

Politecnico di Milano

Scuola di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



**IL METODO DI WENNER APPLICATO AL CALCESTRUZZO:
ANALISI DEI PARAMETRI DI INFLUENZA**

Relatore: Prof. Luciano Lazzari

Tesi di Laurea di:
Alex Valaderio Matricola:765335

Anno Accademico 2012 - 2013

Ringraziamenti

I miei ringraziamenti vanno al Professor Luciano Lazzari, che mi ha proposto questo lavoro e mi ha aiutato a svilupparlo, e al Professor Marco Ormellese, che mi ha aiutato a prendere confidenza con il software Comsol Multiphysics e mi ha aiutato nelle simulazioni numeriche.

Quindi la dedica di questo lavoro va ai miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto e aiutato, solo grazie a loro posso conseguire ora questo importante traguardo, perché mi hanno reso la persona che sono e senza di loro sarei perduto. Spero che questo vi renda orgogliosi e possa ripagare tutti i vostri sacrifici.

Oltre ai miei genitori devo ringraziare anche tutti i familiari che mi sono stati vicini in questi faticosi anni di studio e che saranno lì con me a condividere questo momento.

Un pensiero va anche alle persone che purtroppo non sono più con noi ma che sentirò sicuramente vicine in questo giorno importante, perché so che sarebbero state tanto orgogliose di me.

Quindi un ringraziamento va a tutti gli amici che mi sono sempre stati vicini, soprattutto a quelli presenti nei momenti più difficile, perché è in questo momento che si vede la vera amicizia, quella che ti accompagnerà per tutta la vita.

In particolare devo ringraziare una persona, che mi è stata e che mi è vicina, sempre, che mi è entrata nel cuore, mi ha cambiato la vita e mi ha spinto a cercare di essere una persona migliore.

Grazie perché non sempre ci si rende conto di quanto siano per noi fondamentali le persone che ci stanno vicine e io molte volte sono quasi cieco e chiuso in me stesso. Ma il cuore non mente, del resto “non si vede che con il cuore, l’essenziale è invisibile agli occhi”.

Grazie a tutti voi e anche a tutti quelli che avrò sicuramente dimenticato.

Indice

Indice delle figure	7
Indice delle tabelle	9
Indice dei grafici	11
Abstract	15
Introduzione	17
Capitolo 1. La corrosione del calcestruzzo armato	19
1.1. Innesco e propagazione della corrosione.....	19
1.2. Morfologia, conseguenze e velocità di corrosione.....	19
1.3. Corrosione da carbonatazione.....	20
1.4. Corrosione da cloruri.....	21
1.5. Prevenzione della corrosione.....	21
1.5.1. Qualità del calcestruzzo.....	22
Capitolo 2. Applicazione del metodo di Wenner al calcestruzzo armato	25
2.1. Introduzione.....	25
2.2. La resistività del calcestruzzo armato.....	25
2.3. Il metodo di Wenner.....	26
Capitolo 3. I casi studio	29
3.1. Caso omogeneo.....	29
3.2. Caso non omogeneo.....	30
3.3. Caso omogeneo con armatura.....	31
3.4. Caso non omogeneo con armatura.....	33
Capitolo 4. La modellazione numerica	35
4.1. La modellazione dei casi studio.....	36
Capitolo 5. La risoluzione dei casi studio	49
5.1. I risultati del caso omogeneo.....	49
5.2. I risultati del caso non omogeneo.....	50
5.3. I risultati del caso omogeneo con armatura.....	50
5.4. I risultati del caso non omogeneo e armatura.....	52

Capitolo 6. Applicabilità del metodo di Wenner in condizioni di omogeneità	55
6.1. Introduzione.....	55
6.2. Presentazione grafica dei risultati relativi al caso omogeneo.....	55
6.3. Influenza dell'armatura di rinforzo.....	58
6.3.1. Presentazione grafica dei risultati relativi al caso omogeneo con armatura perpendicolare.....	58
6.3.2. Presentazione grafica dei risultati relativi al caso omogeneo con armatura parallela.....	61
6.4. Analisi dei parametri di influenza.....	64
Capitolo 7. Validità del metodo di Wenner in condizioni di non omogeneità	67
7.1. Introduzione.....	67
7.2. Formula di Wenner corretta in presenza di strati a diversa resistività.....	67
7.2.1. I risultati corretti del caso non omogeneo.....	68
7.2.2. I risultati corretti del caso non omogeneo con armatura.....	70
7.3. Presentazione grafica dei risultati relativi al caso non omogeneo.....	73
7.3.1. Presentazione grafica risultati del caso non omogeneo corretto con media pesata.....	74
7.3.2. Presentazione grafica risultati del caso non omogeneo corretto con media inversa.....	78
7.4. Influenza dell'armatura di rinforzo.....	81
7.4.1. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata.....	82
7.4.2. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa.....	86
7.4.3. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata.....	90
7.4.4. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa.....	94
7.5. Osservazioni.....	97
Conclusioni	101
Bibliografia	103

Indice delle figure

2.1. Metodo di Wenner.....	26
3.1 .Caso omogeneo.....	30
3.2. Caso non omogeneo.....	31
3.3. Caso omogeneo con armatura perpendicolare.....	32
3.4. Caso omogeneo con armatura parallela.....	32
3.5. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare.....	33
3.6. Caso non omogeneo con armatura parallela.....	34
4.1. Esempio mesh caso omogeneo.....	37
4.2. Esempio risoluzione caso omogeneo.....	38
4.3. Esempio meh caso non omogeneo.....	39
4.4. Esempio risoluzione caso non omogeneo.....	40
4.5. Esempio mesh caso omogeneo con armatura perpendicolare.....	41
4.6. Esempio risoluzione caso omogeneo con armatura perpendicolare.....	42
4.7. Esempio mesh caso omogeneo con armatura parallela.....	43
4.8. Esempio risoluzione caso omogeneo con armatura parallela.....	44
4.9. Esempio mesh caso non omogeneo con armatura perpendicolare.....	45
4.10. Esempio risoluzione caso non omogeneo con armatura perpendicolare.....	46
4.11. Esempio mesh caso non omogeneo con armatura parallela.....	47
4.12. Esempio risoluzione caso non omogeneo con armatura parallela.....	48

Elenco delle tabelle

5.1. Caso omogeneo.....	49
5.2. Caso non omogeneo.....	50
5.3. Caso omogeneo con armatura perpendicolare.....	51
5.4. Caso omogeneo con armatura parallela.....	51
5.5. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare.....	52
5.6. Caso non omogeneo con armatura parallela.....	53
7.1. Caso non omogeneo corretto con media pesata.....	69
7.2. Caso non omogeneo corretto con media inversa.....	69
7.3. Caso non omogeneo corretto con media pesata con armatura perpendicolare.....	70
7.4. Caso non omogeneo corretto con media inversa con armatura perpendicolare.....	71
7.5. Caso non omogeneo corretto con media pesata con armatura parallela.....	72
7.6. Caso non omogeneo corretto con media inversa con armatura parallela.....	72

Indice dei grafici

6.1. Caso omogeneo; $H=2\text{cm}$ $a=1\text{cm}$	56
6.2. Caso omogeneo; $H=5\text{cm}$ $a=1\text{cm}$	56
6.3. Caso omogeneo; $H=5\text{cm}$ $a=3\text{cm}$	57
6.4. Caso omogeneo; $H=10\text{cm}$ $a=1\text{cm}$	57
6.5. Caso omogeneo; $H=10\text{cm}$ $a=3\text{cm}$	58
6.6. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; $H=5\text{cm}$ $a=1\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	59
6.7. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; $H=5\text{cm}$ $a=3\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	59
6.8. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; $H=10\text{cm}$ $a=1\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	60
6.9. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; $H=10\text{cm}$ $a=3\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	60
6.10. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; $H=10\text{cm}$ $a=1\text{cm}$ $s=9\text{cm}$	61
6.11. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; $H=10\text{cm}$ $a=3\text{cm}$ $s=9\text{cm}$	61
6.12. Caso omogeneo con armatura parallela; $H=5\text{cm}$ $a=1\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	62
6.13. Caso omogeneo con armatura parallela; $H=5\text{cm}$ $a=3\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	62
6.14. Caso omogeneo con armatura parallela; $H=10\text{cm}$ $a=1\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	63
6.15. Caso omogeneo con armatura parallela; $H=10\text{cm}$ $a=3\text{cm}$ $s=3\text{cm}$	63
6.16. Caso omogeneo con armatura parallela; $H=10\text{cm}$ $a=1\text{cm}$ $s=9\text{cm}$	64
6.17. Caso omogeneo con armatura parallela; $H=10\text{cm}$ $a=3\text{cm}$ $s=9\text{cm}$	64
7.1. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	73
7.2. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	74
7.3. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	74
7.4. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	75
7.5. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	75
7.6. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	76
7.7. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	76
7.8. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	77
7.9. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	77
7.10. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	78
7.11. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	78
7.12. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	79
7.13. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	79
7.14. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	80
7.15. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	80
7.16. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	81
7.17. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata.; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	81
7.18. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	82
7.19. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	83

7.20. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	83
7.21. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	84
7.22. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	84
7.23. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	85
7.24. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	85
7.25. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	86
7.26. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	86
7.27. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	87
7.28. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	87
7.29. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	88
7.30. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	88
7.31. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	89
7.32. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	89
7.33. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	90
7.34. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	90
7.35. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	91
9.36. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	91
7.37. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	92
7.38. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	92
7.39. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	93
7.40. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	93

7.41. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	94
7.42. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	94
7.43. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	95
7.44. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	95
7.45. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	96
7.46. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	96
7.47. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$	97
7.48. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$	97

Abstract

La misura della resistività elettrica è una tecnica impiegata per valutare il grado di corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato. Il metodo di Wenner è un metodo impiegato in queste misure di resistività.

Si è proceduto a verificare il metodo di Wenner applicato ad una soletta di calcestruzzo, ovvero verificare se i suoi risultati risultano compatibili con quelli ottenuti applicando un metodo di modellazione numerica, il Metodo degli Elementi Finiti (FEM).

Si è poi valutata l'influenza di un confinamento, di disomogeneità e di armature di rinforzo sul metodo stesso.

In particolare si è valutata la sua applicabilità in condizioni di non omogeneità.

Parole chiave: Corrosione, Misure di resistività elettrica, Metodo di Wenner, Calcestruzzo, FEM

Introduzione

La misura della resistività elettrica è una tecnica impiegata per valutare il grado di corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato. Il metodo di Wenner è un metodo molto impiegato in queste misure di resistività.

Nel Capitolo 1 sono state svolte le principali considerazioni sulla corrosione del calcestruzzo armato, mentre nel Capitolo 2 è stato descritto il metodo di Wenner.

Lo scopo di questo lavoro è la verifica del metodo di Wenner, ovvero verificare se i risultati ottenuti applicando la formula di Wenner a dei casi studio relativi ad una soletta di calcestruzzo risultano compatibili con quelli ottenuti applicando un metodo di modellazione numerica, il Metodo degli Elementi Finiti (FEM).

Il metodo di Wenner è stato sviluppato sulla base di alcune ipotesi:

- Dominio non confinato;
- Dominio omogeneo;
- Assenza di armature.

In questo studio si è proceduto rimuovendo progressivamente ciascuna di tali ipotesi semplificative. Dapprima è stato considerato un dominio confinato, ovvero una soletta di calcestruzzo di dimensioni fissate; quindi si è preso in considerazione un dominio confinato non omogeneo, ovvero una soletta di calcestruzzo costituita da due strati con differente resistività; infine è stata analizzata la presenza di un'armatura in acciaio nella medesima soletta, sia in condizioni di omogeneità, sia in condizioni di non omogeneità.

Questi argomenti sono stati svolti nel Capitolo 3, in cui sono stati descritti i vari casi studio, nel Capitolo 4, dove è stato descritto il processo di modellazione numerica adottato, e nel Capitolo 5, dove sono stati riportati i risultati ottenuti.

Sulla base dei risultati ottenuti si è proceduto ad analizzare l'applicabilità del metodo di Wenner e i parametri dai quali questa viene influenzata. In particolare si è proceduto ad studiare la sua applicabilità in condizioni di disomogeneità, ovvero il caso in cui si riscontrano le maggiori discordanze tra i risultati del metodo di Wenner e la realtà. In questa situazione si è ricercato un modello interpretativo dei risultati ottenuti e quindi è stato apportato un fattore correttivo alla formula di Wenner, il quale ne consentisse una maggiore accuratezza in presenza di strati a diversa resistività.

Queste considerazioni sono state svolte nel Capitolo 6 e nel Capitolo 7.

1. La corrosione del calcestruzzo armato

Il calcestruzzo può presentare la durabilità di una pietra naturale, almeno in assenza di alcune specifiche cause di degrado, come gli ambienti acidi o solfatici, il gelo-disgelo, la presenza di aggregati reattivi.

Diverso è il caso delle strutture in calcestruzzo armato, le quali hanno una durata limitata a causa della corrosione delle armature.

1.1. Innesco e propagazione della corrosione

In soluzioni alcaline aerate con $\text{PH} > 11,5$ e in assenza di cloruri, il ferro si ricopre di un film di ossido protettivo di pochi nanometri di spessore. In queste condizioni la velocità di corrosione è praticamente nulla. La stessa cosa succede alle armature annegate nel calcestruzzo correttamente confezionato e messo in opera. Infatti nei suoi pori è presente una soluzione di idrossido di sodio, di potassio e di calcio con un PH compreso tra 13 e 13,5.

Purtroppo, nel tempo, il calcestruzzo può perdere le caratteristiche passivanti. Questo si verifica essenzialmente per due motivi:

- Partendo dagli strati più esterni e passando via via a quelli più interni, l'alcalinità del calcestruzzo viene neutralizzata dall'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno, per cui la soluzione all'interno dei suoi pori passa da $\text{PH} > 13$ a $\text{PH} < 9$. Questo processo, detto processo di carbonatazione, provoca la distruzione del film protettivo sulle armature;
- Nel calcestruzzo a contatto con ambienti contenenti cloruri, questi ioni penetrano fino a raggiungere le armature e quando alla loro superficie superano un tenore critico rompono localmente il film protettivo.

Una volta distrutto il film protettivo, la corrosione si produce solo se alla superficie delle armature sono presenti acqua e ossigeno.

Nella vita delle strutture in calcestruzzo armato si possono individuare due fasi distinte: una fase di innesco della corrosione, in cui si produce la penetrazione della carbonatazione o dei cloruri, la quale porta alla perdita delle condizioni di passività, e una fase di propagazione più o meno veloce dell'attacco, a partire dal momento in cui il film passivo viene distrutto.

1.2. Morfologia, conseguenze e velocità di corrosione

La corrosione da carbonatazione si presenta uniformemente distribuita sulla superficie delle armature. La corrosione da cloruri è invece in generale di tipo localizzato, con attacchi penetranti, che si configurano come crateri (pit), circondati da zone non corrose; solo nel caso di elevati tenori di cloruri (soprattutto al diminuire del PH) la corrosione appare di tipo generalizzato.

I fenomeni corrosivi portano ad una progressiva riduzione dei margini di sicurezza su cui si fonda la progettazione strutturale delle opere in calcestruzzo armato. Infatti:

- Riducono la sezione resistente della armature con conseguente diminuzione della loro capacità di sopportare i carichi statici e dinamici;

- Causano attacchi localizzati che possono ridurre la duttilità delle armature (ovvero il loro allungamento a rottura) al di sotto dei limiti consentiti;
- Riducono l'aderenza tra le armature e il calcestruzzo, o addirittura l'annullano se l'attacco raggiunge nell'acciaio penetrazioni anche solo dell'ordine di 50-200 μm ;
- Generano ossidi che occupano un volume in genere 4-5 volte superiore a quello del ferro da cui provengono, i quali possono quindi causare fessure nel copri ferro fino anche a provocarne l'espulsione o la delaminazione;
- Su alcuni tipi di acciaio ad alta resistenza possono innescare rotture fragili.

Finché la velocità di corrosione si mantiene al di sotto di 1,5-2 $\mu\text{m}/\text{y}$, le conseguenze dell'attacco sulle armature si possono ritenere trascurabili.

1.3. Corrosione da carbonatazione

L'anidride carbonica presente nell'atmosfera quando viene a contatto con il calcestruzzo tende a neutralizzare, a partire dagli strati più esterni, i suoi componenti alcalini. La reazione di carbonatazione si può scrivere schematicamente come:



La carbonatazione non provoca riduzione della resistenza meccanica del calcestruzzo, ma ha importanti conseguenze nei confronti delle armature, portando il PH della soluzione nei pori del calcestruzzo a valori vicini alla neutralità e provocandone così la depassivazione.

L'avanzamento della carbonatazione dipende sia da fattori ambientali (umidità, temperatura, contenuto di anidride carbonica) sia da fattori legati al calcestruzzo stesso (alcalinità, porosità). Particolarmente importanti sono l'umidità e la porosità.

Per quanto riguarda l'umidità si consideri che il trasporto dell'anidride carbonica all'interno del calcestruzzo ha luogo facilmente attraverso i pori riempiti d'aria, mentre avviene molto lentamente in quelli riempiti d'acqua: il rapporto tra le velocità di diffusione nei due casi è di circa 10^4 . Di conseguenza la velocità di diffusione dell'anidride carbonica diminuisce al crescere dell'umidità relativa (più marcatamente al di sopra dell'80%) fino ad annullarsi in calcestruzzo saturo d'acqua. D'altra parte la reazione di carbonatazione si produce soltanto in presenza d'acqua per cui, di fatto, per umidità inferiori al 40% non avviene con velocità apprezzabile. Per questi due motivi opposti, l'intervallo di umidità relativa più pericoloso per la carbonatazione è compreso tra 50 e 80%. Si sottolinea l'estrema importanza, nelle situazioni concrete, del microclima, cioè delle condizioni di umidità e di temperatura che si creano nelle diverse parti della struttura, per effetto anche della geometria della struttura stessa: ad esempio, la velocità di penetrazione all'interno di un edificio è più elevata che non all'esterno, in una zona schermata dalla pioggia più che in una zona non schermata.

Per quanto riguarda, invece, la porosità si sottolinea che tutti i fattori che determinano questa grandezza (rapporto acqua/cemento, messa in opera, costipazione, maturazione) hanno un'importanza decisiva nel determinare la velocità di carbonatazione: ad esempio la penetrazione della carbonatazione diminuisce al diminuire del rapporto acqua/cemento e al crescere del grado di stagionatura.

Una volta che il fronte carbonatato ha raggiunto le armature e le ha depassivate, la corrosione può avere luogo se sono presenti acqua e ossigeno. Se si escludono le condizioni di completa e permanente saturazione del calcestruzzo, l'ossigeno è in grado di raggiungere la superficie delle armature in quantità sufficienti per permettere lo svolgimento del processo corrosivo.

In pratica la velocità di corrosione è determinata dal contenuto d'acqua nel calcestruzzo. Solo in vicinanza delle condizioni di saturazione la velocità di corrosione può raggiungere valori dell'ordine di svariate decine di $\mu\text{m}/\text{y}$. La corrosione da carbonatazione può divenire pericolosa solo in condizioni di elevata umidità, o in presenza di bagnamenti della superficie del calcestruzzo di durata e frequenza tali da far variare il tenore di umidità a livello delle armature.

La situazione è molto più grave se nel calcestruzzo sono presenti cloruri, anche in tenori insufficienti a creare di per sé condizioni di corrosione, perché, a parità di umidità, aumentano la velocità di corrosione e riducono l'intervallo di umidità relativa in cui la velocità di corrosione si può considerare trascurabile.

1.4. Corrosione da cloruri

I cloruri possono penetrare nel calcestruzzo dall'ambiente esterno: questo si verifica nelle strutture marine o nelle opere stradali su cui si spargono sali disgelanti. L'attacco corrosivo si innesca quando alla superficie delle armature la concentrazione dei cloruri raggiunge un valore critico in genere compreso, per strutture esposte all'atmosfera, tra 0,4 e 1% rispetto al peso in cemento.

Il tempo necessario perché il tenore critico sia raggiunto, detto tempo di innesco della corrosione, dipende dal tenore di cloruri sulla superficie esterna del calcestruzzo, dalle caratteristiche della matrice cementizia, dallo spessore di copriferro e dal contenuto critico di cloruri.

Solo nel calcestruzzo completamente saturo d'acqua la penetrazione dei cloruri avviene con un meccanismo di pura diffusione, mentre nella maggior parte delle situazioni, oltre a quello diffusivo, operano anche altri meccanismi di trasporto.

Nel caso di strutture esposte all'atmosfera, una volta che l'attacco si è innescato, la velocità di corrosione può passare da qualche decina di $\mu\text{m}/\text{y}$ a $1\text{mm}/\text{y}$, al crescere del tenore di umidità dal 70 al 95% e del tenore di cloruri dall'1 al 3% (in peso rispetto al cemento). Passando da climi temperati a climi tropicali, la velocità di corrosione può crescere ulteriormente. In pratica, quindi, in strutture contaminate da cloruri l'attacco corrosivo, una volta innescato, può portare in tempi molto brevi a riduzioni inaccettabili della sezione delle armature anche nelle comuni condizioni di esposizione atmosferica.

Il limite inferiore dell'umidità relativa in corrispondenza al quale la velocità di corrosione diviene trascurabile dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo, dal contenuto di cloruri alla sua superficie e dal tipo di sale da cui provengono. In ogni caso risulta molto minore di quello che rende trascurabili gli effetti di corrosione prodotti dalla carbonatazione.

1.5. Prevenzione della corrosione

La prevenzione della corrosione delle armature, e più in generale del degrado di una struttura in calcestruzzo armato, inizia in sede di progetto dell'opera, nel momento della concezione e del calcolo della struttura, del disegno dei suoi particolari costruttivi, della scelta dei materiali da utilizzare e delle loro proporzioni ottimali. Si sviluppa poi nella fase della sua realizzazione con la

preparazione, la messa in opera, la costipazione e la maturazione del calcestruzzo. Continua infine per tutta la sua vita di servizio con interventi programmati di ispezione e manutenzione. Si considerano ora i principali aspetti che influenzano la qualità di un calcestruzzo armato.

1.5.1. Qualità del calcestruzzo

Lo strato di calcestruzzo che ricopre le armature fornisce loro protezione dagli agenti aggressivi che provengono dall'ambiente esterno. Infatti è sufficiente che il calcestruzzo a contatto con la loro superficie rimanga alcalino e privo di cloruri, per garantire condizioni di passività. Per prevenire la corrosione delle armature, quindi, ci si deve porre come primo obiettivo la realizzazione di un calcestruzzo di bassa permeabilità. Particolarmente importanti sono il rapporto acqua/cemento, il contenuto e il tipo di cemento, la messa in opera e la compattazione, la maturazione e la fessurazione.

- **Rapporto acqua/cemento**

Il rapporto tra acqua e cemento al momento dell'impasto è il fattore chiave nel determinare la porosità capillare della pasta cementizia e quindi la resistenza alla penetrazione delle specie aggressive (oltre che la resistenza meccanica). La scelta di un rapporto sufficientemente basso in relazione all'aggressività ambientale è il primo passo indispensabile per ottenere un calcestruzzo impervio resistente sia alla carbonatazione sia alla penetrazione dei cloruri.

- **Contenuto di cemento**

L'aumento del contenuto di cemento, per un dato rapporto acqua/cemento, consente l'impiego di una maggiore quantità di acqua nell'impasto e quindi una maggiore lavorabilità; tuttavia, un aumento del dosaggio di cemento può favorire la fessurazione dovuta al calore di idratazione o al ritiro igrometrico oppure alla reazione alcali-aggregati.

- **Tipo di cemento**

Il tipo di cemento assume particolare importanza nel caso di strutture che debbano operare in presenza di cloruri. A parità di altre condizioni, i cementi di miscela e quelli di altoforno sono quelli che maggiormente si oppongono alla penetrazione dei cloruri. Purtroppo alcuni cementi d'altoforno hanno spesso un contenuto di cloruri compreso nell'intervallo 0,1-0,2% che in parte vanifica i vantaggi sopra indicati. I cementi di miscela hanno inoltre effetti benefici in relazione all'attacco solfatico e alla relazione alcali-aggregati e sono caratterizzati da un basso calore di idratazione.

- **Messa in opera e compattazione**

I vuoti rimasti dopo la compattazione, dovuti alla segregazione o a insufficiente vibrazione, aumentano la permeabilità della struttura, non consentono una perfetta passivazione delle armature e portano il tenore critico di cloruri a valori più bassi. La messa in opera e la compattazione devono essere fatte al fine di riempire perfettamente la cassaforma e di rimuovere l'aria intrappolata nel

calcestruzzo fresco. La compattazione, che consiste nella vibrazione del calcestruzzo per rimuovere l'aria, può portare a segregazione, che va evitata. L'attenzione richiesta nella compattazione deve aumentare man mano che la lavorabilità diminuisce. Una eccessiva vibrazione può però portare alla segregazione dei calcestruzzi con elevata lavorabilità. L'aggiunta di fluidificanti quando sono richieste alte lavorabilità e bassi rapporti acqua/cemento diviene quindi necessaria.

- **Maturazione**

La maturazione (o stagionatura) del calcestruzzo consiste nel favorire l'idratazione del cemento attraverso un controllo del contenuto di umidità e della temperatura del calcestruzzo nei giorni successivi alla messa in opera. Spesso per ottenere un'adeguata maturazione è sufficiente bagnare la superficie, ridurre l'evaporazione o l'allontanamento dell'acqua, o ritardare la rimozione dei casseri. La maturazione influenza sia la resistenza meccanica che la durabilità, ma le conseguenze di una cattiva maturazione si risentono soprattutto su quest'ultima.

- **Fessure**

Le fessure si formano quando all'interno del calcestruzzo si generano sforzi di trazione maggiori della sua resistenza. Oltre alle sollecitazioni meccaniche dovute direttamente ai carichi applicati alla struttura, gli sforzi di trazione nel calcestruzzo possono essere dovuti anche ad altre cause. Un esempio è dato dalla presenza di vincoli interni o esterni che impediscono il ritiro del calcestruzzo per effetto delle variazioni di umidità (come il ritiro plastico o il ritiro igrometrico). Nel caso di getti di grande spessore la fessurazione può avere luogo per variazioni di temperatura eccessive tra l'interno e la superficie del getto. Altre fessure sono legate alla formazione di composti espansivi all'interno del calcestruzzo, come avviene in seguito alla corrosione delle armature, alla reazione alcali-aggregati, all'attacco solfatico o all'attacco da gelo-disgelo.

Le fessure possono ridurre il tempo di innesco, in quanto risultano vie preferenziali per la propagazione della carbonatazione e dei cloruri. Entro certi limiti la presenza di fessure non è pericolosa: si osserva infatti che se le dimensioni delle fessure sono modeste (per esempio 0,1 mm), dopo l'innesco dell'attacco corrosivo i prodotti di corrosione dapprima sigillano le fessure, almeno nella zona più vicina alle armature, e poi creano le condizioni perché il film protettivo si riformi.

- **Spessore di copriferro**

L'aumento dello spessore di copriferro consente di allungare il tempo necessario per l'innesco di fenomeni corrosivi, aumentando la profondità che la carbonatazione o la penetrazione dei cloruri devono raggiungere per depassivare le armature.

Quando si progetta una struttura, note le caratteristiche del calcestruzzo e quindi la velocità con cui possono penetrare la carbonatazione o i cloruri, è possibile determinare lo spessore di copriferro necessario per garantire un tempo di innesco sufficientemente lungo. Al crescere dell'aggressività ambientale è in teoria possibile, attraverso un aumento dello spessore di copriferro, mantenere costante il grado di affidabilità delle strutture. In pratica, però, gli spessori non possono superare certi limiti per motivi economici e tecnici (per esempio per spessori di copriferro elevati aumenta il rischio di fessurazione a causa del ritiro igrometrico del calcestruzzo).

2. Applicazione del metodo di Wenner al calcestruzzo armato

2.1. Introduzione

Il metodo di Wenner, detto anche dei quattro elettrodi, è un metodo impiegato per le misure di resistività.

Come noto, in un conduttore ohmico la corrente elettrica incontra una resistenza R che dipende dalla differenza di potenziale ΔV e dalla corrente circolante I , come espresso nella Legge di Ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.1)$$

Per un conduttore omogeneo (ovvero un corpo in cui ogni sua parte ha le stesse proprietà fisiche) e isotropo (ovvero un corpo le cui proprietà fisiche non dipendono dalla direzione lungo la quale vengono considerate), di sezione S e lunghezza l , la resistenza elettrica può essere espressa come:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.2)$$

Con il termine ρ si indica la resistività del materiale, ovvero la sua attitudine ad opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche.

2.2. La resistività del calcestruzzo armato

La resistività del calcestruzzo è un parametro importante per descrivere, ad esempio, il grado di saturazione d'acqua, la resistenza alla penetrazione dei cloruri e il grado di corrosione delle armature in una struttura in calcestruzzo armato. Il valore di resistività del calcestruzzo può andare da poche decine fino ad alcune migliaia di Ωm .

Esso è funzione del contenuto d'acqua del calcestruzzo (ovvero la sua umidità relativa), del tipo di cemento usato (cemento Portland oppure cemento di miscela), del rapporto acqua/cemento, della presenza o meno di cloruri, del fatto che il calcestruzzo presenti o meno un processo di carbonatazione. Tutti questi parametri possono essere correlati in base alla loro influenza sulla velocità di diffusione all'interno del calcestruzzo e sulla microstruttura del calcestruzzo stesso.

Un alto valore di umidità relativa implica la presenza di un gran numero di pori riempiti d'acqua all'interno del calcestruzzo, il rapporto acqua/cemento e il tipo di cemento determina il volume e la distribuzione di questi pori nel calcestruzzo, la presenza di cloruri incrementa la conduttività della soluzione presente all'interno di questi pori, mentre la carbonatazione la diminuisce.

Nel valutare la corrosione delle armature in strutture in calcestruzzo armato si consideri che, una volta che le armature sono state depassivate, la velocità di corrosione può essere correlata alla resistività del calcestruzzo.

Anche se sono stati proposti criteri empirici per la stima della velocità di corrosione sulla base del valore della resistività del calcestruzzo, questi non hanno validità generale, in quanto la resistività del calcestruzzo può variare in modo considerevole in relazione alle condizioni locali e alle influenze ambientali. Non valgono, per esempio, per le armature passive, cioè nel periodo di innesco della corrosione, quando le armature non si corrodono anche se il calcestruzzo è umido e quindi la sua resistività è bassa.

All'aumentare del valore di resistività del calcestruzzo si ha una diminuzione della velocità di corrosione. Indicativamente si può assumere che nel periodo di propagazione la velocità di corrosione sia:

- Trascurabile per resistività maggiore di 1000 Ωm ;
- Bassa per resistività compresa nell'intervallo 1000-500 Ωm ;
- Moderata per resistività compresa nell'intervallo 500-200 Ωm ;
- Alta per resistività compresa nell'intervallo 200-100 Ωm ;
- Molto alta per resistività inferiore a 100 Ωm .

La misura di resistività è utile soprattutto per individuare, all'interno di una struttura, le zone di maggiore corrosione oppure per valutare le variazioni subite dal calcestruzzo nel tempo (per esempio la penetrazione dei cloruri o la carbonatazione).

2.3. Il metodo di Wenner

Come detto sopra, il metodo di Wenner è un metodo impiegato per le misure di resistività. La Figura 2.1 sottostante rappresenta la schematizzazione del metodo di Wenner.

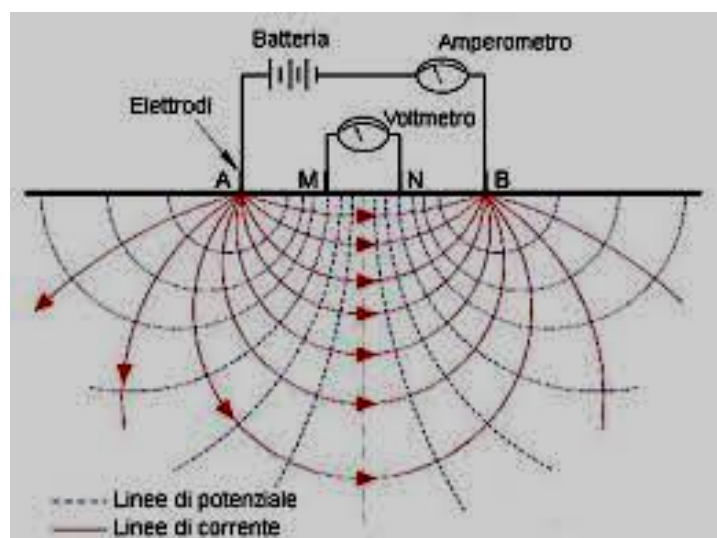


Figura 2.1. Metodo di Wenner

La misura è effettuata disponendo quattro elettrodi, solitamente di rame o di acciaio inossidabile, allineati ed equidistanti di una lunghezza a sulla superficie del mezzo in esame; affinché la validità del metodo sia il più possibile rigorosa, è necessario che gli elettrodi siano elettrodi sferici di piccole dimensioni, con connessioni isolate. Due picchetti, collegati ad un generatore di corrente, sono detti amperometrici, mentre gli altri due, detti voltmetrici, sono collegati ad un voltmetro: quindi in pratica si fa circolare una corrente I tra i due elettrodi esterni e si misura la caduta ohmica

ΔV tra i due elettrodi interni. Spesso la misura è ripetuta invertendo il senso di circolazione della corrente e aumentando la distanza a poiché all'aumentare della distanza tra gli elettrodi aumenta la penetrazione della corrente nel mezzo e così è possibile ottenere delle misure riferite a profondità diverse.

Il maggior pregio del metodo di Wenner consiste nella sua semplicità, sia di impiego sia di interpretazione.

Il limite di questo metodo, però, sta nel fatto di presupporre l'omogeneità del dominio a cui è applicato, almeno per quanto riguarda la sua zona di influenza.

Infatti se il dominio è omogeneo, almeno fino ad una profondità pari alla semidistanza $3/2 a$ tra i due elettrodi esterni, il campo elettrico generato dalla circolazione di corrente ha un andamento semisferico. In questo caso il potenziale all'elettrodo M è pari a :

$$E_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right) \quad (2.3)$$

Allo stesso modo il potenziale all'elettrodo N è pari a :

$$E_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{NB}} \right) \quad (2.4)$$

Quindi tale la caduta ohmica ΔV misurata dal voltmetro tra l'elettrodo M e l'elettrodo N è data da:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{NB}} \right) \right] \quad (2.5)$$

Dato che $r_{AM} = r_{MN} = r_{NB} = a$, sarà $r_{MB} = r_{AN} = 2a$ e quindi si può semplificare l'espressione tra parentesi nell'equazione 2.5 e porla pari a a . Si ricava quindi l'espressione della caduta ohmica tra i due elettrodi interni del metodo di Wenner, ovvero la formula di Wenner:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (2.6)$$

Dalla relazione è possibile quindi ricavare il valore della resistività ρ , noti ΔV , I , a .

Tale relazione si basa su due ipotesi semplificative:

- Dominio infinito, ovvero il campo elettrico non è soggetto ad alcun tipo di confinamento;
- Dominio omogeneo, ovvero l'intero dominio deve presentare le medesime proprietà termofisiche.

Rimuovendo queste ipotesi il valore di resistività calcolato con il metodo di Wenner può differire anche significativamente dal valore di resistività reale. Se, ad esempio, il terreno non è omogeneo ma costituito da due strati aventi differente resistività, l'andamento del campo elettrico risulta distorto rispetto al caso di campo elettrico semisferico descritto sopra. Il valore della resistività ottenuto con la formula sopra indicata, valida per mezzi omogenei, assume il significato di resistività apparente e può discostarsi anche notevolmente dal valore vero.

3. I casi studio

Lo scopo di questo lavoro è la verifica del metodo di Wenner. Per fare questo si intende verificare se, considerando un dominio che presenti una serie di valori imposti di resistività, la caduta ohmica ricavata applicando la formula di Wenner 2.6 risulta comparabile con quella ricavata da un simulatore numerico. In questo modo, praticamente, si intende verificare se le resistività calcolate con il metodo di Wenner risultano equivalenti a quelle assegnate al dominio oggetto di analisi. Per la verifica del metodo di Wenner sono stati considerati una serie di casi studio. Innanzitutto si è proceduto a rimuovere l'ipotesi di dominio infinito, introducendo un dominio geometricamente confinato, ovvero una soletta di calcestruzzo di dimensioni fissate. Dapprima è stato considerato un dominio omogeneo, ma successivamente è stata rimossa anche l'ipotesi di omogeneità e si è preso in considerazione un dominio non omogeneo (ovvero una soletta di calcestruzzo che presentasse due strati con differente resistività). Infine, sia per il caso omogeneo, sia per il caso non omogeneo, nella soletta è stata introdotta un'armatura, distinguendo tra il caso di armatura disposta perpendicolarmente e quello di armatura disposta parallelamente rispetto al posizionamento del dispositivo di Wenner.

Si descrivono ora i diversi casi studio che sono stati oggetto di simulazione.

3.1. Caso omogeneo

Nella Figura 3.1 sottostante si rappresenta la geometria considerata per il caso omogeneo. Con il termine d si indica il diametro degli elettrodi, con il termine a la distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner, mentre con il termine I la corrente circolante tra i due elettrodi esterni e con il termine V si indica la caduta ohmica misurata tra i due elettrodi interni, come rappresentato nella Figura 2.1. Con i termini H , L , W , invece, si indicano le dimensioni geometriche della soletta di calcestruzzo (ovvero altezza, lunghezza e profondità rispettivamente).

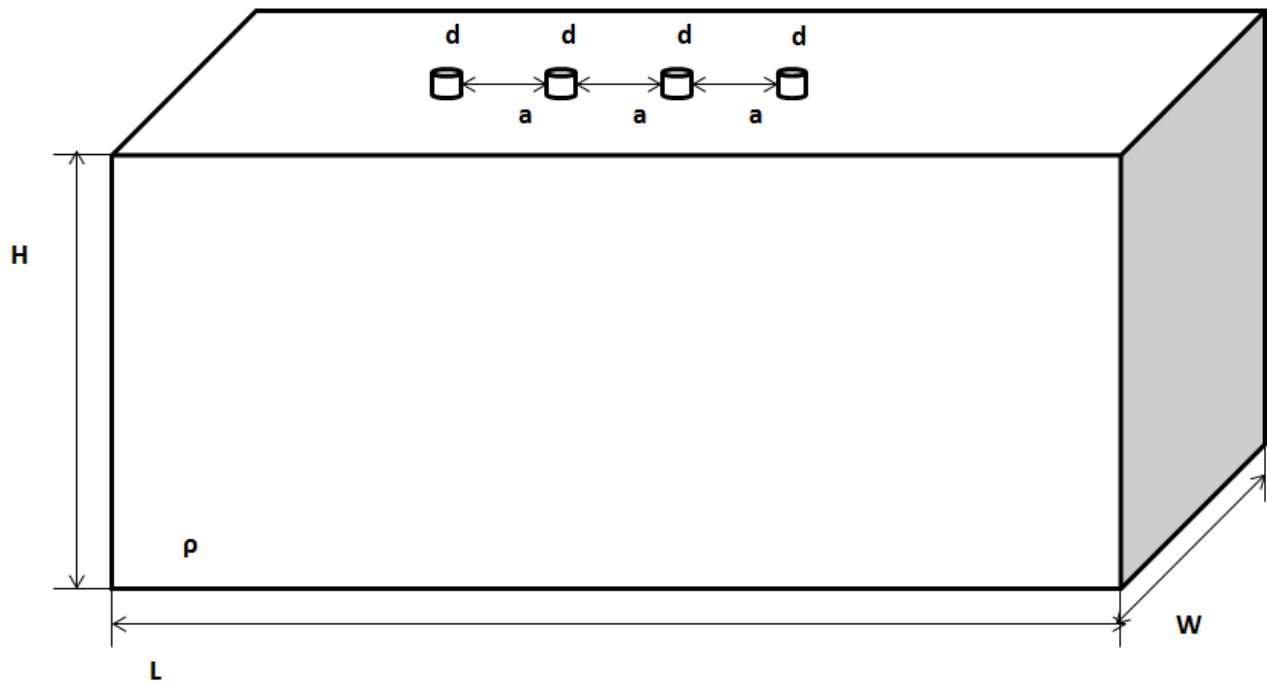


Figura 3.1. Caso omogeneo

Tra i parametri rappresentati in figura, i seguenti sono stati mantenuti fissi, con i valori indicati di seguito:

- $L=20cm$;
- $W=20cm$;
- $d=0,5cm$;
- $I=1mA$.

