

**POLITECNICO DI TORINO**

**Ingegneria Elettrica**



**Politecnico  
di Torino**

**Tesi di laurea magistrale**

**Impatto delle correnti vaganti -  
Valutazione del rischio di corrosione delle  
strutture interrato**

**Relatori**

**Prof. ENRICO PONS**

**Prof. PIETRO COLELLA**

**Candidato**

**ILIE MUTRUC**

**Novembre 2024**



# Sommario

Le correnti vaganti in regime continuo sono riconosciute come una delle cause principali di corrosione elettrochimica nelle strutture metalliche interrato. Queste correnti si verificano quando una dispersione accidentale di elettricità avviene da un circuito primario, come un sistema di trazione ferroviaria o una rete di distribuzione energetica, e attraversa il terreno circostante. Le infrastrutture sotterranee, incluse tubazioni metalliche, cavi, armature in cemento armato e sistemi di messa a terra, risultano particolarmente vulnerabili, poiché la differenza di potenziale tra i vari metalli presenti potrebbe favorire lo sviluppo di processi corrosivi nelle zone anodiche. Tale fenomeno può portare a gravi danni strutturali e funzionali.

Le correnti continue vaganti sono più pericolose rispetto a quelle alternate per via della loro natura costante e unidirezionale, che intensifica la corrosione localizzata, accelerando il degrado dei materiali. Questo fenomeno è particolarmente accentuato nelle aree urbane e industriali, dove le infrastrutture elettriche e i sistemi di trasporto su rotaia, alimentati da corrente continua spesso interagiscono con le strutture metalliche interrato. Il rischio è ulteriormente amplificato in contesti in cui i sistemi di messa a terra, essenziali per la sicurezza elettrica, possono essere compromessi da queste correnti disperse.

Il presente lavoro di tesi analizza in dettaglio l'interazione tra una platea di fondazione in cemento, contenente armature in acciaio, e un sistema di messa a terra in rame associato a una cabina elettrica. La corrosione dell'acciaio, indotta dalla presenza di correnti vaganti, rappresenta una delle principali cause di degrado strutturale delle infrastrutture sotterranee, con un impatto significativo sulla loro durabilità e sulla capacità del sistema di messa a terra di mantenere condizioni di sicurezza ottimali.

Per comprendere meglio l'impatto di tali fenomeni, sono state eseguite simulazioni FEM con COMSOL Multiphysics e costruiti modelli numerici volti a studiare la distribuzione del potenziale elettrico, la densità di corrente e l'intensità della corrente che attraversa gli elementi metallici interrati in diverse configurazioni operative. Le simulazioni hanno tenuto conto dell'influenza di fattori come la conducibilità del terreno, l'entità della corrente vagante, la dimensione dei conduttori e la distanza tra i vari materiali metallici; tali parametri giocano un ruolo chiave nell'analisi

dell'intensità della corrosione e della sua localizzazione.

I risultati ottenuti possono offrire un contributo significativo per la comprensione del fenomeno e fornire indicazioni utili per lo sviluppo di strategie di mitigazione più efficaci. L'applicazione di queste strategie potrebbe migliorare la durabilità delle infrastrutture e garantire la loro affidabilità nel tempo, riducendo i costi di manutenzione e il rischio di malfunzionamenti dovuti alla corrosione. Le informazioni raccolte possono essere utilizzate per perfezionare le pratiche di progettazione e manutenzione delle infrastrutture soggette a correnti vaganti, contribuendo così a una maggiore sicurezza e sostenibilità a lungo termine.

# Ringraziamenti

Il raggiungimento di questo traguardo rappresenta per me un momento di grande soddisfazione ed orgoglio, reso possibile grazie al supporto di molte persone che mi sono state vicine lungo questo percorso.

In primo luogo, desidero ringraziare i miei relatori, Prof. Enrico Pons e Prof. Pietro Colella, per la loro guida e disponibilità. I loro preziosi consigli, le osservazioni puntuali e la costante attenzione sono stati fondamentali per la realizzazione di questa tesi.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto, dato amore e compreso le sfide legate alla gestione degli impegni accademici e lavorativi. La loro pazienza e il loro affetto sono stati una fonte continua di forza e motivazione. In particolare, vorrei esprimere la mia più profonda gratitudine a mia sorella Mariana per il suo costante incoraggiamento e per il suo carattere burbero e birichino, attraverso cui è riuscita a distrarmi nei momenti difficili, regalandomi un sorriso quando ne avevo più bisogno. Il suo modo di fare mi ha aiutato a trovare leggerezza anche nelle sfide più impegnative, e per questo le sono profondamente grato.

