76\% \quad (2.3)$$

Se effettuassimo il calcolo analitico andando considerare un raggio limitato e non infinito otterremo un risultato praticamente uguale a quello restituito da FEMM.

$$R = \frac{100}{2\pi} \left(\frac{1}{0.55} - \frac{1}{10} \right) = 27.34\Omega \quad (2.4)$$

2.3.2 Andamento delle grandezze

Successivamente, sono stati analizzati gli andamenti del potenziale, della densità di corrente e del campo elettrico lungo la linea a livello del suolo. A tal fine è stato necessario definire dei punti leggermente al di sotto di quelli che costituiscono la linea d'asse, in modo che il segmento su cui calcolare questi valori rientrasse all'interno dell'area definita. Senza questa accortezza non sarebbe stato possibile ottenere risultati significativi. Come ci si aspetta il potenziale assume valore massimo all'interno del conduttore per poi diminuire con andamento inversamente proporzionale alla distanza dal centro del dispersore.

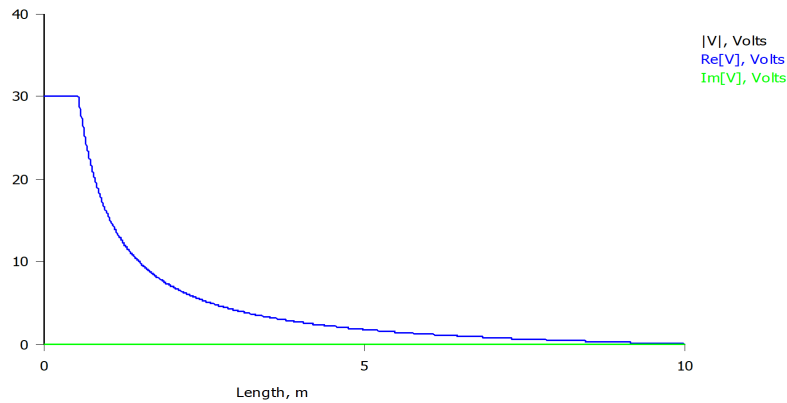


Figura 2.8: Andamento potenziale V

Invece la densità di corrente e il campo elettrico sono nulli all'interno del conduttore e assumono valore massimo sulla superficie esterna del conduttore, per poi decrescere in modo inversamente proporzionale alla distanza dal centro del dispersore.

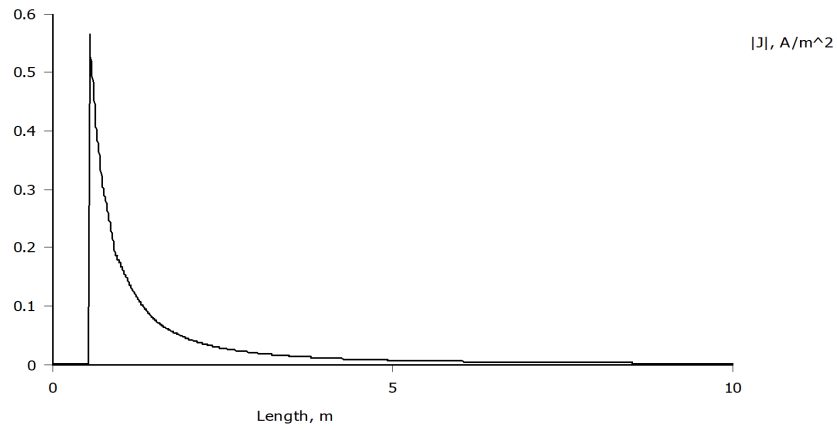


Figura 2.9: Andamento densità di corrente J

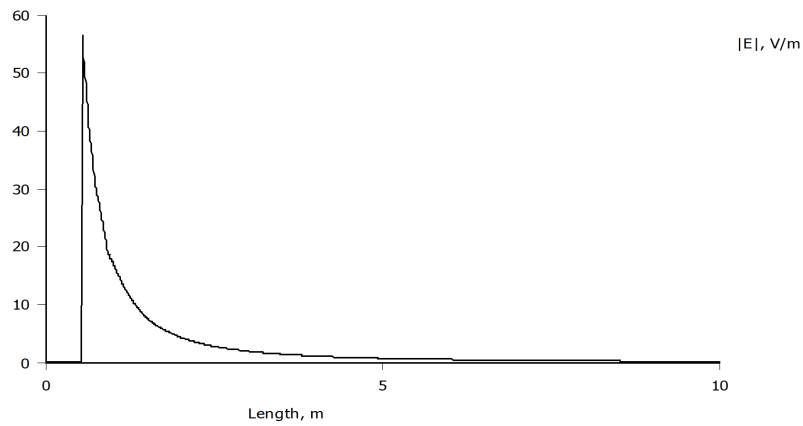


Figura 2.10: Andamento campo elettrico E

2.3.3 Analisi delle mappe cromatiche

Le analisi delle mappe cromatiche rispecchiano quanto visto precedentemente.