Per i parametri seguenti, invece, è stata assunta una serie di valori:

- $H=2-5-10cm$;
- $a=1-3cm$;
- $\rho=10-50-100-500\Omega m$.

3.2. Caso non omogeneo

Nella Figura 3.2 sottostante si rappresenta la geometria considerata per il caso non omogeneo. Con i termini H_1 e ρ_1 si indicano rispettivamente l'altezza e la resistività del primo strato, che è meno resistivo, mentre con i termini H_2 e ρ_2 si indicano rispettivamente l'altezza e la resistività del secondo strato, quello più resistivo. Si è assunta questa configurazione perché rappresenta una situazione facilmente riscontrabile nella realtà, ovvero la presenza di un strato esterno sottile della soletta di calcestruzzo in cui sia già stata completata la fase di innesco della corrosione e che quindi presenti una resistività molto inferiore rispetto al resto della struttura.

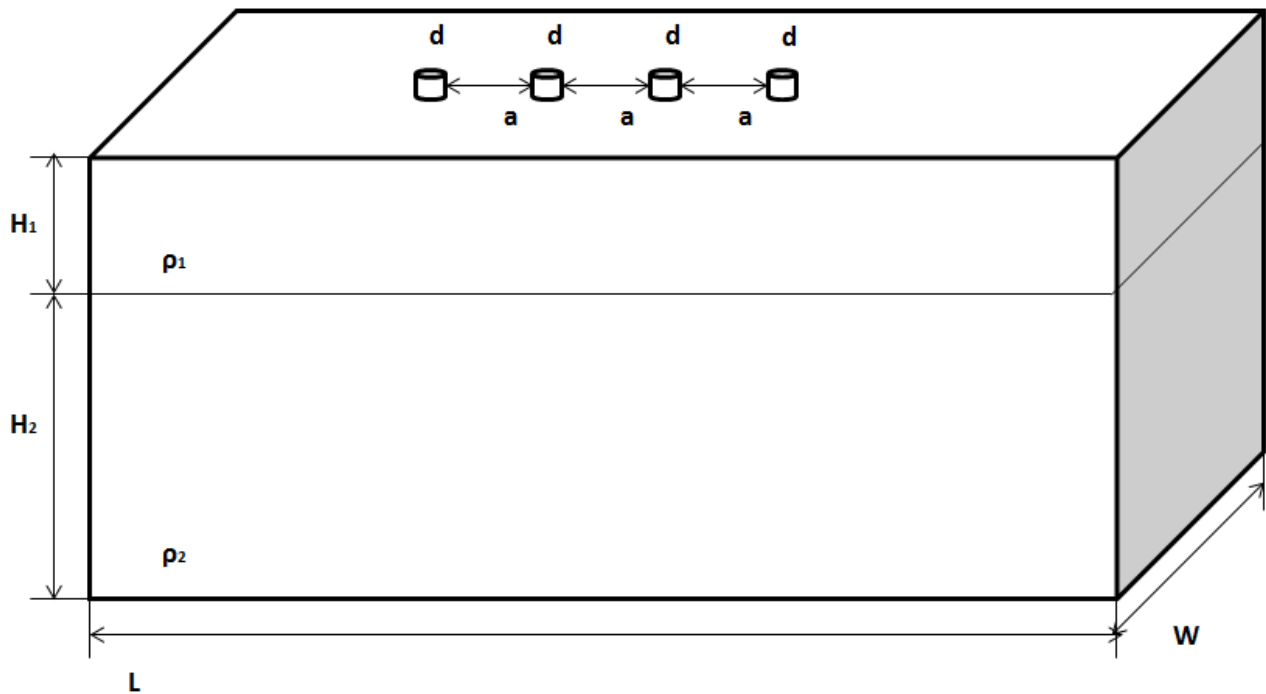


Figura 3.2. Caso non omogeneo

Tra i parametri rappresentati in figura, i parametri L , W , d , a , I hanno i medesimi valori indicati nel Paragrafo 3.1.

L'altezza totale della soletta, poi, è stata mantenuta fissa, con il valore indicato di seguito:

- $H_1 + H_2 = 10\text{cm}$.

I parametri nuovi rispetto al caso omogeneo sono i seguenti, per i quali è stata assunta una serie di valori:

- $H_1 = 1-3\text{cm}$;
- $H_2 = 9-7\text{cm}$;
- $\rho_1 = 10-50\Omega\text{m}$;
- $\rho_2 = 10-50-100-500\Omega\text{m}$.

3.3. Caso omogeneo con armatura

Nelle Figure 3.3 e 3.4 sottostanti si rappresenta la geometria considerata per il caso omogeneo con armatura, distinguendo tra il caso di armatura perpendicolare e quello di armatura parallela al dispositivo di Wenner. Con il termine D si indica il diametro dell'armatura, con il termine ρ_D si indica la resistività dell'acciaio dell'armatura, mentre con il termine s si indica lo spessore del copriferro.

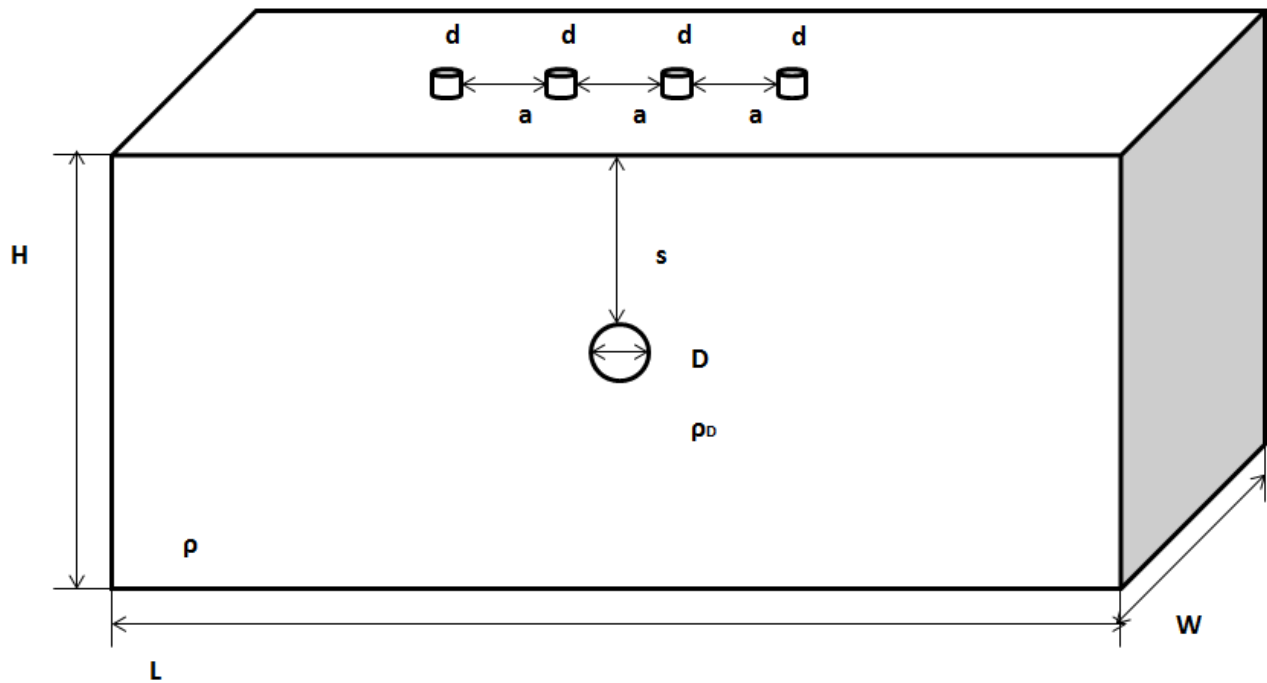


Figura 3.3. Caso omogeneo con armatura perpendicolare

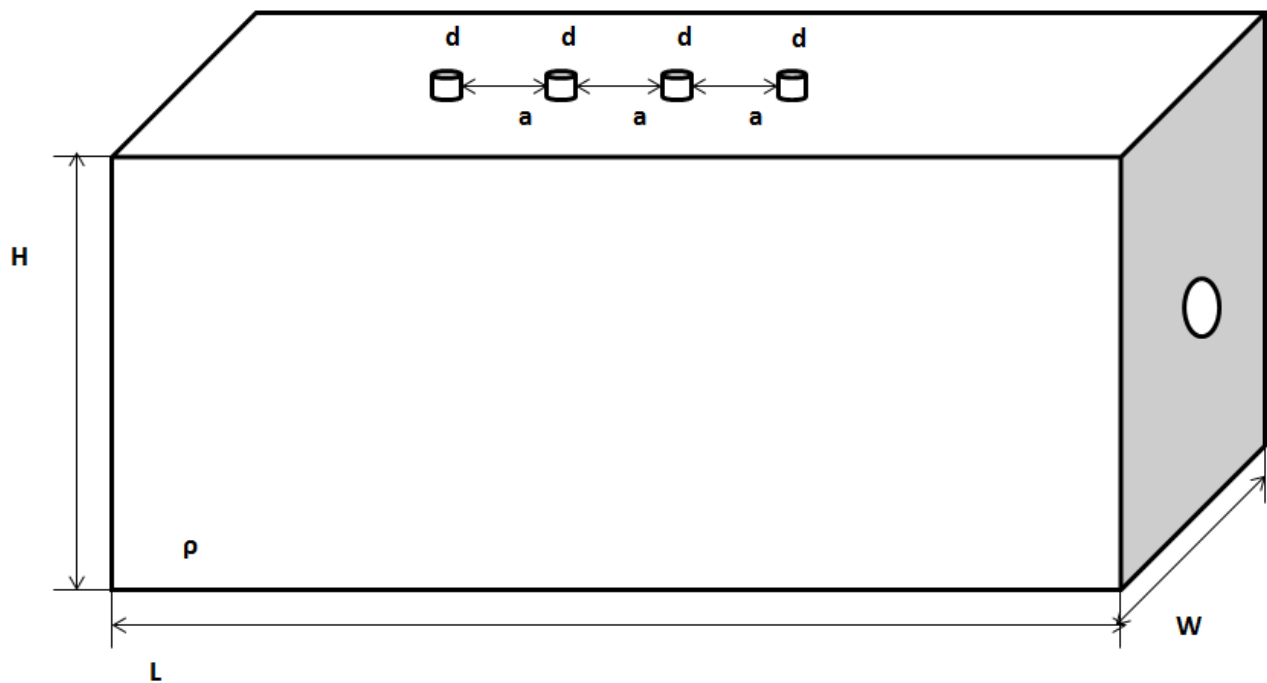


Figura 3.4. Caso omogeneo con armatura parallela

Tra i parametri rappresentati nelle figure, i parametri L , W , d , a , l hanno i medesimi valori indicati nel Paragrafo 3.1.

Tra i parametri nuovi rappresentati, poi, i seguenti sono stati mantenuti fissi, con i valori seguenti:

- $D=1\text{cm}$;
- $\rho_D=7,14 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$;

Per i parametri seguenti, invece, è stata assunta una serie di valori:

- $H=5-10cm$;
- $s=3-9cm$.

3.4. Caso non omogeneo con armatura

Nelle Figure 3.5 e 3.6 sottostanti si rappresenta la geometria considerata per il caso non omogeneo con armatura, distinguendo tra il caso di armatura perpendicolare e quello di armatura parallela al dispositivo di Wenner.

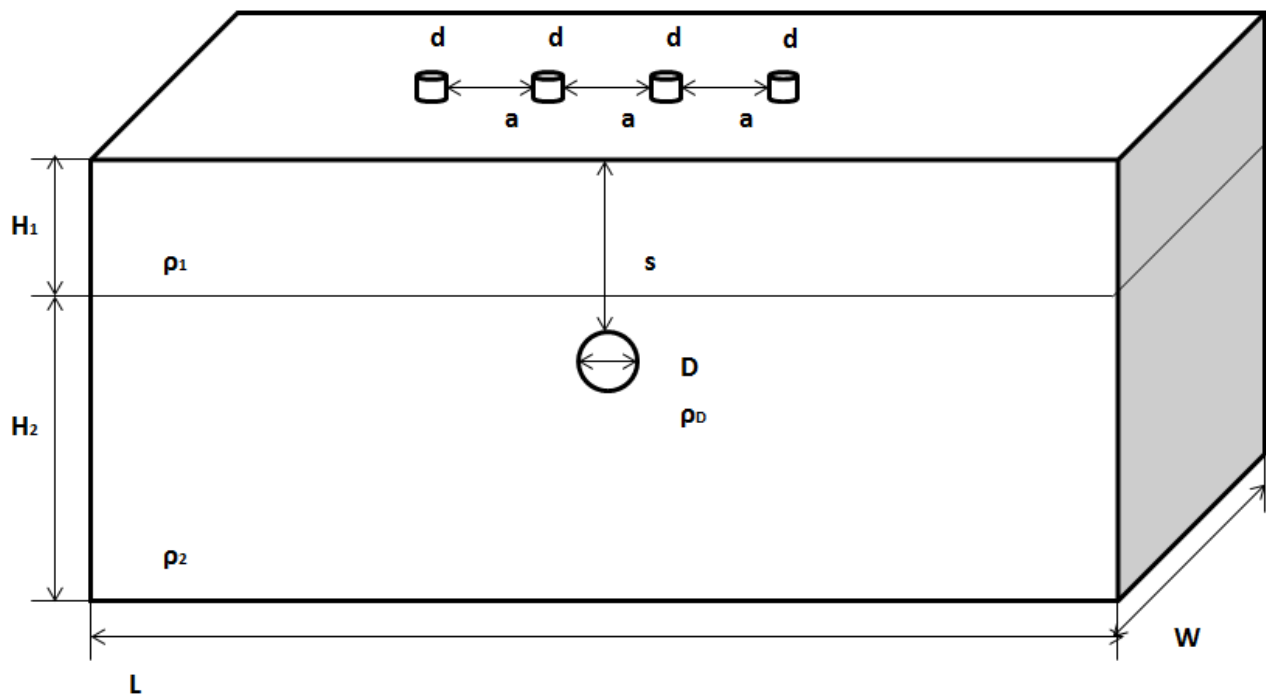


Figura 3.5. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare

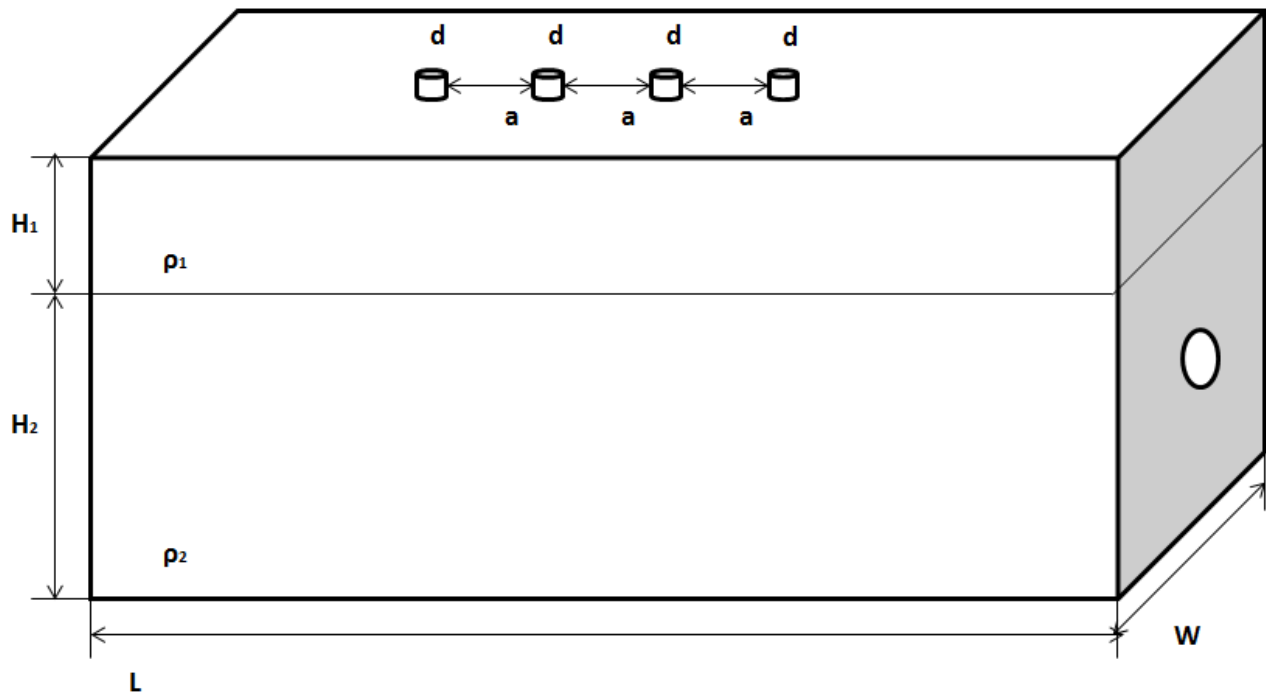


Figura 3.6. Caso non omogeneo con armatura parallela

Tra i parametri rappresentati nelle figure, L , W , d , a , I , H_1 , H_2 , ρ_1 , ρ_2 hanno i medesimi valori indicati nei Paragrafi 3.1 e 3.2, mentre D , ρ_D , hanno gli stessi valori indicati nel Paragrafo 3.3. Lo spessore del copriferro, poi, è stata mantenuto fisso, con il valore indicato di seguito:

- $s=3cm$.

4. La modellazione numerica

Per la modellazione dei casi studio descritti nel Capitolo 3 si è adottato il Metodo degli Elementi Finiti (FEM, Finite Element Method), nel quale il dominio del caso in esame viene discretizzato. FEM è il metodo più impiegato nella modellazione e sul mercato vi sono diversi software impiegati nel campo ingegneristico che sono stati sviluppati per risolvere simulazioni attraverso FEM. In questo lavoro è stato impiegato il software Comsol Multiphysics, il quale, come dice il nome, permette di costruire simulazioni multifisiche, dove fisiche differenti interagiscono tra loro. Il fine principale della modellazione al computer è la risoluzione del campo elettrico nell'elettrolita. La distribuzione del potenziale è ottenuta simulando le condizioni e le reazioni elettrochimiche per i casi in esame. In un sistema puramente ohmico questo si ottiene risolvendo l'equazione di Laplace nel dominio elettrolitico. L'equazione di Laplace è derivata da due differenti equazioni:

- La legge di Ohm:

$$i = \frac{\nabla E}{\rho} \quad (4.1)$$

Dove con il termine ρ si indica la resistività, mentre con il termine ∇E si indica il gradiente di potenziale;

- La conservazione della carica espressa dall'equazione di continuità:

$$\text{div}(i) + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

Dove con il termine $\text{div}(i)$ si indica la divergenza della densità di corrente i , mentre con il termine ∂q si indica il tasso di variazione della densità di carica q .

In caso di stato stazionario si può riscrivere l'equazione come:

$$\text{div}(i) = 0 \quad (4.3)$$

La legge di Laplace è ottenuta combinando l'equazione 4.1 e l'equazione 4.3, ottenendo:

$$\nabla E^2 = 0 \quad (4.4)$$

L'equazione di Laplace può essere applicata nello studio di un vasto campo di fenomeni, tra cui anche la descrizione della distribuzione di un campo elettrico. L'equazione di Laplace può essere risolta analiticamente solo in un campo molto ristretto di casi e di geometrie, mentre per tutti gli altri casi si ricorre all'analisi numerica. Nella modellazione al computer non ci sono limiti sulle geometrie o su condizioni al contorno non lineari ed inoltre possono essere analizzati anche i casi in regime variabile.

Nella realtà si deve però considerare che il sistema è più complicato rispetto al caso puramente ohmico, e questo dipende da diversi fattori:

- Vi è una caduta di potenziale all'interfaccia elettrodo-elettrolita, dovuta a reazioni elettrochimiche superficiali e alle proprietà elettrolitiche;
- Vi sono fenomeni di polarizzazione di concentrazione, dovuti a reazioni elettrochimiche all'interfaccia, le quali comportano un consumo o una produzione di componenti chimici, creando così un gradiente di concentrazione nell'elettrolita. Fenomeni di trasporto convettivi e diffusivi tendono a ristabilire condizioni di equilibrio;
- Vi sono sovratensioni associate alle reazioni di elettrodo che consentono il trasferimento di carica tra elettrodo ed elettrolita e sono dovute all'esistenza all'interfaccia elettrodo-elettrolita di una barriera energetica che si oppone a questo trasferimento.

Un modello di distribuzione di corrente che si basa sul caso puramente ohmico è detto modello di distribuzione di corrente primaria. Un modello più completo, che tiene conto anche delle sovratensioni di attivazioni, è il modello di distribuzione di corrente secondaria; il modello più complesso, invece, che tiene conto anche delle polarizzazioni di concentrazioni, è il modello di distribuzione di corrente terziaria.

4.1. La modellazione dei casi studio

Come detto prima lo strumento di simulazione in questo lavoro è il software Comsol Multiphysic. Nei casi studio di questo lavoro, per semplicità, si fa riferimento al caso di distribuzione di corrente primaria.

Nella modellazione si devono considerare le condizioni al contorno: in tutti i casi studio si è assunta una condizione di isolamento elettrico su tutta la superficie del dominio considerato, ad eccezione dei due elettrodi esterni, tra i quali si fa circolare corrente.

Un'altra considerazione importante riguarda la mesh, dove con mesh si intende quel passaggio della modellazione in cui la geometria presa in esame viene suddivisa in sottodomini. Questo processo di discretizzazione è necessario per trasformare un oggetto continuo, come la geometria in esame, in un'entità numerica che può essere analizzata con la simulazione numerica. Il processo di mesh influenza notevolmente la modellazione: infatti un numero troppo basso di elementi creato nel processo di mesh può portare a risultati non attendibili, mentre un numero troppo elevato può portare ad eccessivi tempi di computazione. Nel software Comsol Multiphysics è presente un apposito comando per la creazione della mesh e nei casi studiati si è fatto riferimento ad una mesh estremamente fine, in particolare per la zona nell'intorno degli elettrodi.

Si riportano di seguito delle immagini della mesh e della risoluzione per un esempio di ciascuno dei casi studio analizzati e presentati nel Capitolo 3.

Nelle Figure 4.1 e 4.2 seguenti si riportano mesh e risoluzione per un caso omogeneo con $H=10cm$, $a=1cm$, $\rho=10\Omega m$, $I=1mA$.

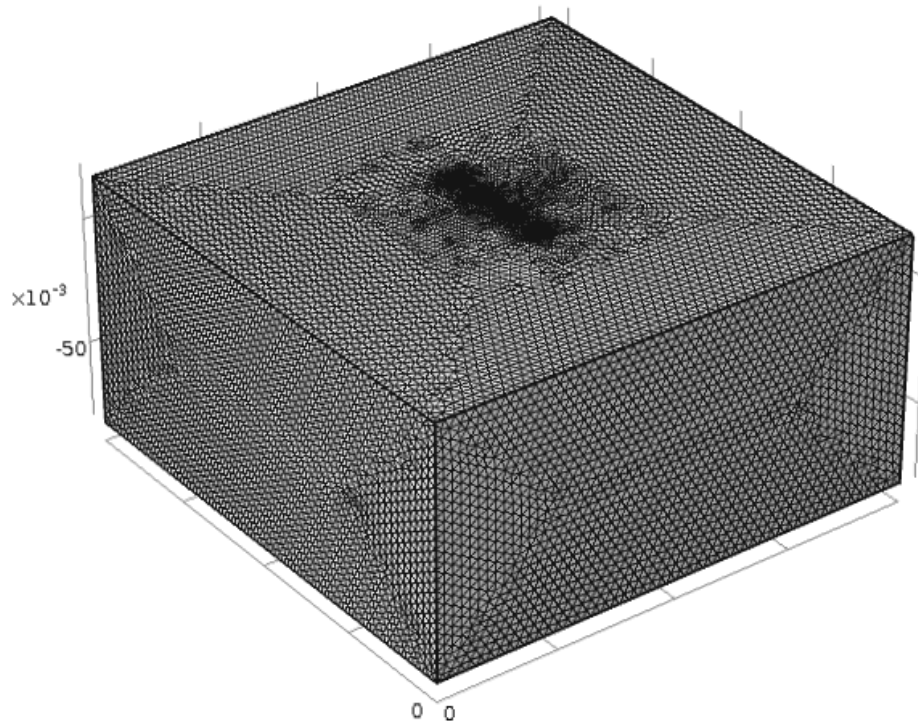


Figura 4.1. Esempio mesh caso omogeneo

Slice: Electrolyte potential (V) Streamline: + Electrolyte current density vector

COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.298

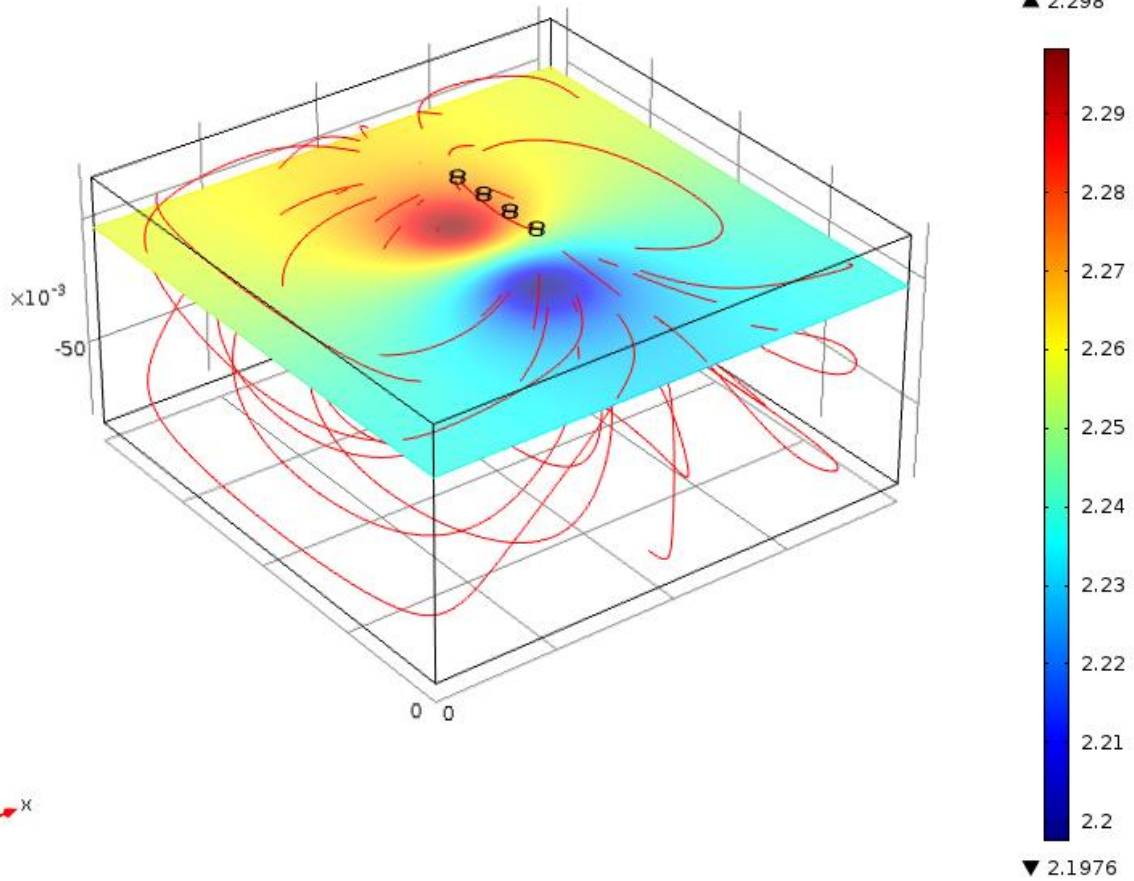


Figura 4.2. Esempio risoluzione caso omogeneo

Nelle Figure 4.3 e 4.4 seguenti si riportano mesh e risoluzione per un caso non omogeneo con $H_1=1cm$, $H_2=9cm$, $a=1cm$, $\rho_1=10\Omega m$, $\rho_2=100\Omega m$, $I=1mA$.

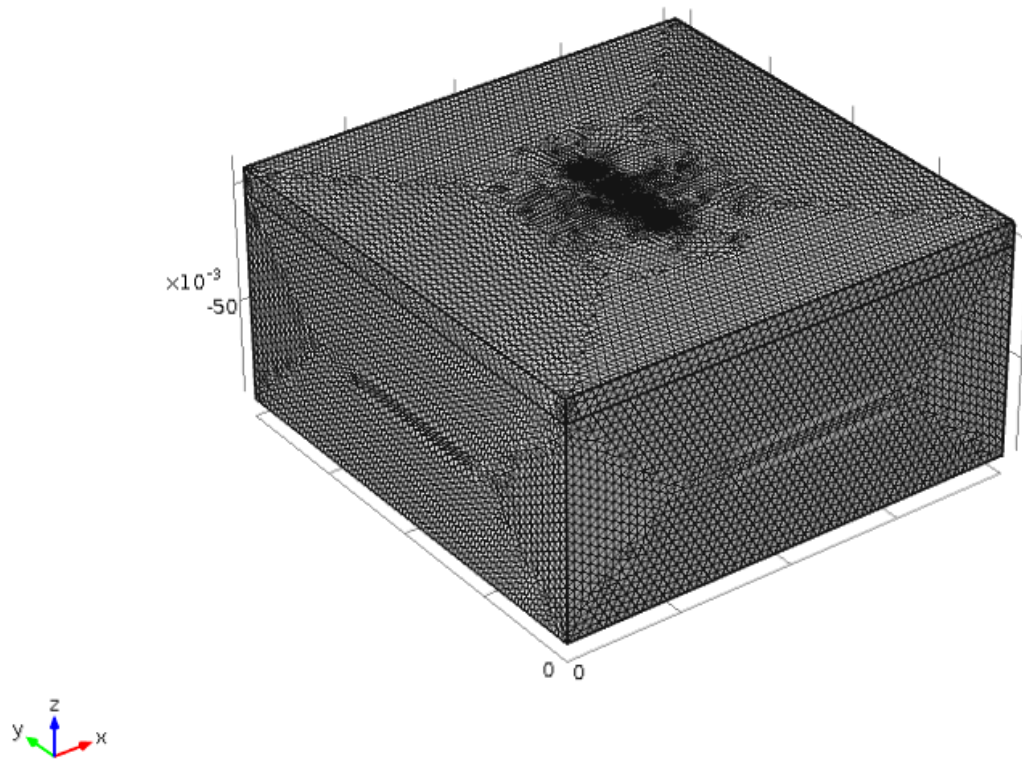


Figura 4.3. Esempio mesh caso non omogeneo

Slice: Electrolyte potential (V) Streamline: + Electrolyte current density vector

COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.6354

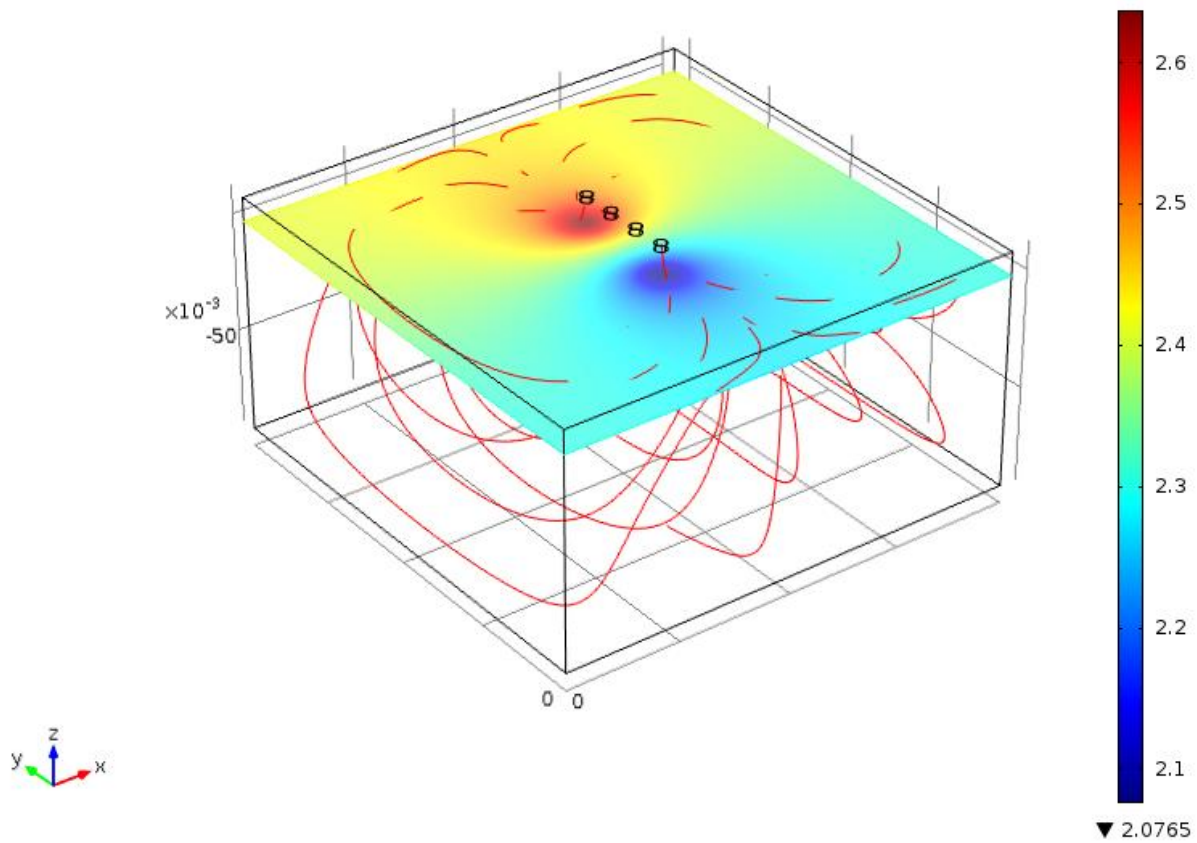


Figura 4.4. Esempio risoluzione caso non omogeneo

Nelle Figure 4.5 e 4.6 seguenti si riportano mesh e risoluzione per un caso omogeneo con armatura perpendicolare al dispositivo di Wenner, con $H=10\text{cm}$, $a=1\text{cm}$, $\rho=10\Omega\text{m}$, $I=1\text{mA}$, $s=3\text{cm}$.

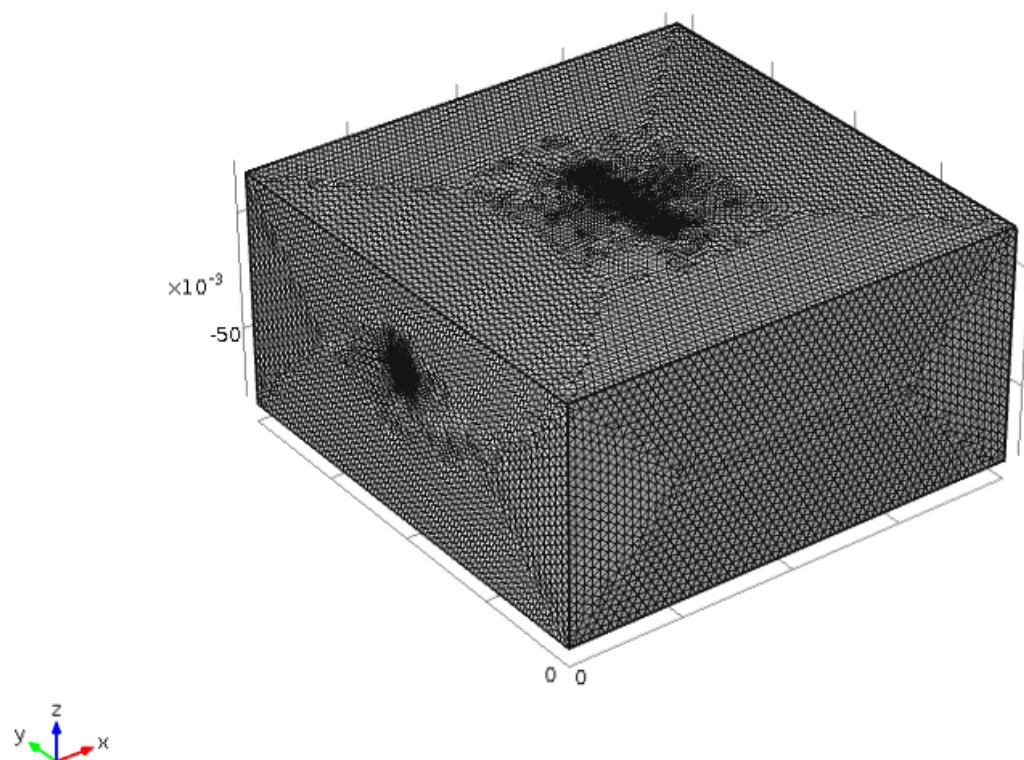


Figura 4.5. Esempio mesh caso omogeneo con armatura perpendicolare

Slice: Electrolyte potential (V) Streamline: + Electrolyte current density vector

COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.2956

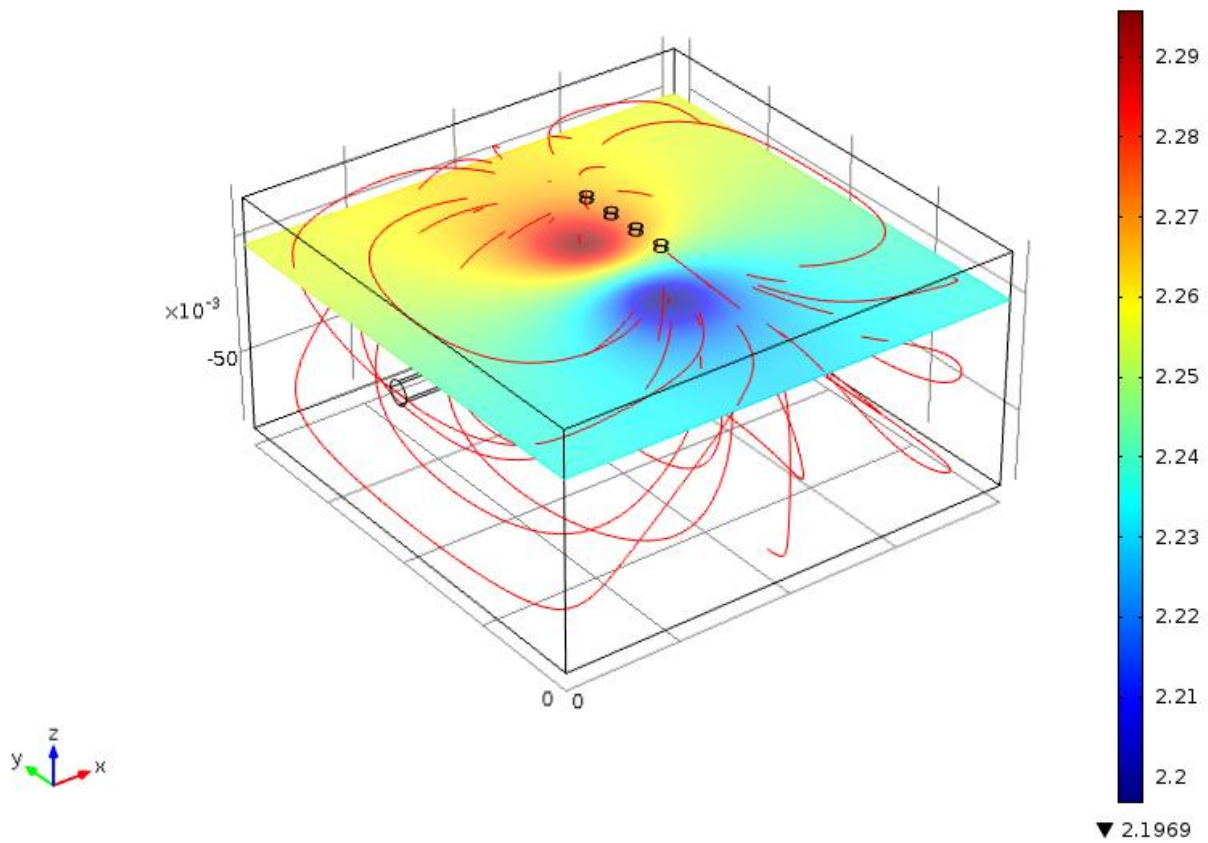


Figura 4.6. Esempio risoluzione caso omogeneo con armatura perpendicolare

Nelle Figure 4.7 e 4.8 seguenti si riportano mesh e risoluzione per un caso omogeneo con armatura parallela al dispositivo di Wenner, con $H=10\text{cm}$, $a=1\text{cm}$, $\rho=10\Omega\text{m}$, $I=1\text{mA}$, $s=3\text{cm}$.