Vorrei esprimere la mia profonda gratitudine alla mia ragazza, Viviana, per il suo amore, la sua comprensione e il suo continuo incoraggiamento. Grazie per aver creduto in me, per essermi stata vicina nei momenti difficili e per il tuo sostegno incondizionato. Senza di te, il cammino sarebbe stato sicuramente più complicato. Un grazie va anche ai miei colleghi e amici, che hanno condiviso con me questa esperienza, rendendo il percorso più piacevole e arricchente. Il vostro supporto e le nostre discussioni mi hanno aiutato a mantenere alta la motivazione.

Infine, un ringraziamento speciale va a me stesso, che dopo innumerevoli cadute, seguite da piccoli accenni di ripresa, la costante paura di non essere all'altezza, l'inadeguatezza, la difficoltà di conciliare la vita accademica e vita professionale, non si è mai dato per vinto, permettendomi di crescere professionalmente e personalmente. Vorrei che questo entusiasmo e questa forza di volontà mi stia accanto per tutta la vita.

A tutti voi, un sentito grazie di cuore.

*Ilie Mutruc*

*Per aspera ad sidera – attraverso le difficoltà, fino alle stelle. Questo traguardo è il frutto di un percorso impegnativo, ma ogni sfida superata mi ha condotto a questo importante momento.*



# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	X
<b>Elenco delle figure</b>	XIII
<b>Glossario</b>	XX
<b>1 Introduzione al fenomeno della corrosione</b>	<b>1</b>
1.1 Scopo e obiettivo della ricerca . . . . .	1
1.2 Normativa . . . . .	2
1.3 Struttura del documento . . . . .	3
<b>2 Fondamenti della corrosione</b>	<b>5</b>
2.1 Tipi di corrosione . . . . .	5
2.2 Retrosceca storico . . . . .	8
2.3 Elementi base sul meccanismo di corrosione elettrochimica . . . . .	10
2.4 Fattori che influenzano la corrosione . . . . .	13
2.5 Concetti base sulle correnti disperse . . . . .	14
2.5.1 Le sorgenti delle correnti vaganti . . . . .	14
2.5.2 Tipi di corrente vagante . . . . .	15
2.5.3 Legge di Faraday . . . . .	16
2.6 Analisi dei tipi di interferenza da corrente vagante . . . . .	16
2.6.1 Interferenza della corrente continua . . . . .	17
2.6.2 Interferenza da corrente alternata . . . . .	19
2.6.3 Interferenza per induzione magnetica . . . . .	19
2.7 Valutazione della corrente di corrosione . . . . .	21
2.7.1 Rapporto tra area anodica e catodica . . . . .	22
2.7.2 Resistenza elettrica . . . . .	23
2.7.3 Continuità elettrica . . . . .	23
2.8 Corrosione dei sistemi di terra delle cabine primarie . . . . .	24
2.8.1 Materiali utilizzati per la messa a terra . . . . .	24
2.8.2 Calcolo della corrosione complessiva . . . . .	26



2.8.3	Rimedi per la corrosione della rete di messa a terra delle cabine elettriche . . . . .	31
2.9	Corrosione dell'acciaio indotta dalle correnti vaganti nelle infrastrutture	32
<b>3</b>	<b>Correnti vaganti nei sistemi di trazione</b>	<b>34</b>
3.1	Origini e cause delle correnti vaganti nei sistemi di trazione . . . . .	35
3.2	Meccanismo di corrosione nei sistemi di trazione dovuti a correnti vaganti . . . . .	37
3.3	Aspetti di sicurezza . . . . .	41
3.3.1	Caratteristiche del potenziale di rotaia . . . . .	42
3.3.2	Schema di messa a terra del ritorno della trazione . . . . .	44
3.4	Modelli di Analisi della Distribuzione della Corrente Vagante nei Sistemi di Trazione . . . . .	46
3.4.1	Circuito equivalente resistivo a parametri concentrati . . . . .	47
3.4.2	Modello delle correnti vaganti mediante elettrodi sferici . . . . .	48
3.5	Mitigazione, prevenzione e protezione da correnti vaganti . . . . .	50
3.5.1	Drenaggio della corrente vagante . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Misurazione, monitoraggio, prevenzione e protezione dalla corrente vagante</b>	<b>55</b>
4.1	La misurazione delle correnti vaganti in corrente continua . . . . .	55
4.1.1	Misura della resistività del terreno . . . . .	56
4.1.2	Misura dell'intensità del campo elettrico di terra . . . . .	57
4.1.3	Determinazione della densità di corrente . . . . .	61
4.2	Aspetti generali riguardanti la protezione da corrosione . . . . .	62
4.2.1	Tipi di protezione contro la corrosione . . . . .	62
4.3	Tecniche di protezione contro la corrosione delle infrastrutture interrate	64
4.3.1	Scudo elettrico . . . . .	64
4.3.2	Giunti isolanti . . . . .	65
4.4	Protezione catodica . . . . .	65
4.4.1	Protezione catodica ad anodo sacrificale . . . . .	66
4.4.2	Protezione catodica a corrente impressa . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Analisi dell'impatto di correnti vaganti continue su strutture metalliche interrate</b>	<b>69</b>
5.1	Modello 1 - Interazione tra il conduttore in rame e acciaio scollegati senza il blocco di cemento . . . . .	71
5.1.1	Condizioni al Contorno . . . . .	74
5.1.2	Analisi e Costruzione della Mesh . . . . .	74
5.1.3	Validità del Modello . . . . .	77
5.1.4	Risultati . . . . .	78