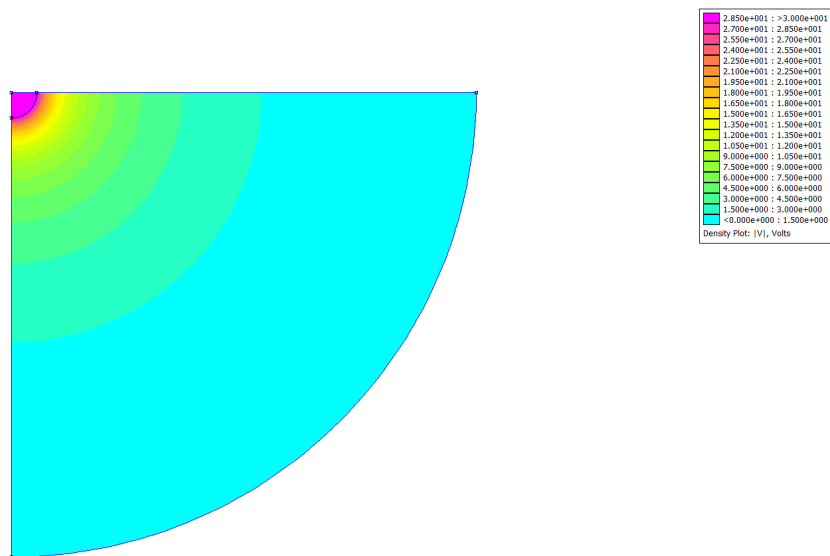


Figura 2.11: Mappa potenziale V

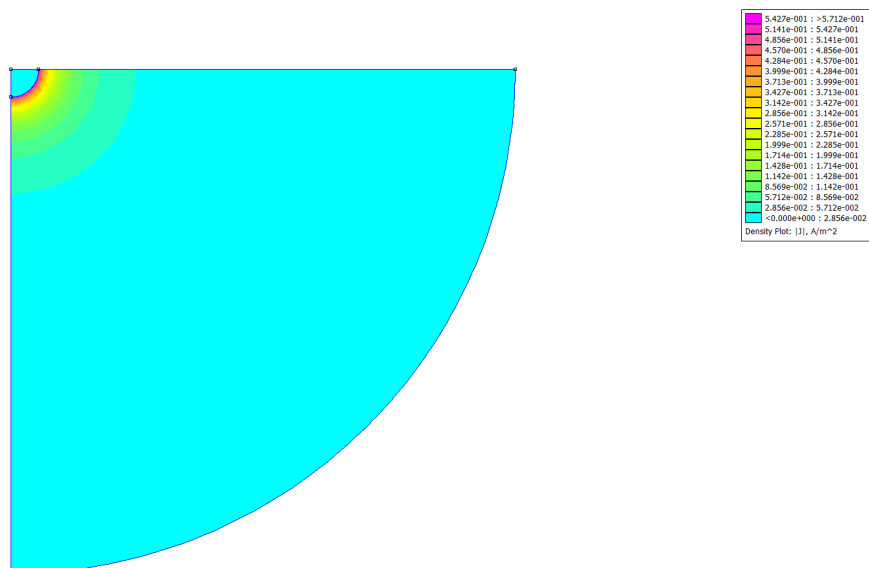


Figura 2.12: Mappa densità di corrente J

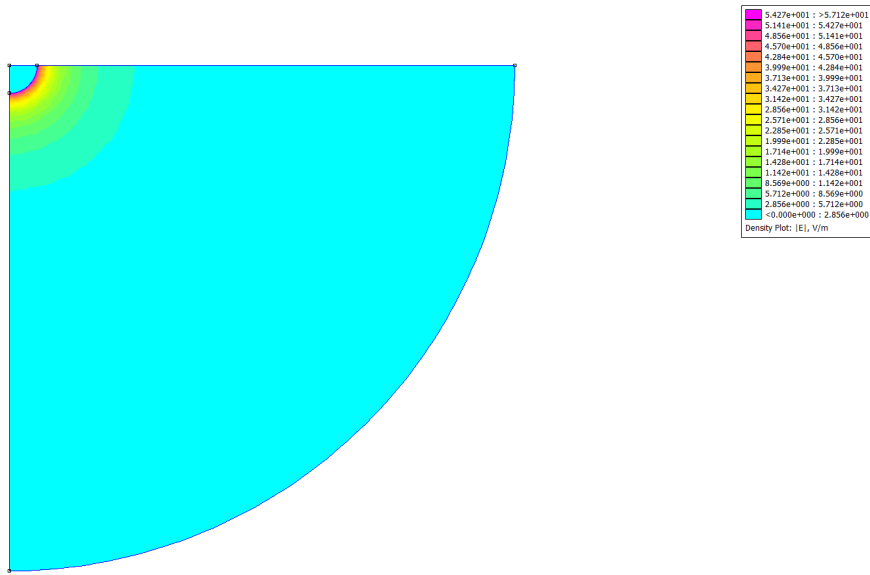


Figura 2.13: Mappa campo elettrico E

2.3.4 Verifica tensione di passo

Per il calcolo della tensione di passo si è preso un punto corrispondente sul raggio del conduttore e l'altro a distanza di un metro, come mostrato in Fig.2.14.

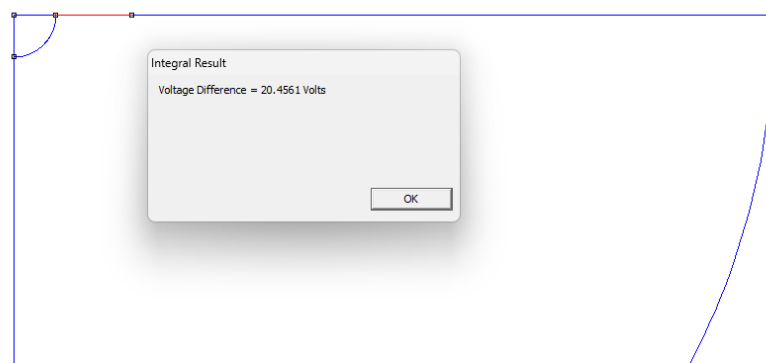


Figura 2.14: Valore della tensione di passo.

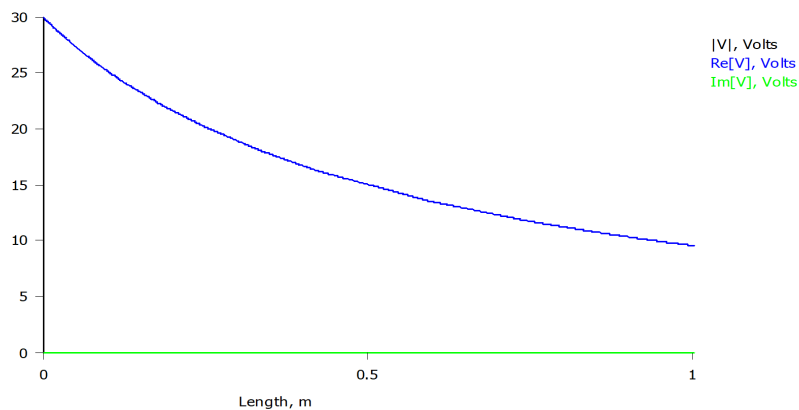


Figura 2.15: Andamento tensione di passo

e se si confronta tale valore con il calcolo analitico

$$V_p = \frac{\rho I}{2\pi R_0} \left(1 - \frac{R_0}{1 + R_0}\right) = \frac{100 \cdot 1.1}{2\pi \cdot 0.55} \left(1 - \frac{0.55}{1 + 0.55}\right) = 20.53V \quad (2.5)$$

si osserva come i risultati, a meno di un discostamento di circa 0.1 V, coincidano.

Capitolo 3

Esercizio 3: Dispersore emisferico immerso in terreno non omogeneo (doppio strato).

3.1 Dati

- $R_0 = 0.5 * (1 + \frac{2}{20}) = 0.55m$ raggio del dispersore
- $R_1 = 1.5 * (1 + \frac{2}{20}) = 1.65m$ raggio del terreno interno
- $\rho_1 = 100 \frac{\Omega}{m}$ resistività del terreno esterno
- $\rho_2 = 20 \frac{\Omega}{m}$ resistività del terreno interno
- $I = 1 * (1 + \frac{2}{20}) = 1.1A$
- Raggio del terreno analizzato: $R_{ext} = 10m$

3.2 Modello

Rispetto al caso precedente abbiamo definito un ulteriore strato di terreno con resistività inferiore.

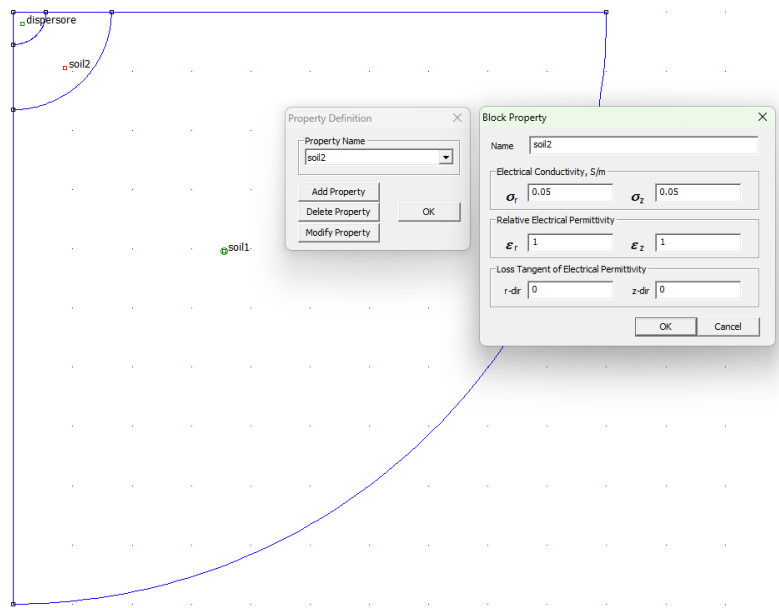


Figura 3.1: Strato interno di terreno.

3.3 Verifiche

3.3.1 Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica

Confrontando la resistenza con il caso precedente notiamo che il valore è diminuito.

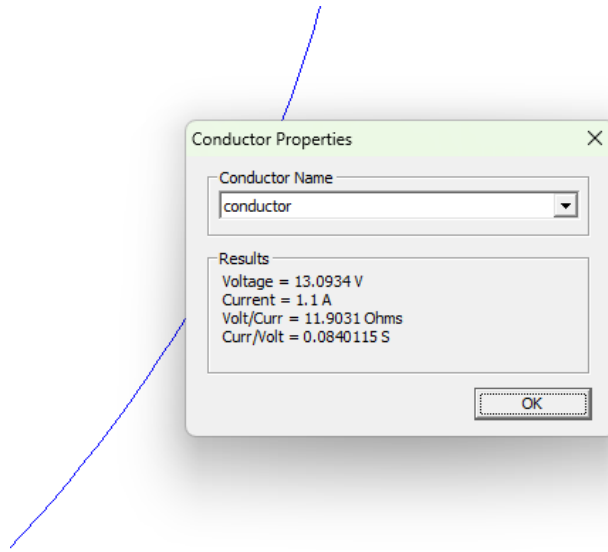


Figura 3.2: Valore resistenza su FEMM

Con il calcolo analitico otteniamo invece

$$R = \frac{20}{2\pi} \left(\frac{1}{0.55} - \frac{1}{1.65} \right) + \frac{100}{2\pi} \frac{1}{1.65} = 13.5\Omega \quad (3.1)$$

Anche qui l'effetto di limitazione dovuto a FEMM è evidente. L'errore percentuale ottenuto è mostrato in 3.2

$$\epsilon = \frac{|13.5 - 11.9|}{|13.5|} \approx 11.83\% \quad (3.2)$$

Considerando il bordo esterno infatti otterremo

$$R = \frac{20}{2\pi} \left(\frac{1}{0.55} - \frac{1}{1.65} \right) + \frac{100}{2\pi} \left(\frac{1}{1.65} - \frac{1}{10} \right) = 11.91\Omega \quad (3.3)$$

tale risultato coincide con quello FEMM.