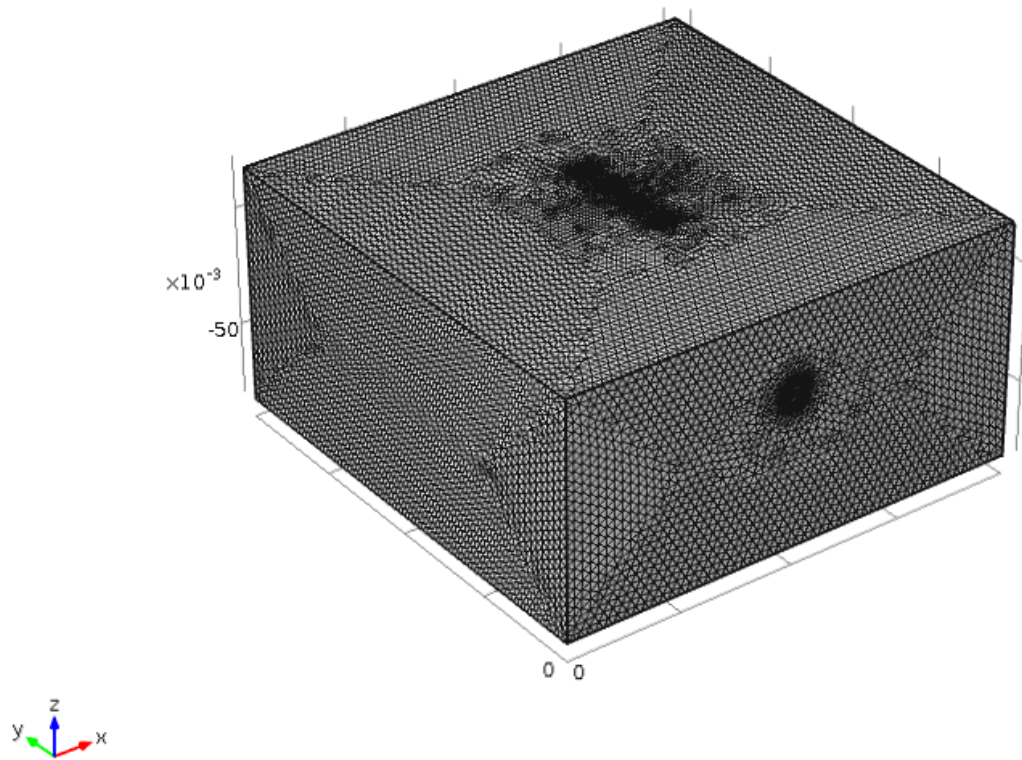


Figura 4.7. Esempio mesh caso omogeneo con armatura parallela

Slice: Electrolyte potential (V) Streamline: + Electrolyte current density vector

COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.2772

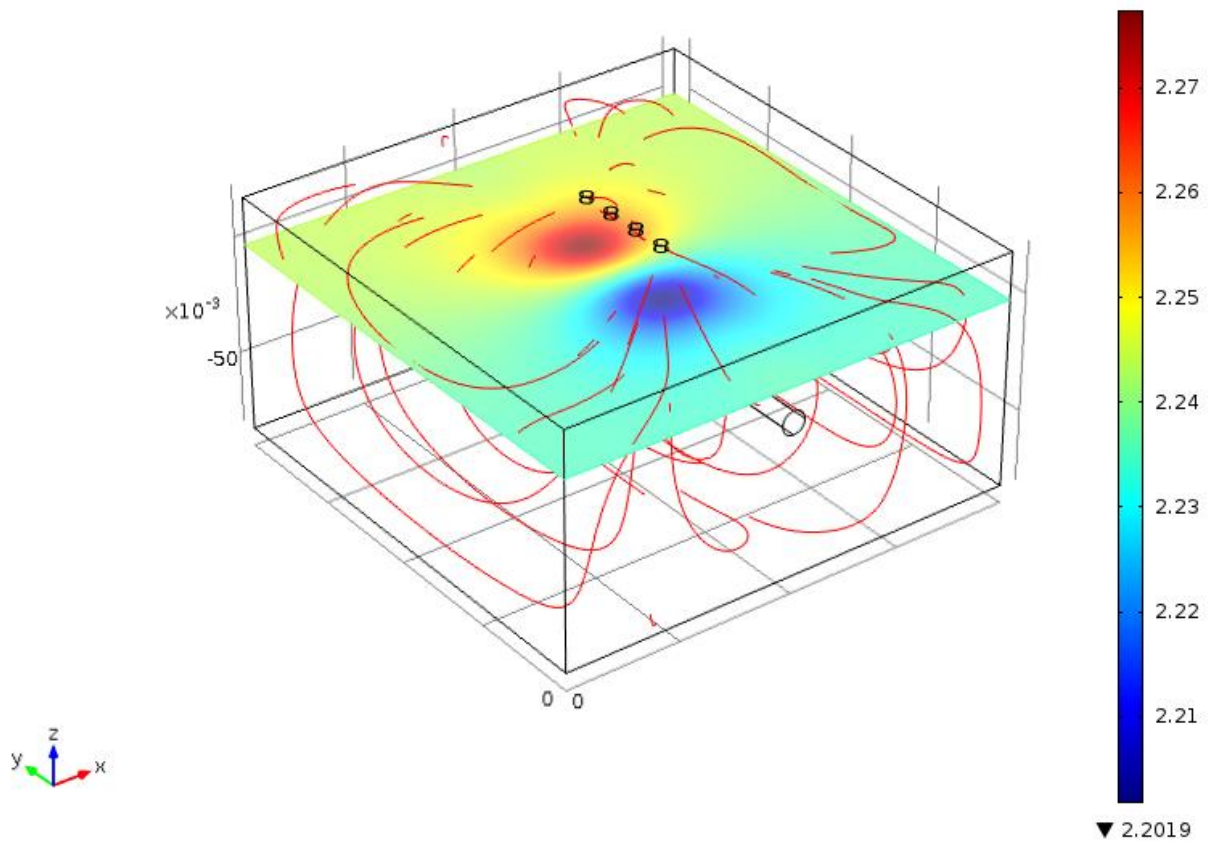


Figura 4.8. Esempio risoluzione caso omogeneo con armatura parallela

Nelle Figure 4.9 e 4.10 seguenti si riportano mesh e risoluzione per un caso non omogeneo con armatura perpendicolare al dispositivo di Wenner, con $H_1=1\text{cm}$, $H_2=9\text{cm}$, $a=1\text{cm}$, $\rho_1=10\Omega\text{m}$, $\rho_2=100\Omega\text{m}$, $I=1\text{mA}$, $s=3\text{cm}$.

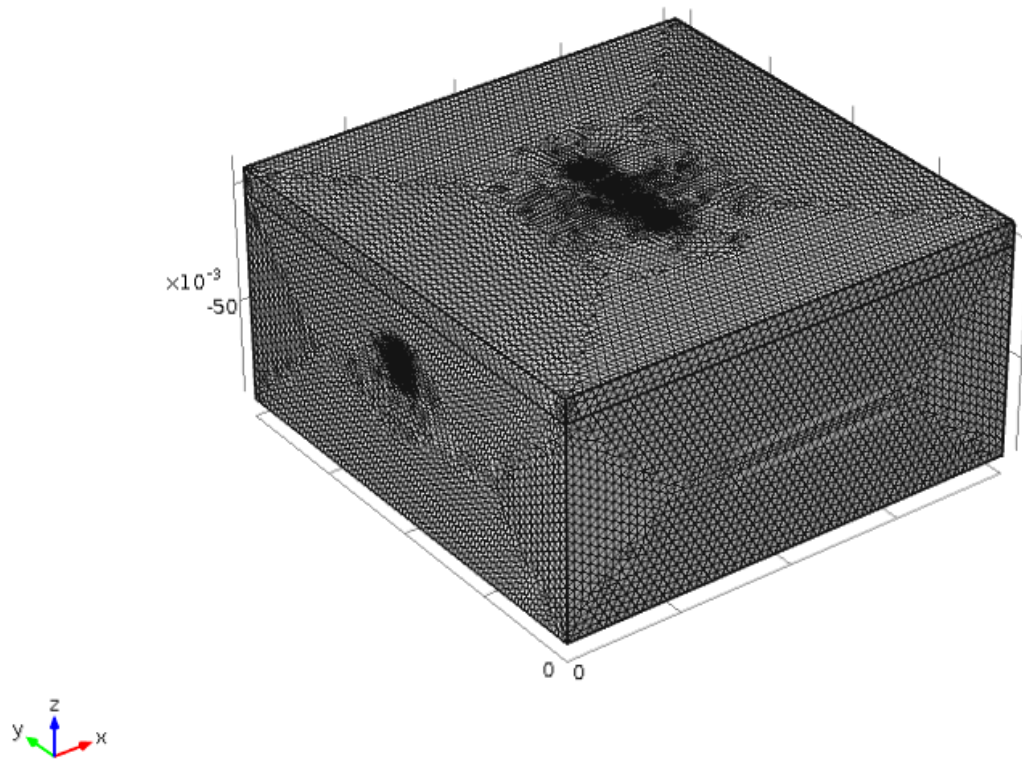


Figura 4.9. Esempio mesh caso non omogeneo con armatura perpendicolare

Slice: Electrolyte potential (V) Streamline: + Electrolyte current density vector

COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.6353

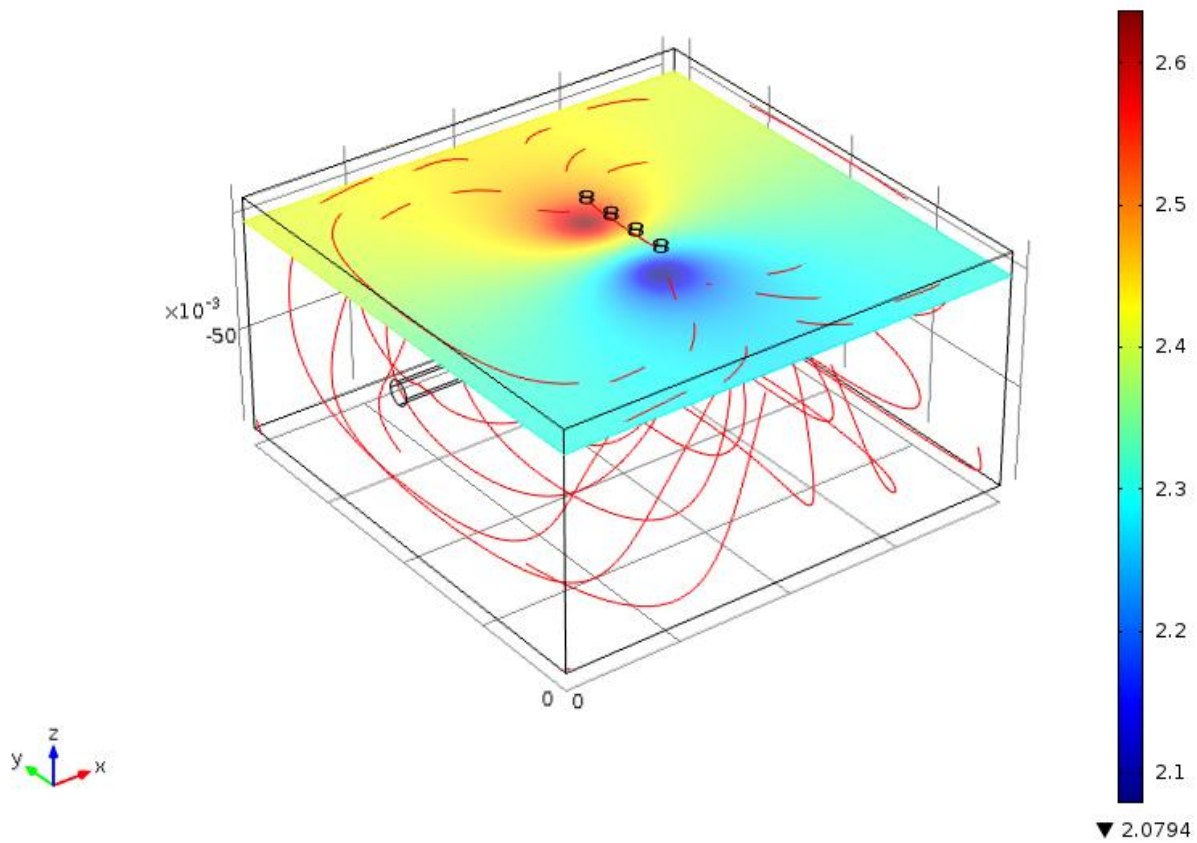


Figura 4.10. Esempio risoluzione caso non omogeneo con armatura perpendicolare

Nelle Figure 4.11 e 4.12 seguenti si riportano mesh e risoluzione per un caso non omogeneo con armatura parallela al dispositivo di Wenner, con $H_1=1\text{cm}$, $H_2=9\text{cm}$, $a=1\text{cm}$, $\rho_1=10\Omega\text{m}$, $\rho_2=100\Omega\text{m}$, $I=1\text{mA}$, $s=3\text{cm}$.

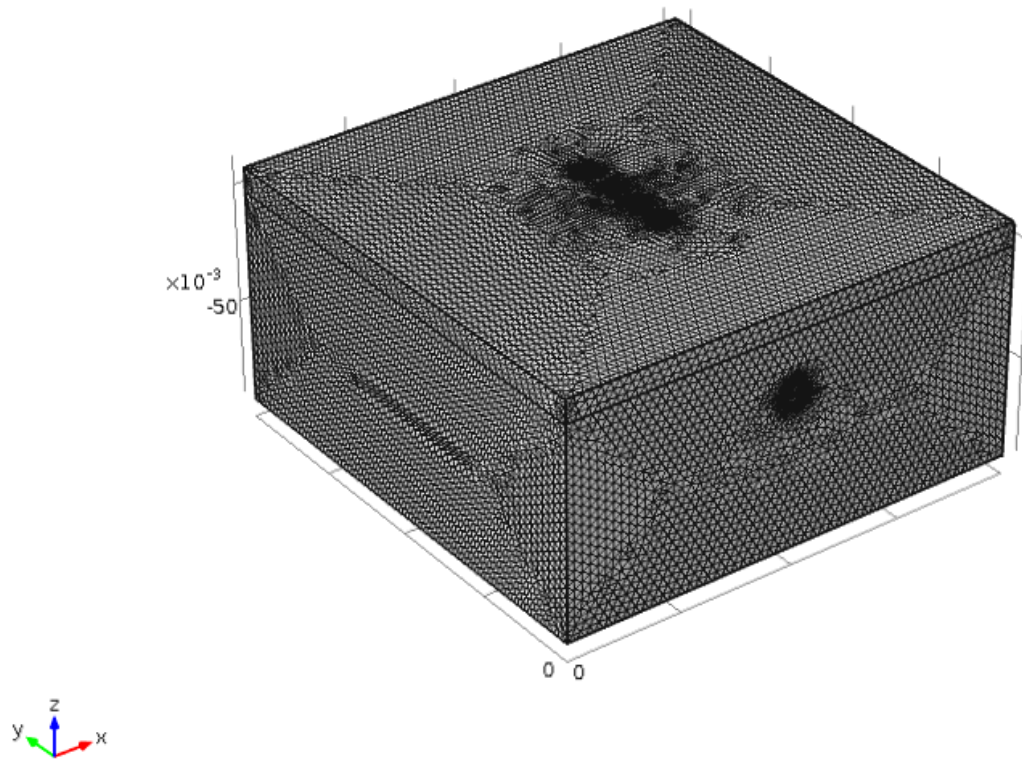
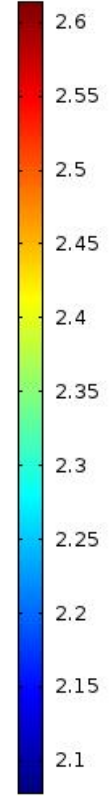
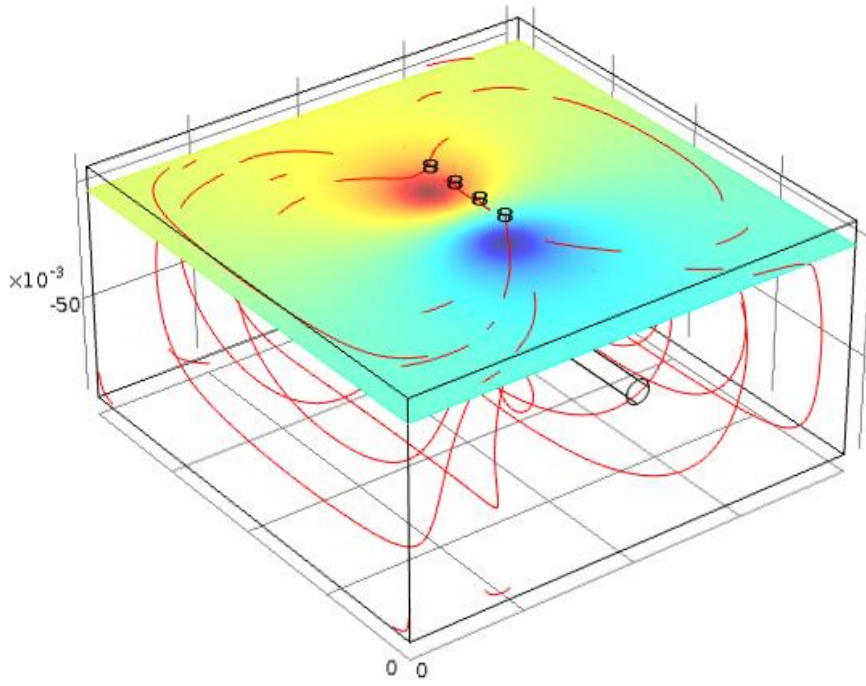


Figura 4.11. Esempio mesh caso non omogeneo con armatura parallela

Slice: Electrolyte potential (V) Streamline: + Electrolyte current density vector

COMSOL
MULTIPHYSICS

▲ 2.6127



▼ 2.0781

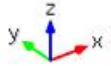


Figura 4.12. Esempio risoluzione caso non omogeneo con armatura parallela

5. La risoluzione dei casi studio

I diversi casi studio descritti nel Capitolo 3 sono stati oggetto di simulazione in Comsol Multiphysics. Grazie al software è stato possibile ricavare la caduta ohmica misurata ai due elettrodi interni e confrontare quindi i risultanti ottenuti dal simulatore con quelli ottenuti applicando la formula 2.6 ai diversi casi in esame. Per i casi non omogenei nell'applicare la formula 2.6 si è proceduto dapprima considerando solo lo strato di resistività ρ_1 quindi solo lo strato di resistività ρ_2 . Nei paragrafi seguenti si riassumono i risultati ottenuti per i diversi casi studio.

5.1. I risultati del caso omogeneo

Nella Tabella 5.1 sottostante si riportano i risultati ottenuti per il caso omogeneo, al variare dei parametri descritti nel Paragrafo 3.1, ovvero l'altezza e la resistività della soletta di calcestruzzo e la distanza tra gli elettrodi, per una assegnata corrente circolante. Si riporta anche lo scostamento percentuale tra le due cadute ohmiche calcolate.

Tabella 5.1. Caso omogeneo

H [m]	a [m]	ρ [Ω m]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,02	0,01	10	1	0,13962	0,159154943	12,27417
0,02	0,01	50	1	0,69808	0,795774715	12,27668
0,02	0,01	100	1	1,39617	1,591549431	12,27605
0,02	0,01	500	1	6,98082	7,957747155	12,27643
0,05	0,01	10	1	0,11158	0,159154943	29,89222
0,05	0,01	50	1	0,5579	0,795774715	29,89222
0,05	0,01	100	1	1,11579	1,591549431	29,89285
0,05	0,01	500	1	5,57898	7,957747155	29,89247
0,05	0,03	10	1	0,06921	0,053051648	30,45778
0,05	0,03	50	1	0,34605	0,265258238	30,45778
0,05	0,03	100	1	0,69209	0,530516477	30,45589
0,05	0,03	500	1	3,46048	2,652582385	30,45702
0,1	0,01	10	1	0,10867	0,159154943	31,72063
0,1	0,01	50	1	0,54334	0,795774715	31,72188
0,1	0,01	100	1	1,08669	1,591549431	31,72125
0,1	0,01	500	1	5,43345	7,957747155	31,72125
0,1	0,03	10	1	0,0591	0,053051648	11,40088
0,1	0,03	50	1	0,29548	0,265258238	11,39334
0,1	0,03	100	1	0,59096	0,530516477	11,39334
0,1	0,03	500	1	2,95483	2,652582385	11,39447

5.2. I risultati del caso non omogeneo

Nella Tabella 5.2 sottostante si riportano i risultati ottenuti per il caso non omogeneo, al variare dei parametri descritti nel Paragrafo 3.2, ovvero le altezze e le resistività dei due strati della soletta di calcestruzzo e la distanza tra gli elettrodi, per una assegnata corrente circolante. Si riporta anche lo scostamento percentuale tra le due cadute ohmiche calcolate.

Tabella 5.2. Caso non omogeneo

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ω m]	ρ_2 [Ω m]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner con ρ_2 [V]	ΔV Wenner con ρ_1 [V]	Scostamento con ρ_2 [%]	Scostamento con ρ_1 [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	1	0,32061	0,159154943	0,795774715	101,4452	59,71096
0,01	0,09	0,01	10	50	1	0,17611	0,795774715	0,159154943	77,86936	10,65318
0,01	0,09	0,01	10	100	1	0,19831	1,591549431	0,159154943	87,53982	24,60185
0,01	0,09	0,01	50	100	1	0,69045	1,591549431	0,795774715	56,61775	13,23549
0,01	0,09	0,01	10	500	1	0,22437	7,957747155	0,159154943	97,18048	40,97583
0,01	0,09	0,01	50	500	1	0,99157	7,957747155	0,795774715	87,53956	24,60436
0,01	0,09	0,03	50	10	1	0,08644	0,053051648	0,265258238	62,93556	67,41289
0,01	0,09	0,03	10	50	1	0,14875	0,265258238	0,053051648	43,92257	180,3871
0,01	0,09	0,03	10	100	1	0,18715	0,530516477	0,053051648	64,72306	252,7694
0,01	0,09	0,03	50	100	1	0,46885	0,530516477	0,265258238	11,62386	76,75229
0,01	0,09	0,03	10	500	1	0,23905	2,652582385	0,053051648	90,98803	350,5986
0,01	0,09	0,03	50	500	1	0,93575	2,652582385	0,265258238	64,72306	252,7694
0,03	0,07	0,01	50	10	1	0,51427	0,159154943	0,795774715	223,1254	35,37493
0,03	0,07	0,01	10	50	1	0,11588	0,795774715	0,159154943	85,43809	27,19045
0,03	0,07	0,01	10	100	1	0,11781	1,591549431	0,159154943	92,59778	25,97779
0,03	0,07	0,01	50	100	1	0,5602	1,591549431	0,795774715	64,8016	29,60319
0,03	0,07	0,01	10	500	1	0,11977	7,957747155	0,159154943	98,49493	24,74629
0,03	0,07	0,01	50	500	1	0,58904	7,957747155	0,795774715	92,59791	25,97905
0,03	0,07	0,03	50	10	1	0,21861	0,053051648	0,265258238	312,0701	17,58597
0,03	0,07	0,03	10	50	1	0,07948	0,265258238	0,053051648	70,03675	49,81627
0,03	0,07	0,03	10	100	1	0,08517	0,530516477	0,053051648	83,94583	60,54167
0,03	0,07	0,03	50	100	1	0,34238	0,530516477	0,265258238	35,46289	29,07422
0,03	0,07	0,03	10	500	1	0,09101	2,652582385	0,053051648	96,569	71,54981
0,03	0,07	0,03	50	500	1	0,42584	2,652582385	0,265258238	83,94621	60,5379

5.3. I risultati del caso omogeneo con armatura

Nelle Tabelle 5.3 e 5.4 sottostanti si riportano i risultati ottenuti per il caso omogeneo con armatura, dapprima per il caso con armatura perpendicolare, quindi per il caso con armatura parallela al dispositivo di Wenner. I risultati sono riportati al variare dei parametri descritti nel Paragrafo 3.1 e 3.3, ovvero l'altezza e la resistività della soletta di calcestruzzo, la distanza tra gli elettrodi e lo spessore di copriferro, per una assegnata corrente circolante. Si riporta anche lo scostamento percentuale tra le due cadute ohmiche calcolate.

Tabella 5.3. Caso omogeneo con armatura perpendicolare

H [m]	a [m]	s [m]	ρ [Ω m]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,05	0,01	0,03	10	1	0,11076	0,159155	30,40746
0,05	0,01	0,03	50	1	0,55378	0,795775	30,40998
0,05	0,01	0,03	100	1	1,10757	1,591549	30,40931
0,05	0,01	0,03	500	1	5,53782	7,957747	30,4097
0,05	0,03	0,03	10	1	0,0674	0,053052	27,04516
0,05	0,03	0,03	50	1	0,33702	0,265258	27,05366
0,05	0,03	0,03	100	1	0,67405	0,530516	27,05555
0,05	0,03	0,03	500	1	3,37027	2,652582	27,0562
0,1	0,01	0,03	10	1	0,10823	0,159155	31,99711
0,1	0,01	0,03	50	1	0,54115	0,795775	31,99711
0,1	0,01	0,03	100	1	1,08229	1,591549	31,9977
0,1	0,01	0,03	500	1	5,41141	7,957747	31,99822
0,1	0,03	0,03	10	1	0,05821	0,053052	9,722536
0,1	0,03	0,03	50	1	0,29103	0,265258	9,715824
0,1	0,03	0,03	100	1	0,58206	0,530516	9,715824
0,1	0,03	0,03	500	1	2,91034	2,652582	9,717249
0,1	0,01	0,09	10	1	0,10859	0,159155	31,77092
0,1	0,01	0,09	50	1	0,54295	0,795775	31,77092
0,1	0,01	0,09	100	1	1,08592	1,591549	31,76962
0,1	0,01	0,09	500	1	5,42948	7,957747	31,77114
0,1	0,03	0,09	10	1	0,05898	0,053052	11,17394
0,1	0,03	0,09	50	1	0,29493	0,265258	11,18609
0,1	0,03	0,09	100	1	0,58985	0,530516	11,18421
0,1	0,03	0,09	500	1	2,94921	2,652582	11,18261

Tabella 5.4. Caso omogeneo con armatura parallela

H [m]	a [m]	s [m]	ρ [Ω m]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,05	0,01	0,03	10	1	0,10363	0,159155	34,88737
0,05	0,01	0,03	50	1	0,51816	0,795775	34,88612
0,05	0,01	0,03	100	1	1,03632	1,591549	34,88608
0,05	0,01	0,03	500	1	5,18141	7,957747	34,88848
0,05	0,03	0,03	10	1	0,04514	0,053052	14,91367
0,05	0,03	0,03	50	1	0,22566	0,265258	14,92811
0,05	0,03	0,03	100	1	0,45131	0,530516	14,92999
0,05	0,03	0,03	500	1	2,25653	2,652582	14,93081
0,1	0,01	0,03	10	1	0,10335	0,159155	35,0633
0,1	0,01	0,03	50	1	0,51674	0,795775	35,06456
0,1	0,01	0,03	100	1	1,03349	1,591549	35,06389
0,1	0,01	0,03	500	1	5,16734	7,957747	35,06529
0,1	0,03	0,03	10	1	0,04418	0,053052	16,72321

H [m]	a [m]	s [m]	ρ [Ω m]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,1	0,03	0,03	50	1	0,22093	0,265258	16,71128
0,1	0,03	0,03	100	1	0,44187	0,530516	16,70939
0,1	0,03	0,03	500	1	2,20934	2,652582	16,70983
0,1	0,01	0,09	10	1	0,10808	0,159155	32,09136
0,1	0,01	0,09	50	1	0,5404	0,795775	32,09136
0,1	0,01	0,09	100	1	1,0808	1,591549	32,09131
0,1	0,01	0,09	500	1	5,40407	7,957747	32,09045
0,1	0,03	0,09	10	1	0,05681	0,053052	7,083616
0,1	0,03	0,09	50	1	0,28405	0,265258	7,084423
0,1	0,03	0,09	100	1	0,56809	0,530516	7,082539
0,1	0,03	0,09	500	1	2,84048	2,652582	7,083589

5.4. I risultati del caso non omogeneo con armatura

Nelle Tabelle 5.5 e 5.6 sottostanti si riportano i risultati ottenuti per il caso non omogeneo con armatura, dapprima per il caso con armatura perpendicolare quindi per il caso con armatura parallela al dispositivo di Wenner. I risultati sono riportati al variare dei parametri descritti nel Paragrafo 3.2 e 3.4, ovvero le altezze e le resistività dei due strati della soletta di calcestruzzo e la distanza tra gli elettrodi, per una assegnata corrente circolante. Si riporta anche lo scostamento percentuale tra le due cadute ohmiche calcolate.

Tabella 5.5. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare

H ₁ [m]	H ₂ [m]	a [m]	ρ_1 [Ω m]	ρ_2 [Ω m]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner con ρ_2 [V]	ΔV Wenner con ρ_1 [V]	Scostamento con ρ_2 [%]	Scostamento con ρ_1 [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	1	0,31973	0,159155	0,795775	100,8923	59,8215576
0,01	0,09	0,01	10	50	1	0,17556	0,795775	0,159155	77,93848	10,30756181
0,01	0,09	0,01	10	100	1	0,19789	1,591549	0,159155	87,5662	24,33790958
0,01	0,09	0,01	50	100	1	0,68757	1,591549	0,795775	56,7987	13,59743646
0,01	0,09	0,01	10	500	1	0,22423	7,957747	0,159155	97,18224	40,88781377
0,01	0,09	0,01	50	500	1	0,98944	7,957747	0,795775	87,56633	24,33665295
0,01	0,09	0,03	50	10	1	0,08503	0,053052	0,265258	60,27777	67,94441638
0,01	0,09	0,03	10	50	1	0,14752	0,265258	0,053052	44,38627	178,0668024
0,01	0,09	0,03	10	100	1	0,18614	0,530516	0,053052	64,91344	250,8633039
0,01	0,09	0,03	50	100	1	0,46304	0,530516	0,265258	12,71902	74,56212442
0,01	0,09	0,03	10	500	1	0,23869	2,652582	0,053052	91,0016	349,9170625
0,01	0,09	0,03	50	500	1	0,93068	2,652582	0,265258	64,91419	250,8584095
0,03	0,07	0,01	50	10	1	0,51044	0,159155	0,795775	220,7189	35,85624077
0,03	0,07	0,01	10	50	1	0,11487	0,795775	0,159155	85,56501	27,82507618
0,03	0,07	0,01	10	100	1	0,11693	1,591549	0,159155	92,65307	26,53074047
0,03	0,07	0,01	50	100	1	0,55466	1,591549	0,795775	65,14968	30,29939367
0,03	0,07	0,01	10	500	1	0,11908	7,957747	0,159155	98,5036	25,17985612

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner con ρ_2 [V]	ΔV Wenner con ρ_1 [V]	Scostamento con ρ_2 [%]	Scostamento con ρ_1 [%]
0,03	0,07	0,01	50	500	1	0,58462	7,957747	0,795775	92,65345	26,53451038
0,03	0,07	0,03	50	10	1	0,21702	0,053052	0,265258	309,0731	18,18531392
0,03	0,07	0,03	10	50	1	0,07861	0,265258	0,053052	70,36473	48,1753751
0,03	0,07	0,03	10	100	1	0,08454	0,530516	0,053052	84,06459	59,35308754
0,03	0,07	0,03	50	100	1	0,33735	0,530516	0,265258	36,41102	27,17806814
0,03	0,07	0,03	10	500	1	0,09078	2,652582	0,053052	96,57767	71,11513232
0,03	0,07	0,03	50	500	1	0,42268	2,652582	0,265258	84,06534	59,3467492

Tabella 5.6. Caso non omogeneo con armatura parallela

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner con ρ_2 [V]	ΔV Wenner con ρ_1 [V]	Scostamento con ρ_2 [%]	Scostamento con ρ_1 [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	1	0,31223	0,159155	0,795775	96,17989	60,76404
0,01	0,09	0,01	10	50	1	0,16791	0,795775	0,159155	78,89981	5,500927
0,01	0,09	0,01	10	100	1	0,19097	1,591549	0,159155	88,001	19,98995
0,01	0,09	0,01	50	100	1	0,65468	1,591549	0,795775	58,86524	17,73051
0,01	0,09	0,01	10	500	1	0,22142	7,957747	0,159155	97,21755	39,12224
0,01	0,09	0,01	50	500	1	0,95488	7,957747	0,795775	88,00062	19,99372
0,01	0,09	0,03	50	10	1	0,06527	0,053052	0,265258	23,03105	75,39377
0,01	0,09	0,03	10	50	1	0,12242	0,265258	0,053052	53,84875	130,7547
0,01	0,09	0,03	10	100	1	0,16267	0,530516	0,053052	69,33743	206,6237
0,01	0,09	0,03	50	100	1	0,36229	0,530516	0,265258	31,70994	36,58024
0,01	0,09	0,03	10	500	1	0,22883	2,652582	0,053052	91,37331	331,3315
0,01	0,09	0,03	50	500	1	0,81333	2,652582	0,265258	69,33818	206,6185
0,03	0,07	0,01	50	10	1	0,50376	0,159155	0,795775	216,5217	36,69567
0,03	0,07	0,01	10	50	1	0,10655	0,795775	0,159155	86,61053	33,05268
0,03	0,07	0,01	10	100	1	0,10808	1,591549	0,159155	93,20913	32,09136
0,03	0,07	0,01	50	100	1	0,522	1,591549	0,795775	67,20177	34,40357
0,03	0,07	0,01	10	500	1	0,11086	7,957747	0,159155	98,60689	30,34463
0,03	0,07	0,01	50	500	1	0,5404	7,957747	0,795775	93,20913	32,09136
0,03	0,07	0,03	50	10	1	0,19623	0,053052	0,265258	269,8848	26,02297
0,03	0,07	0,03	10	50	1	0,05331	0,265258	0,053052	79,9026	0,486315
0,03	0,07	0,03	10	100	1	0,05736	0,530516	0,053052	89,18789	8,120335
0,03	0,07	0,03	50	100	1	0,23931	0,530516	0,265258	54,89113	9,782174
0,03	0,07	0,03	10	500	1	0,06501	2,652582	0,053052	97,54918	22,54015
0,03	0,07	0,03	50	500	1	0,28677	2,652582	0,265258	89,18903	8,10984

6. Applicabilità del metodo di Wenner in condizioni di omogeneità

6.1. Introduzione

Analizzando i risultati in condizioni di omogeneità presentati nel Capitolo 5, nei Paragrafi 5.1 e 5.3, è possibile fare alcune considerazioni.

Si può osservare che il metodo di Wenner risulta applicabile anche ad un dominio confinato, in quanto i risultati ottenuti applicando la formula di Wenner ai casi studio omogenei risultano comparabili con quelli ricavati dal simulatore numerico. Nella Tabella 5.1 si può osservare, infatti, come lo scostamento massimo tra questi due risultati sia nell'ordine del 30%.

Questo significa che l'introduzione del confinamento non comporta una eccessiva distorsione del campo elettrico rispetto al caso non confinato. Bisogna sottolineare che nei casi studio analizzati non è mai stata presa in considerazione un'altezza della soletta di calcestruzzo inferiore alla distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner e inoltre si è assunta una lunghezza della soletta stessa che fosse almeno doppia rispetto alla lunghezza complessiva del dispositivo di Wenner (ovvero la distanza tra gli elettrodi più esterni, che, essendo gli elettrodi equidistanziati, è pari a tre volte la distanza tra gli elettrodi). Sinteticamente queste due considerazioni possono essere riassunte nel modo seguente :

- $H > a$;
- $L > 3a$.

In queste condizioni, quindi, il campo elettrico può svilupparsi correttamente anche nel dominio confinato assunto per i vari casi studio. Tuttavia questo non potrebbe verificarsi se non si rispettassero le condizioni indicate sopra: un eccessivo confinamento, infatti, porterebbe a distorsioni significative del campo elettrico e in tali condizioni la formula di Wenner 2.6 non sarebbe più applicabile.

Di seguito si presentano i risultati, dapprima per il caso omogeneo in assenza di armatura di rinforzo, quindi per il caso omogeneo con armatura. I risultati vengono presentati graficamente, attraverso grafici a dispersione, che mettono a confronto la caduta ohmica ricavata applicando la formula di Wenner 2.6 con quella ricavata dal simulatore numerico, al variare dei parametri descritti nel Capitolo 3, nei Paragrafi 3.1 e 3.3.

6.2. Presentazione grafica dei risultati relativi al caso omogeneo

Nei grafici seguenti si presentano i risultati ottenuti per il caso omogeneo al variare dei parametri presentati nel Paragrafo 3.1, ovvero l'altezza e la resistività della soletta di calcestruzzo e la distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner.