5.1.5	Influenza dei Parametri Fisici sulle Proprietà Elettriche del Sistema . . . . .	95
5.2	Modello 2 - Interazione tra il conduttore in rame e il conduttore in acciaio immerso nel blocco di cemento . . . . .	107
5.2.1	Analisi della Mesh . . . . .	108
5.2.2	Validità del modello 2 . . . . .	110
5.2.3	Risultati del modello 2 . . . . .	111
5.3	Modello 3 - Interazione tra il conduttore in rame e il conduttore in acciaio collegati, con la presenza del blocco di cemento . . . . .	130
5.3.1	Condizioni al contorno . . . . .	131
5.3.2	Analisi della mesh . . . . .	131
5.3.3	Validità del modello 3 . . . . .	132
5.3.4	Risultati del modello 3 . . . . .	133
5.4	Considerazioni finali . . . . .	147
5.5	Conclusioni . . . . .	154
<b>A Tabelle Risultati</b>		<b>156</b>
<b>Bibliografia</b>		<b>160</b>

# Elenco delle tabelle

2.1	Serie galvanica dei metalli in acqua salata [15]. . . . .	12
2.2	Tasso di corrosione annuale $k$ di alcuni metalli [22]. . . . .	16
2.3	Classificazione della resistività del suolo. . . . .	21
2.4	Resistività media dei diversi tipi di terreno. . . . .	21
4.1	Classificazione dei campi della corrente di terra basata sul valore dell'intensità del campo elettrico [19]. . . . .	61
4.2	Classificazione dell'ambiente corrosivo e della classe di corrosione basata sul valore della densità di corrente [19]. . . . .	61
5.1	Proprietà del suolo, del rame e dell'acciaio. . . . .	73
5.2	Caso 1: Tabella dei valori del gradiente di potenziale elettrico intorno al conduttore in rame in funzione della posizione sull'asse $x$ . . . . .	82
5.3	Caso 1: Tabella dei valori della densità di corrente ingresso/uscita dal rame. . . . .	82
5.4	Caso 1: Corrente $I$ [mA] che circola nel conduttore in rame (singolo elemento interrato nel terreno) in diverse sezioni trasversali lungo il suo asse. . . . .	84
5.5	Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio. . . . .	86
5.6	Densità di corrente sulla superficie dell'acciaio in funzione della posizione sull'asse $x$ . . . . .	87
5.7	Corrente $I$ [mA] che circola nel conduttore in acciaio (singolo elemento interrato nel terreno) in diverse sezioni trasversali lungo il suo asse. . . . .	88
5.8	Caso 3: Confronto del gradiente di potenziale in prossimità dei domini in rame e acciaio. . . . .	91
5.9	Confronto della densità di corrente superficiale tra rame e acciaio in funzione della coordinata $x$ . . . . .	92
5.10	Confronto della corrente $I$ [mA] che circola nel conduttore in rame e acciaio in diverse sezioni trasversali lungo i loro assi. . . . .	93