3.3.2 Andamento delle grandezze

Si sono poi analizzati gli andamenti di potenziale, densità di corrente e campo elettrico lungo la linea a livello del terreno. Dalla Fig.3.3 si può subito osservare come la differenza di resistività del terreno influisce sull'andamento del potenziale. Nel primo strato a più bassa resistività si ha una caduta di potenziale più lenta rispetto allo strato a resistività più alta dove il potenziale tende a decrescere più velocemente.

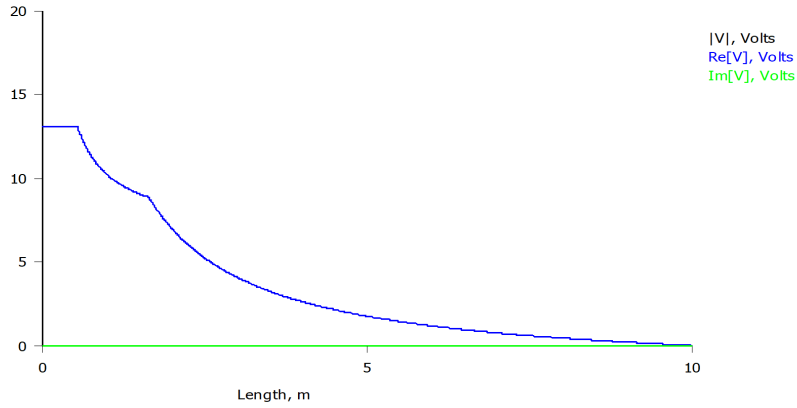


Figura 3.3: Andamento potenziale V .

Per quanto riguarda l'andamento della densità di corrente invece non si osservano differenze rispetto al caso precedente. Cosa che non si può dire nell'andamento di campo elettrico. Dalla Fig. 3.5, si osserva la presenza di due valori di picco. Dopo un primo andamento decrescente, in corrispondenza del punto in cui varia la resistività del terreno si ha un aumento a gradino del campo con successivo comportamento decrescente.

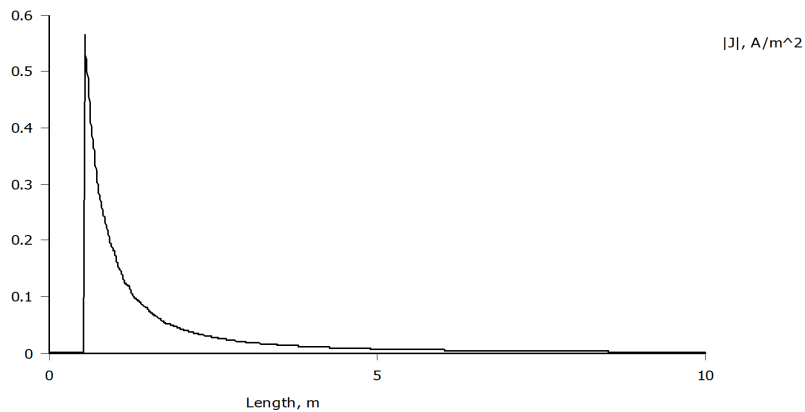


Figura 3.4: Andamento densità di corrente J .

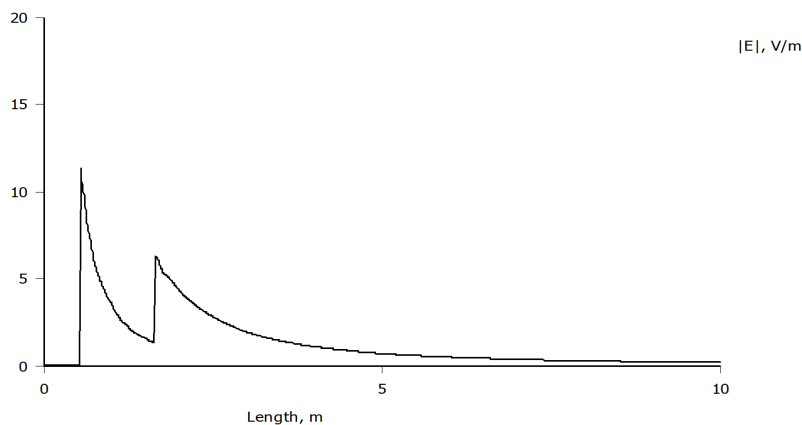


Figura 3.5: Andamento campo elettrico E

3.3.3 Analisi delle mappe cromatiche

Osservando la mappa cromatica di potenziale in Fig.3.6 e confrontandola con quella dell'esercizio precedente in Fig.2.11 si può osservare chiaramente come il potenziale nel stratto a più bassa resistività tende a diminuire più lentamente.

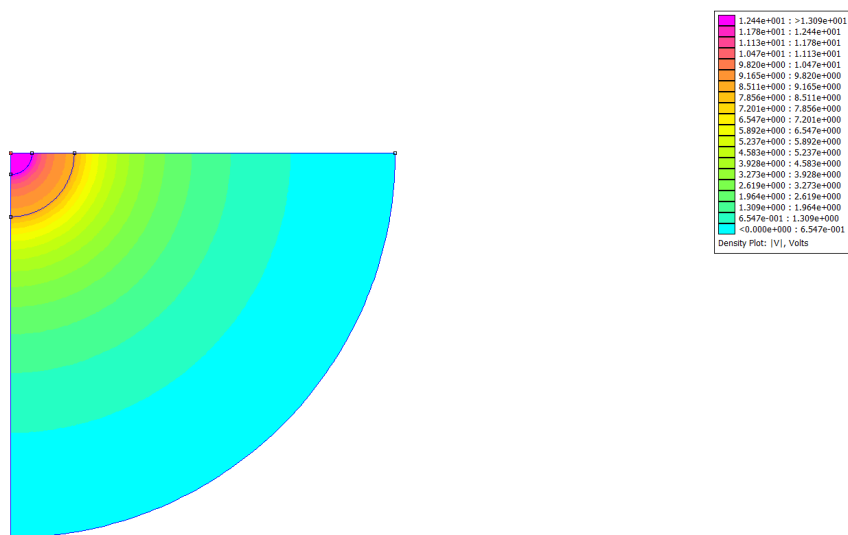


Figura 3.6: Mappa potenziale V

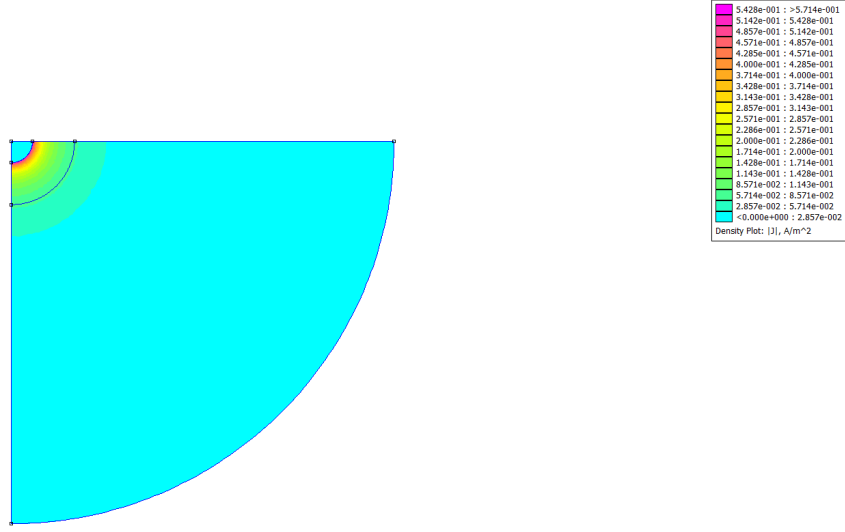


Figura 3.7: Mappa densità di corrente J

Dalla mappa di campo elettrico invece è possibile osservare chiaramente il picco che si ottiene nel punto di variazione della resistività.