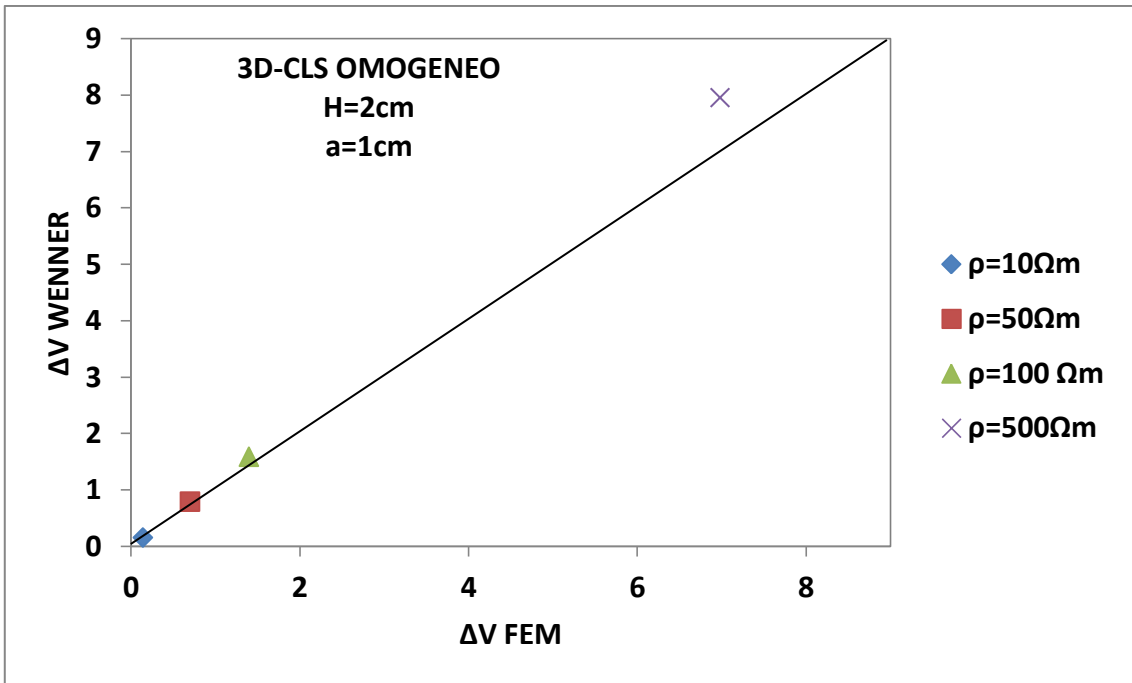


Grafico 6.1. Caso omogeneo; H=2cm a=1cm

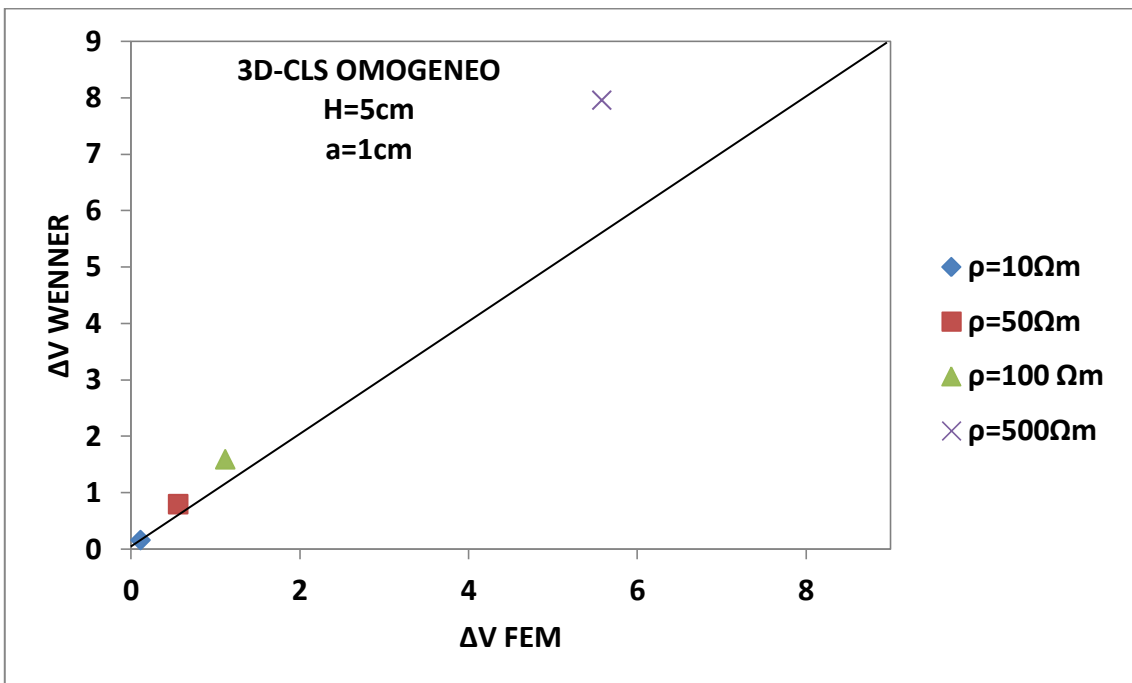


Grafico 6.2. Caso omogeneo; H=5cm a=1cm

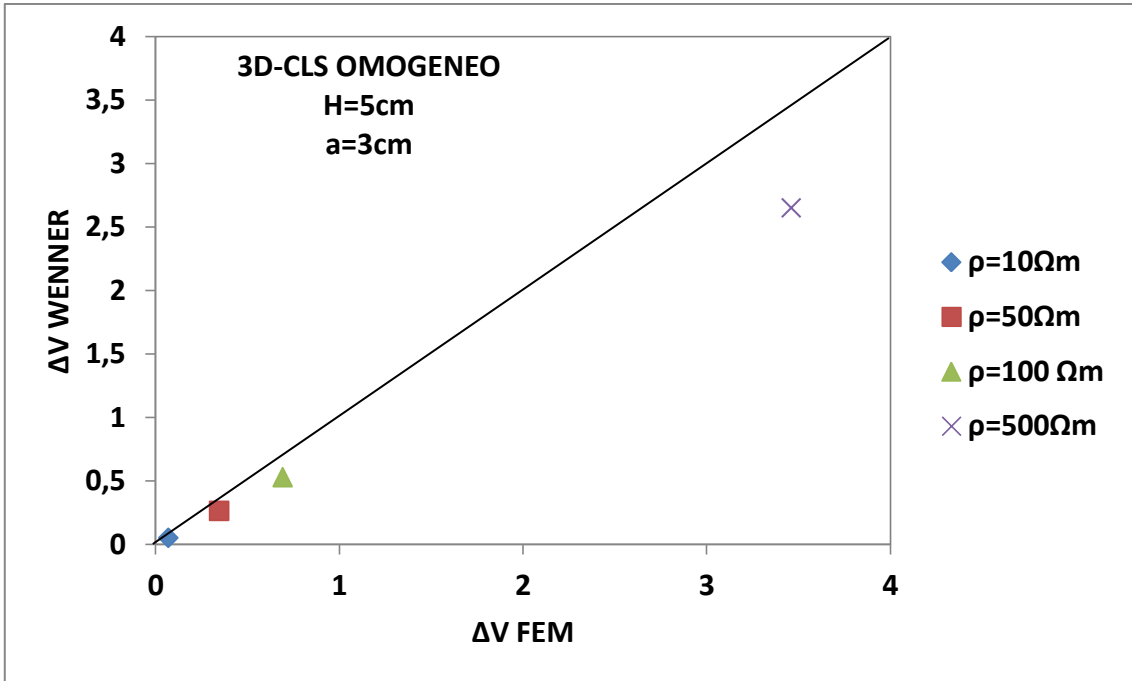


Grafico 6.3. Caso omogeneo; H=5cm a=3cm

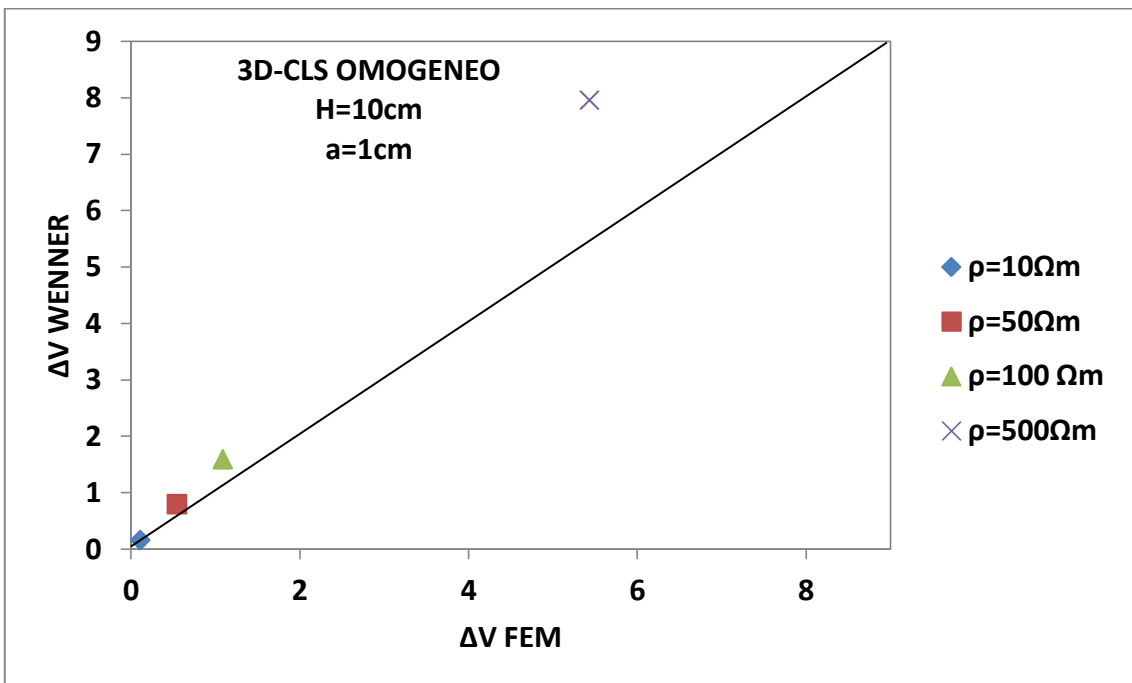


Grafico 6.4. Caso omogeneo; H=10cm a=1cm

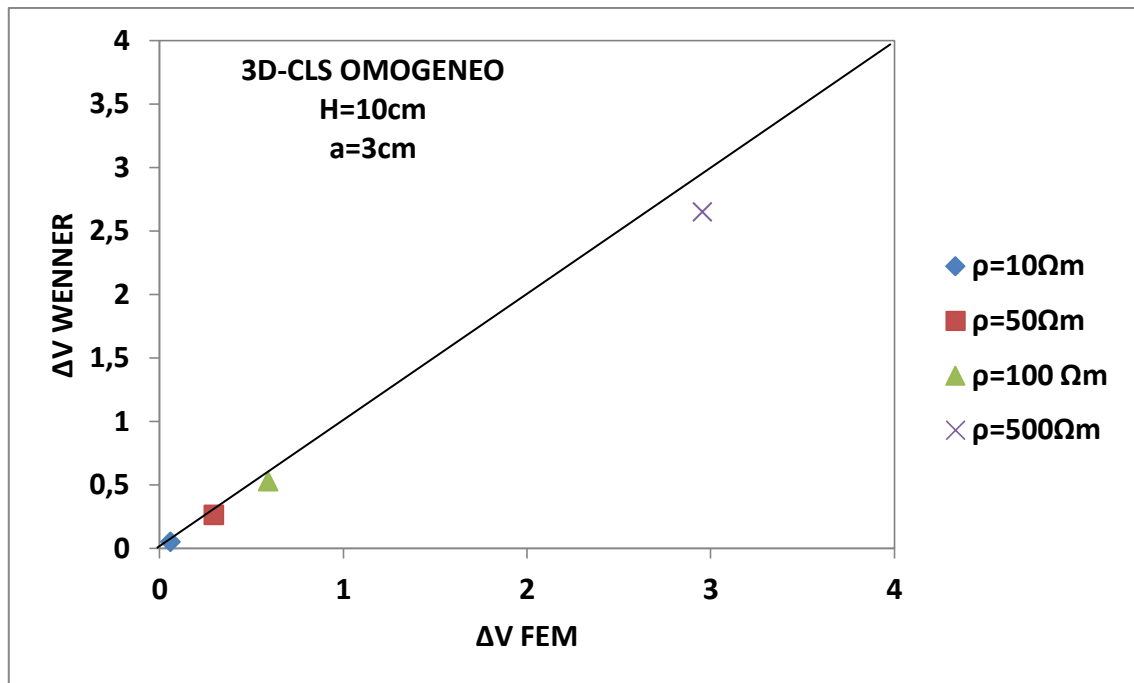


Grafico 6.5. Caso omogeneo; H=10cm a=3cm

6.3. Influenza dell'armatura di rinforzo

Sulla base dei risultati presentati nel Paragrafo 5.3 in presenza dell'armatura di rinforzo, è possibile osservare come il metodo di Wenner risulta applicabile anche ad un dominio confinato in presenza di un'armatura di rinforzo. Questo significa che l'introduzione di un'armatura di rinforzo non introduce una eccessiva distorsione del campo elettrico rispetto al caso in assenza di armatura. Nelle tabella 5.3 e 5.4 si può osservare, infatti, come lo scostamento massimo tra la caduta ohmica ricavata con la formula di Wenner e quella ricavata dal simulatore numerico sia nell'ordine del 30%. Infatti l'armatura di rinforzo in acciaio presenta una resistività di diversi ordini di grandezza inferiore rispetto alla resistività del dominio in cui è inserita, ovvero le diverse resistività considerate per il calcestruzzo. Inoltre, per i casi studio analizzati, si è anche assunto uno spessore di copriferro che non fosse mai inferiore alla distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner, ovvero:

- $s \geq a$.

6.3.1. Presentazione grafica dei risultati dei risultati relativi al caso omogeneo con armatura perpendicolare

Nei grafici seguenti si presentano i risultati ottenuti per il caso omogeneo con armatura disposta perpendicolarmente rispetto al dispositivo di Wenner al variare dei parametri presentati nel Paragrafo 3.3, ovvero l'altezza e la resistività della soletta di calcestruzzo, la distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner e lo spessore del copriferro.

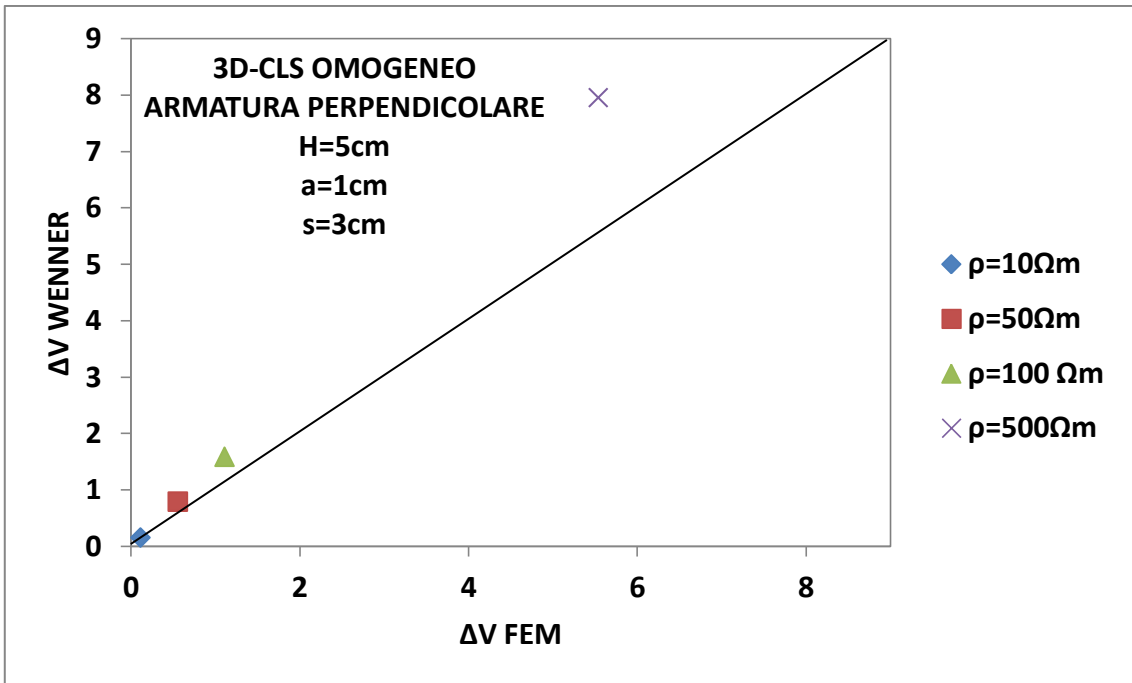


Grafico 6.6. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; H=5cm a=1cm s=3cm

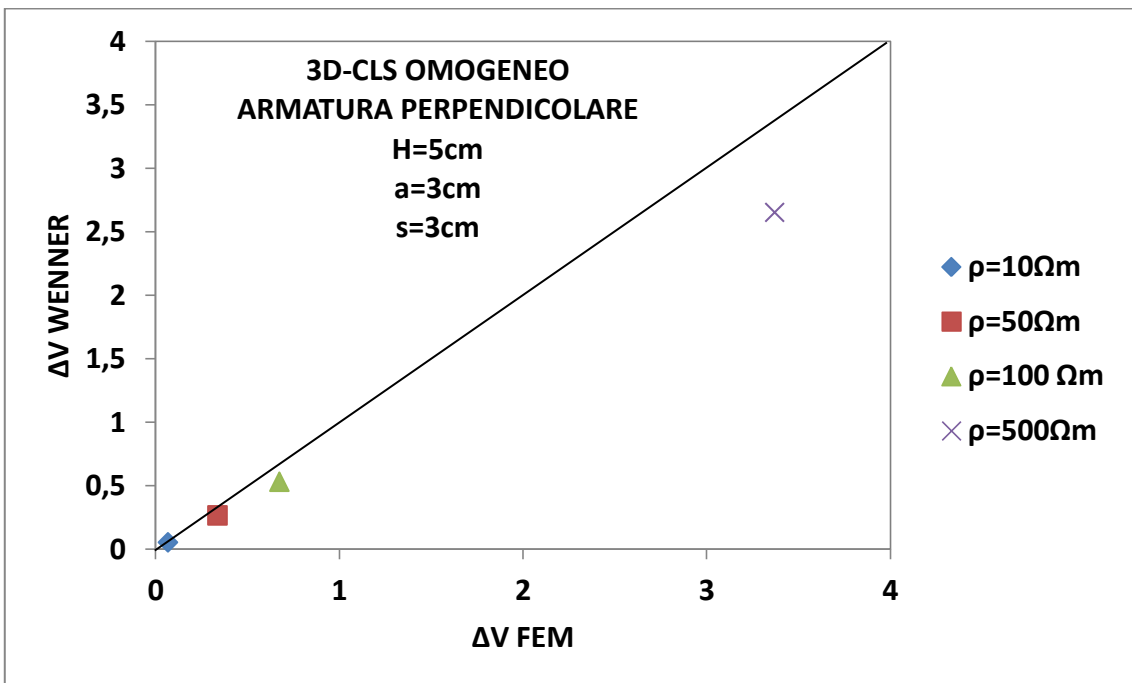


Grafico 6.7. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; H=5cm a=3cm s=3cm

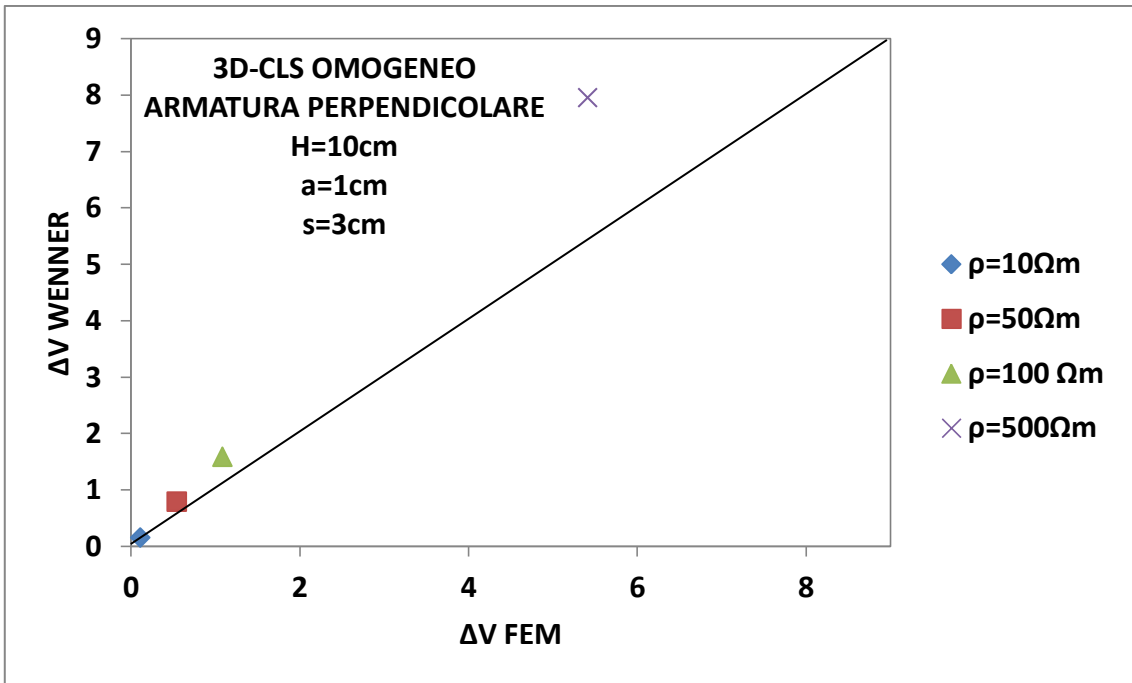


Grafico 6.8. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; H=10cm a=1cm s=3cm

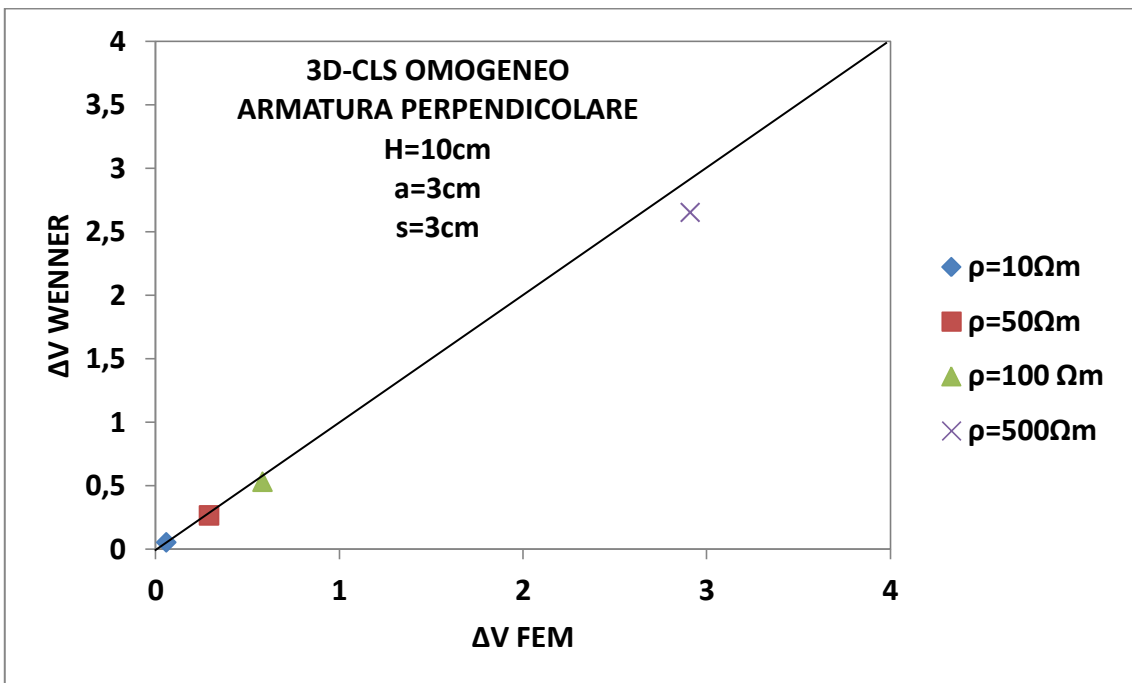


Grafico 6.9. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; H=10cm a=3cm s=3cm

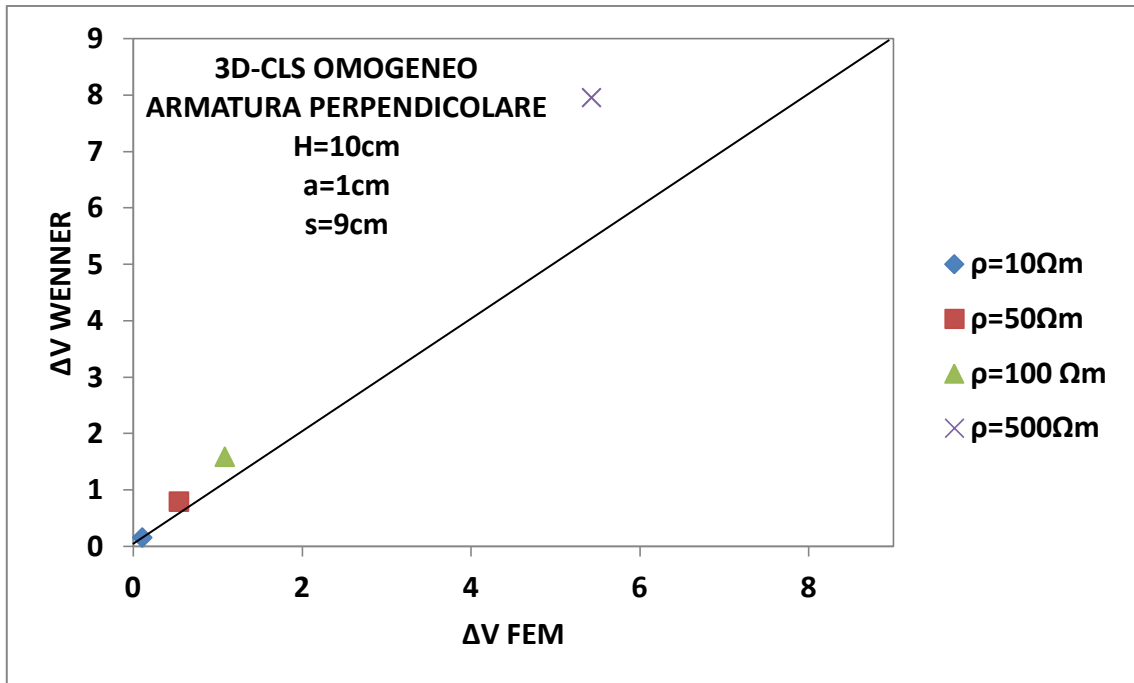


Grafico 6.10. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; H=10cm a=1cm s=9cm

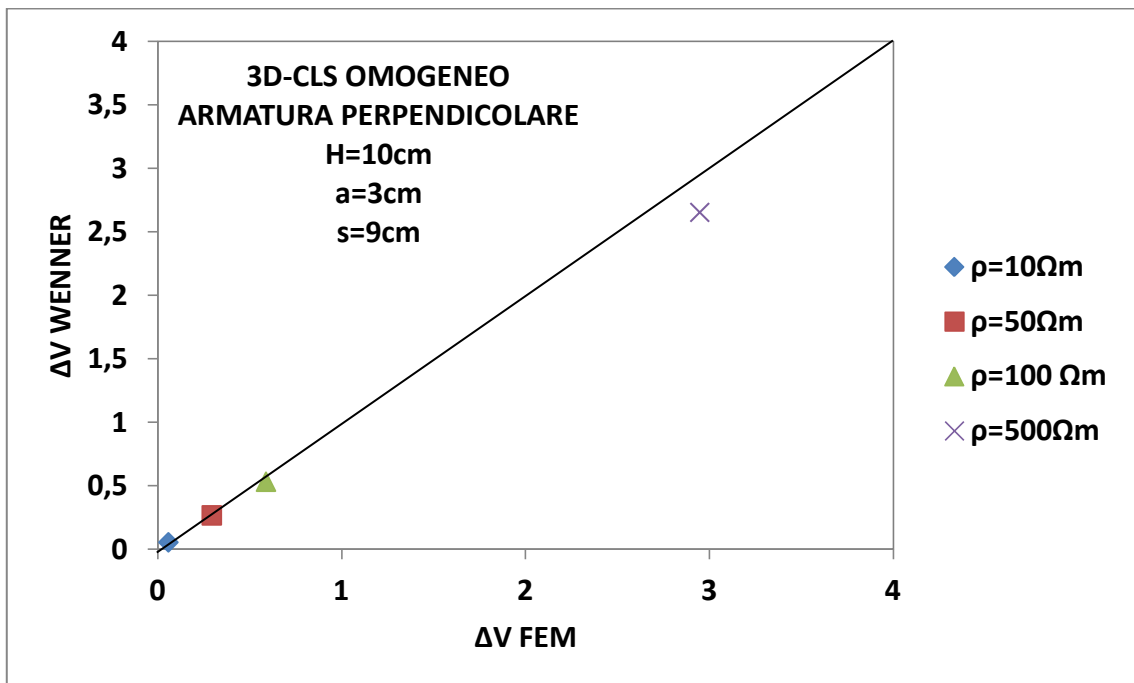


Grafico 6.11. Caso omogeneo con armatura perpendicolare; H=10cm a=3cm s=9cm

6.3.2. Presentazione grafica dei risultati dei risultati relativi al caso omogeneo con armatura parallela

Nei grafici seguenti si presentano i risultati ottenuti per il caso omogeneo con armatura disposta parallelamente rispetto al dispositivo di Wenner al variare dei parametri presentati nel Paragrafo 3.3, ovvero l'altezza e la resistività della soletta di calcestruzzo, la distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner e lo spessore del copriferro.