5.11	Confronto dei casi analizzati nel Modello 1, in termini di gradiente di potenziale elettrico massimo [V/m], densità di corrente massima [mA/m <sup>2</sup> ] e corrente totale assorbita [mA]. . . . .	93
5.12	Relazione tra Resistività e Gradiente di Potenziale Massimo rilevato. . . . .	97
5.13	Relazione tra Lunghezza della barra, Gradiente di Potenziale Massimo, Densità di Corrente Massima e Corrente Totale assorbita. . . . .	102
5.14	Proprietà elettriche dei materiali. . . . .	107
5.15	Caso 4: Tabella dei valori del gradiente di potenziale elettrico intorno al conduttore in acciaio in funzione della posizione sull'asse x. . . . .	113
5.16	Caso 4: Tabella dei valori della densità di corrente in funzione della posizione sull'asse x. . . . .	113
5.17	Caso 4: Corrente I [mA] che circola nel conduttore in acciaio in varie superfici trasversali, immerso nel blocco di cemento asciutto. . . . .	114
5.18	Gradiente di potenziale elettrico intorno al conduttore in Acciaio, immerso nel blocco di cemento bagnato. . . . .	117
5.19	Densità di corrente sulla superficie del conduttore in Acciaio, immerso nel blocco di cemento bagnato. . . . .	117
5.20	Corrente I [mA] che circola nel conduttore in acciaio in varie sezioni trasversali, immerso nel blocco di cemento bagnato. . . . .	118
5.21	Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio inglobato nel blocco di cemento asciutto e Rame. . . . .	122
5.22	Confronto della densità di corrente tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento in condizioni di asciutto e Rame. . . . .	123
5.23	Confronto della corrente I [mA] che circola attraverso le superfici trasversali del conduttore in rame e del conduttore in acciaio, inglobato in un blocco di cemento in condizioni di asciutto. . . . .	123
5.24	Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame. . . . .	126
5.25	Confronto della densità di corrente tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame. . . . .	128
5.26	Confronto della corrente I[mA] che circola attraverso le superfici trasversali del conduttore in rame e del conduttore acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato. . . . .	128
5.27	Corrente trasferita per il collegamento 1 e il collegamento 2. . . . .	135
5.28	Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento asciutto e Rame, collegati tra loro. . . . .	136
5.29	Confronto della densità di corrente tra Acciaio,inglobato in un blocco di cemento asciutto e Rame, collegati tra loro. . . . .	138
5.30	Confronto della corrente attraverso le superfici trasversali del conduttore in Acciaio, inglobato in un blocco di cemento asciutto e del conduttore in Rame, collegati tra loro. . . . .	138

5.31	Corrente trasferita per il collegamento 1 e il collegamento 2. . . . .	141
5.32	Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame, collegati tra loro. . . . .	142
5.33	Confronto della densità di corrente tra Acciaio,inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame, collegati tra loro. . . . .	144
5.34	Confronto della corrente attraverso le sezione trasversali del conduttore in Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e del conduttore in Rame, collegati tra loro. . . . .	144
5.35	Tabella riepilogativa dei casi studiati. . . . .	147
A.1	Confronto del gradiente di potenziale [V/m] intorno al conduttore di rame tra vari casi (C1, C3, C6, C7, C8, C9). . . . .	157
A.2	Confronto della densità di corrente superficiale [mA/m <sup>2</sup> ] sul conduttore di rame tra vari casi (C1, C3, C6, C7, C8, C9). . . . .	157
A.3	Confronto della corrente totale [mA] che circola in diverse sezioni trasversali del conduttore di rame, nei vari casi (C1, C3, C6, C7, C8, C9). . . . .	158
A.4	Confronto del gradiente di potenziale [V/m] intorno al contorno del conduttore in acciaio per vari casi (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9).158	
A.5	Confronto della densità di corrente superficiale [mA/m <sup>2</sup> ] sul conduttore in acciaio tra vari casi (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9). . . . .	159
A.6	Confronto della corrente totale [mA] che circola in diverse sezioni trasversali dell'acciaio, nei vari casi (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9).159	

# Elenco delle figure

2.1	Morfologia della corrosione [11] . . . . .	6
2.2	La pila di volta [14]. . . . .	9
2.3	Schema esemplificativo di una cella elettrolitica. . . . .	11
2.4	Corrosione dei metalli dovuta a correnti galvaniche e/o correnti di dispersione [18]. . . . .	14
2.5	Interferenza stazionaria tra due tubazioni interrate incrociate[24]. . . . .	17
2.6	Interferenza stazionaria tra due tubazioni interrate parallele[24]. . . . .	18
2.7	Interferenza non stazionaria causata da correnti disperse da un sistema di trasporto a Corrente continua [24]. . . . .	18
2.8	Interferenza indotta su una tubazione [23]. . . . .	20
2.9	Forme di corrosione di (a) corrosione uniforme, (b) corrosione per vaiolatura e (c) Corrosione influenzata dai microbi nella rete di messa a terra della sottostazione [10]. . . . .	25
2.10	Schema corrosione galvanica quando sono collegate due reti di terra in rame e acciaio. . . . .	27
2.11	Schema corrosione galvanica [31]. . . . .	30
3.1	Esempi di corrosione [33]. . . . .	35
3.2	Distribuzione della corrente vagante nel sistema di trazione, schema 3D [34]. . . . .	36
3.3	Quota della corrente vagante nel terreno generata dalla presenza in linea di un convoglio ferroviario [17]. . . . .	37
3.4	Corrente vagante nel terreno raccolta da una struttura estranea e spostamento del potenziale della struttura rispetto all'elettrolita [17]. . . . .	38
3.5	Principio base della diffusione delle correnti vaganti [19]. . . . .	39
3.6	Elaborazione delle reazioni chimiche che avvengono sulla tubazione interrata a causa delle correnti vaganti [34]. . . . .	40
3.7	Esempi di corrosione da correnti vaganti [34]. . . . .	41
3.8	Modello a T o $\pi$ del binario [37]. . . . .	42
3.9	Circuito di misura della resistenza di rotaia di lunghezza 10 m [1]. . . . .	43