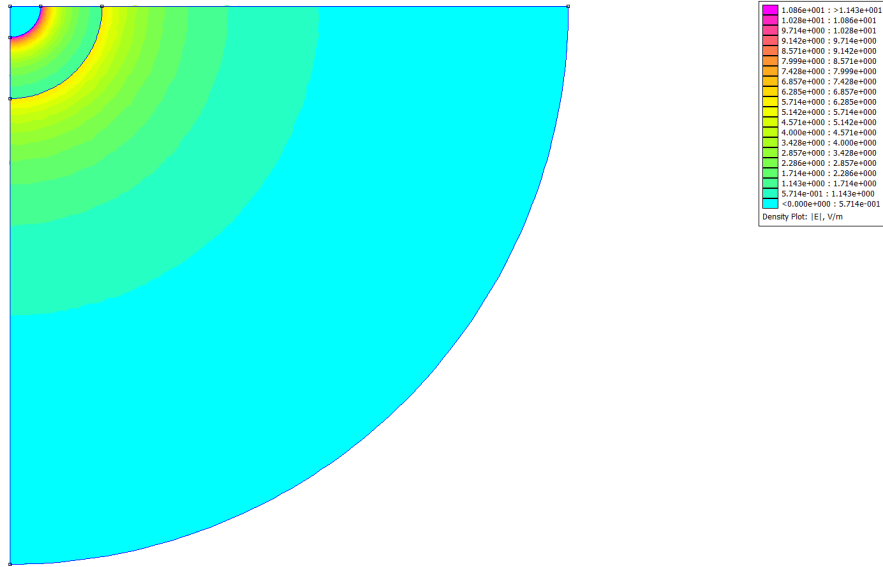


Figura 3.8: Mappa campo elettrico E

3.3.4 Verifica tensione di passo

Verifica della tensione di passo in corrispondenza del conduttore

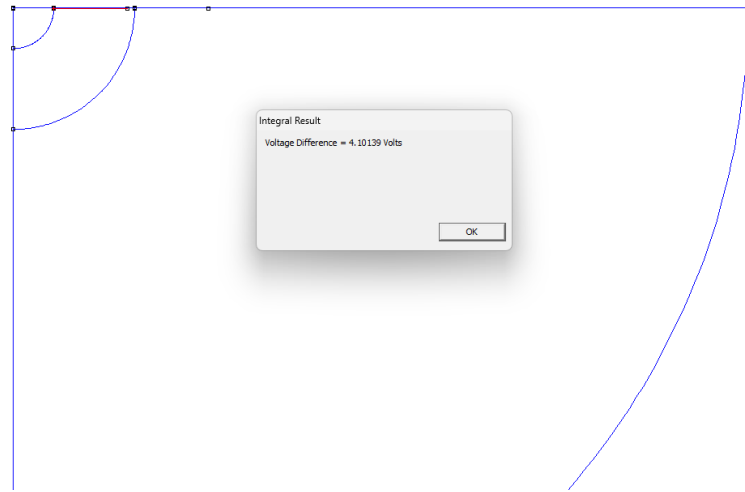


Figura 3.9: Tensione di passo conduttore.

Con la formula analitica si ottiene

$$V_p = \frac{\rho_2 I}{2\pi R_0} \left(1 - \frac{R_0}{1 + R_0}\right) = \frac{20 \cdot 1.1}{2\pi 0.55} \left(1 - \frac{0.55}{1 + 0.55}\right) = 4.1V \quad (3.4)$$

In corrispondenza del passaggio di resistività del terreno otteniamo invece

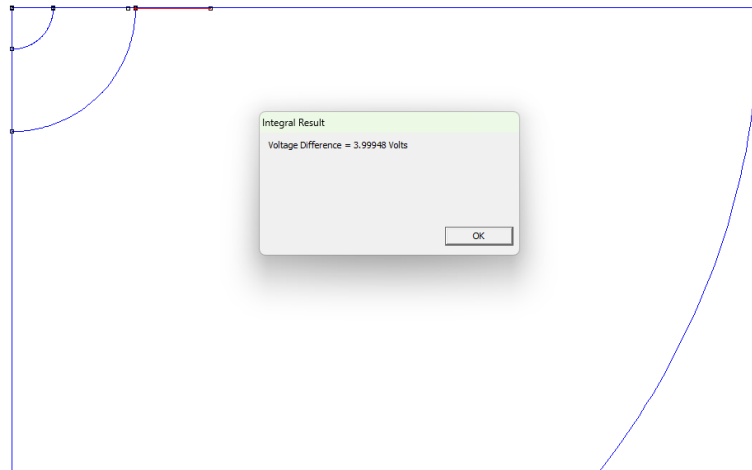


Figura 3.10: Tensione di passo sul terreno esterno.

Con la formula analitica si ottiene

$$V_p = \frac{\rho_1 I}{2\pi R_0} \left(1 - \frac{R_0}{1 + R_0}\right) = \frac{100 \cdot 1.1}{2\pi 1.65} \left(1 - \frac{1.65}{1 + 1.65}\right) = 4V \quad (3.5)$$

Capitolo 4

Esercizio 4: Dispersore a picchetto in terreno omogeneo

4.1 Dati

- Raggio dispersore: $R_0 = 0.5 * (1 + \frac{2}{20}) = 0.55m$
- Resistività del terreno: $\rho = 100 \frac{\Omega}{m}$
- Corrente dispersa: $I = 1 * (1 + \frac{2}{20}) = 1.1A$
- Lunghezza dispersore: $Ld = 2m$
- Raggio del terreno analizzato: $R_e = 15m$
- Potenziale su R_e : $V_{ext} = 0$

4.2 Modello

Il modello FEMM è di tipo assialsimmetrico e riportato di seguito.

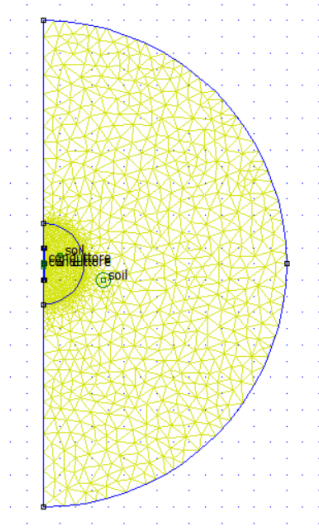


Figura 4.1: Modello FEMM dispersore a picchetto immerso in terreno omogeneo

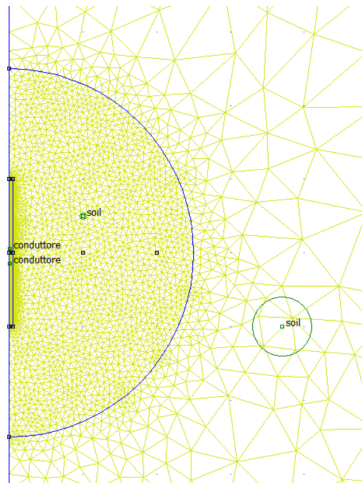


Figura 4.2: Zoom modello FEMM dispersore a picchetto immerso in terreno omogeneo

È stata poi creata la mesh andando ad assegnare al dispersore una grandezza di 0.005, al primo tratto di terreno 0.08 e nell'area più esterna 0.8.

4.3 Richieste

4.3.1 Valore della resistenza del conduttore e confronto con la formula analitica

Per prima cosa si esegue il modello con l'opportuna mesh; dopodiché si calcola il valore di resistenza del conduttore attraverso l'apposita funzione FEMM.

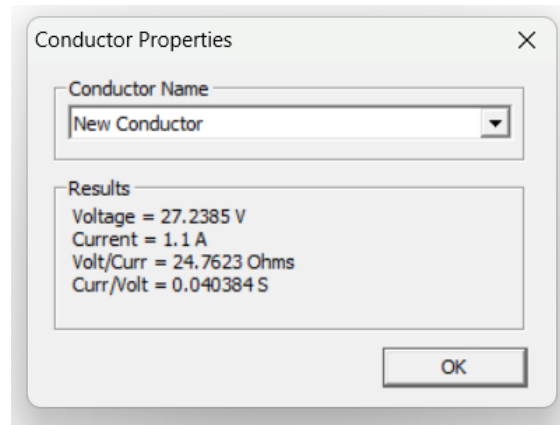


Figura 4.3: Valore resistenza conduttore

A questo punto, è necessario confrontare tale valore con quello ricavato tramite la formula analitica di un dispersore a picchetto:

Calcolo della resistenza:

$$R_T = \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \ln \left(\frac{L + \sqrt{\frac{d^2}{4} + L^2}}{-L + \sqrt{\frac{d^2}{4} + L^2}} \right) = 28.603\Omega$$

- ρ è la resistività;
- L è la semi-lunghezza del dispersore;
- d è il diametro;
- R_T è la resistenza del dispersore.