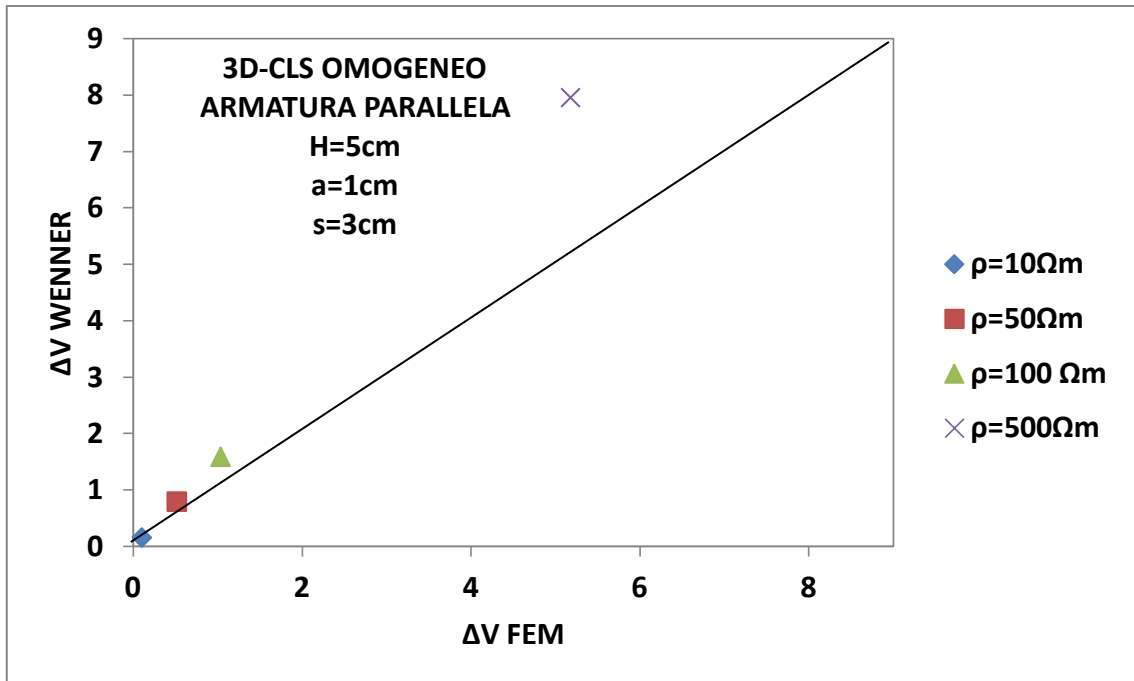


Grafico 6.12. Caso omogeneo con armatura parallela; H=5cm a=1cm s=3cm

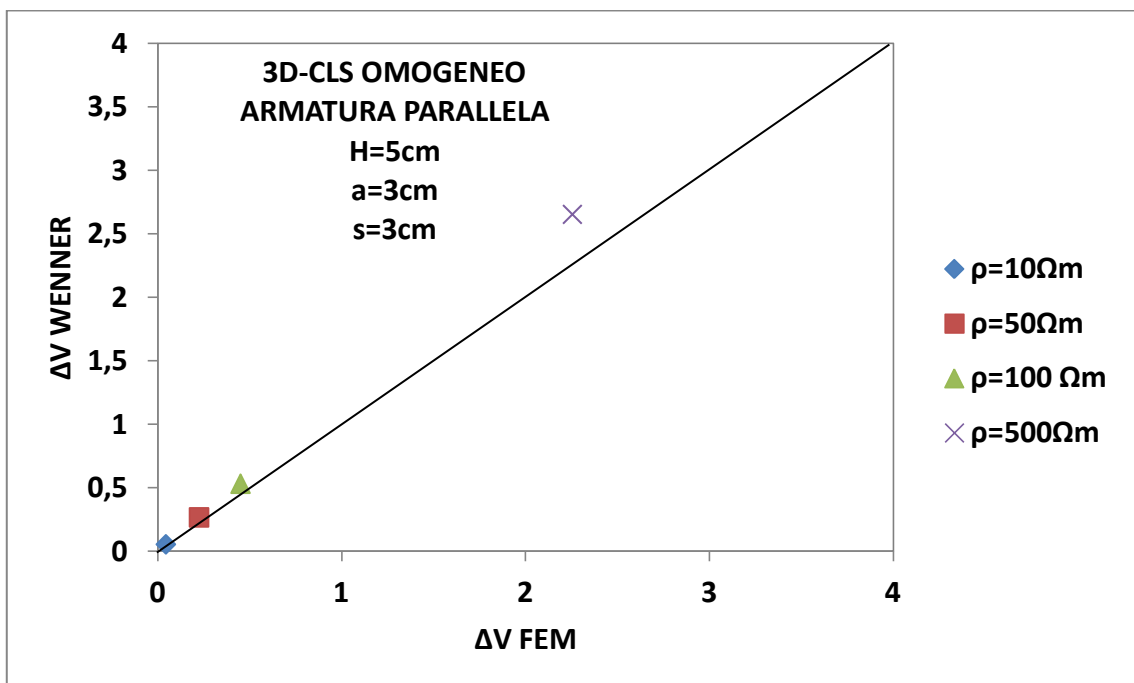


Grafico 6.13. Caso omogeneo con armatura parallela; H=5cm a=3cm s=3cm

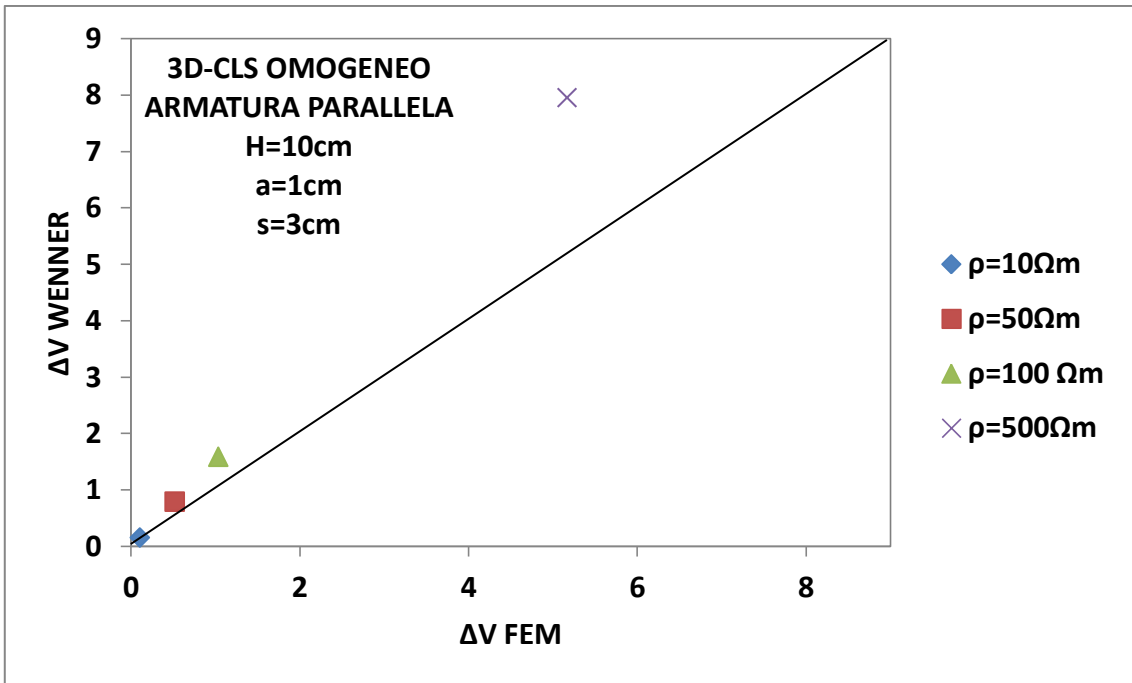


Grafico 6.14. Caso omogeneo con armatura parallela; H=10cm a=1cm s=3cm

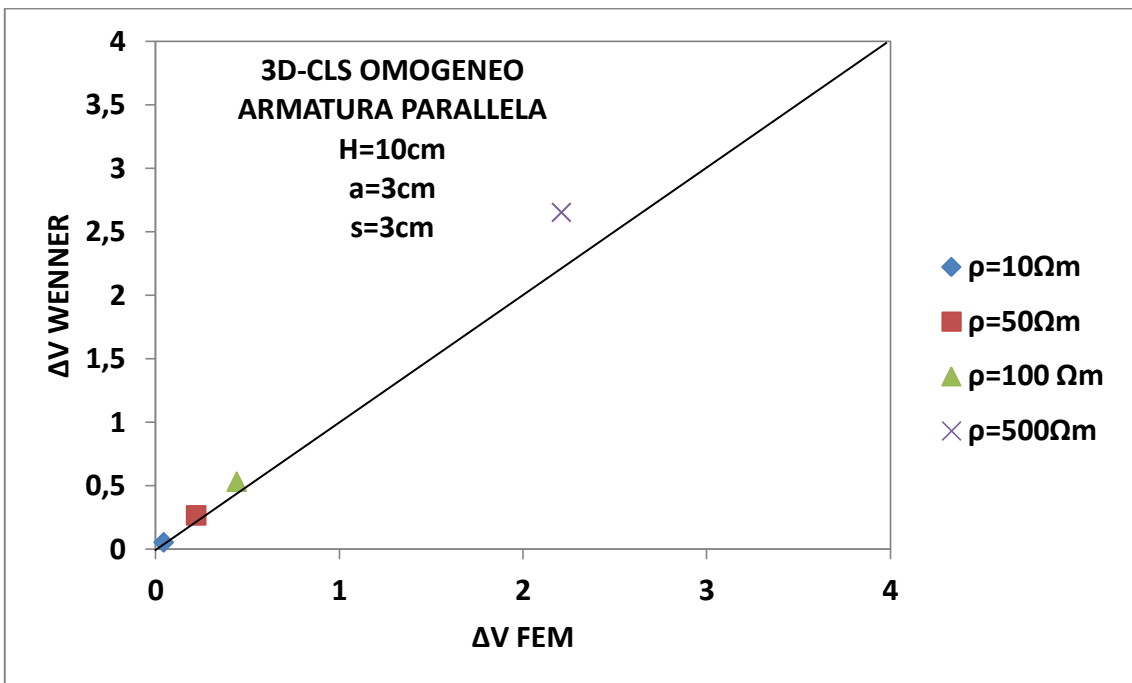


Grafico 6.15. Caso omogeneo con armatura parallela; H=10cm a=3cm s=3cm

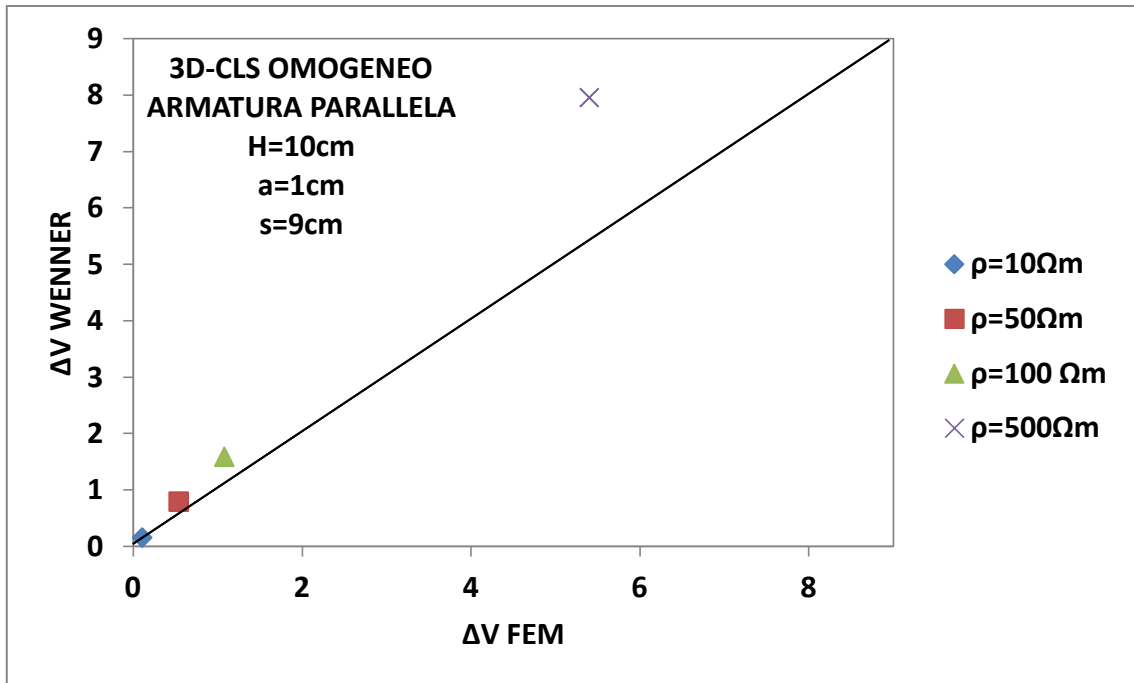


Grafico 6.16. Caso omogeneo con armatura parallela; H=10cm a=1cm s=9cm

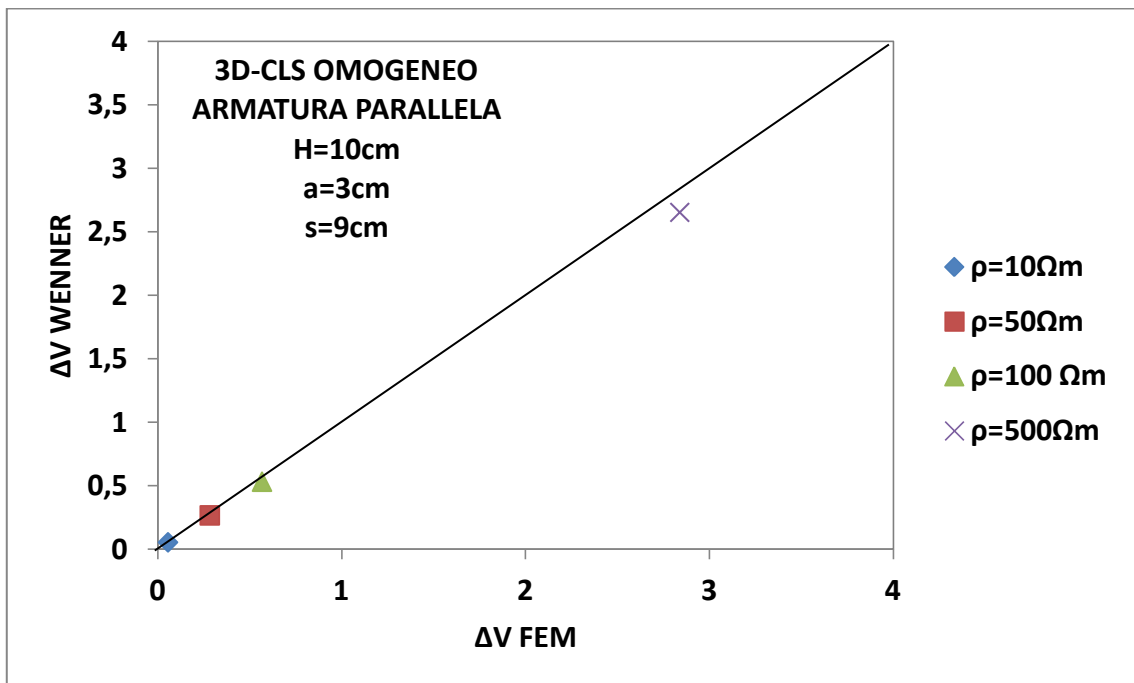


Grafico 6.17. Caso omogeneo con armatura parallela; H=10cm a=3cm s=9cm

6.4. Analisi dei parametri di influenza

Dai grafici presentati è possibile osservare come solo in presenza di un calcestruzzo fortemente resistivo (ovvero $\rho=500\Omega m$) vi siano degli scostamenti significativi (ovvero dell'ordine del 30% circa) tra le cadute ohmiche analizzate.

Si considera ora l'influenza dell'altezza della soletta di calcestruzzo e delle spaziatura tra gli elettrodi: si osserva come, a parità di altezza della soletta, una maggiore distanza tra gli elettrodi

porta a scostamenti inferiori; adottando poi questa spaziatura degli elettrodi non troppo ridotta, una maggiore altezza della soletta porta a risultati migliori. Nei casi analizzati, quindi, una spaziatura $a=3\text{cm}$ è migliore di una con $a=1\text{cm}$; inoltre, con $a=3\text{cm}$, un'altezza $H=10\text{cm}$ porta a risultati migliori rispetto a quelli per un'altezza $H=5\text{cm}$. Questo si verifica perché con una maggiore spaziatura tra gli elettrodi e una maggiore altezza della soletta di calcestruzzo il confinamento risulta inferiore e quindi anche la distorsione del campo elettrico sarà ridotta.

Per quanto riguarda l'influenza della spaziatura tra gli elettrodi, poi, per distanze ridotte il metodo di Wenner va a sovrastimare la caduta ohmica rispetto al simulatore numerico; per elettrodi più distanziati, invece si osserva una sottostima della caduta ohmica con il metodo di Wenner rispetto al simulatore numerico. Nel primo caso quindi il metodo di Wenner considera il calcestruzzo più resistivo di quanto non sia realmente, mentre nel secondo caso si verifica la situazione opposta. Poiché, come descritto nel Capitolo 2, nel Paragrafo 2.2, una resistività elevata del calcestruzzo corrisponde ad una ridotta velocità di corrosione, anche sotto questo aspetto si può considerare una soluzione migliore l'adozione di una maggiore spaziatura tra gli elettrodi nel dispositivo di Wenner: in questo modo si evita, infatti, di sovrastimare la resistività del calcestruzzo e, quindi, di considerare un margine di sicurezza, per quanto riguarda la velocità di corrosione, maggiore di quanto non sia in realtà.

L'introduzione dell'armatura di rinforzo non va a modificare significativamente la dispersione dei dati analizzati.

Per quanto riguarda i parametri di influenza, valgono le medesime considerazioni svolte per il caso in assenza di armatura, ovvero si osservano scostamenti inferiori per una maggiore spaziatura degli elettrodi e una maggiore altezza della soletta di calcestruzzo.

L'orientamento dell'armatura non influisce significativamente sui risultati, sebbene sia possibile fare alcune osservazioni a riguardo: la spaziatura tra gli elettrodi ha un'influenza maggiore nel caso di armatura disposta parallelamente al dispositivo di Wenner rispetto a quella che ha nel caso di armatura perpendicolare; inoltre, anche l'influenza del copriferro è differente, in quanto nel caso di armatura parallela, all'aumentare dello spessore di copriferro, gli scostamenti diminuiscono, mentre nel caso di armatura parallela si osserva un andamento opposto. Per i casi studio analizzati si è osservato che, nel caso di armatura disposta perpendicolarmente al dispositivo di Wenner, è meglio adottare una spaziatura tra gli elettrodi che sia circa pari allo spessore di copriferro, mentre, nel caso di armatura disposta parallelamente, è meglio adottare una spaziatura tra gli elettrodi che sia inferiore allo spessore di copriferro.

7. Validità del metodo di Wenner in condizioni di non omogeneità

7.1. Introduzione

Analizzando i risultati in condizioni di non omogeneità presentati nel Capitolo 5, nei Paragrafi 5.2 e 5.4, è possibile fare alcune considerazioni.

In queste condizioni sono state rimosse le due ipotesi semplificative sulla base delle quali è stato ricavato il metodo di Wenner, ovvero è stato considerato un dominio confinato e non omogeneo.

Come analizzato nel Capitolo 6 il metodo di Wenner risulta applicabile anche ad un dominio confinato, perciò si procede ora a considerare l'influenza della condizione di disomogeneità.

Osservando i risultati presentati nella Tabella 5.2 si nota che i risultati del simulatore numerico sono fortemente discordanti con quelli ottenuti applicando la formula di Wenner 2.6. Del resto si ricorda come, nell'applicazione della formula 2.6, si è proceduto dapprima considerando solo lo strato di resistività ρ_1 , quindi solo lo strato di resistività ρ_2 : in questo modo, però, il metodo di Wenner non tiene conto della stratificazione del dominio a cui è applicato.

Tuttavia i casi studio non omogenei rientrano proprio in questa categoria, in quanto presentano due strati a differente resistività.

In queste condizioni si deve considerare che, se la lunghezza complessiva del dispositivo di Wenner (ovvero la distanza tra gli elettrodi più esterni, che, essendo gli elettrodi equidistanziati, è pari a tre volte la distanza tra gli elettrodi) è molto piccola rispetto allo spessore del primo strato, il campo elettrico tende sostanzialmente a distribuirsi all'interno del primo strato: la caduta ohmica misurata non risente, quindi, della presenza del secondo strato e la resistività risultante, in base alla formula di Wenner 2.6, corrisponde esattamente a quella reale del primo strato.

Se, però, si comincia ad aumentare la distanza tra gli elettrodi, o se lo spessore del primo strato non è più molto ridotto, la lunghezza complessiva del dispositivo di Wenner non risulta più trascurabile rispetto alla dimensione del primo strato e quindi una parte di corrente progressivamente crescente tende a circolare nel secondo strato. In questa condizione il campo elettrico risulta distorto e, quindi, la caduta ohmica viene modificata: il valore di resistività ricavato dalla formula di Wenner 2.6 si allontana progressivamente dalla resistività del primo strato per avvicinarsi a quello del secondo strato.

Quindi, a seconda della disposizione degli elettrodi rispetto alla stratificazione del dominio a cui sono applicati, la resistività misurata tende ad oscillare tra i valori delle resistività reali dei singoli strati, fino a tendere asintoticamente alla resistività di un singolo strato. Tale resistività misurata, che non coincide necessariamente con alcuna delle resistività reali dei singoli strati, viene detta resistività apparente.

7.2. Formula di Wenner corretta in presenza di strati a diversa resistività

Per un dominio non omogeneo, il valore della resistività apparente è funzione, oltre che della distanza tra gli elettrodi, anche delle resistività e degli spessori dei singoli strati.

Si deve procedere, quindi, sviluppando un modello interpretativo che tenga conto della dipendenza dai parametri indicati sopra.

In condizioni di disomogeneità si è pensato di introdurre un fattore correttivo alla formula di Wenner 2.6, nella quale compare solamente un valore di resistività, rapportato alla distanza tra gli elettrodi. Tale fattore correttivo deve mostrare una dipendenza dai tre parametri sopra indicati (ovvero resistività e spessore dei singoli strati, oltre alla distanza tra gli elettrodi) e deve valutare il peso relativo di ciascuno strato, rapportandone alla dimensione complessiva dell'intero dominio. Si è pensato di racchiudere questo fattore correttivo nella definizione di una resistività apparente ρ_a da applicare nella formula di Wenner 2.6, per giungere così ad una formula di Wenner corretta:

$$\Delta V = \frac{\rho_a I}{2\pi a} \quad (7.1)$$

Per esplicitare tale resistività apparente ρ_a in presenza di un dominio stratificato, si è pensato di adottare o una logica di serie (definendo, quindi, una resistività apparente che sia una media pesata delle resistività dei singoli strati rapportate alle rispettive dimensioni geometriche), oppure una logica di parallelo (definendo, quindi, una resistività apparente che sia una media inversa delle resistività dei singoli strati rapportate alle rispettive dimensioni geometriche). Poiché per i casi studio considerati, secondo la geometria descritta nel Capitolo 3, nel Paragrafo 3.2, si considerano due soli strati e la dimensione variabile per ciascuno strato è la sua altezza (essendo fissate lunghezza e profondità) e poiché l'altezza complessiva della soletta risulta fissata, la definizione della resistività apparente secondo questi due differenti approcci è così esprimibile, rispettivamente per il caso di media pesata e di media inversa, nelle formule 7.2 e 7.3 seguenti:

$$\rho_a = \frac{\rho_1 H_1 + \rho_2 H_2}{(H_1 + H_2)} \quad (7.2)$$

$$\rho_a = (H_1 + H_2) \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 H_2 + \rho_2 H_1} \quad (7.3)$$

Si procede ora a riportare i risultati corretti per il caso non omogeneo e per il caso non omogeneo con armatura, dove la caduta ohmica secondo il metodo di Wenner è ottenuta applicando la formula 7.1, inserendo le resistività apparenti definite nelle formule 7.2 e 7.3.

7.2.1. I risultati corretti del caso non omogeneo

Nelle tabelle 7.1 e 7.2 sottostanti si riportano i risultati corretti per il caso non omogeneo, al variare dei parametri descritti nel Paragrafo 3.2, ovvero le altezze e le resistività dei due strati della soletta di calcestruzzo e la distanza tra gli elettrodi, per una assegnata corrente circolante. Nella Tabella 7.1 si è considerata una resistività apparente definita secondo la formula 7.2, mentre nella Tabella 7.2 si è considerata una resistività apparente definita secondo la formula 7.3. Inoltre nelle tabelle si riportano per ciascun caso il valore della resistività apparente considerato e lo scostamento percentuale tra la caduta ohmica calcolata con la formula di Wenner corretta 7.1 e quella ricavata dal simulatore numerico.

Tabella 7.1. Caso non omogeneo corretto con media pesata

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	14	1	0,32061	0,22281692	43,88943
0,01	0,09	0,01	10	50	46	1	0,17611	0,732112738	75,94496
0,01	0,09	0,01	10	100	91	1	0,19831	1,448309982	86,30749
0,01	0,09	0,01	50	100	95	1	0,69045	1,511971959	54,33447
0,01	0,09	0,01	10	500	451	1	0,22437	7,177887933	96,87415
0,01	0,09	0,01	50	500	455	1	0,99157	7,241549911	86,30721
0,01	0,09	0,03	50	10	14	1	0,08644	0,074272307	16,38254
0,01	0,09	0,03	10	50	46	1	0,14875	0,244037579	39,04627
0,01	0,09	0,03	10	100	91	1	0,18715	0,482769994	61,23413
0,01	0,09	0,03	50	100	95	1	0,46885	0,503990653	6,972481
0,01	0,09	0,03	10	500	451	1	0,23905	2,392629311	90,0089
0,01	0,09	0,03	50	500	455	1	0,93575	2,41384997	61,23413
0,03	0,07	0,01	50	10	22	1	0,51427	0,350140875	46,87517
0,03	0,07	0,01	10	50	38	1	0,11588	0,604788784	80,83959
0,03	0,07	0,01	10	100	73	1	0,11781	1,161831085	89,85997
0,03	0,07	0,01	50	100	85	1	0,5602	1,352817016	58,59011
0,03	0,07	0,01	10	500	353	1	0,11977	5,618169491	97,86817
0,03	0,07	0,01	50	500	365	1	0,58904	5,809155423	89,86014
0,03	0,07	0,03	50	10	22	1	0,21861	0,116713625	87,30461
0,03	0,07	0,03	10	50	38	1	0,07948	0,201596261	60,57467
0,03	0,07	0,03	10	100	73	1	0,08517	0,387277028	78,00799
0,03	0,07	0,03	50	100	85	1	0,34238	0,450939005	24,07399
0,03	0,07	0,03	10	500	353	1	0,09101	1,872723164	95,14023
0,03	0,07	0,03	50	500	365	1	0,42584	1,936385141	78,00851

Tabella 7.2. Caso non omogeneo corretto con media inversa

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	10,86956522	1	0,32061	0,172994503	85,32959
0,01	0,09	0,01	10	50	35,71428571	1	0,17611	0,568410511	69,01711
0,01	0,09	0,01	10	100	52,63157895	1	0,19831	0,837657595	76,32565
0,01	0,09	0,01	50	100	90,90909091	1	0,69045	1,446863119	52,27952
0,01	0,09	0,01	10	500	84,74576271	1	0,22437	1,348770704	83,36485
0,01	0,09	0,01	50	500	263,1578947	1	0,99157	4,188287976	76,32517
0,01	0,09	0,03	50	10	10,86956522	1	0,08644	0,057664834	49,90072
0,01	0,09	0,03	10	50	35,71428571	1	0,14875	0,18947017	21,4916
0,01	0,09	0,03	10	100	52,63157895	1	0,18715	0,279219198	32,97381
0,01	0,09	0,03	50	100	90,90909091	1	0,46885	0,482287706	2,786243

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,03	10	500	84,74576271	1	0,23905	0,449590235	46,82936
0,01	0,09	0,03	50	500	263,1578947	1	0,93575	1,396095992	32,97381
0,03	0,07	0,01	50	10	13,15789474	1	0,51427	0,209414399	145,5753
0,03	0,07	0,01	10	50	22,72727273	1	0,11588	0,36171578	67,9638
0,03	0,07	0,01	10	100	27,02702703	1	0,11781	0,430148495	72,61178
0,03	0,07	0,01	50	100	76,92307692	1	0,5602	1,224268793	54,24207
0,03	0,07	0,01	10	500	31,84713376	1	0,11977	0,506862876	76,37033
0,03	0,07	0,01	50	500	135,1351351	1	0,58904	2,150742474	72,61225
0,03	0,07	0,03	50	10	13,15789474	1	0,21861	0,0698048	213,1733
0,03	0,07	0,03	10	50	22,72727273	1	0,07948	0,120571927	34,08084
0,03	0,07	0,03	10	100	27,02702703	1	0,08517	0,143382832	40,59958
0,03	0,07	0,03	50	100	76,92307692	1	0,34238	0,408089598	16,10176
0,03	0,07	0,03	10	500	31,84713376	1	0,09101	0,168954292	46,13336
0,03	0,07	0,03	50	500	135,1351351	1	0,42584	0,716914158	40,60098

7.2.2. I risultati corretti del caso non omogeneo con armatura

Nelle tabelle 7.3 e 7.4 sottostanti si riportano i risultati corretti per il caso non omogeneo con armatura perpendicolare al dispositivo di Wenner. Nelle tabelle 7.5 e 7.6 sottostanti si riportano, invece, i risultati corretti per il caso non omogeneo con armatura parallela al dispositivo di Wenner. I risultati sono presentati al variare dei parametri descritti nei paragrafo 3.2 e 3.4, ovvero le altezze e le resistività dei due strati della soletta di calcestruzzo e la distanza tra gli elettrodi, per una assegnata corrente circolante. Nelle tabelle 7.3 e 7.5 si è considerata una resistività apparente definita secondo la formula 7.2, mentre nelle tabelle 7.4 e 7.6 si è considerata una resistività apparente definita secondo la formula 7.3. Inoltre nelle tabelle si riportano per ciascun caso il valore della resistività apparente considerato e lo scostamento percentuale tra la caduta ohmica calcolata con la formula di Wenner corretta 7.1 e quella ricavata dal simulatore numerico.

Tabella 7.3. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	14	1	0,31973	0,22281692	43,49449
0,01	0,09	0,01	10	50	46	1	0,17556	0,732112738	76,02009
0,01	0,09	0,01	10	100	91	1	0,19789	1,448309982	86,33649
0,01	0,09	0,01	50	100	95	1	0,68757	1,511971959	54,52495
0,01	0,09	0,01	10	500	451	1	0,22423	7,177887933	96,8761
0,01	0,09	0,01	50	500	455	1	0,98944	7,241549911	86,33663
0,01	0,09	0,03	50	10	14	1	0,08503	0,074272307	14,48412
0,01	0,09	0,03	10	50	46	1	0,14752	0,244037579	39,55029
0,01	0,09	0,03	10	100	91	1	0,18614	0,482769994	61,44334
0,01	0,09	0,03	50	100	95	1	0,46304	0,503990653	8,12528
0,01	0,09	0,03	10	500	451	1	0,23869	2,392629311	90,02395

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,03	50	500	455	1	0,93068	2,41384997	61,44417
0,03	0,07	0,01	50	10	22	1	0,51044	0,350140875	45,78132
0,03	0,07	0,01	10	50	38	1	0,11487	0,604788784	81,00659
0,03	0,07	0,01	10	100	73	1	0,11693	1,161831085	89,93571
0,03	0,07	0,01	50	100	85	1	0,55466	1,352817016	58,99963
0,03	0,07	0,01	10	500	353	1	0,11908	5,618169491	97,88045
0,03	0,07	0,01	50	500	365	1	0,58462	5,809155423	89,93623
0,03	0,07	0,03	50	10	22	1	0,21702	0,116713625	85,9423
0,03	0,07	0,03	10	50	38	1	0,07861	0,201596261	61,00622
0,03	0,07	0,03	10	100	73	1	0,08454	0,387277028	78,17066
0,03	0,07	0,03	50	100	85	1	0,33735	0,450939005	25,18944
0,03	0,07	0,03	10	500	353	1	0,09078	1,872723164	95,15251
0,03	0,07	0,03	50	500	365	1	0,42268	1,936385141	78,1717

Tabella 7.4. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	10,86956522	1	0,31973	0,172994503	84,8209
0,01	0,09	0,01	10	50	35,71428571	1	0,17556	0,568410511	69,11387
0,01	0,09	0,01	10	100	52,63157895	1	0,19789	0,837657595	76,37579
0,01	0,09	0,01	50	100	90,90909091	1	0,68757	1,446863119	52,47857
0,01	0,09	0,01	10	500	84,74576271	1	0,22423	1,348770704	83,37523
0,01	0,09	0,01	50	500	263,1578947	1	0,98944	4,188287976	76,37603
0,01	0,09	0,03	50	10	10,86956522	1	0,08503	0,057664834	47,45555
0,01	0,09	0,03	10	50	35,71428571	1	0,14752	0,18947017	22,14078
0,01	0,09	0,03	10	100	52,63157895	1	0,18614	0,279219198	33,33553
0,01	0,09	0,03	50	100	90,90909091	1	0,46304	0,482287706	3,990918
0,01	0,09	0,03	10	500	84,74576271	1	0,23869	0,449590235	46,90943
0,01	0,09	0,03	50	500	263,1578947	1	0,93068	1,396095992	33,33696
0,03	0,07	0,01	50	10	13,15789474	1	0,51044	0,209414399	143,7464
0,03	0,07	0,01	10	50	22,72727273	1	0,11487	0,36171578	68,24302
0,03	0,07	0,01	10	100	27,02702703	1	0,11693	0,430148495	72,81636
0,03	0,07	0,01	50	100	76,92307692	1	0,55466	1,224268793	54,69459
0,03	0,07	0,01	10	500	31,84713376	1	0,11908	0,506862876	76,50647
0,03	0,07	0,01	50	500	135,1351351	1	0,58462	2,150742474	72,81776
0,03	0,07	0,03	50	10	13,15789474	1	0,21702	0,0698048	210,8955
0,03	0,07	0,03	10	50	22,72727273	1	0,07861	0,120571927	34,8024
0,03	0,07	0,03	10	100	27,02702703	1	0,08454	0,143382832	41,03897
0,03	0,07	0,03	50	100	76,92307692	1	0,33735	0,408089598	17,33433
0,03	0,07	0,03	10	500	31,84713376	1	0,09078	0,168954292	46,26949
0,03	0,07	0,03	50	500	135,1351351	1	0,42268	0,716914158	41,04176

Tabella 7.5. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	14	1	0,31223	0,22281692	40,1285
0,01	0,09	0,01	10	50	46	1	0,16791	0,732112738	77,06501
0,01	0,09	0,01	10	100	91	1	0,19097	1,448309982	86,81429
0,01	0,09	0,01	50	100	95	1	0,65468	1,511971959	56,70026
0,01	0,09	0,01	10	500	451	1	0,22142	7,177887933	96,91525
0,01	0,09	0,01	50	500	455	1	0,95488	7,241549911	86,81387
0,01	0,09	0,03	50	10	14	1	0,06527	0,074272307	12,12068
0,01	0,09	0,03	10	50	46	1	0,12242	0,244037579	49,83559
0,01	0,09	0,03	10	100	91	1	0,16267	0,482769994	66,30487
0,01	0,09	0,03	50	100	95	1	0,36229	0,503990653	28,11573
0,01	0,09	0,03	10	500	451	1	0,22883	2,392629311	90,43604
0,01	0,09	0,03	50	500	455	1	0,81333	2,41384997	66,30569
0,03	0,07	0,01	50	10	22	1	0,50376	0,350140875	43,87352
0,03	0,07	0,01	10	50	38	1	0,10655	0,604788784	82,38228
0,03	0,07	0,01	10	100	73	1	0,10808	1,161831085	90,69744
0,03	0,07	0,01	50	100	85	1	0,522	1,352817016	61,41385
0,03	0,07	0,01	10	500	353	1	0,11086	5,618169491	98,02676
0,03	0,07	0,01	50	500	365	1	0,5404	5,809155423	90,69744
0,03	0,07	0,03	50	10	22	1	0,19623	0,116713625	68,12947
0,03	0,07	0,03	10	50	38	1	0,05331	0,201596261	73,55606
0,03	0,07	0,03	10	100	73	1	0,05736	0,387277028	85,1889
0,03	0,07	0,03	50	100	85	1	0,23931	0,450939005	46,93074
0,03	0,07	0,03	10	500	353	1	0,06501	1,872723164	96,52858
0,03	0,07	0,03	50	500	365	1	0,28677	1,936385141	85,19045

Tabella 7.6. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,01	50	10	10,86956522	1	0,31223	0,172994503	80,4855
0,01	0,09	0,01	10	50	35,71428571	1	0,16791	0,568410511	70,45973
0,01	0,09	0,01	10	100	52,63157895	1	0,19097	0,837657595	77,2019
0,01	0,09	0,01	50	100	90,90909091	1	0,65468	1,446863119	54,75177
0,01	0,09	0,01	10	500	84,74576271	1	0,22142	1,348770704	83,58357
0,01	0,09	0,01	50	500	263,1578947	1	0,95488	4,188287976	77,20119
0,01	0,09	0,03	50	10	10,86956522	1	0,06527	0,057664834	13,18857
0,01	0,09	0,03	10	50	35,71428571	1	0,12242	0,18947017	35,38825
0,01	0,09	0,03	10	100	52,63157895	1	0,16267	0,279219198	41,74111
0,01	0,09	0,03	50	100	90,90909091	1	0,36229	0,482287706	24,88094
0,01	0,09	0,03	10	500	84,74576271	1	0,22883	0,449590235	49,10254

H_1 [m]	H_2 [m]	a [m]	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	ρ_a [Ωm]	I [mA]	ΔV FEM [V]	ΔV Wenner [V]	Scostamento [%]
0,01	0,09	0,03	50	500	263,1578947	1	0,81333	1,396095992	41,74254
0,03	0,07	0,01	50	10	13,15789474	1	0,50376	0,209414399	140,5565
0,03	0,07	0,01	10	50	22,72727273	1	0,10655	0,36171578	70,54317
0,03	0,07	0,01	10	100	27,02702703	1	0,10808	0,430148495	74,87379
0,03	0,07	0,01	50	100	76,92307692	1	0,522	1,224268793	57,3623
0,03	0,07	0,01	10	500	31,84713376	1	0,11086	0,506862876	78,12821
0,03	0,07	0,01	50	500	135,1351351	1	0,5404	2,150742474	74,87379
0,03	0,07	0,03	50	10	13,15789474	1	0,19623	0,0698048	181,1125
0,03	0,07	0,03	10	50	22,72727273	1	0,05331	0,120571927	55,78573
0,03	0,07	0,03	10	100	27,02702703	1	0,05736	0,143382832	59,99521
0,03	0,07	0,03	50	100	76,92307692	1	0,23931	0,408089598	41,35847
0,03	0,07	0,03	10	500	31,84713376	1	0,06501	0,168954292	61,52214
0,03	0,07	0,03	50	500	135,1351351	1	0,28677	0,716914158	59,9994

7.3. Presentazione grafica dei risultati relativi al caso non omogeneo

Di seguito si presentano i risultati per il caso non omogeneo corretto in assenza di armatura di rinforzo. I risultati vengono presentati graficamente, attraverso grafici a dispersione, che mettono a confronto la caduta ohmica ricavata applicando la formula di Wenner corretta 7.1 con quella ricavata dal simulatore numerico, al variare dei parametri descritti nel Capitolo 3, nel Paragrafo 3.2, ovvero le altezze e le resistività dei due strati della soletta di calcestruzzo e la distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner.

7.3.1. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo corretto con media pesata

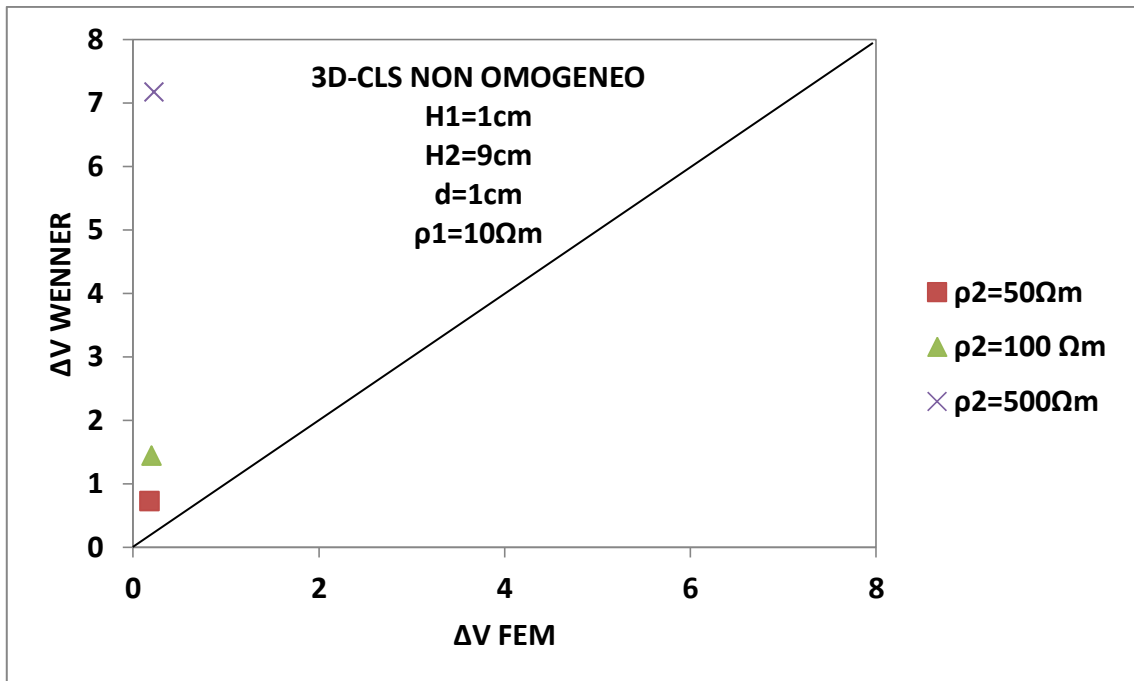


Grafico 7.1. Caso non omogeneo corretto con media pesata; H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=10Ωm

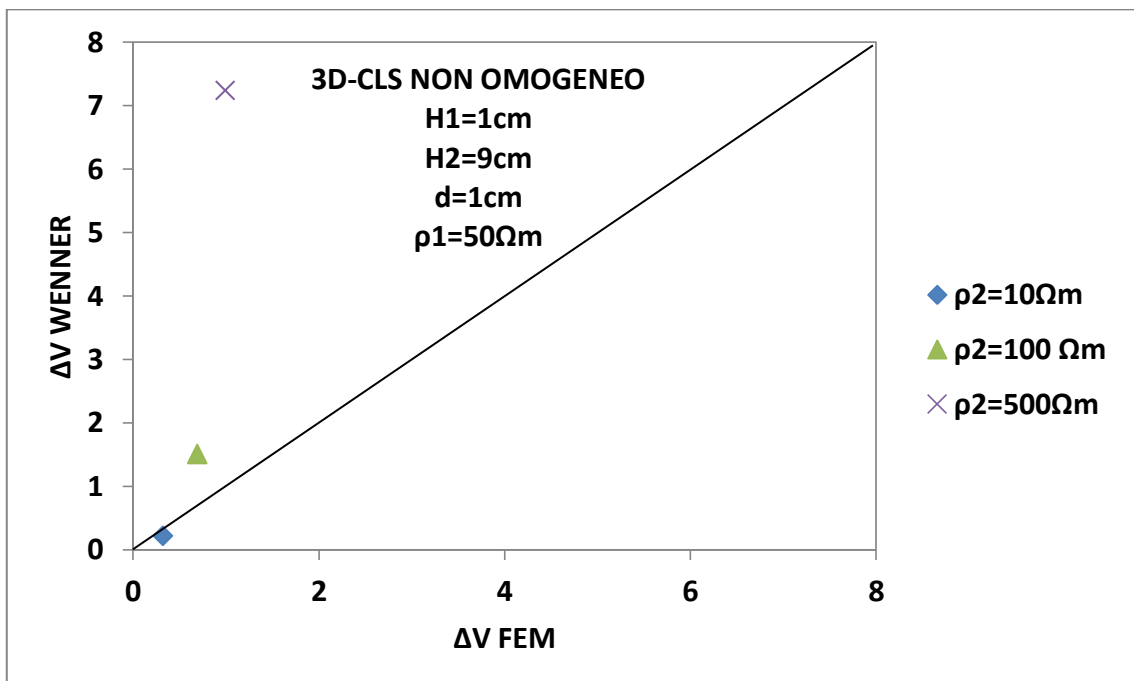


Grafico 7.2. Caso non omogeneo corretto con media pesata; H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=50Ωm