3.10	Conduttanza per unità di lunghezza per sezioni di binario senza strutture civili [1]. . . . .	44
3.11	Schemi di messa a terra per la trazione [38]. . . . .	46
3.12	Circuito equivalente resistivo binario-struttura interrata. . . . .	47
3.13	Modello delle correnti vaganti mediante elettrodi sferici[34]. . . . .	48
3.14	Modello del gradiente del potenziale di terra[34]. . . . .	49
3.15	Schemi di drenaggio della corrente di dispersione: (a) implementazione comune mediante interruttore unidirezionale (con diodo) o diodo controllato (tiristore), (b) schema con resistore controllabile e (c) drenaggio forzato mediante raddrizzatore controllato [38]. . . . .	51
3.16	Dettagli del drenaggio delle correnti vaganti utilizzando (a) armature e (b) griglie [47]. . . . .	52
3.17	Dettagli di (a) una cabina di fissaggio e un blocco isolante, (b) cuscinetti isolanti e (c) la tecnica dei blocchi flottanti [47]. . . . .	54
3.18	Sistema di raccolta delle correnti vaganti sotto la rotaia [48]. . . . .	54
4.1	Metodo di Wenner. . . . .	57
4.2	Circuito per la misurazione del potenziale delle strutture. . . . .	58
4.3	Circuito equivalente di misura nel caso di struttura interferita. . . . .	59
4.4	Tubazioni rivestite di pittura protettiva [12]. . . . .	63
4.5	Rivestimento poliuretano di tubazioni [12]. . . . .	63
4.6	Tubazioni isolate per metanodotti [12]. . . . .	63
4.7	Schema di uno schermo catodico per ridurre al minimo l'interferenza anodica [21]. . . . .	64
4.8	Effetto della corrente che scorre lungo una tubazione interrata sulla corrosione in prossimità di giunti isolati [53]. . . . .	65
4.9	Schema degli anodi sacrificali per mitigare l'interferenza catodica [21]. . . . .	67
4.10	Schema di sistema di protezione catodica a corrente impressa [16]. . . . .	68
5.1	Geometria del modello 1. . . . .	73
5.2	Mesh del modello distribuita su più livelli. . . . .	75
5.3	Valutazione grafica della Mesh in termini di Skewness. . . . .	76
5.4	Valutazione della densità di corrente sull'intero sistema. . . . .	77
5.5	Distribuzione del potenziale V sul sistema. . . . .	79
5.6	Caso 1: Gradiente del potenziale elettrico vicino al conduttore di rame Cu. . . . .	80
5.7	Caso 1: Grafico del Gradiente del potenziale elettrico vicino al conduttore di rame Cu. . . . .	81
5.8	Caso 1: Densità di corrente sulla superficie del rame. . . . .	81
5.9	Caso 1: Grafico della Densità di corrente sulla superficie del rame. . . . .	83

5.10	Densità di flusso netto di corrente nel volume del cilindro di rame in diverse sezioni trasversali. . . . .	83
5.11	Caso 2: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio. . . . .	85
5.12	Caso 2: Densità di corrente sulla superficie del conduttore in acciaio.	86
5.13	Caso 2: Densità di flusso di corrente netto nel volume del conduttore in acciaio. . . . .	87
5.14	Caso 3: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio. . . . .	90
5.15	Caso 3: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame. . . . .	90
5.16	Caso 3: Densità di corrente superficiale sul conduttore in rame. . .	91
5.17	Caso 3: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio. .	92
5.18	Risultati finali in termini di gradiente di potenziale $\text{Grad}(V)$ massimo $[V/m]$ , $J$ Densità di corrente massima $[mA/m^2]$ e $I$ corrente totale $[mA]$ che attraversa i conduttori, a confronto dei casi: C1, interazione tra terreno e conduttore in rame; C2, interazione tra terreno e conduttore in acciaio; C3, interazione combinata tra terreno, rame e acciaio (riferimento appendice A). . . . .	94
5.19	Grafico del gradiente di potenziale elettrico massimo in funzione della variazione di resistività elettrica. . . . .	97
5.20	Grafico del gradiente di potenziale massimo, densità di corrente superficiale massima e corrente nel conduttore massima, in funzione della resistività elettrica del terreno. . . . .	98
5.21	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a $10 \Omega \cdot m$ . . . . .	98
5.22	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a $100 \Omega \cdot m$ . . . . .	99
5.23	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a $1000 \Omega \cdot m$ . . . . .	99
5.24	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a $10000 \Omega \cdot m$ . . . . .	100
5.25	Grafico della dipendenza del gradiente di potenziale massimo, densità di corrente superficiale massima e corrente nel conduttore massima, dalla lunghezza assiale del conduttore in rame. . . . .	102
5.26	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 4 metri. . . . .	103
5.27	Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 4 metri. . . . .	103
5.28	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 6 metri. . . . .	104