Il risultato proveniente dalla simulazione differisce da quello trovato a causa della formula analitica, ricavata con le ipotesi di conduttore filiforme avente carica lineare e non superficiale.

Diminuendo il raggio (diametro=0.02 m) del conduttore si ottiene un risultato che presenta un errore relativo minore rispetto al caso precedente.

$$R_T = \frac{\rho}{8\pi L} \cdot \ln \left(\frac{L + \sqrt{\frac{d^2}{4} + L^2}}{-L + \sqrt{\frac{d^2}{4} + L^2}} \right) = 42.163\Omega$$

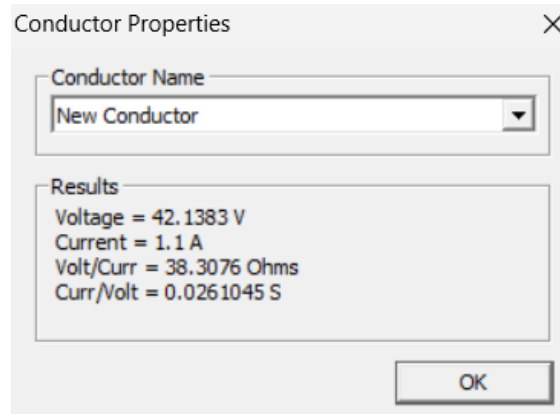


Figura 4.4: Valore resistenza conduttore

$$\epsilon_{(r=0.055m)} = \frac{|28.6 - 24.76|}{|28.6|} \approx 13.43\%$$

$$\epsilon_{(r=0.01m)} = \frac{|42.16 - 38.3|}{|42.16|} \approx 9.16\%$$

4.3.2 Andamento delle grandezze

Ci si aspetta che all'interno del conduttore il potenziale V sia costante, mentre campo elettrico E e densità di corrente J nulle. All'esterno del conduttore, invece il potenziale decresce in modo inversamente proporzionale alla distanza dal centro del conduttore e le altre due grandezze invece in modo inversamente proporzionale.

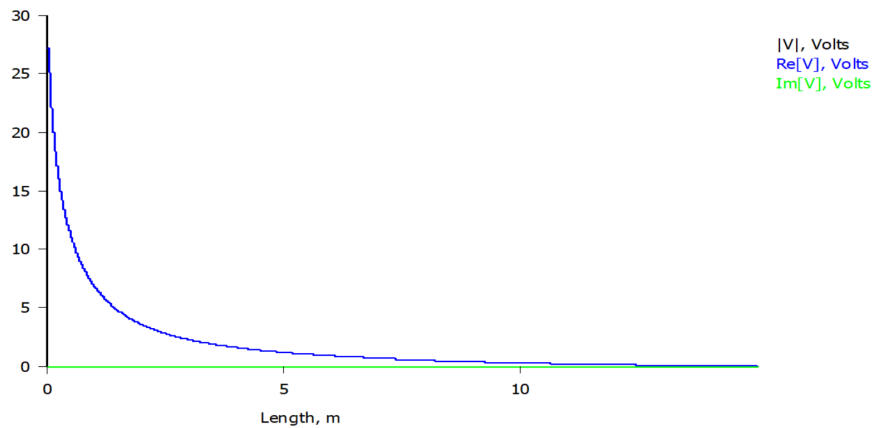


Figura 4.5: Grafico potenziale in funzione del raggio

Accorciando il tratto analizzato da 15m a 2m si può notare il tratto costante per i tre grafici.

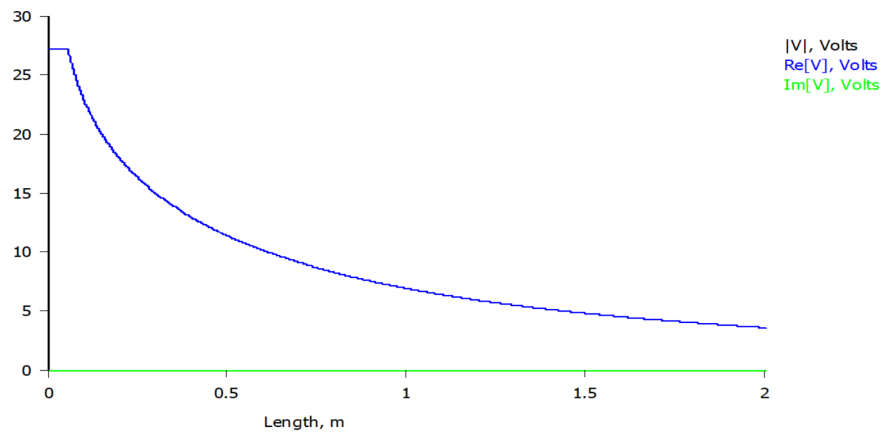


Figura 4.6: Zoom grafico potenziale in funzione del raggio

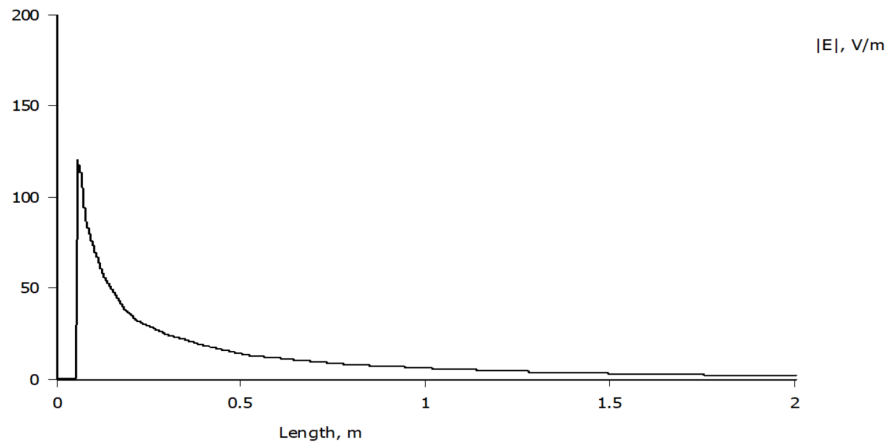


Figura 4.7: Grafico campo elettrico in funzione del raggio

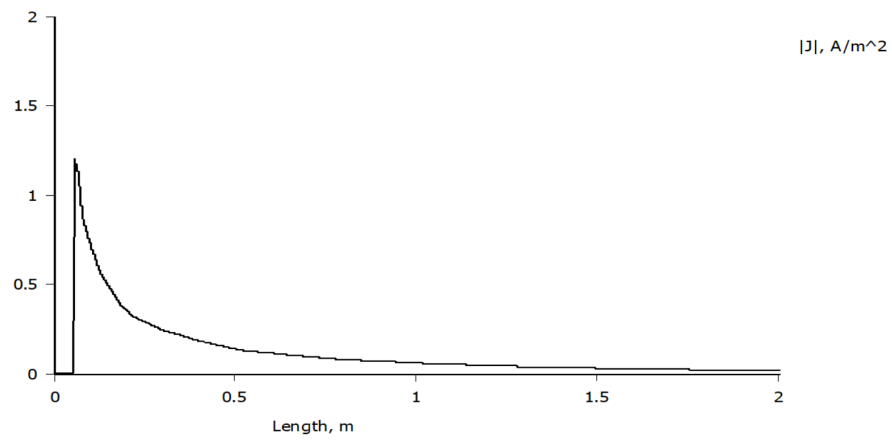


Figura 4.8: Grafico densità di corrente in funzione del raggio

4.3.3 Analisi delle mappe cromatiche

Il riscontro della correttezza degli andamenti è dato dalle mappe cromatiche delle tre grandezze. Infatti, mentre nel potenziale si nota un "nucleo" di colore molto acceso, per campo elettrico e densità di corrente il conduttore ha un colore azzurro, per identificare il valore zero.