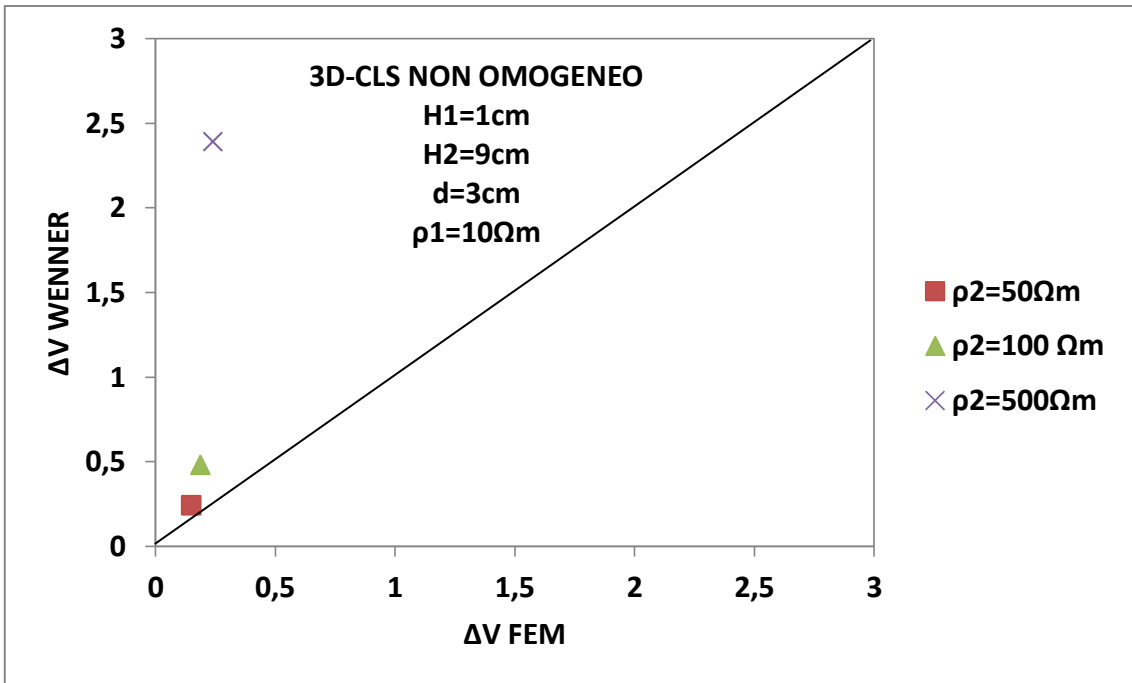


Grafico 7.3. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

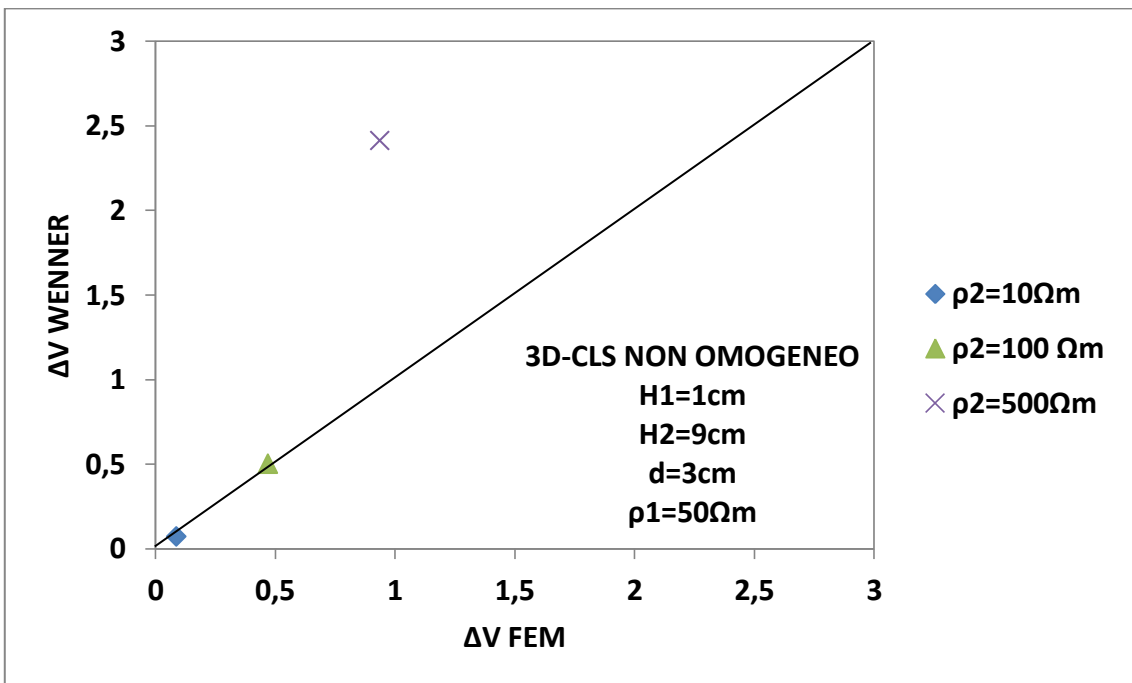


Grafico 7.4. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

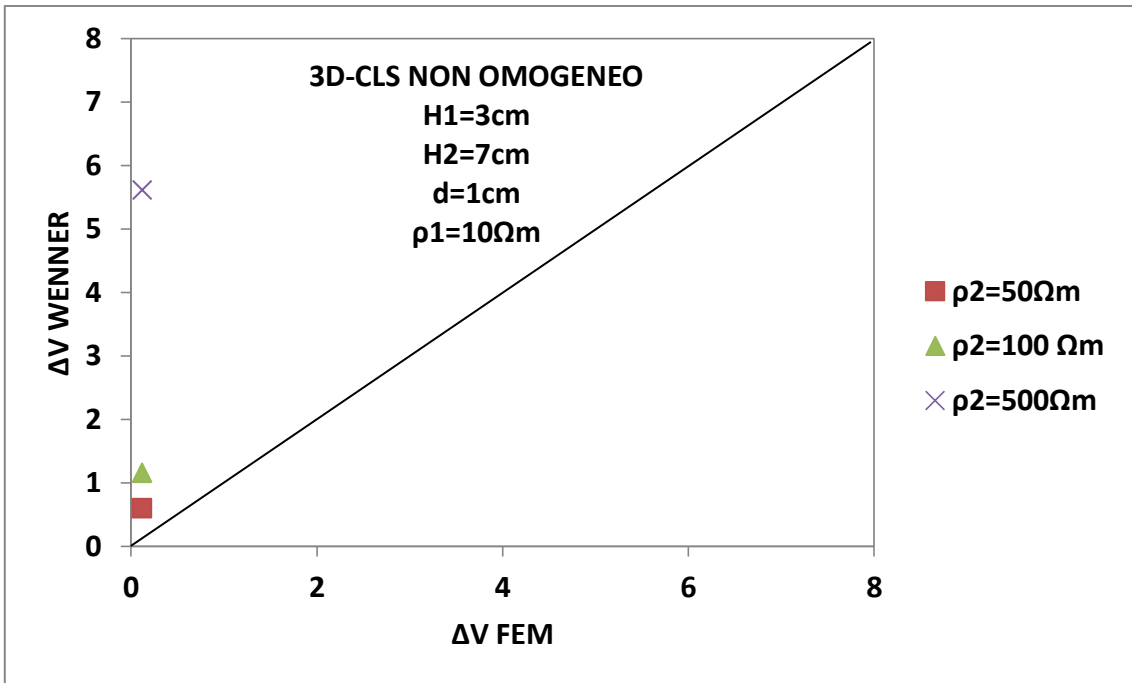


Grafico 7.5. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

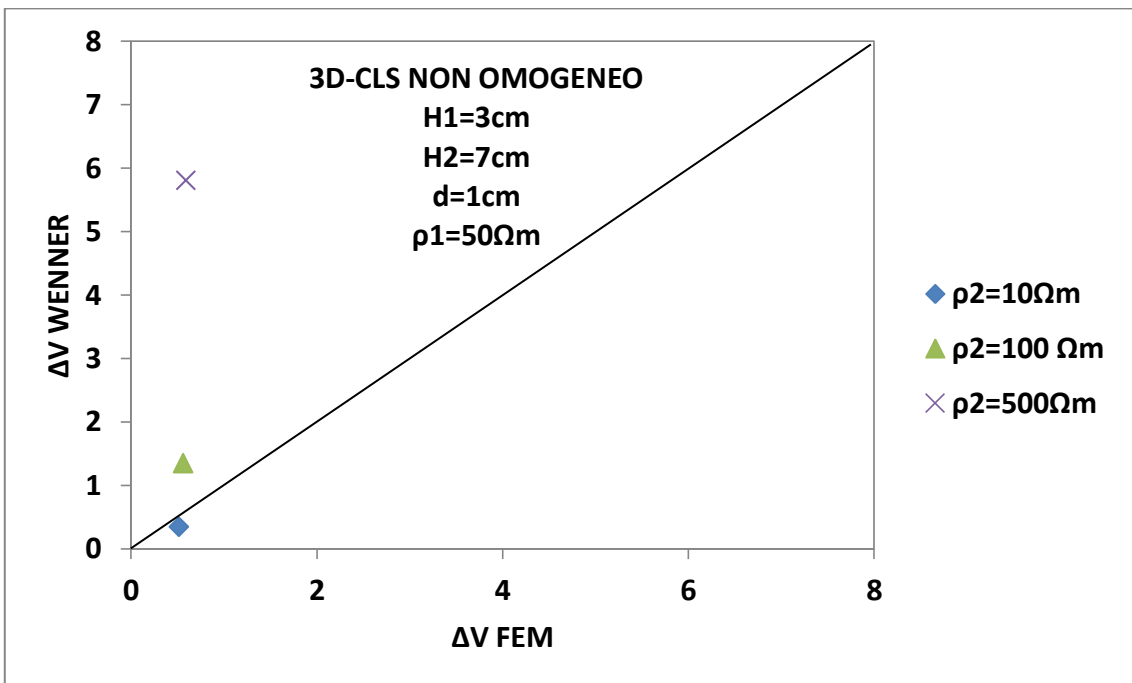


Grafico 7.6. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

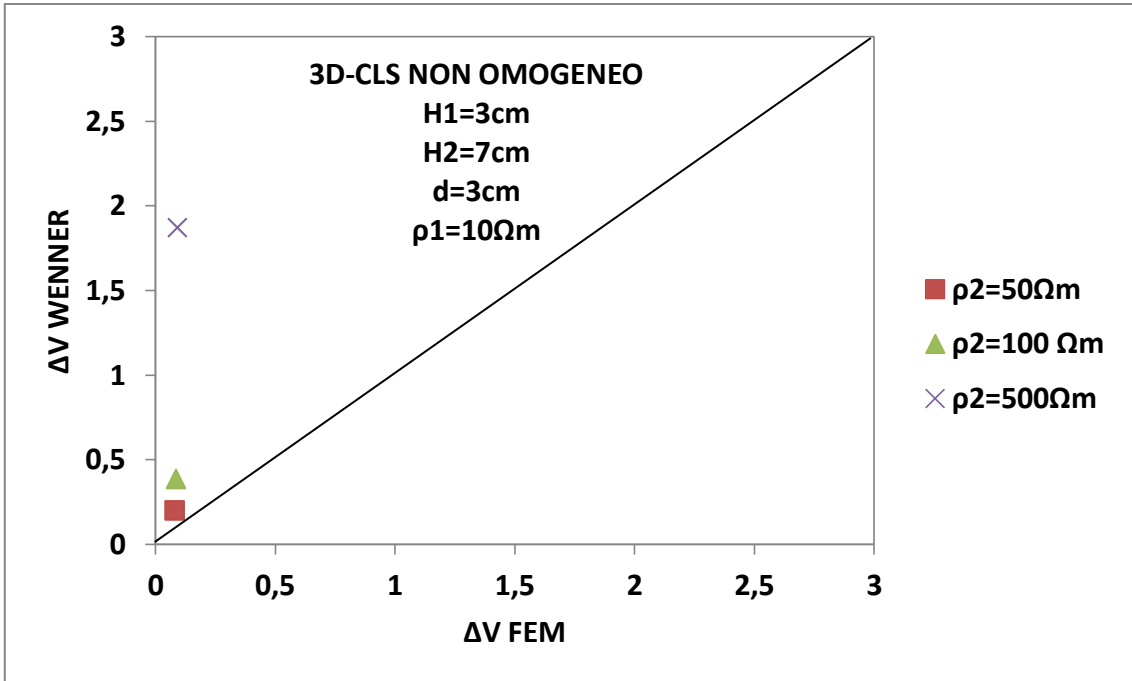


Grafico 7.7. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

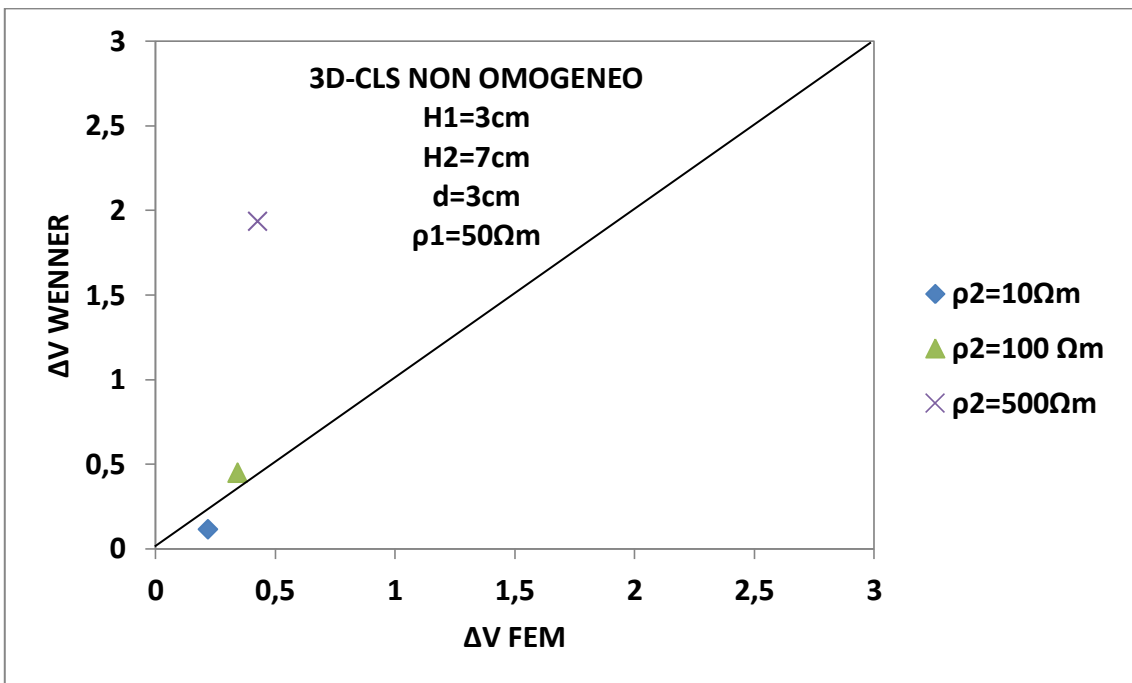


Grafico 7.8. Caso non omogeneo corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

7.3.2. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo corretto con media inversa

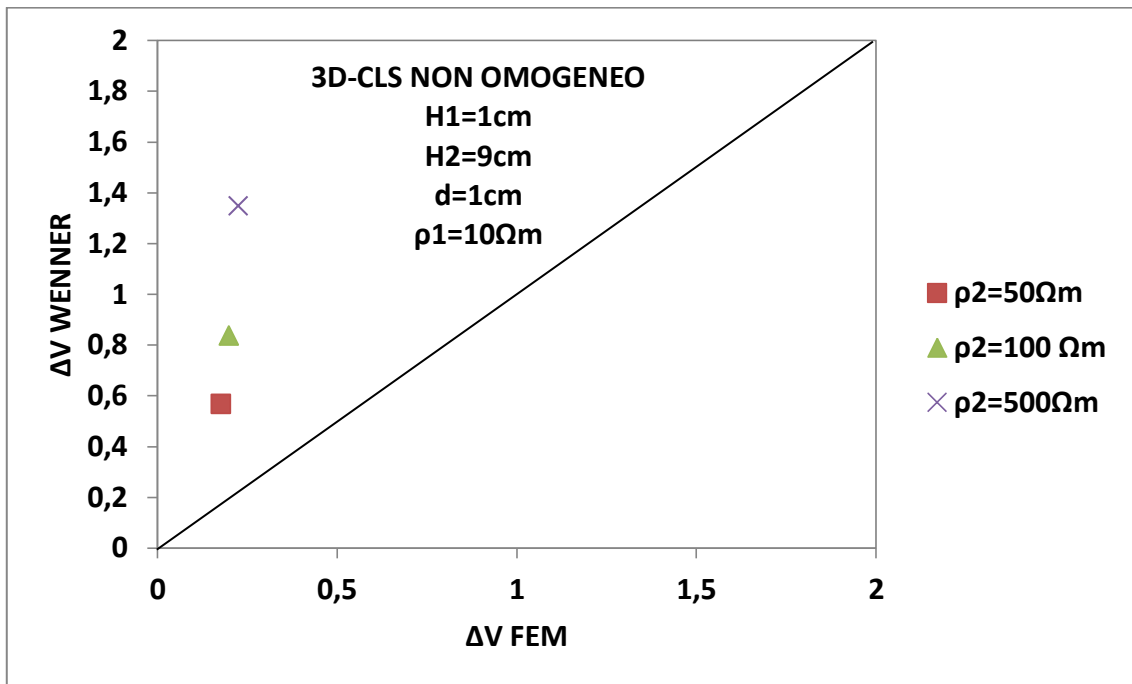


Figura 7.9. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

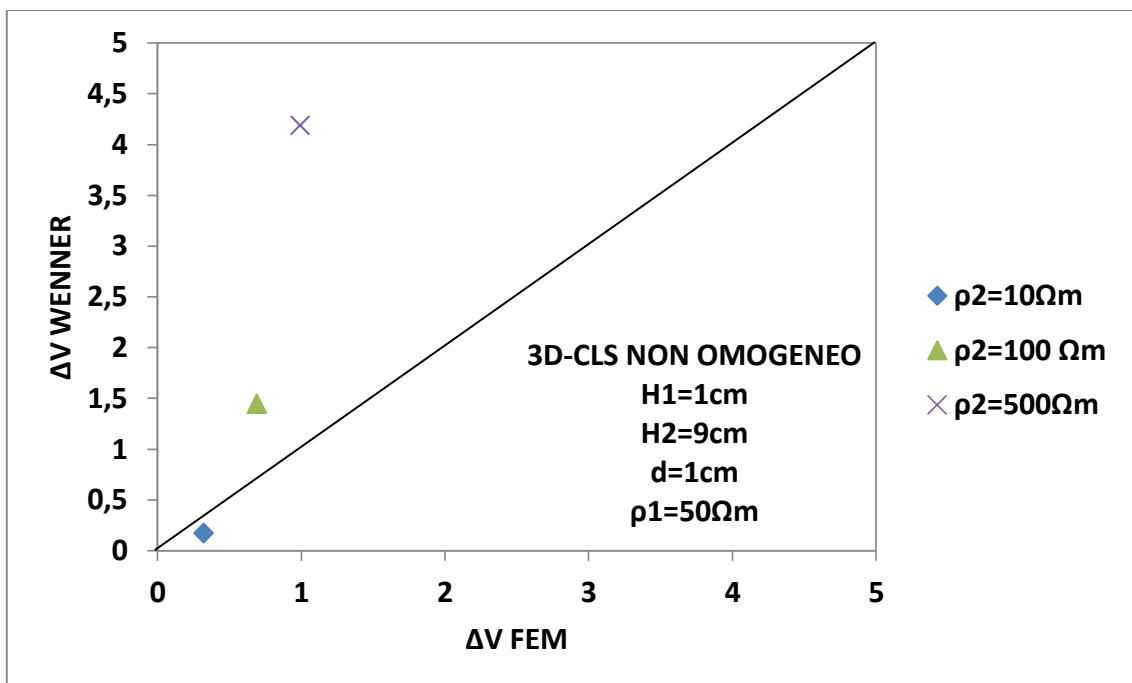


Figura 7.10. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

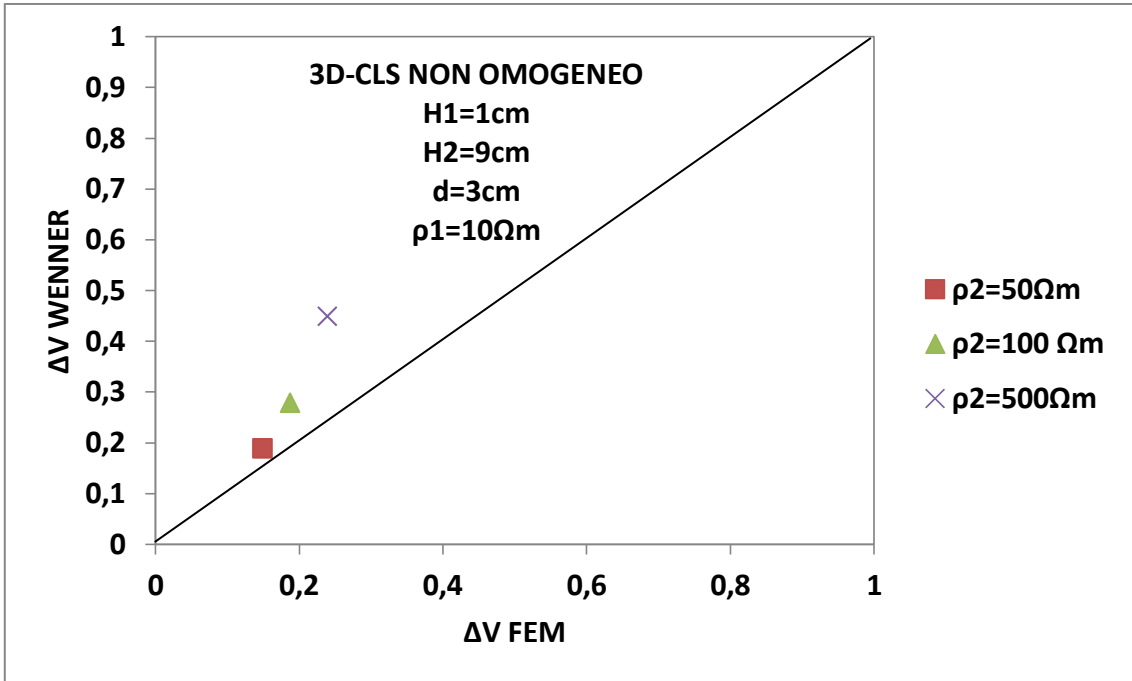


Figura 7.11. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

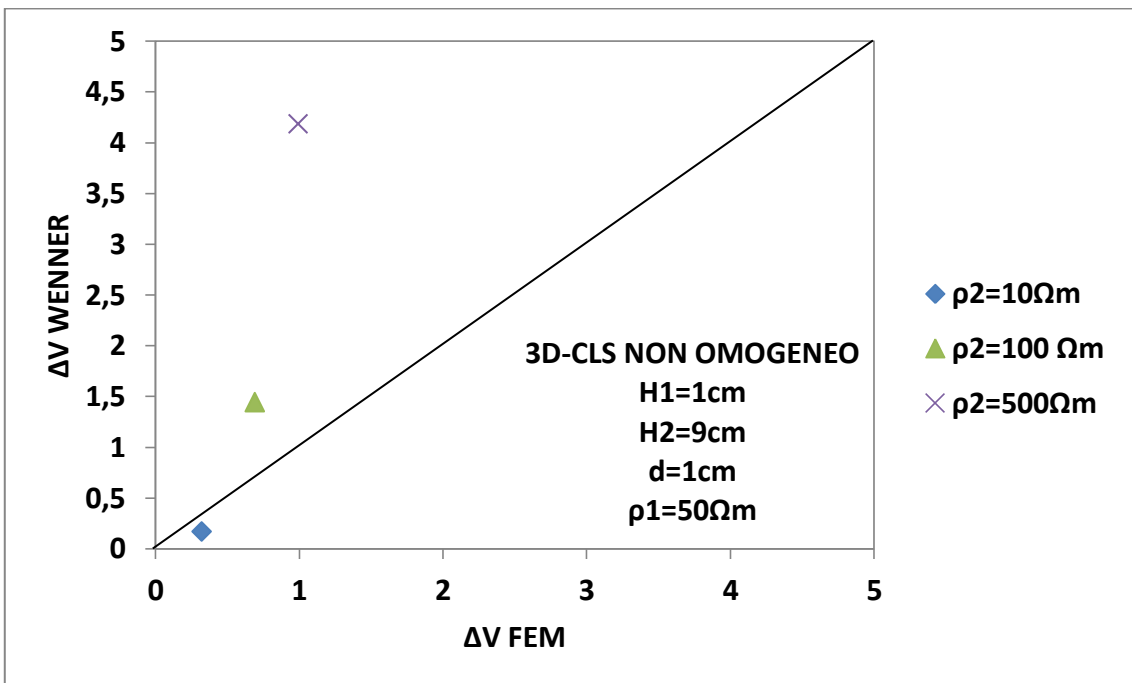


Figura 7.12. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

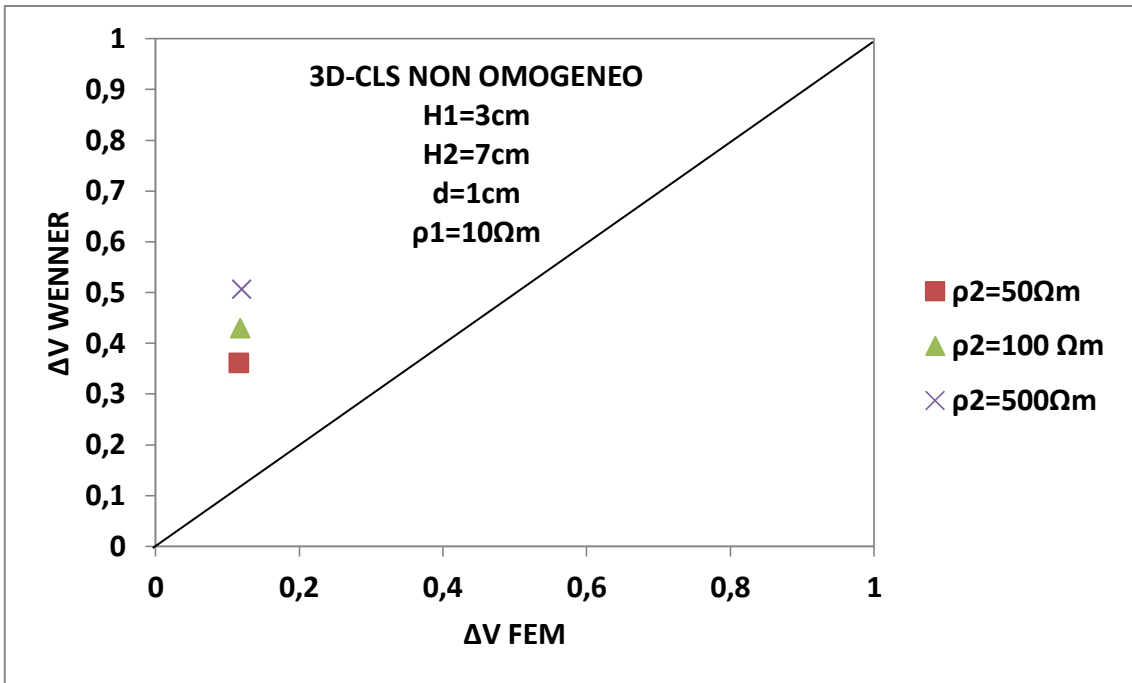


Figura 7.13. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

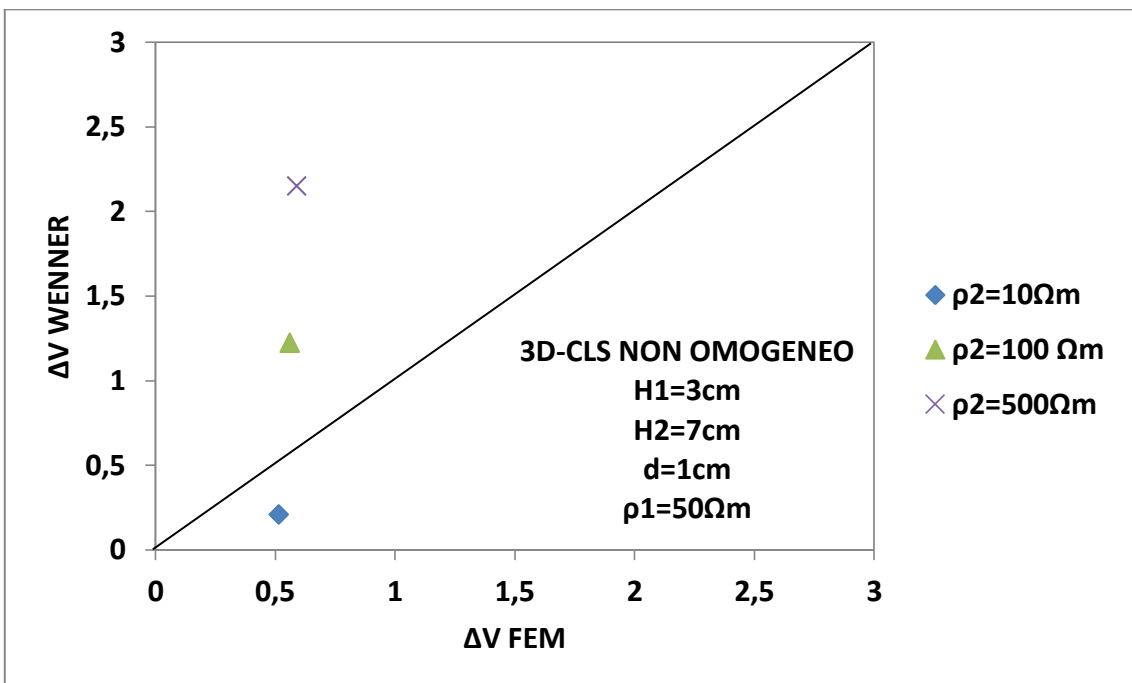


Figura 7.14. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

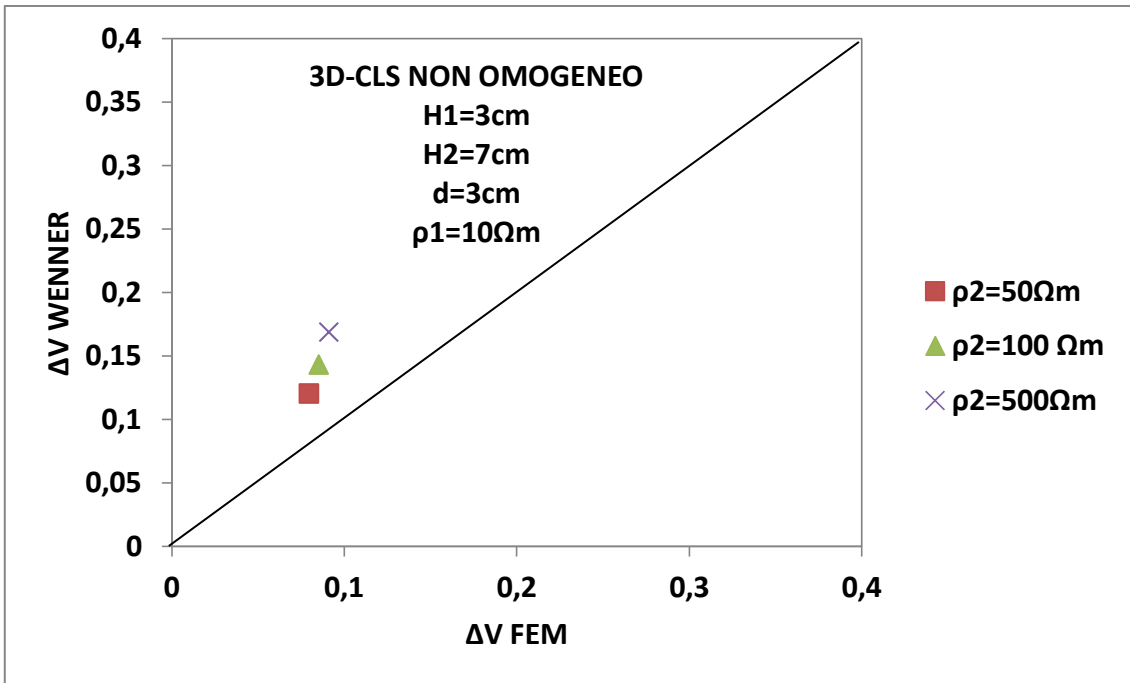


Figura 7.15. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

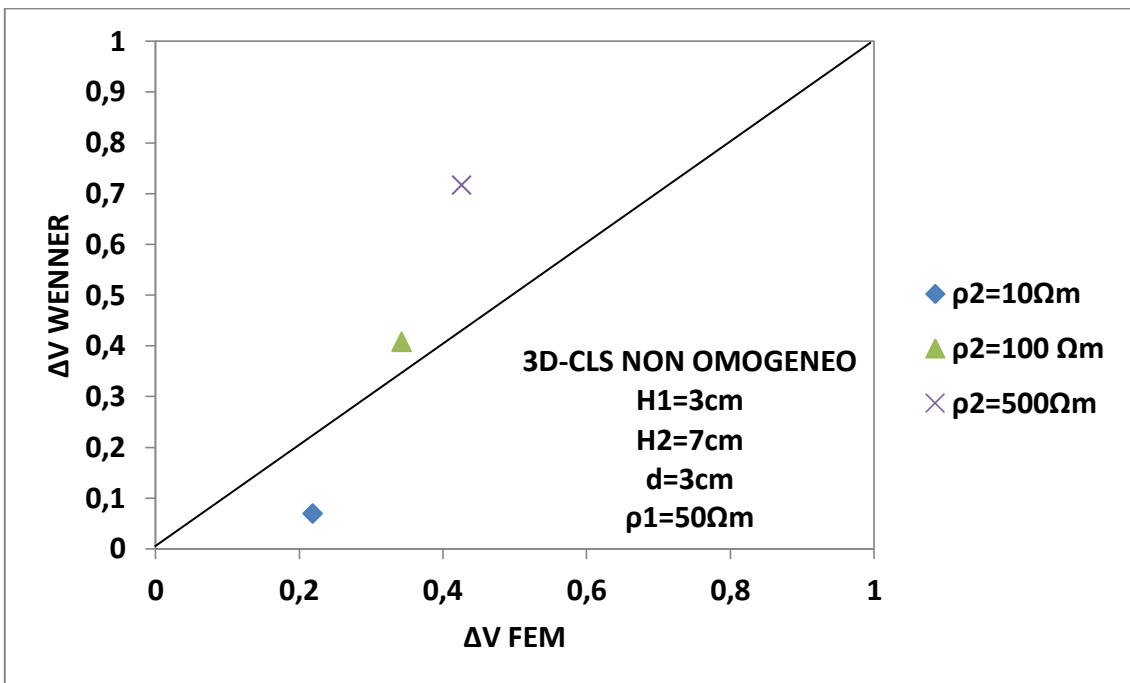


Figura 7.16. Caso non omogeneo corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

7.4. Influenza dell'armatura di rinforzo

Sulla base dei risultati presentati nel Sottoparagrafo 7.2.2 per il caso non omogeneo corretto in presenza dell'armatura di rinforzo, è possibile osservare come l'introduzione dell'armatura non

comporti scostamenti significativi dei risultati rispetto a quelli relativi al caso in assenza dell'armatura. Valgono quindi le medesime considerazioni svolte nel Capitolo 6, nel Paragrafo 6.3. Di seguito si presentano i risultati per il caso non omogeneo con armatura di rinforzo corretto. I risultati vengono presentati graficamente, attraverso grafici a dispersione, che mettono a confronto la caduta ohmica ricavata applicando la formula di Wenner corretta 7.1 con quella ricavata dal simulatore numerico, al variare dei parametri descritti nel Capitolo 3, nel Paragrafo 3.4, ovvero le altezze e le resistività dei due strati della soletta di calcestruzzo, la distanza tra gli elettrodi del dispositivo di Wenner.

7.4.1. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata

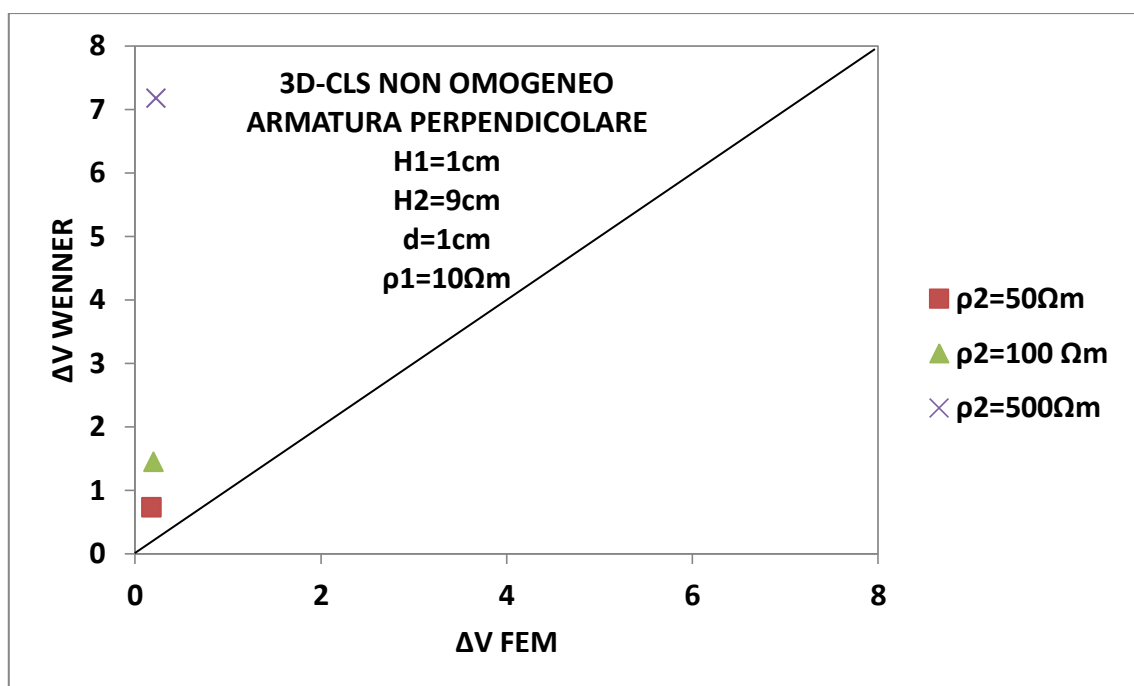


Grafico 7.17. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

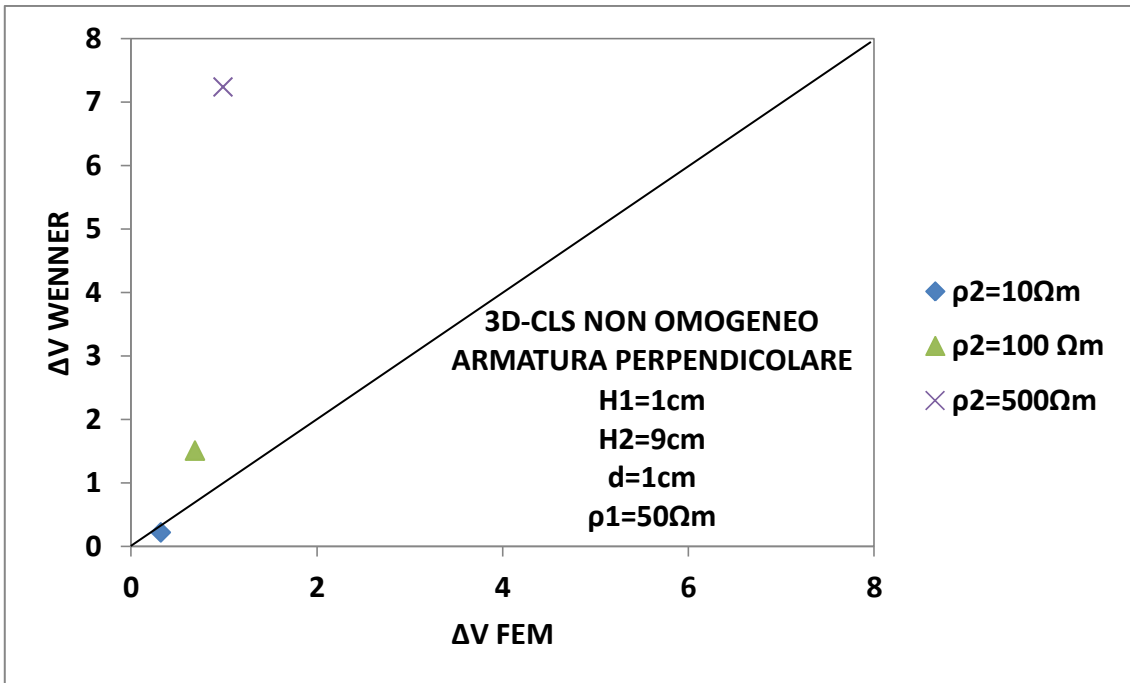


Grafico 7.18. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata;
H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=50Ωm

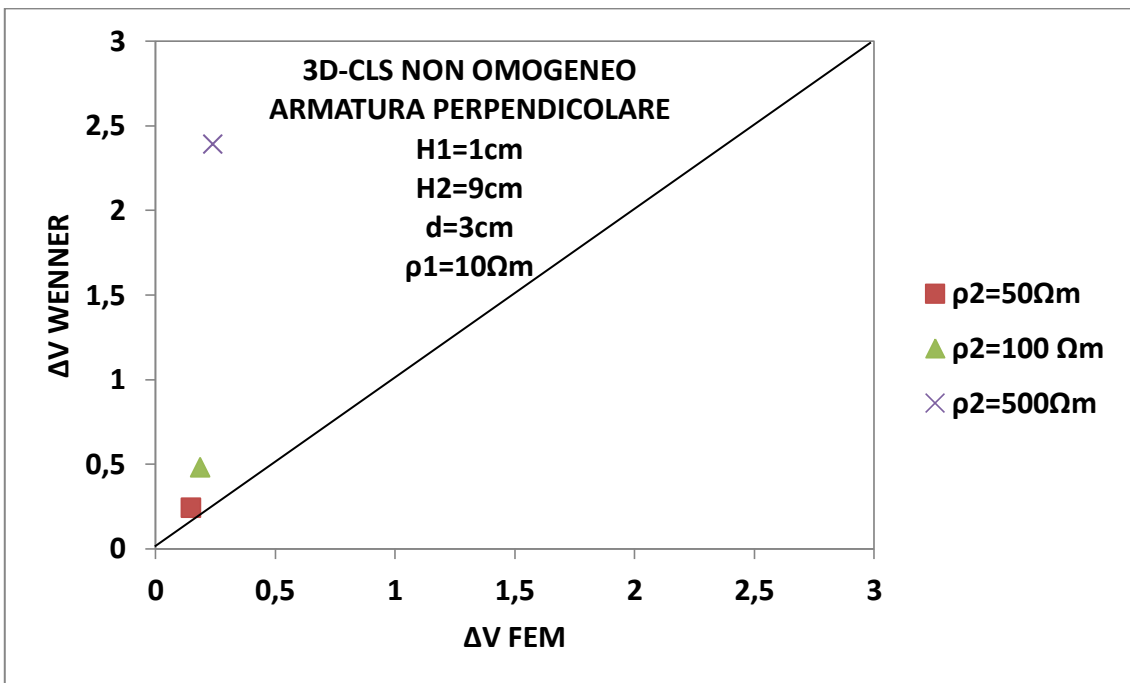


Grafico 7.19. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata;
H₁=1cm H₂=9cm d=3cm ρ₁=10Ωm