5.29	Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 6 metri. . . . .	104
5.30	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 8 metri. . . . .	105
5.31	Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 8 metri. . . . .	105
5.32	Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 10 metri. . . . .	106
5.33	Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 10 metri. . . . .	106
5.34	Geometria del modello 2. . . . .	108
5.35	Valutazione grafica della mesh in termini di Skewness per il modello 2.	109
5.36	Caso 4: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio con cemento asciutto. . . . .	112
5.37	Caso 4: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio con cemento in condizioni di asciutto. . . . .	112
5.38	Caso 5: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato. . . . .	116
5.39	Caso 5: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato. . . . .	116
5.40	Caso 6: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento asciutto con l'aggiunta del conduttore in rame. . . . .	120
5.41	Caso 6: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con cemento in condizioni di asciutto con l'acciaio in esso inglobato. . . . .	121
5.42	Caso 6: Densità di corrente conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento asciutto con l'aggiunta del conduttore in rame. . . . .	121
5.43	Caso 6: Densità di corrente sulla superficie del conduttore in rame con cemento in condizioni di asciutto con l'acciaio in esso inglobato.	122
5.44	Caso 7: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato con l'aggiunta del conduttore in rame. . . . .	125
5.45	Caso 7: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con un blocco di cemento bagnato con l'acciaio in esso inglobato.	126
5.46	Caso 7: Densità di corrente conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato con l'aggiunta del conduttore in rame. . . . .	127
5.47	Caso 7: Densità di corrente sulla superficie del conduttore in rame con cemento in condizioni di bagnato con l'acciaio in esso inglobato.	127

5.48	Risultati del modello 2 in termini di gradiente di potenziale Grad(V) Massimo $[V/m]$ , J Densità di corrente massima $[mA/m^2]$ e I corrente massima $[mA]$ nel conduttore in acciaio (riferimento appendice A).	129
5.49	Modello 3 Geometria.	130
5.50	Modello 3 valutazione grafica della mesh in termini di Skewness.	132
5.51	Caso 8: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati.	135
5.52	Caso 8: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati.	136
5.53	Caso 8: Densità di corrente sul conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati.	137
5.54	Caso 8: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati.	137
5.55	Modello 3: Densità di corrente sulla superficie laterale di uno dei collegamenti.	139
5.56	Caso 9: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.	141
5.57	Caso 8: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.	142
5.58	Caso 8: Densità di corrente sul conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.	143
5.59	Caso 9: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.	143
5.60	Confronto tra i casi C6, C7, C8, C9 (riferimento appendice A), in termini di gradiente di potenziale massimo $[V/m]$ in prossimità dei conduttori in acciaio e rame.	145
5.61	Confronto tra i casi C6, C7, C8, C9 (riferimento appendice A), in termini di densità di corrente superficiale massima J $[mA/m^2]$ rilevata sui conduttori in acciaio e rame.	145
5.62	Confronto tra i casi C6, C7, C8, C9 (riferimento appendice A), in termini di corrente massima che circola nei conduttori in acciaio e rame.	146
5.63	Confronto della corrente totale I massima $[mA]$ che circola nel conduttore in rame nei vari casi studio, riferimento appendice A.	148
5.64	Confronto della corrente totale I $[mA]$ che circola nell'acciaio nei vari casi studio, riferimento appendice A.	149
5.65	Confronto del gradiente di potenziale massimo intorno al conduttore di rame nei vari casi analizzati, riferimento appendice A.	150
5.66	Confronto del gradiente di potenziale massimo intorno al conduttore d'acciaio nei vari casi analizzati, riferimento appendice A.	151

5.67	Confronto della densità di corrente massima superficiale $J$ [ $mA/m^2$ ] sul conduttore in rame nei vari casi analizzati, riferimento appendice A. . . . .	152
5.68	Confronto della densità di corrente massima superficiale $J$ [ $mA/m^2$ ] sul conduttore in acciaio nei vari casi analizzati, riferimento appendice A. . . . .	153
5.69	Confronto della caduta di tensione sull'acciaio [ $\mu V$ ] nei vari casi analizzati. . . . .	154