Figura 4.9: Mappa potenziale

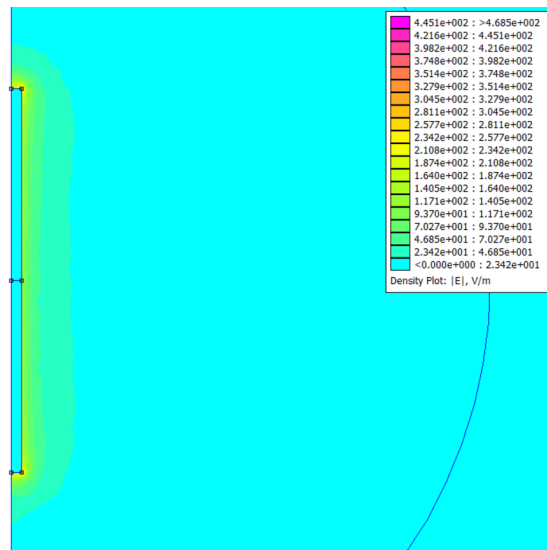


Figura 4.10: Mappa campo elettrico

In prossimità dell'angolo di un conduttore attraversato da corrente, l'interazione delle correnti provenienti dai lati adiacenti dà luogo a un aumento locale della densità di corrente J .

In questo punto, infatti, si verifica una sovrapposizione delle componenti vettoriali della corrente lungo i due segmenti del conduttore che formano l'angolo.

Poiché ciascun lato conduce corrente in una direzione specifica, la somma vettoriale delle loro componenti nella zona d'intersezione intensifica il campo elettromagnetico risultante.

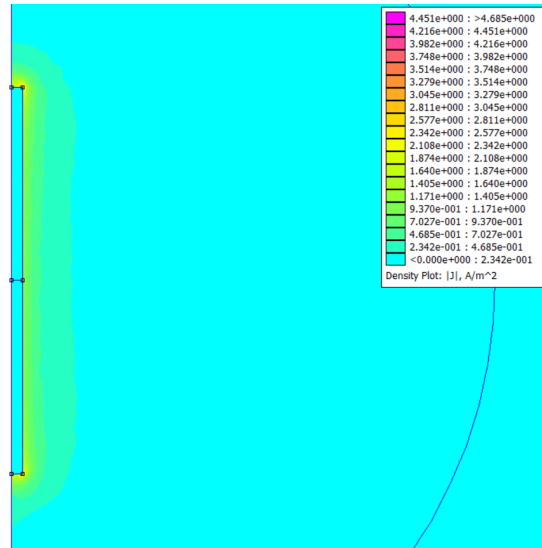


Figura 4.11: Mappa densità di corrente

Questa intensificazione si traduce in un valore maggiore di J lungo la diagonale dell'angolo, rispetto al valore di densità di corrente che si riscontra nei tratti rettilinei del conduttore.

Tale incremento locale della densità di corrente si può interpretare come il risultato della configurazione spaziale del campo, poiché ogni segmento del conduttore contribuisce con linee di campo che tendono a sovrapporsi nell'area d'angolo. Di conseguenza, il campo totale risulta amplificato in questa regione specifica a causa della combinazione delle linee di forza provenienti dai due lati.

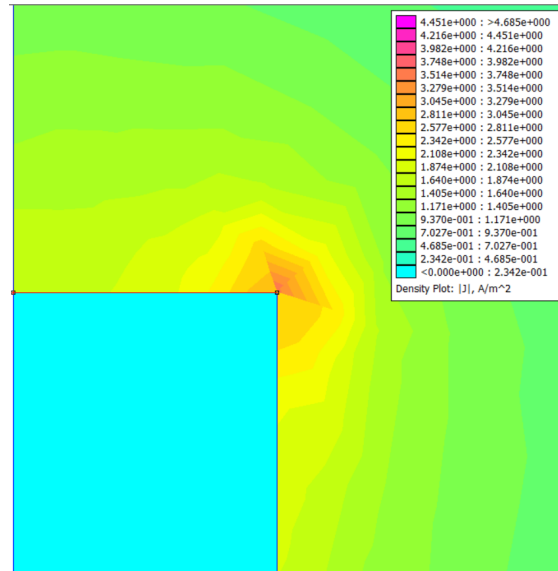
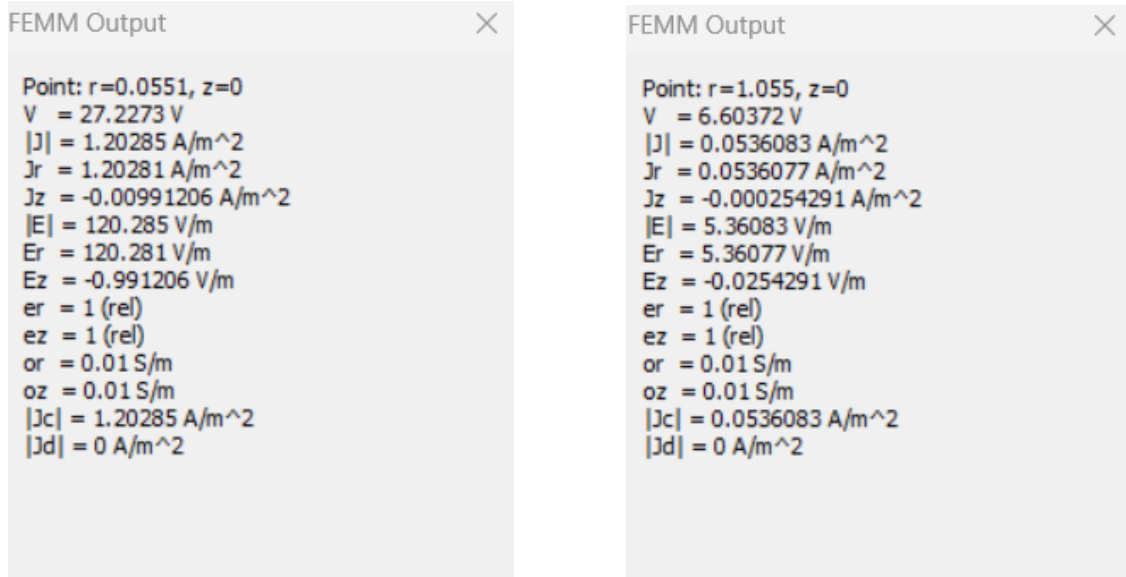


Figura 4.12: Mappa densità di corrente

4.3.4 Verifica tensione tra punti

Si considerino due punti: uno a contatto con il dispersore e un altro a distanza di 1 metro dal precedente.



(a) Punto 1

(b) Punto 2

Figura 4.13: Grafico potenziale tra i due punti

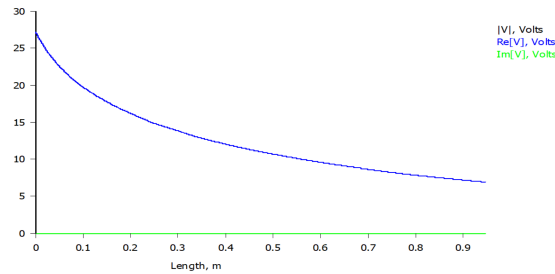


Figura 4.14: Tensione tra punti distanti 1 metro

Formula analitica:

$$V_{\text{superficie}} = \frac{I \rho}{8\pi L} \log \left(\frac{x + L + \sqrt{y_s^2 + (x + L)^2}}{x - L + \sqrt{y_s^2 + (x - L)^2}} \right) = 31.3V$$

Dove $y_s = 0,055$ m e $L = 1$ m e $x = 0$

$$V_{\text{passo}} = \frac{I \rho}{8\pi L} \log \left(\frac{x + L + \sqrt{y_{\text{passo}}^2 + (x + L)^2}}{x - L + \sqrt{y_{\text{passo}}^2 + (x - L)^2}} \right) = 7.39V$$

Dove $y_{passo} = 1.055$ m e $L = 1$ m e $x = 0$

Il risultato della simulazione conferma quello analitico con qualche difformità.

$$dV_{FEMM} = 27.23 - 6.6 = 20.63V$$

$$dV_{analitica} = 31.3 - 7.39 = 23.91V$$

$$\epsilon_{passo} = \frac{|dV_{FEMM} - dV_{analitica}|}{|dV_{FEMM}|} \approx 15,9\%$$