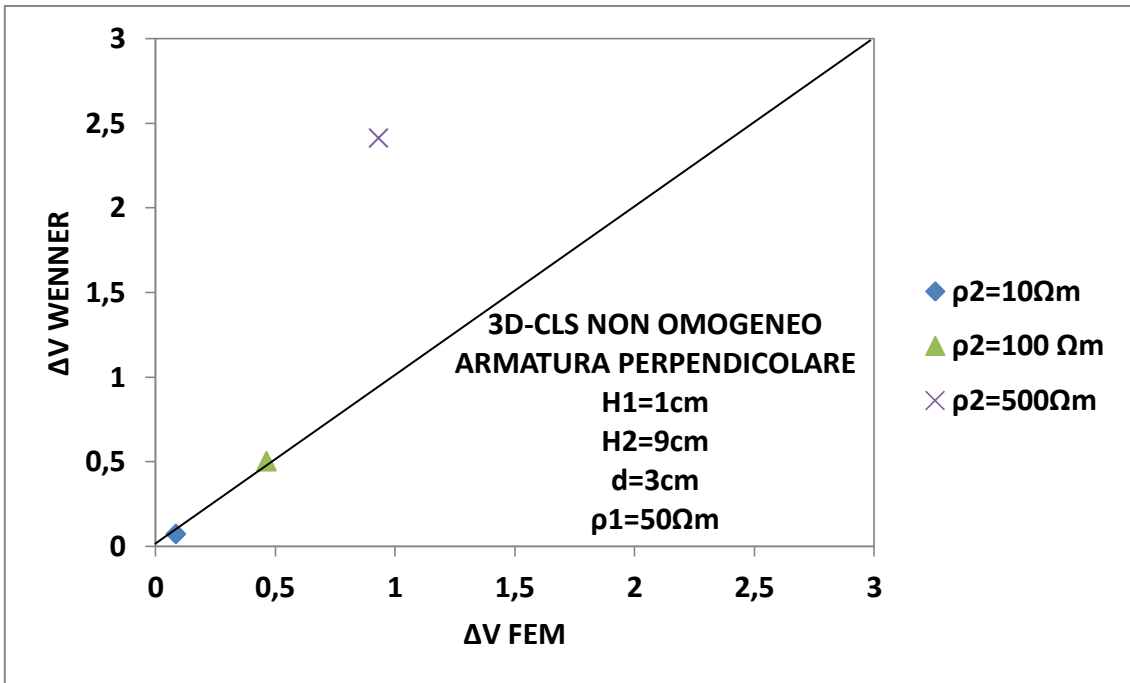


Grafico 7.20. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata;
 $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

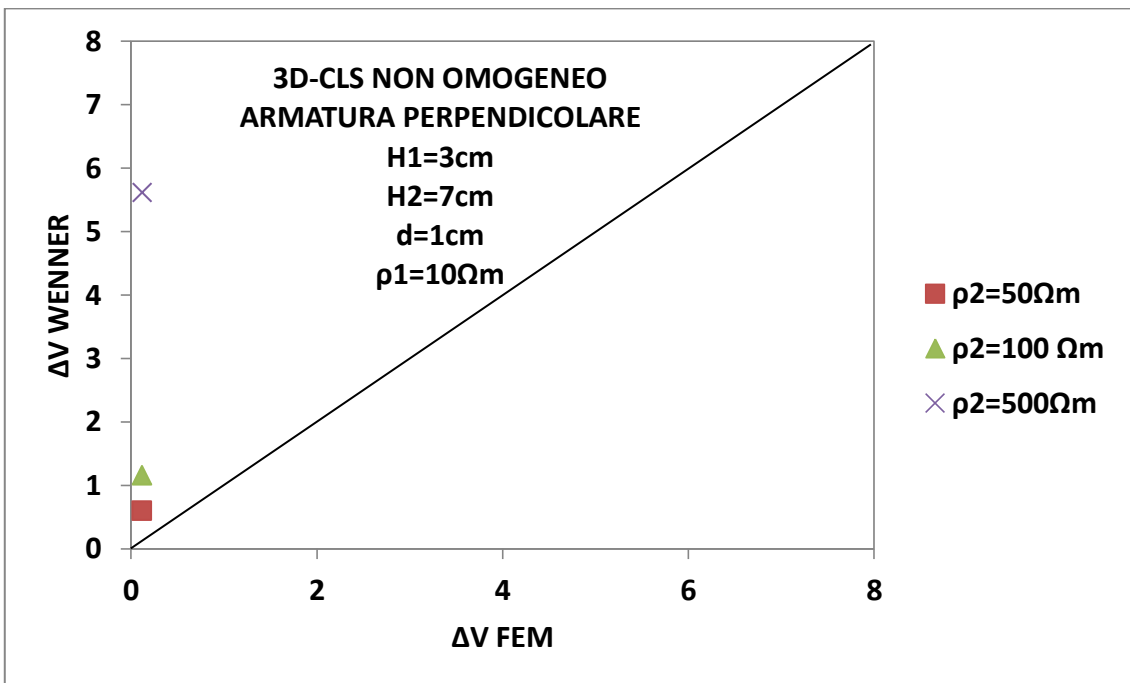


Grafico 7.21. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

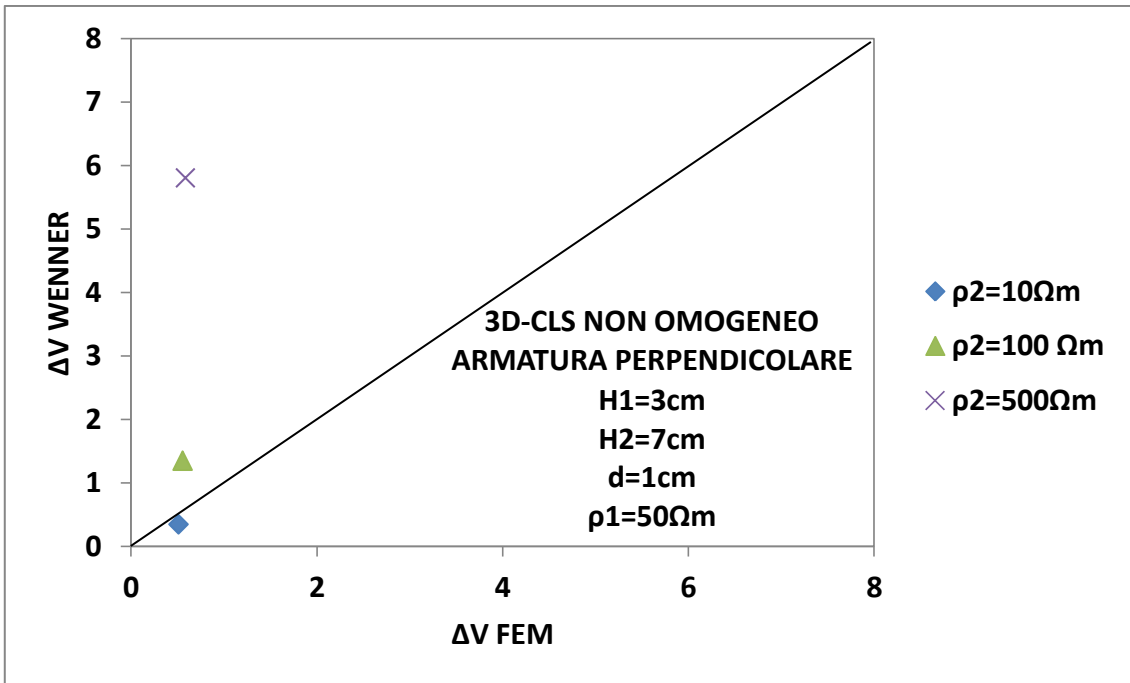


Grafico 7.22. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata;
H₁=3cm H₂=7cm d=1cm ρ₁=50Ωm

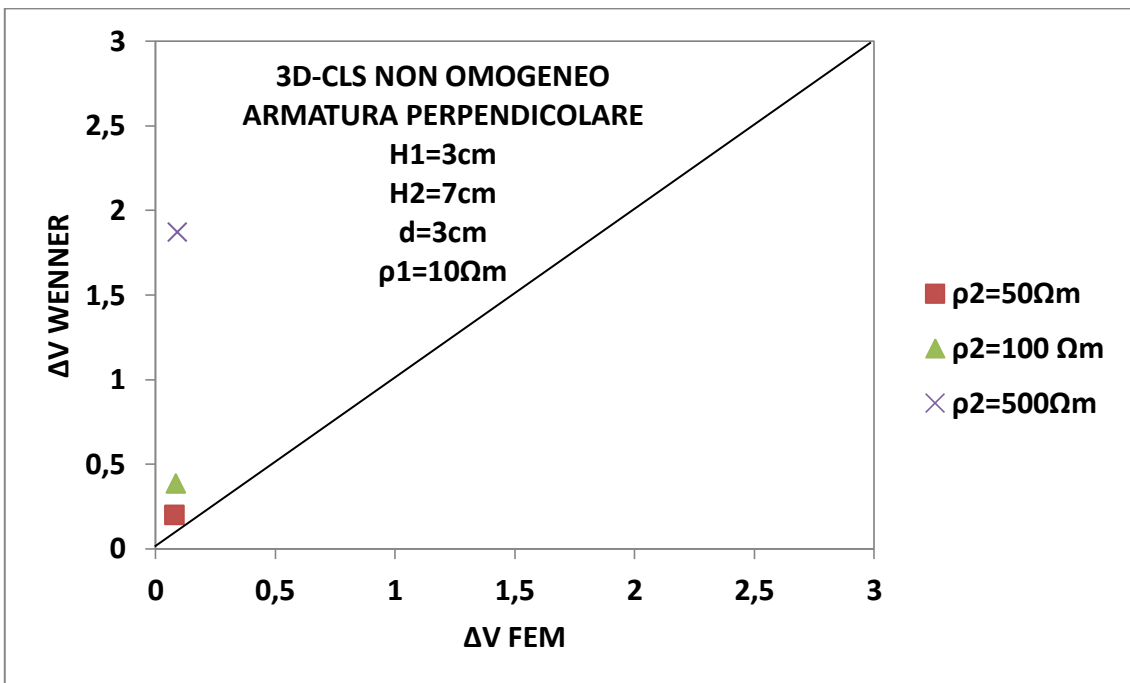


Grafico 7.23. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata;
H₁=3cm H₂=7cm d=3cm ρ₁=10Ωm

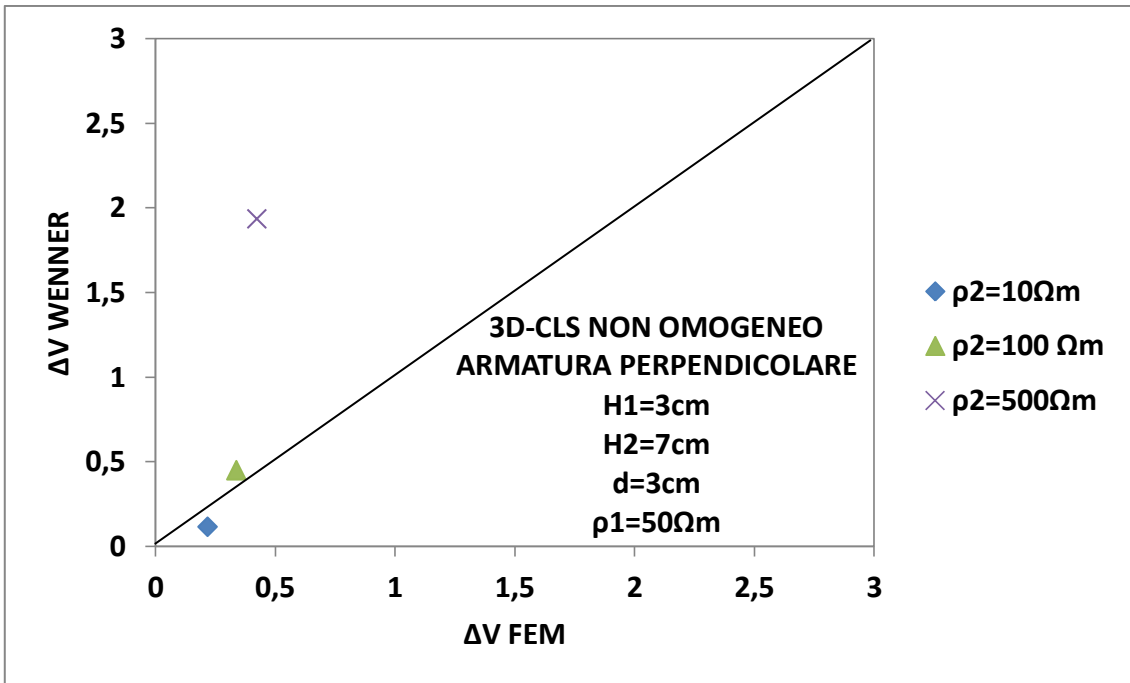


Grafico 7.24. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media pesata; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

7.4.2. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa

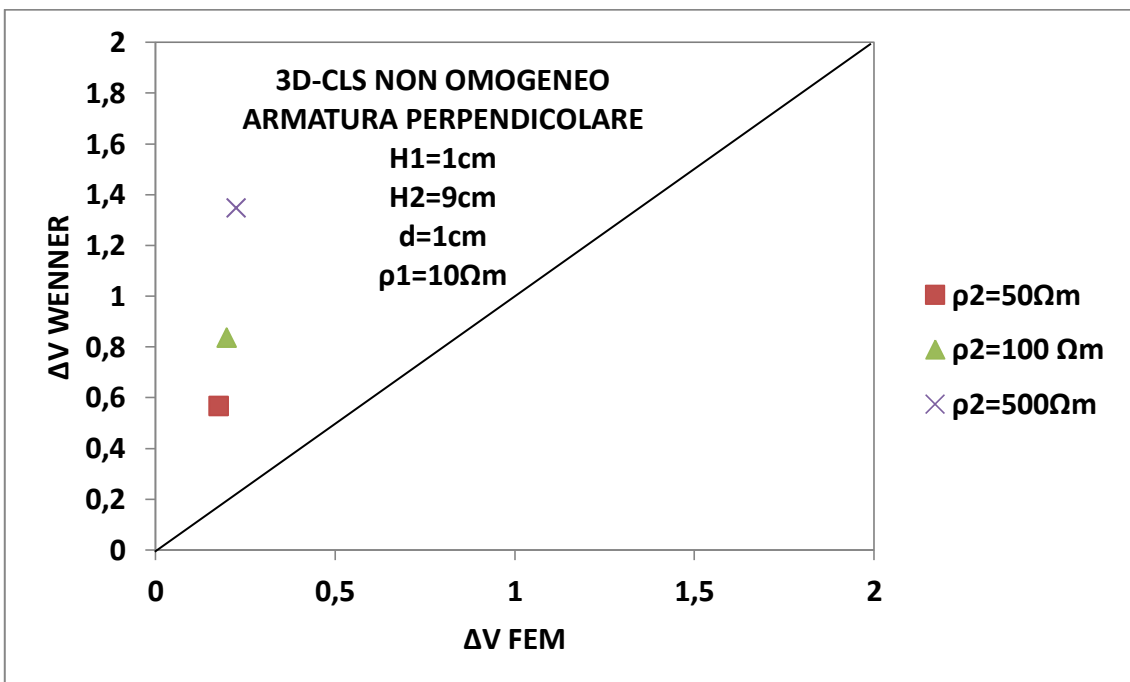


Figura 7.25. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa; $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

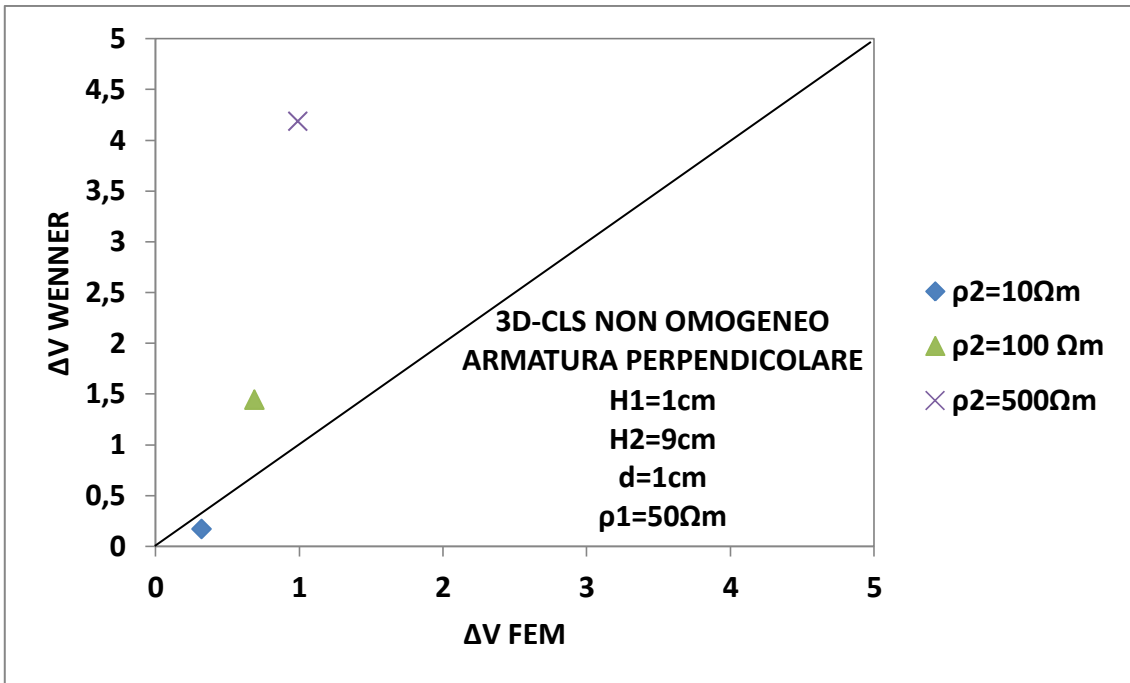


Figura 7.26. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa;
H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=50Ωm

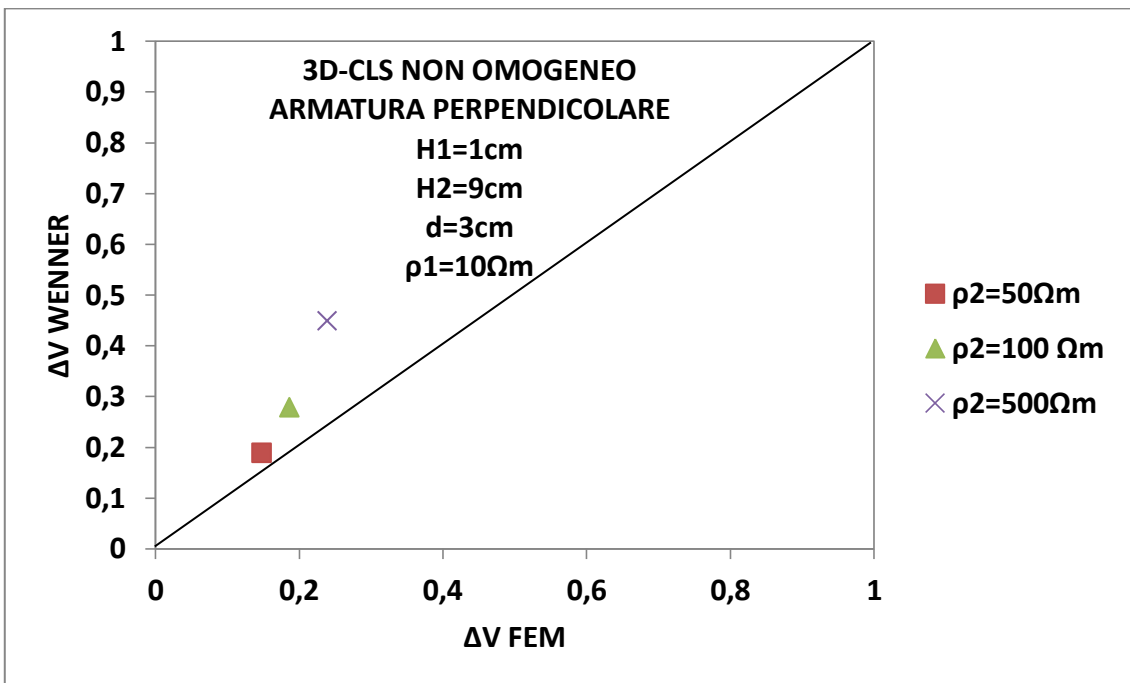


Figura 7.27. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa;
H₁=1cm H₂=9cm d=3cm ρ₁=10Ωm

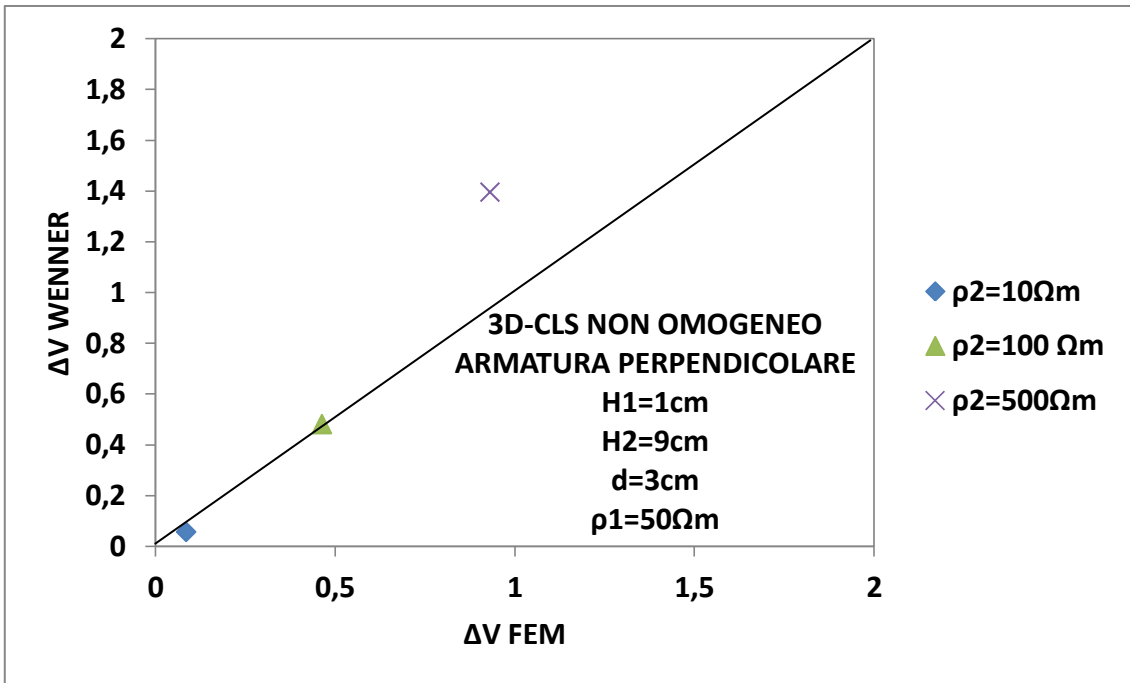


Figura 7.28. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa;
 $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

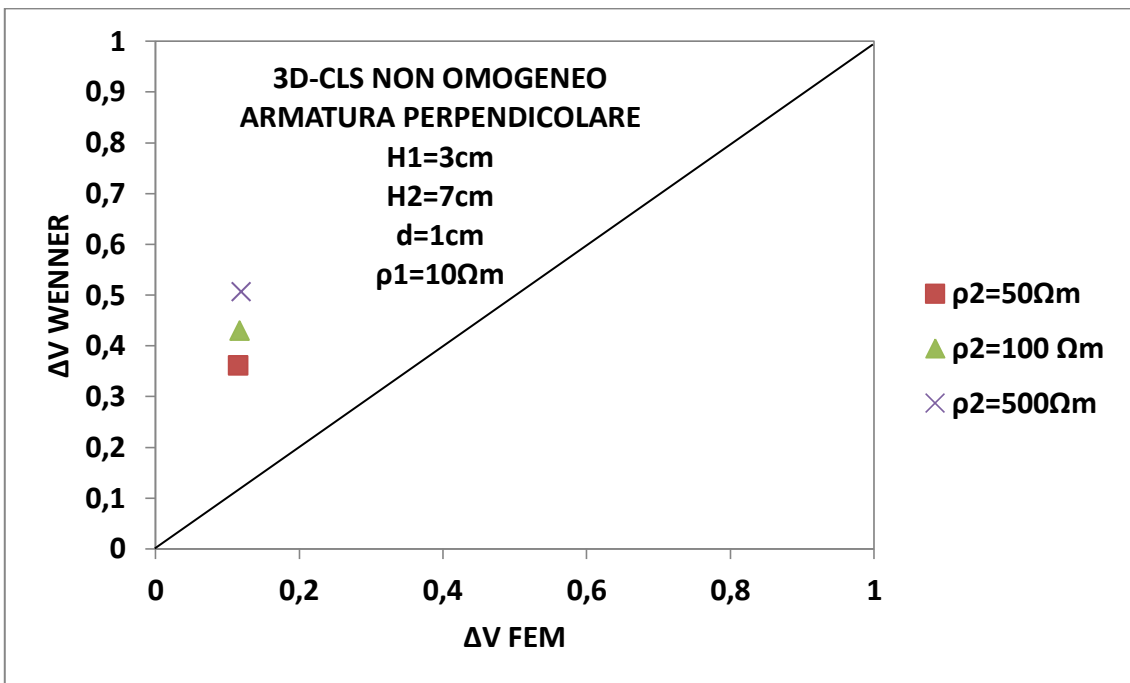


Figura 7.29. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

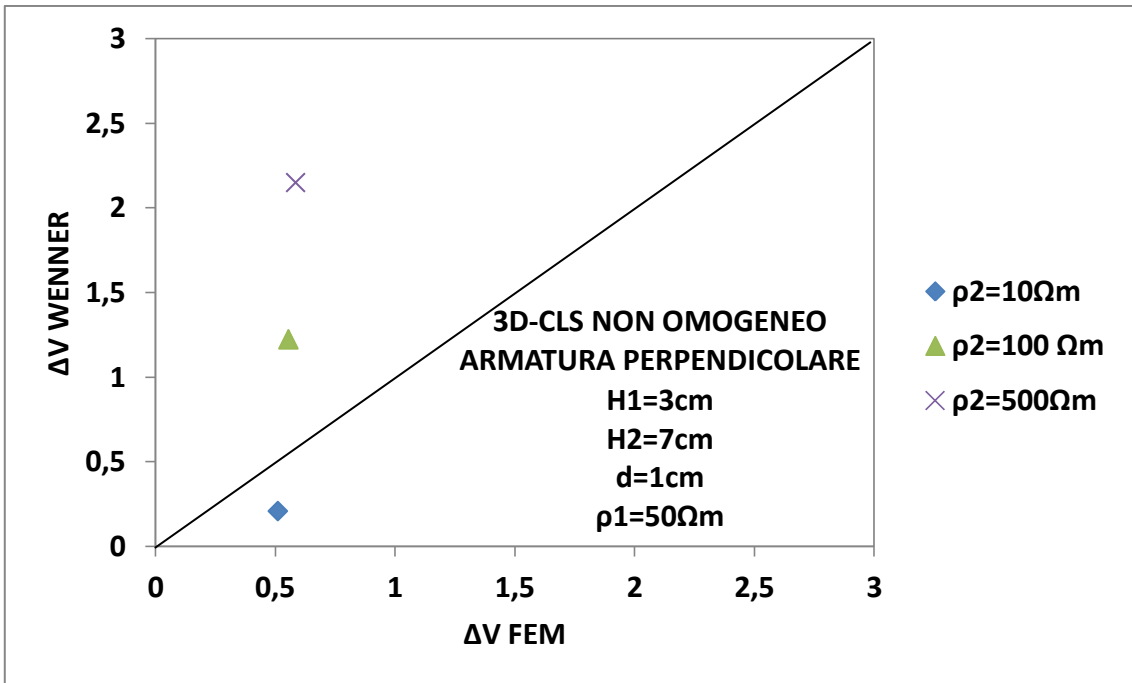


Figura 7.30. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

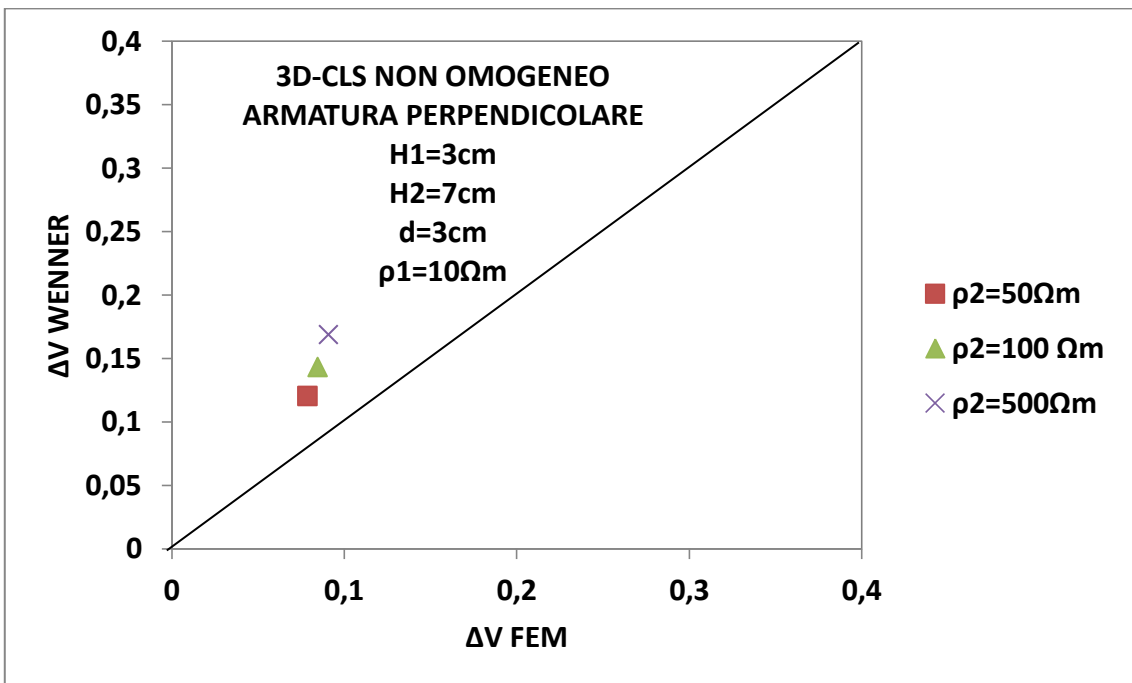


Figura 7.31. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

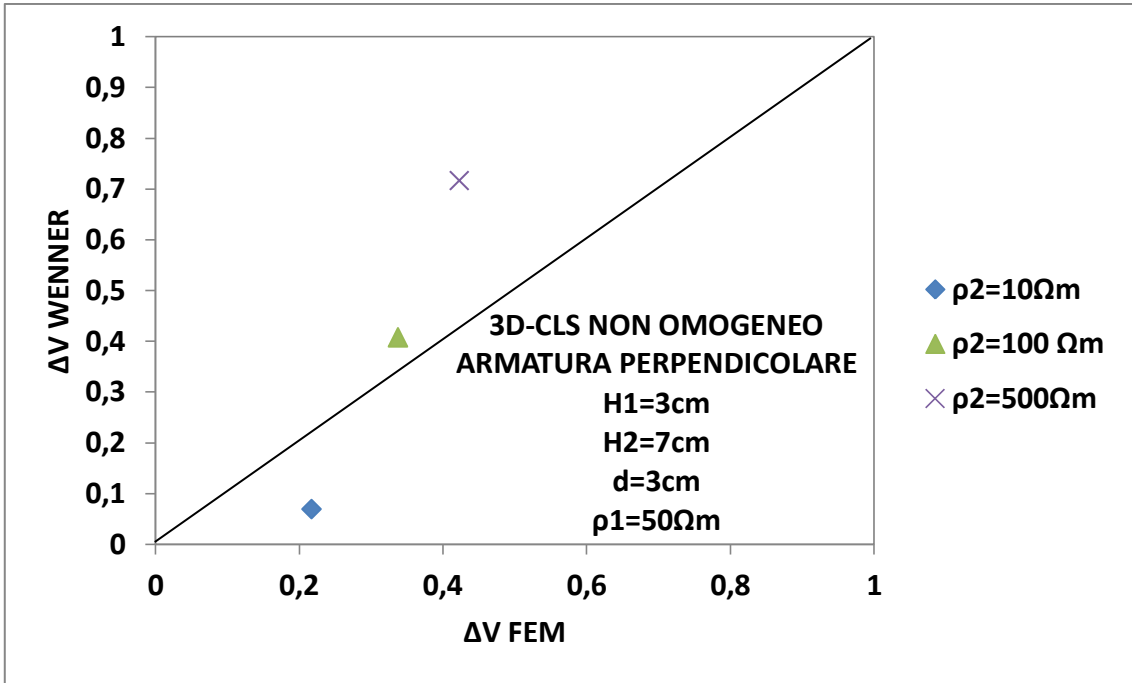


Figura 7.32. Caso non omogeneo con armatura perpendicolare corretto con media inversa;
 H₁=3cm H₂=7cm d=3cm ρ₁=50Ωm

7.4.3. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata

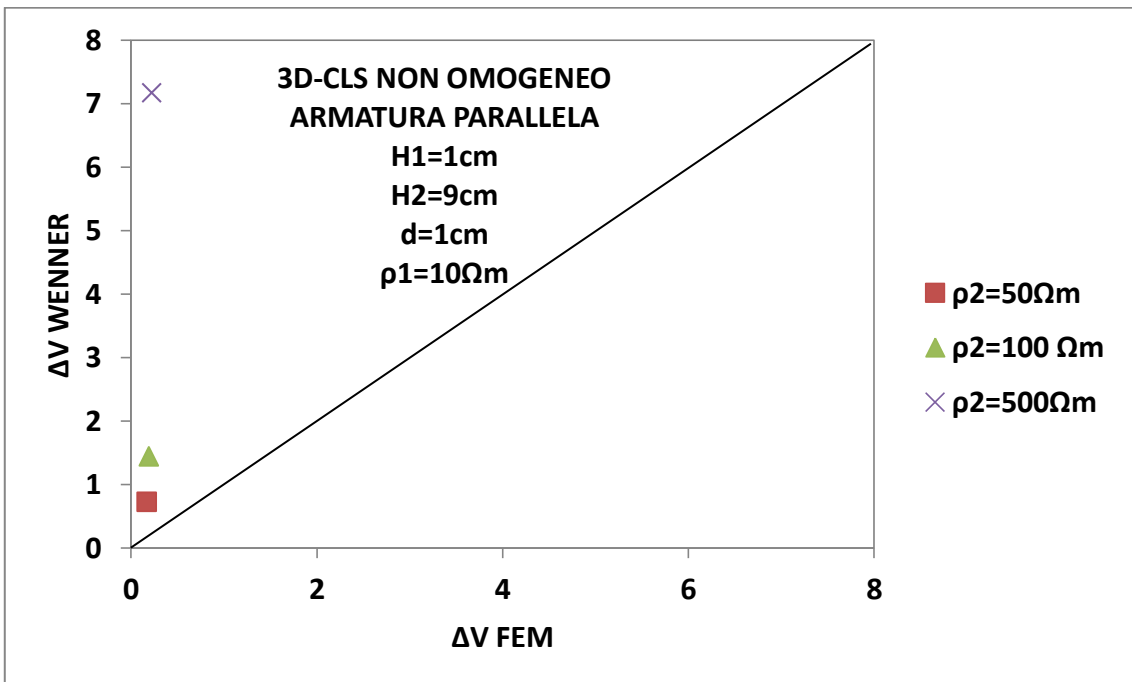


Grafico 7.33. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
 H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=10Ωm

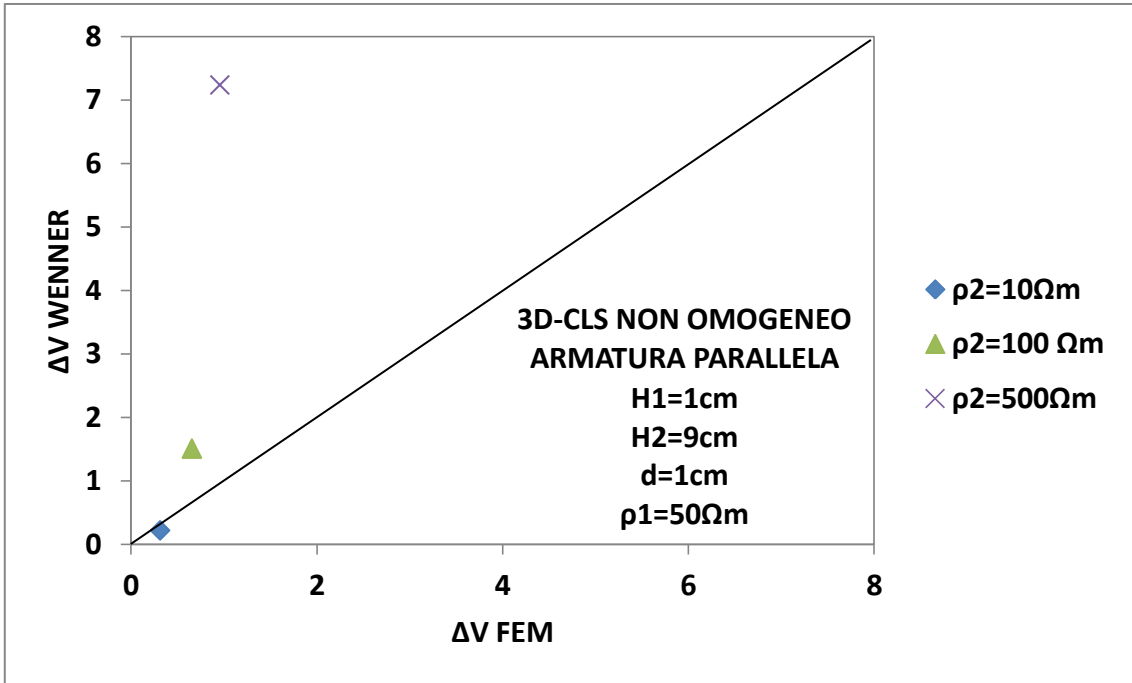


Grafico 7.34. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=50Ωm

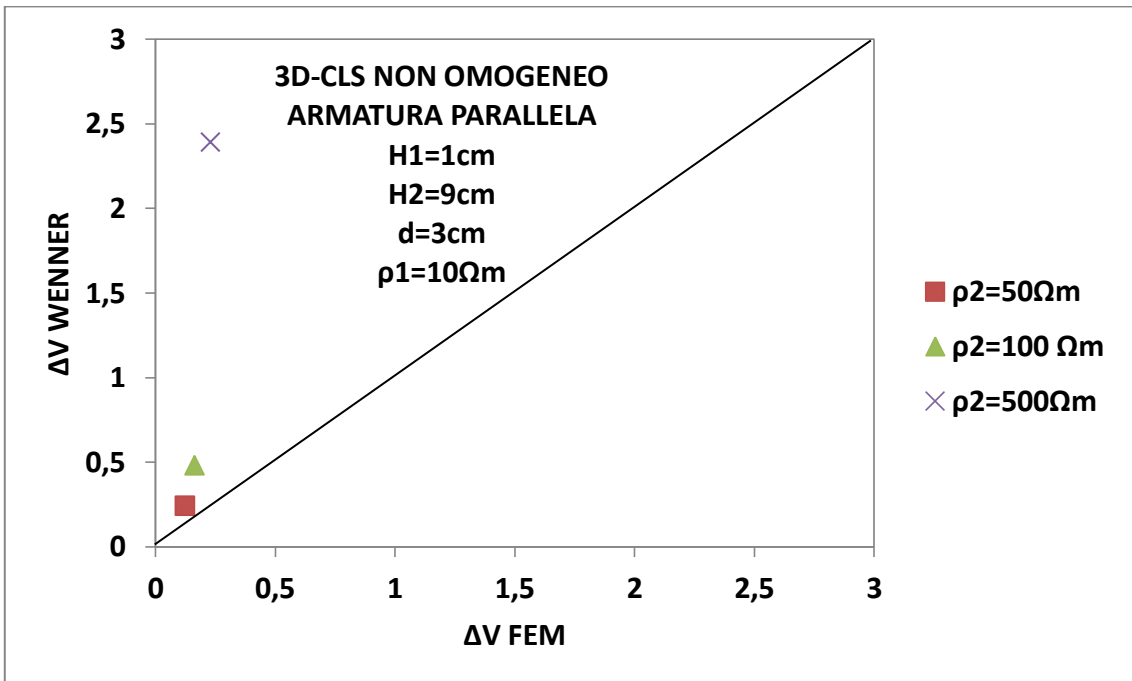


Grafico 7.35. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
H₁=1cm H₂=9cm d=3cm ρ₁=10Ωm