# Glossario

**HVDC**

High Voltage Direct Current

**FEM**

Finite Element Method

**AEM**

Azienda Elettrica Municipale

**AEEGSI**

Autorità per l'energia elettrica il gas ed il sistema idrico

**CC**

Corrente Continua

**CA**

Corrente Alternata

**IEC**

International Electrotechnical Commission

**ISO**

International Organization for Standardization

**VLD**

Voltage Limiting Device

**SSE**

Sottostazione Elettrica

**KCL**

Kirchhoff's Current Law

**KVL**

Kirchhoff's Voltage Law

**SCMS**

Stray Current Monitoring System

**IED**

Intelligent Electronic Device

**OVPD**

Over Voltage Protection Device

**SCPS**

Stray Current Protection System

**SCD**

Stray Current Drainage

**SCC**

Stray Current Collector

**CP**

Cathodic Protection

# Capitolo 1

## Introduzione al fenomeno della corrosione

Nel campo dell'ingegneria elettrica, la gestione efficace delle correnti elettriche è fondamentale per il funzionamento sicuro ed efficiente dei sistemi di distribuzione e trasmissione dell'energia elettrica. Tuttavia, l'emergere di correnti vaganti, come ad esempio dai sistemi di trazione, dovute ad un "imperfetto isolamento" da terra del binario, ha sollevato crescenti preoccupazioni riguardo alla loro interazione con le infrastrutture interrato e cementizie, portando a una maggiore attenzione verso i fenomeni di corrosione.

Corrosione, dal latino "corrodere", significa "rosicchiare" o "attaccare" un materiale a seguito dell'interazione chimica e/o fisica tra questo materiale e il suo ambiente. La corrosione non si limita ai soli metalli ma colpisce anche altri materiali (vetro, legno, polimeri, ceramica, ecc.), che si corrodono o si degradano durante la loro vita utile.

### 1.1 Scopo e obiettivo della ricerca

L'obiettivo primario di questa tesi è esaminare l'impatto delle correnti vaganti sui materiali delle infrastrutture interrato e cementizie, con particolare attenzione alle grandezze elettriche che descrivono il fenomeno della corrosione indotta dalle correnti elettriche disperse.

Questo fenomeno rappresenta una sfida significativa per l'ingegneria elettrica, poiché le correnti vaganti possono accelerare i processi di corrosione, compromettendo l'integrità strutturale e l'affidabilità delle infrastrutture.

Attraverso un'analisi dettagliata dei meccanismi di corrosione elettrochimica (o galvanica), verranno esaminate le interazioni tra le correnti vaganti e i materiali delle infrastrutture, identificando i fattori chiave che influenzano la manifestazione

della corrosione.

Inoltre, questo documento si propone di analizzare le tecniche di mitigazione e prevenzione della corrosione, al fine di sviluppare strategie efficaci per proteggere le infrastrutture e garantire la loro affidabilità a lungo termine.

Attraverso la simulazione di vari modelli di analisi, si cercherà di descrivere e analizzare possibili casi reali di interazione fra infrastrutture interrate e sorgenti di corrente vagante, valutando l'impatto e la gestione di queste ultime. Sulla base dei risultati ottenuti, si possono ipotizzare delle linee guida di analisi delle grandezze elettriche da tener sotto controllo, per migliorare la sicurezza e la durabilità delle infrastrutture sotterranee.

In conclusione, questa tesi si prefigge di contribuire alla comprensione in campo elettrico, dei rischi legati alla corrosione nelle infrastrutture interrate e cementizie.

## **1.2 Normativa**

Le norme relative alla corrosione, dovuta alle correnti vaganti, rivestono un'importanza cruciale nell'industria e nell'ingegneria, poiché forniscono linee guida e procedure standardizzate per valutare, prevenire e mitigare gli effetti dannosi delle correnti vaganti sulle infrastrutture elettrotecniche.

Questo paragrafo si propone di esaminare le principali normative internazionali e nazionali riguardanti la corrosione causata dalle correnti vaganti dal punto di vista elettrico, evidenziando l'impatto sulla sicurezza delle infrastrutture.

Non esiste una norma IEC specifica che tratti esclusivamente della corrosione a causa delle correnti vaganti nelle infrastrutture interrate. Tuttavia, ci sono norme che possono trattare aspetti correlati alla protezione di queste ultime, contro la corrosione e altre forme di degradazione.

Un particolare interesse verrà riposto sulle seguenti norme:

- CEI EN 50122 - Norma per l'impiego di apparecchiature elettriche in sistemi di alimentazione ferroviaria. La norma CEI EN 50122-2, specificamente focalizzata su sistemi di trazione a corrente continua, stabilisce requisiti rigorosi per la protezione contro le correnti vaganti che possono causare danni come la corrosione delle infrastrutture metalliche. Questo standard si applica a tutti gli impianti fissi metallici che fanno parte del sistema di trazione e anche ad altri componenti metallici che possono trasportare correnti vaganti derivanti dall'operazione del sistema ferroviario [1].
- CEI EN 50123, specifica i requisiti per le apparecchiature di manovra e controllo CC ed è destinata all'uso in impianti elettrici fissi con tensione nominale non superiore a 3 000 V CC, che forniscono energia elettrica ai veicoli per il trasporto pubblico guidato, vale a dire veicoli ferroviari, veicoli tranviari, metropolitane e filobus [2].