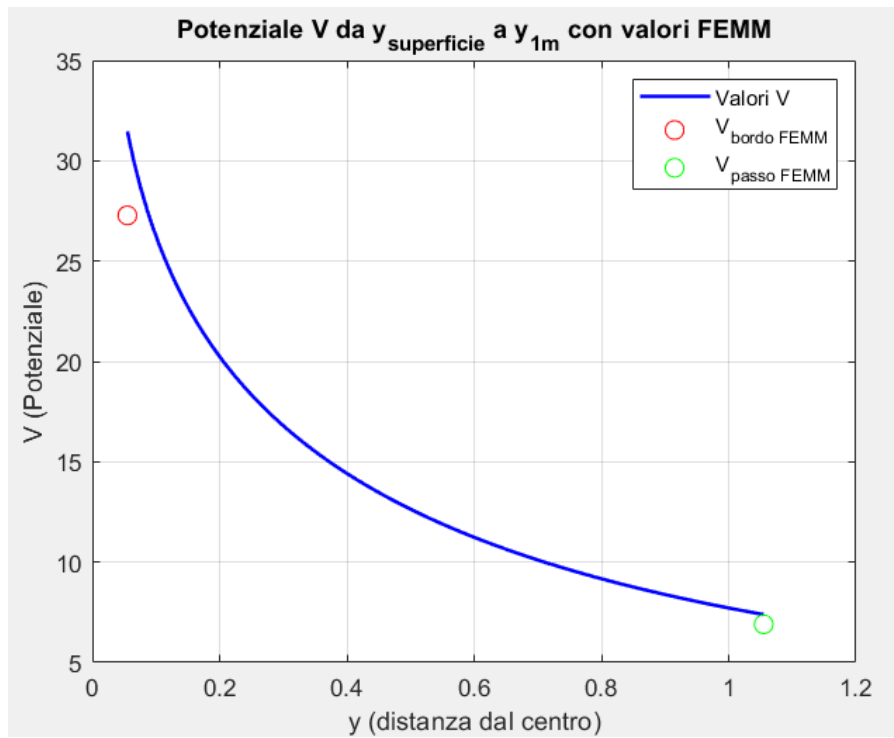


Figura 4.15: Grafico di Confronto FEMM-Analitico

4.3.5 Codice MATLAB per il calcolo dei valori

```

1 % Costanti
2 rho = 100;
3 r = 0.055;
4 r_1m = r + 1;
5 I = 1.1;
6 L = 1;
7 x = 0;
8
9 % Valori di FEMM
10 V_bordo_femm = 27.28;
11 V_passo_femm = 6.9;
12
13 % Range di y da y_superficie a y_1m
14 y_superficie = r;
15 y_1m = r_1m;
16 y_values = linspace(y_superficie, y_1m, 100); % 100 points from
    y_superficie to y_1m
17
18 % Calcolo di V lungo y
19 V_values = I * rho / (8 * pi * L) .* log((x + L + sqrt(y_values.^2
    + (x + L)^2)) ./ (x - L + sqrt(y_values.^2 + (x - L)^2)));
20
21 figure;
22 plot(y_values, V_values, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
23 hold on;
24
25 % Aggiunta Valori FEMM
26 plot(y_superficie, V_bordo_femm, 'ro', 'MarkerSize', 8, '
    DisplayName', 'V_{bordo FEMM}');
27 plot(y_1m, V_passo_femm, 'go', 'MarkerSize', 8, 'DisplayName', 'V_
    {passo FEMM}');
28
29 % Grafico Confronto
30 xlabel('y (distanza dal centro)');
31 ylabel('V (Potenziale)');
32 title('Potenziale V da y_{superficie} a y_{1m} con valori FEMM');
33 legend('Valori V', 'V_{bordo FEMM}', 'V_{passo FEMM}');
34 grid on;
35 hold off;

```

Listing 4.1: Codice MATLAB

Capitolo 5

Esercizio 5: Dispersore a picchetto affiorante in terreno omogeneo

5.1 Dati

- Raggio dispersore: $R_0 = 0.05 * (1 + \frac{2}{20}) = 0.055m$
- Resistività terreno : $\rho = 100 \frac{\Omega}{m}$
- Corrente dispersa: $I = 1 * (1 + \frac{2}{20}) = 1.1A$
- Lunghezza dispersore: $L_d = 1m$

5.2 Modello

Il modello FEMM è di tipo assialsimmetrico e riportato di seguito.

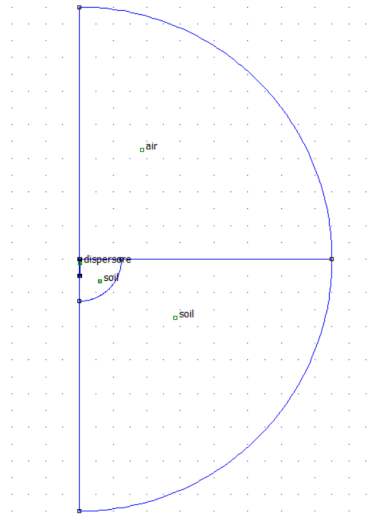


Figura 5.1: Modello FEMM dispersore a picchetto affiorante

Per effettuare l'analisi sono state impostate le mesh di

- Conduttore: 0.005 m
- Suolo interno: 0.05 m
- Suolo esterno: 0.1 m
- Aria: 0.1 m

5.3 Richieste

5.3.1 Valore della resistenza del conduttore e confronto con formula analitica

La simulazione fornisce il seguente valore di resistenza.

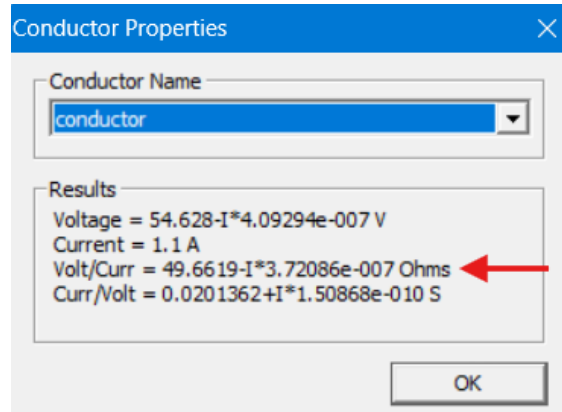


Figura 5.2: Valore resistenza conduttore

Esso viene confrontato con il calcolo analitico della medesima grandezza:

Calcolo della resistenza:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{2R_0}\right) = 57.1934\Omega \quad (5.1)$$

L'errore percentuale che otteniamo è

$$\epsilon = \frac{|57.1934 - 49.6619|}{|57.1934|} \approx 13.16\% \quad (5.2)$$

5.3.2 Andamento delle grandezze

Vengono illustrati gli andamenti di potenziale, campo elettrico e densità di corrente in funzione dello spazio nella zona superiore del terreno.

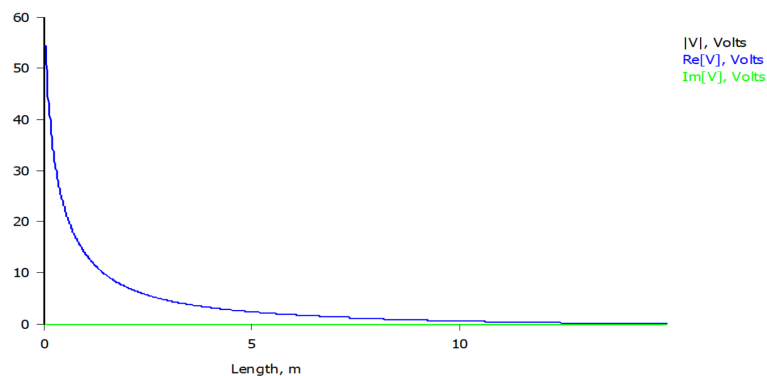


Figura 5.3: Grafico potenziale in funzione dello spazio

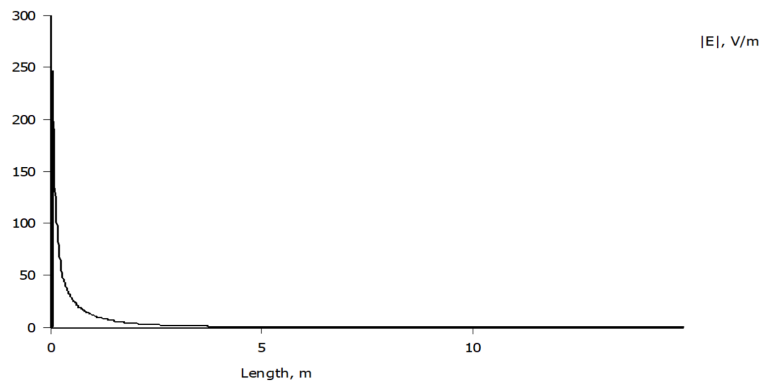


Figura 5.4: Grafico campo elettrico in funzione dello spazio

Ingrandendo sul tratto prossimo al dispersore, si apprezza meglio l'andamento all'interno e in prossimità di esso. Si osserva che il campo elettrico nel conduttore è pari a zero, per poi raggiungere il suo valore di picco e decrescere dalla superficie esterna del picchetto in poi.