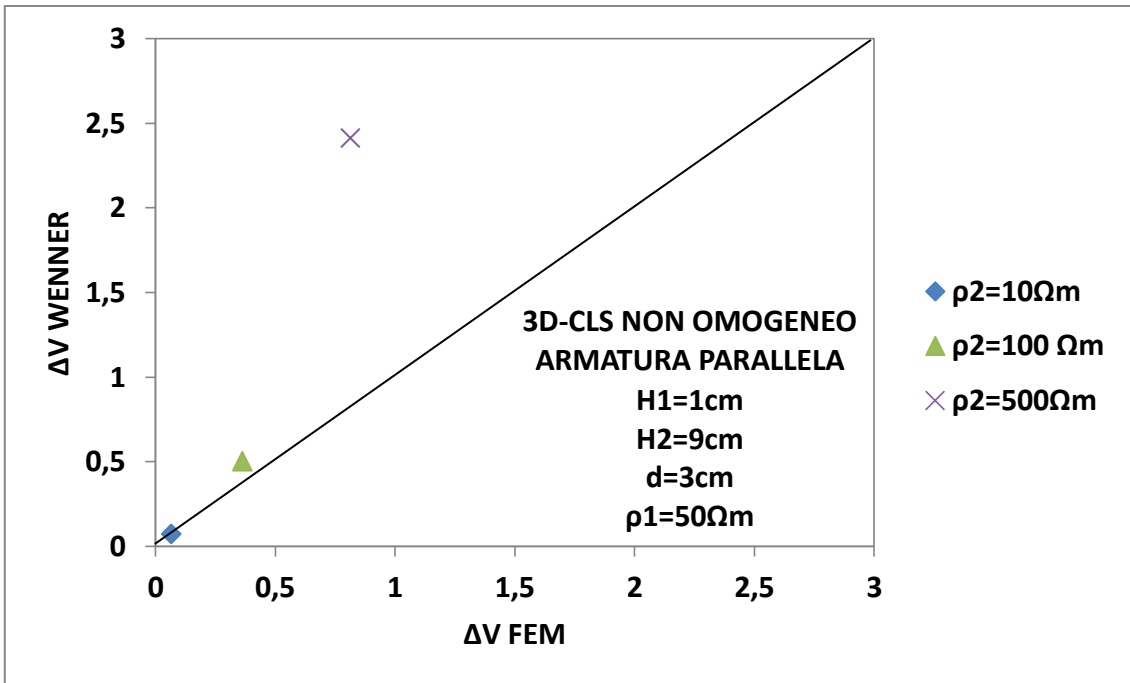


Grafico 7.36. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
 $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

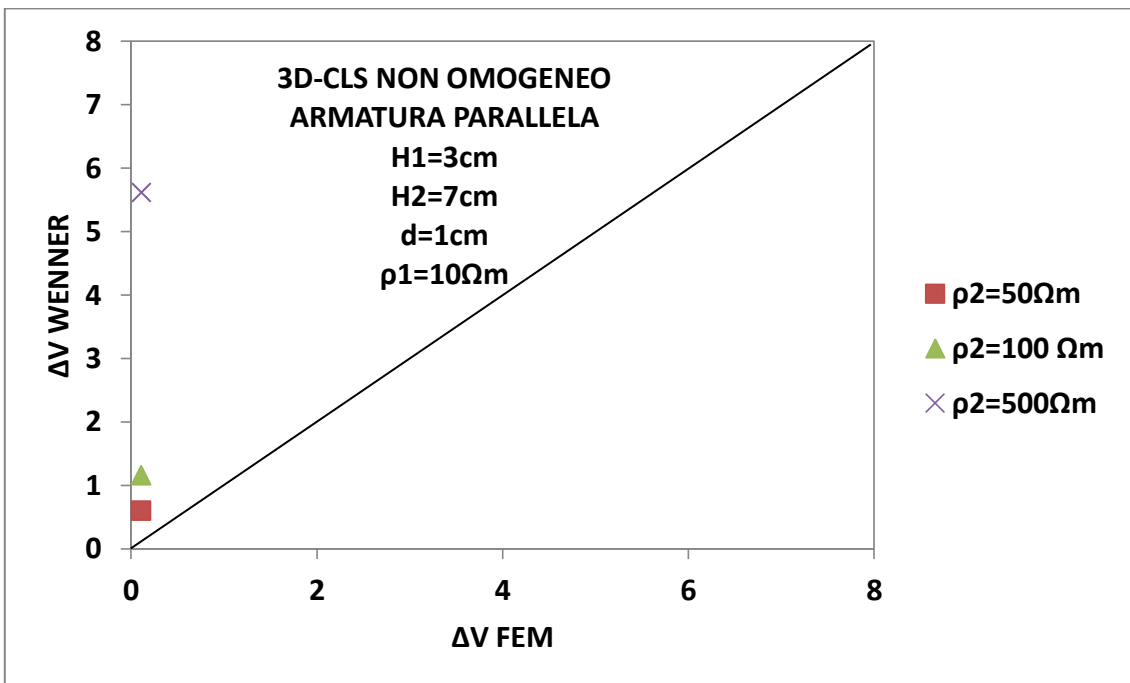


Grafico 7.37. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

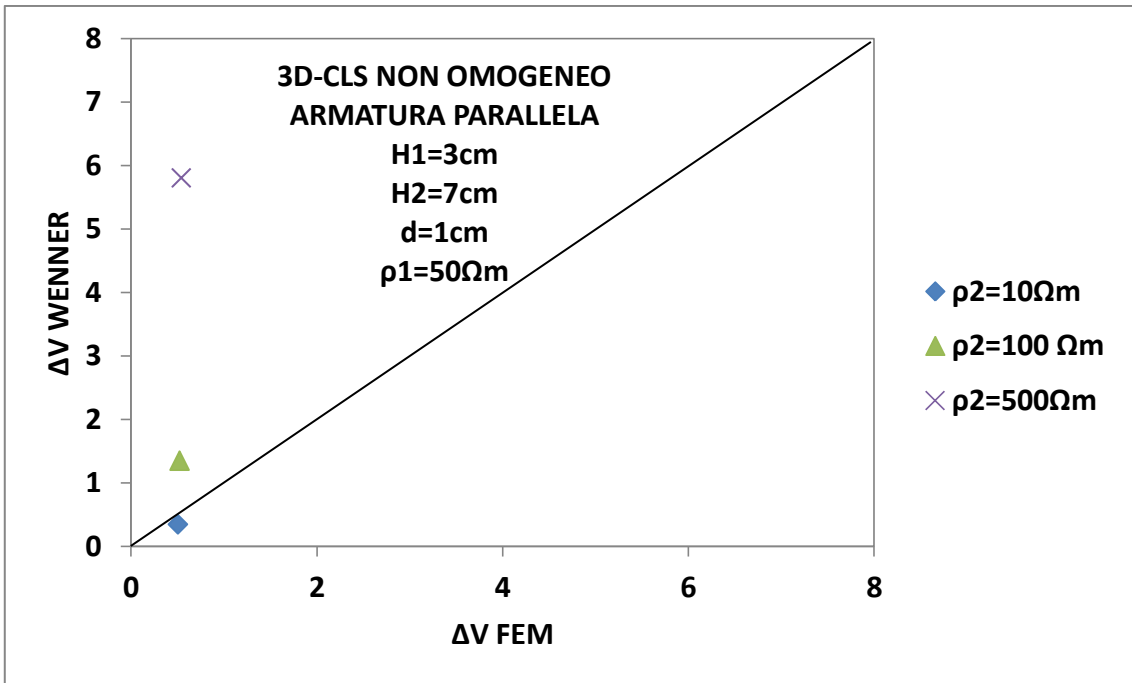


Grafico 7.38. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

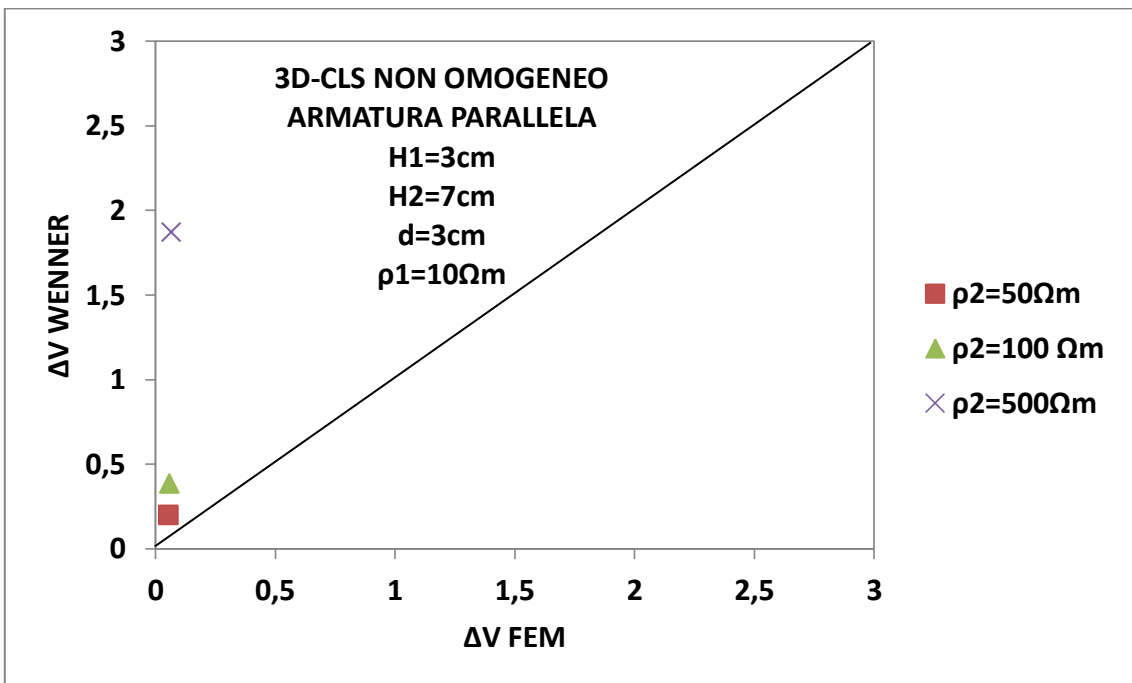


Grafico 7.39. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

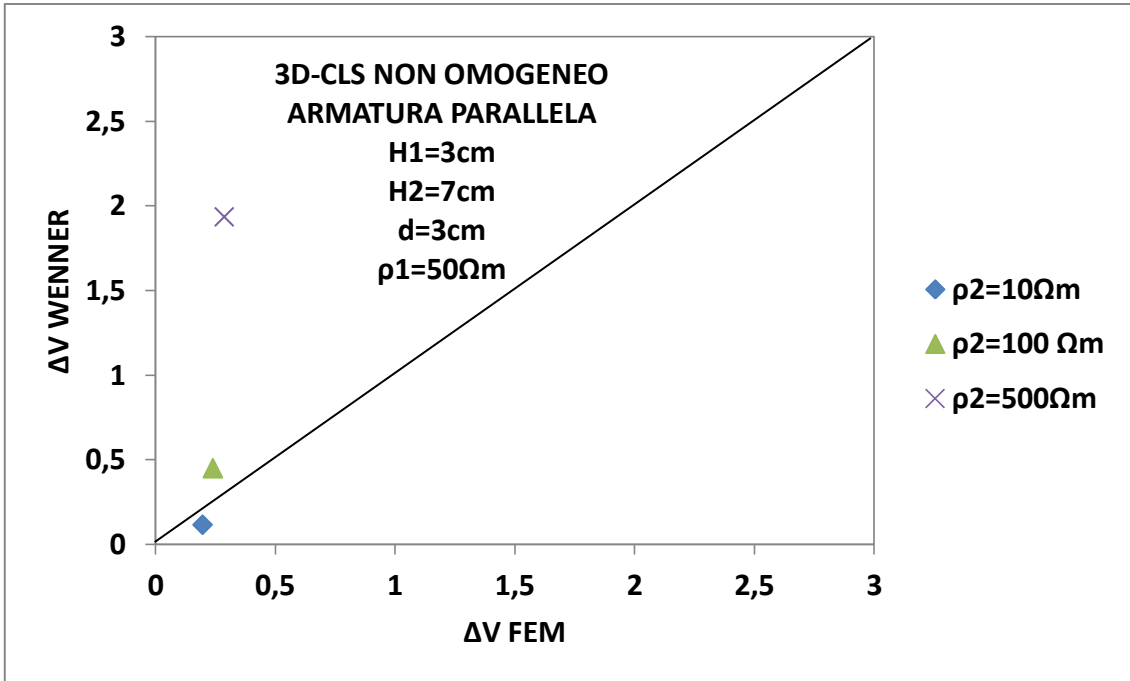


Grafico 7.40. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media pesata;
H₁=3cm H₂=7cm d=3cm ρ₁=50Ωm

7.4.4. Presentazione grafica dei risultati del caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa

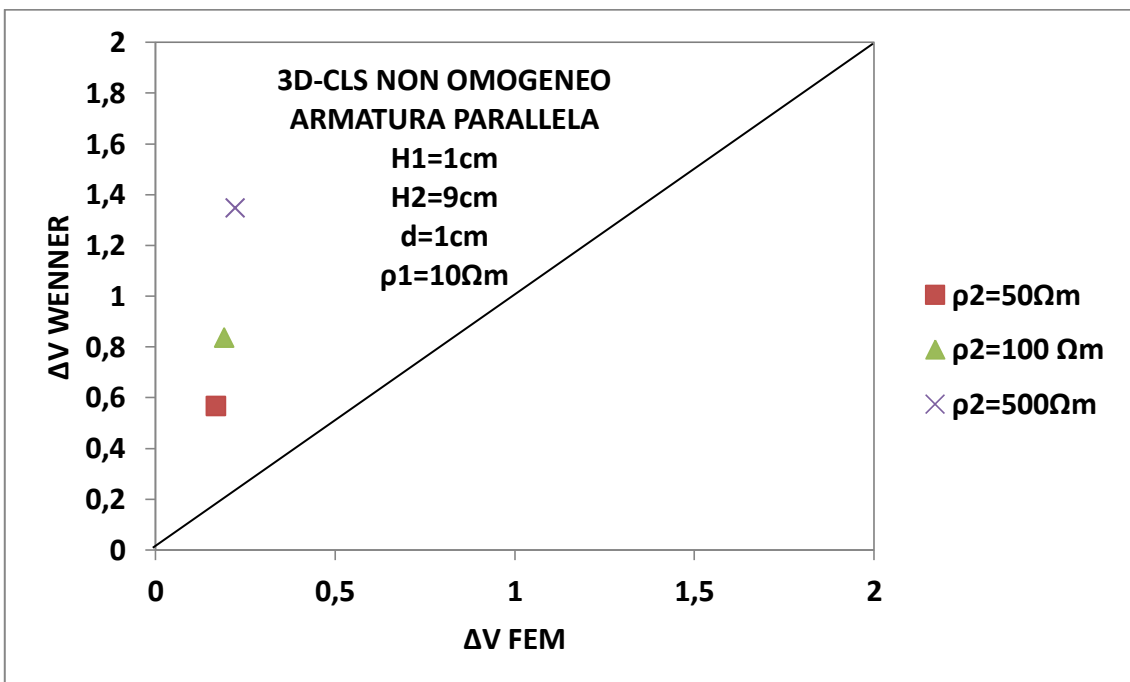


Figura 7.41. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa;
H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=10Ωm

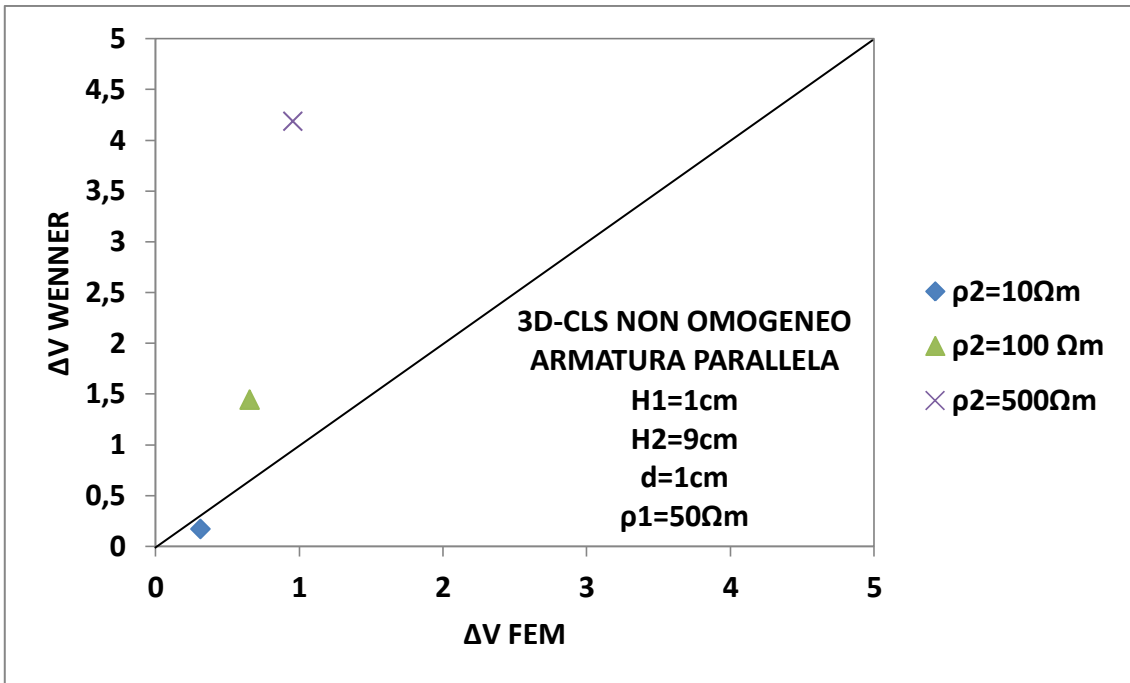


Figura 7.42. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa;
H₁=1cm H₂=9cm d=1cm ρ₁=50Ωm

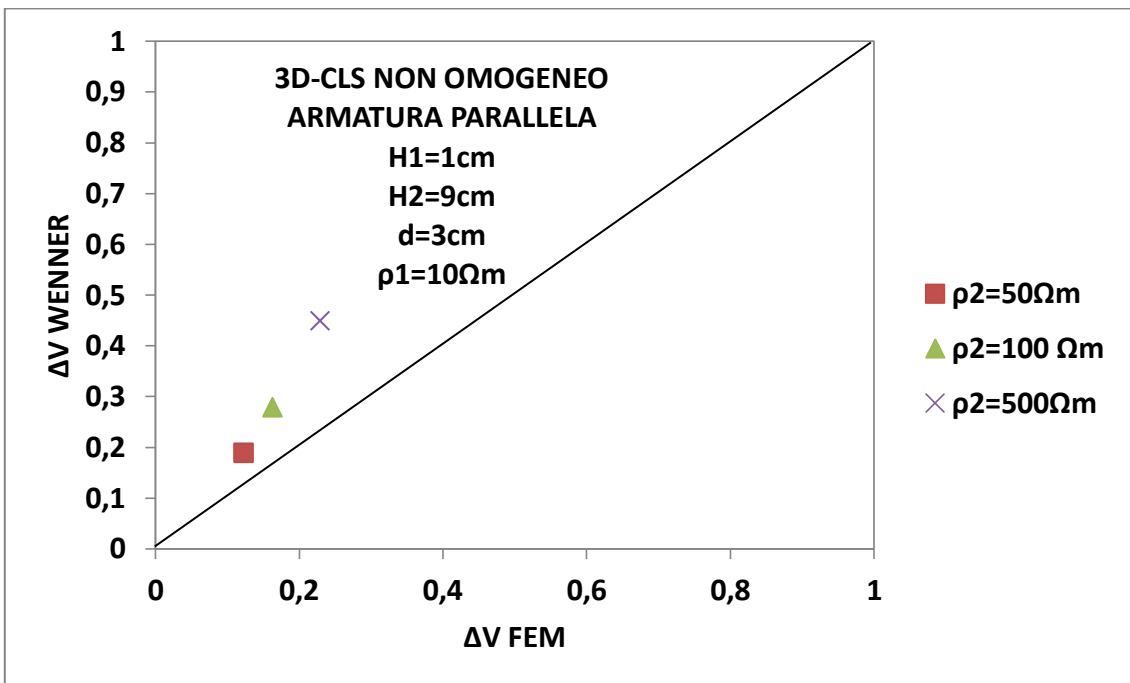


Figura 7.43. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa;
H₁=1cm H₂=9cm d=3cm ρ₁=10Ωm

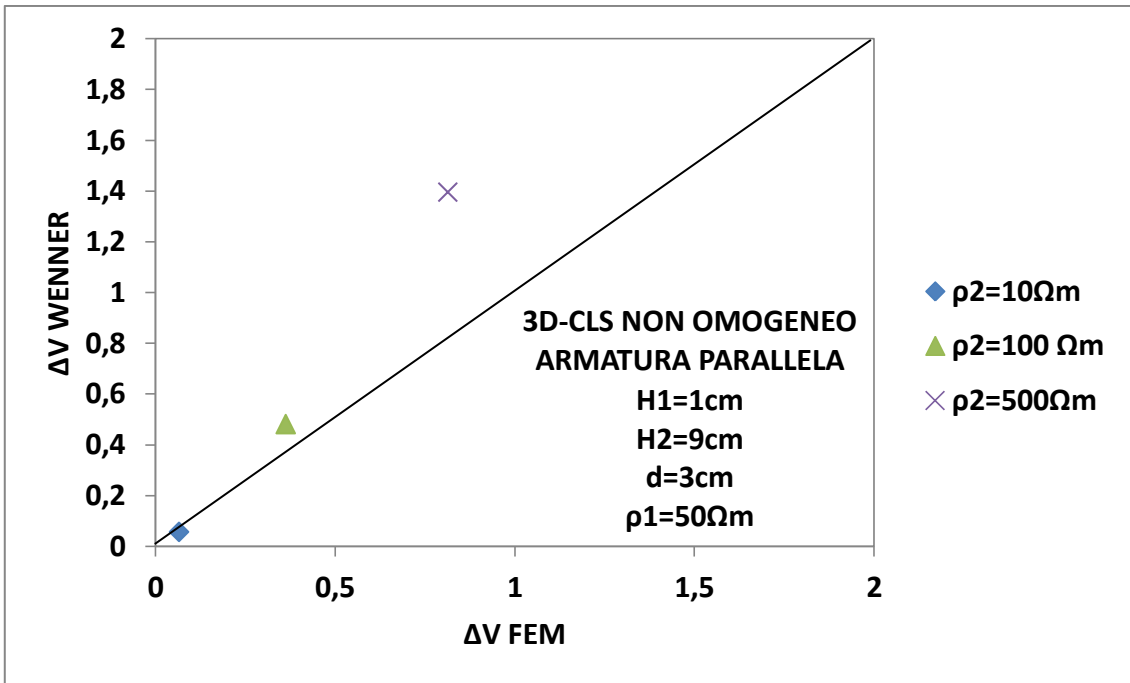


Figura 7.44. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa;
 $H_1=1\text{cm}$ $H_2=9\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

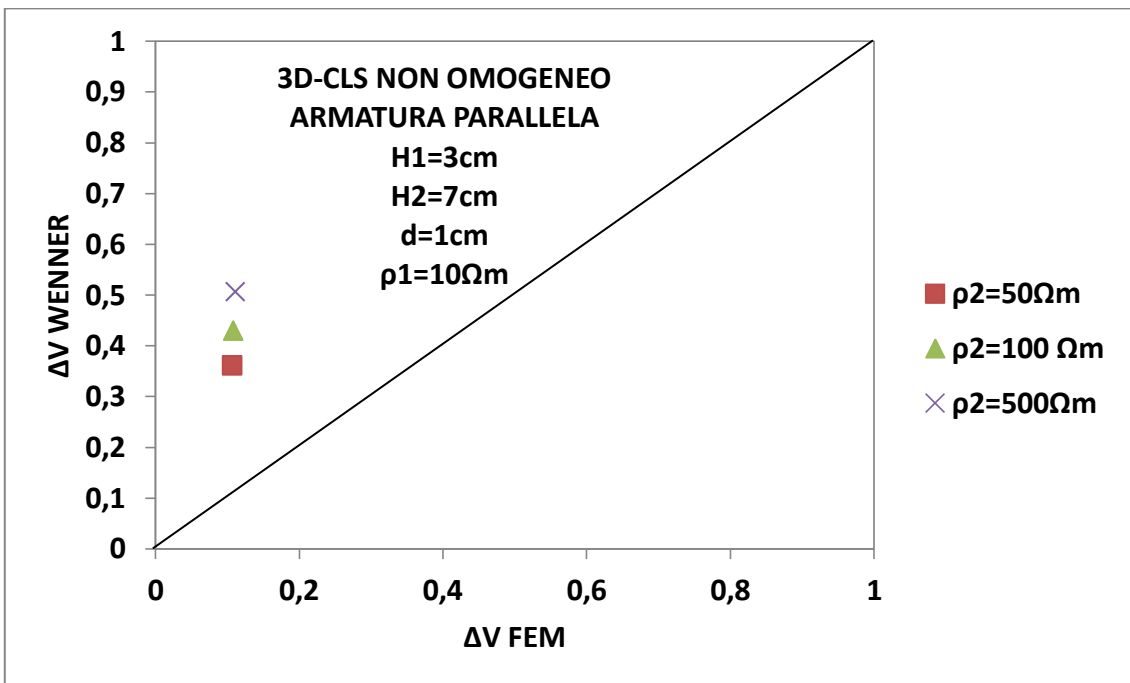


Figura 7.45. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

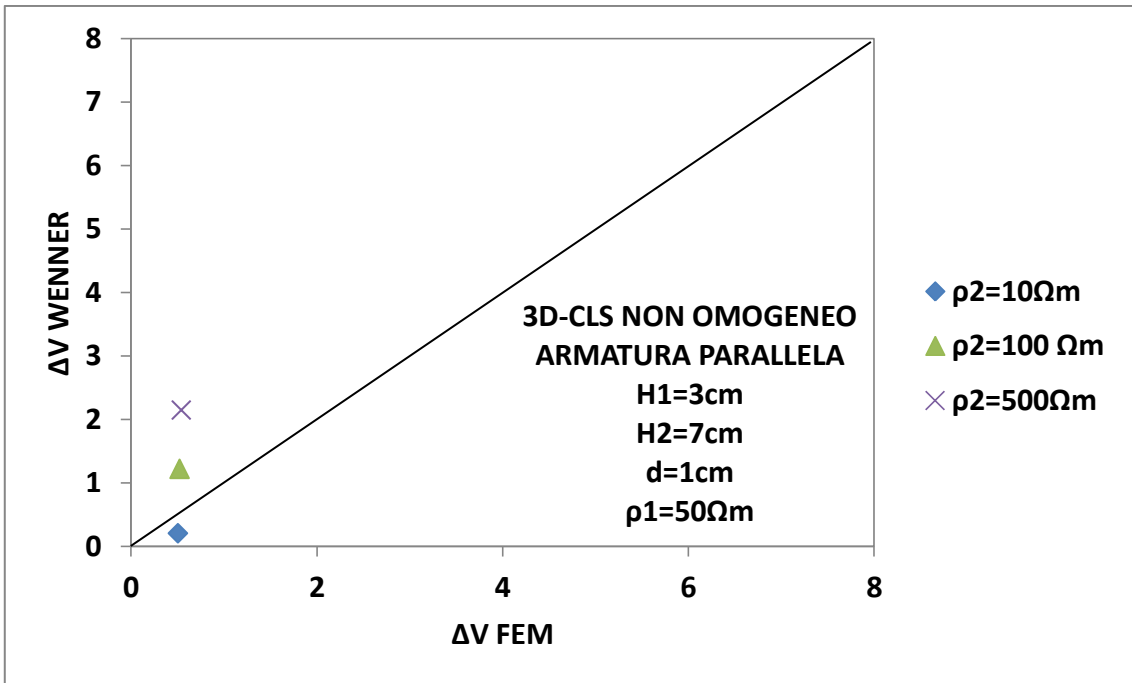


Figura 7.46. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=1\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

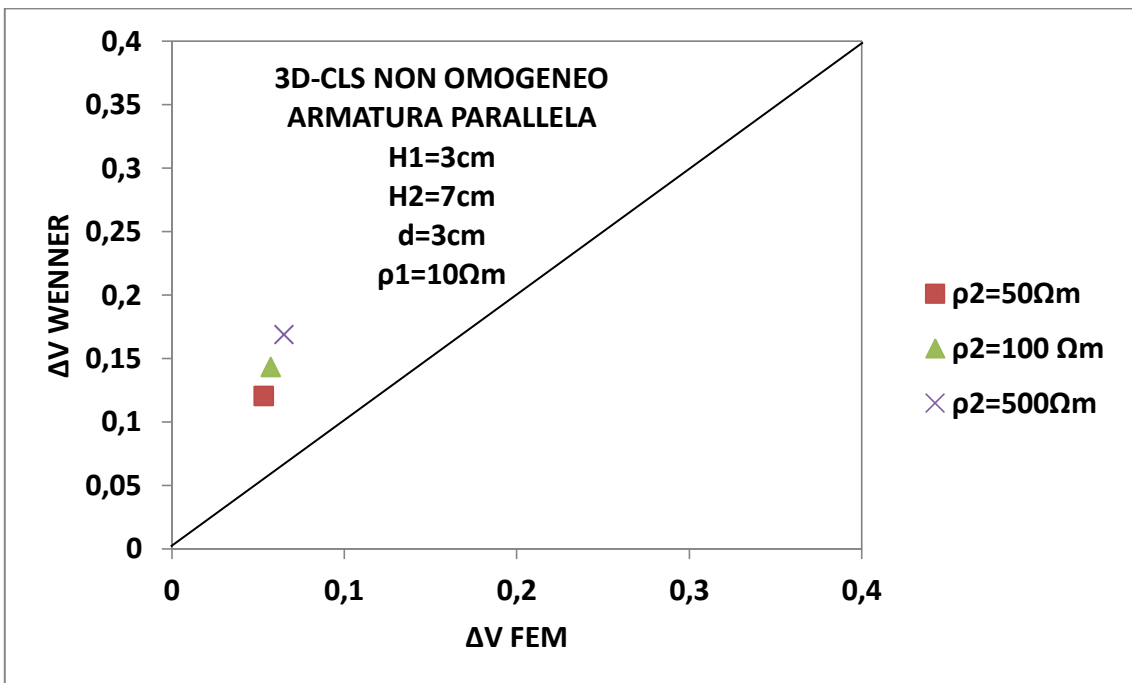


Figura 7.47. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa;
 $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=10\Omega\text{m}$

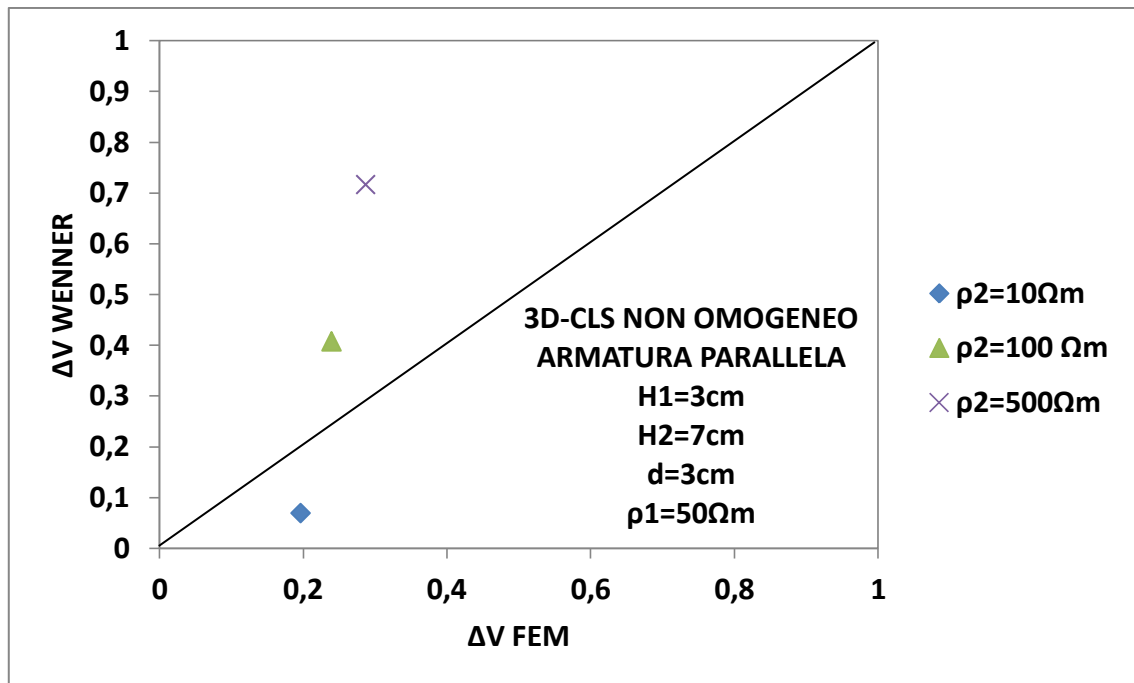


Figura 7.48. Caso non omogeneo con armatura parallela corretto con media inversa; $H_1=3\text{cm}$ $H_2=7\text{cm}$ $d=3\text{cm}$ $\rho_1=50\Omega\text{m}$

7.5. Analisi dei parametri di influenza

Si può osservare come l'apporto della correzione alla formula di Wenner porti a scostamenti decisamente inferiori rispetto ai casi non corretti.

Si sottolinea, poi, come nella formula di Wenner corretta 7.1 sia meglio considerare una resistività apparente definita come una media inversa delle resistività dei singoli strati rapportate alle rispettive dimensioni geometriche (ovvero la formula 7.3), in quanto gli scostamenti osservati rispetto ai risultati della modellazione numerica risultano inferiori. Questo si riscontra in tutti i casi studio considerati, ad eccezione dei casi in cui il primo strato sia più resistivo del secondo, per i quali il considerare una resistività apparente come media pesata delle resistività dei singoli strati rapportate alle rispettive dimensioni geometriche (ovvero la formula 7.2) porta a risultati più accurati.

Si osserva come, a parità di condizioni di stratificazione (ovvero considerando i medesimi valori di resistività e altezza dei due strati) una maggiore spaziatura tra gli elettrodi porta ad una maggiore accuratezza del metodo di Wenner. Questo, tuttavia, è valido solo se la spaziatura tra gli elettrodi non risulta inferiore allo spessore del primo strato.

Sinteticamente queste condizioni di applicabilità del metodo di Wenner possono essere espresse nel modo seguente:

- $\rho_2 > \rho_1$;
- $a > H_1$.

Va tuttavia sottolineato come, per resistività elevate (ovvero dell'ordine dei $500 \Omega\text{m}$) dello strato di maggiore altezza (ovvero il secondo strato, che nei casi studio analizzati è quello più resistivo e più spesso), il metodo di Wenner non fornisca risultati compatibili con quelli ricavati dalla modellazione numerica. La medesima situazione si ha quando la spaziatura tra gli elettrodi risulta dimensionalmente inferiore rispetto all'altezza del primo strato della soletta di calcestruzzo.

In queste situazioni, infatti, il campo elettrico risulta distorto, come descritto nel Paragrafo 7.1. Si sottolinea, inoltre, come in questa condizione il metodo di Wenner vada a sovrastimare la caduta ohmica, considerando quindi il calcestruzzo più resistivo di quanto non sia realmente, il che, secondo quanto visto nel Capitolo 2, nel Paragrafo 2.2, significa attribuire una margine di sicurezza, per quanto riguarda la velocità di corrosione, maggiore di quello effettivo. Inoltre, come già osservato nel Capitolo 6, l'introduzione dell'armatura di rinforzo, così come il suo orientamento rispetto al dispositivo di Wenner, non va a modificare significativamente la dispersione dei dati analizzati. Per cui, anche in presenza di un'armatura di rinforzo, valgono le medesime analisi fatte per l'applicazione in condizioni di disomogeneità in assenza dell'armatura.

Conclusioni

In conclusione si può sottolineare come il metodo di Wenner sia attraente per la sua immediatezza e semplicità, sia di impiego sia di interpretazione.

Tale metodo risulta applicabile anche a domini confinati, adottando alcune semplici accortezze geometriche che non comportino un confinamento eccessivo e quindi una distorsione del campo elettrico.

Se applicato ad una soletta di calcestruzzo anche la presenza di un'armatura di rinforzo non va a modificare significativamente la sua attendibilità.

Maggiori problemi si riscontrano nella sua applicazione ad un dominio stratificato, ovvero con strati che presentano diverse resistività. In questo caso, per quanto riguarda il valore di resistività da inserire nella formula di Wenner, si deve considerare una media inversa delle resistività dei singoli strati, rapportate alle dimensioni geometriche dei singoli strati. In questo modo il metodo di Wenner risulta più accurato.

Si deve tuttavia sottolineare come, in presenza di stratificazioni che presentino resistività fortemente differenti, il metodo di Wenner fornisca un valore di resistività molto approssimato e distante da quello reale.

Quindi, per quanto riguarda la sua applicazione al calcestruzzo, se applicato a domini confinati omogenei o non omogenei, con stratificazioni che presentino valori di resistività che non differiscano di più di un ordine di grandezza, in presenza o meno di un'armatura di rinforzo, il metodo di Wenner risulta accurato e fornisce valori di resistività vicini a quelli reali; se, invece, viene applicato in presenza di stratificazioni che presentino resistività fortemente differenti, il metodo di Wenner non è sufficientemente accurato e va a sovrastimare la resistività rispetto a quella reale.

Bibliografia

- [1] Pietro Pedferri: Corrosione e protezione dei materiali metallici, Polipress, 2009
- [2] Pietro Pedferri, Luca Bertolini: La durabilità del calcestruzzo armato, McGraw-Hill, 2000
- [3] Luciano Lazzari, Pietro Pedferri, Marco Ormellese: Protezione catodica, Polipress, 2006
- [4] Comsol: Electrodeposition module's user guide, 2012
- [5] John M. Reynolds: An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons, 2011