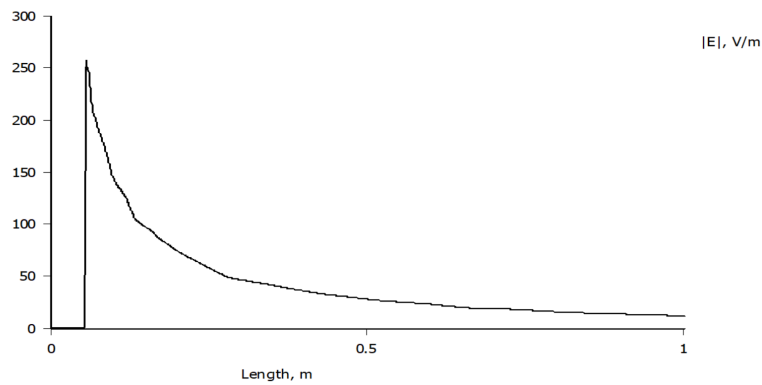


Figura 5.5: Grafico campo elettrico in prossimità del picchetto

Un comportamento del tutto analogo è adottato dalla densità di corrente.

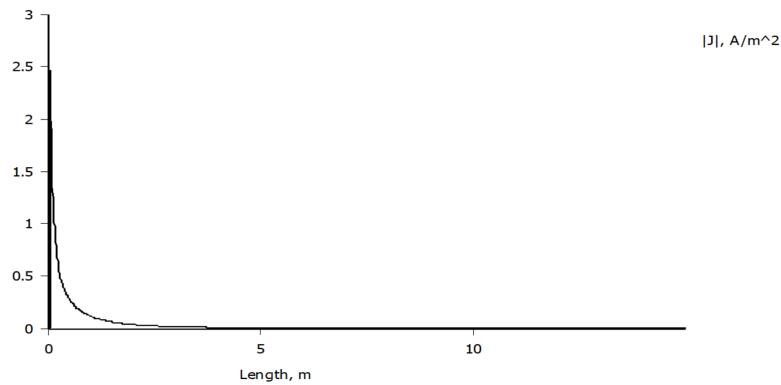


Figura 5.6: Grafico densità di corrente in funzione dello spazio

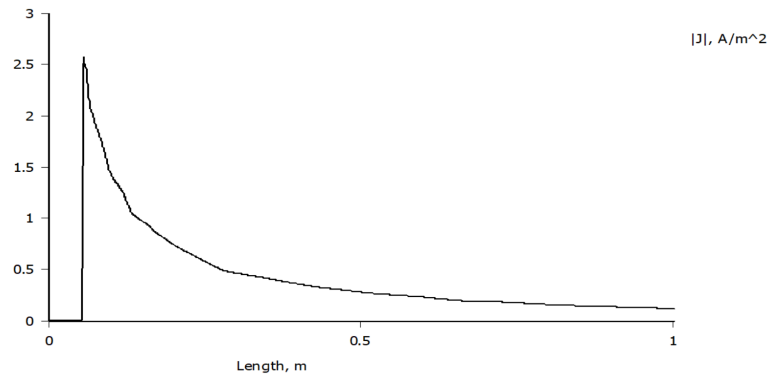


Figura 5.7: Grafico densità di corrente in prossimità del picchetto

5.3.3 Analisi della mappe cromatiche

Le mappe cromatiche delle grandezze sono molto utili affinché si comprenda la distribuzione delle stesse nello spazio. Sono due gli aspetti generali da mettere in risalto:

- Il comportamento all'interno del conduttore (molto simile ai casi precedenti)
- Le differenze di distribuzione tra terreno e aria

Potenziale: come nei casi precedenti, nel conduttore esso è costante e avrà valore massimo rispetto agli altri punti. La distribuzione nel terreno, così come quella in aria, si regola su superfici equipotenziali che approssimano le superfici di semisfere, con raggi che risultano maggiori in corrispondenza della superficie del terreno e minori in basso.



Figura 5.8: Mappa potenziale

Campo elettrico: nel conduttore avrà valore nullo. All'esterno esso, a differenza del potenziale, si esaurisce in spazi molto ridotti. In particolare, nel terreno la distribuzione "segue" la forma del picchetto, mentre in aria mantiene un comportamento simile a quello avuto dal potenziale. In questo caso è ben distinguibile l'aria dal terreno a causa della differenza di raggio con il quale cambiano i valori. Le linee di campo elettrico rimangono perpendicolari alle superfici equipotenziali.

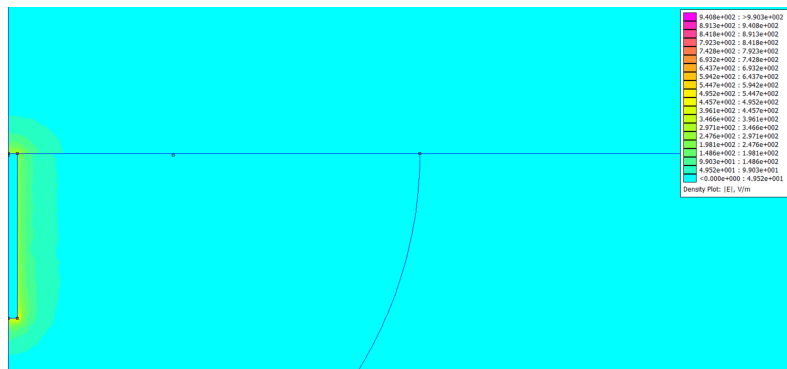


Figura 5.9: Mappa campo elettrico

Densità di corrente: ha un comportamento del tutto simile al campo elettrico nel terreno, ma in aria la densità di corrente è praticamente nulla.

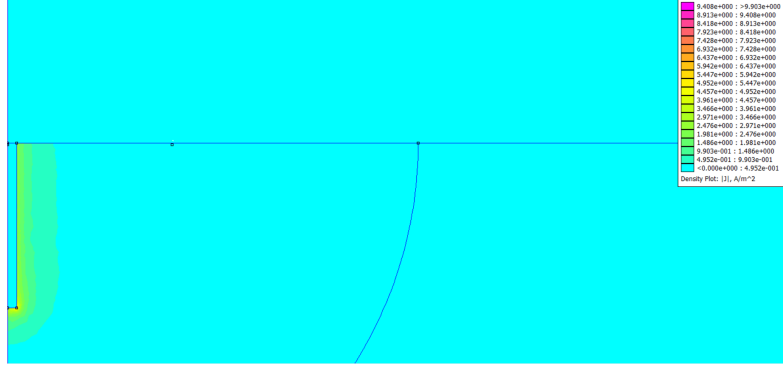


Figura 5.10: Mappa densità di corrente

5.3.4 Verifica della tensione di passo

Si trova il valore della tensione di passo attraverso l'integrazione svolta su FEMM tra un punto sito sulla superficie del conduttore e un altro distante un metro e sulla superficie del terreno. Successivamente si confronta con il calcolo analitico.

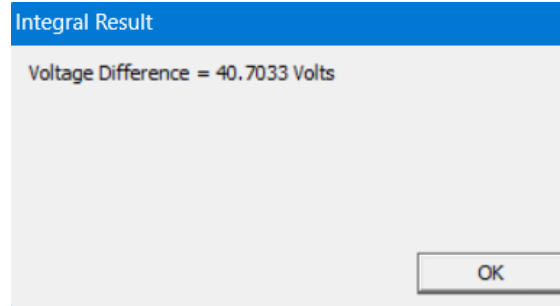


Figura 5.11: Tensione di passo

Tensione di passo:

$$V_p = \frac{\rho I}{2\pi L} * \ln\left(\frac{4L}{2R_0}\right) - \frac{\rho I}{4\pi L} * \ln\left(\frac{L + \sqrt{y^2 + L^2}}{-L + \sqrt{y^2 + L^2}}\right) = 42.4134V \quad (5.3)$$

I risultati sono verificati.