- CEI EN 50162 - Norma per la protezione delle apparecchiature elettriche nelle strutture in cui sono presenti rischi di corrosione esterna. La norma stabilisce i principi generali da adottare per minimizzare gli effetti della corrosione da corrente vagante causata dalla corrente continua (c.c.) su strutture metalliche interrate o immerse. La norma intende offrire indicazioni per: – la progettazione di sistemi in corrente continua che possono produrre correnti vaganti; – la progettazione di strutture metalliche, che devono essere interrate o immerse e – che possono essere soggette a corrosione da correnti vaganti; – la scelta delle misure di protezione adeguate. La norma si occupa principalmente della corrosione esterna da correnti vaganti su strutture sepolte o immerse [3].
- UNI EN 13509 - Norma per la protezione catodica e tecniche di misura. La presente norma europea tratta la protezione catodica contro la corrosione di strutture metalliche sepolte o immerse, descrivendo in dettaglio i metodi di misurazione da utilizzare per valutare l'efficacia della protezione catodica nonché le misurazioni e le misure adottate per monitorare la protezione catodica durante il funzionamento [4].
- EN ISO 15589-1 - Industrie petrolifere, petrolchimiche e del gas naturale - Protezione catodica dei sistemi di tubazioni. Specifica i requisiti e fornisce raccomandazioni per le indagini pre-installazione, la progettazione, i materiali, le attrezzature, l'installazione, la messa in servizio, il funzionamento, l'ispezione e la manutenzione dei sistemi di protezione catodica per condotte terrestri. Questa parte della norma ISO 15589 si applica alle condotte interrate, agli approdi di sezioni di condotte offshore protette da installazioni di protezione catodica a terra e alle sezioni immerse di condotte terrestri come attraversamenti di fiumi o laghi. Essa specifica i requisiti per tubazioni in acciaio al carbonio, acciaio inossidabile, ghisa, acciaio zincato o rame.[5].

### **1.3 Struttura del documento**

Il documento è suddiviso in cinque capitoli, di cui il primo presenta l'argomento di studio, fornendo gli obiettivi e la normativa di riferimento.

Il capitolo due offre una panoramica approfondita dei diversi tipi di corrosione, con un focus particolare sui processi chimici ed elettrochimici. Viene trattata anche l'evoluzione storica della scienza della corrosione, evidenziando come si sia sviluppata nel tempo la comprensione dei meccanismi corrosivi.

Particolare enfasi viene data alla corrosione elettrochimica, che è di grande rilevanza per le strutture metalliche esposte a correnti vaganti. Vengono esplorati i principali fattori che influenzano la corrosione, come le condizioni ambientali e le proprietà dei

materiali. Inoltre, il capitolo introduce il concetto di correnti vaganti, le loro fonti e come interagiscono con le infrastrutture, specialmente in ambienti sotterranei.

Il capitolo tre approfondisce il fenomeno delle correnti vaganti nei sistemi di trazione elettrica, come ferrovie e tramvie. Si discute di come l'isolamento imperfetto tra i binari e il suolo, porti alla dispersione involontaria di corrente nelle strutture circostanti, causando corrosione elettrochimica. Vengono evidenziati gli effetti dannosi di queste correnti vaganti sulle infrastrutture sotterranee, incluse tubazioni metalliche e armature in calcestruzzo. Vengono discussi alcuni modelli di simulazione e individuate strategie di mitigazione per prevenire e controllare queste correnti, con particolare attenzione al ruolo che esse svolgono nel garantire la durabilità delle infrastrutture sotterranee.

Nel capitolo quattro vengono esaminate nel dettaglio le metodologie per misurare e monitorare i parametri che influenzano le correnti vaganti, come il metodo di Wenner per la misura della resistività del suolo. Il capitolo sottolinea l'importanza di una rilevazione precoce per valutare il rischio di corrosione per le strutture sotterranee. Inoltre, vengono passate in rassegna le metodologie preventive e protettive, come la protezione catodica (sia con anodi sacrificali che con sistemi a corrente impressa), cruciali per mitigare gli effetti dannosi delle correnti vaganti.

L'ultimo capitolo presenta i risultati delle simulazioni condotte utilizzando COMSOL Multiphysics per valutare l'impatto delle correnti vaganti su strutture metalliche sotterrate. È stato impiegato il modulo AC/DC-Electric Currents per simulare campi elettrici, distribuzioni di potenziale e densità di corrente. Il capitolo discute tre modelli che simulano il comportamento di conduttori in rame e acciaio in un ambiente di terreno omogeneo.

L'analisi della mesh, le condizioni al contorno e i risultati relativi alla densità di corrente e ai gradienti di potenziale elettrico sono esaminati in dettaglio. Questi ultimi dimostrano l'influenza significativa della conducibilità del terreno e della geometria strutturale sulla distribuzione della corrente e sui gradienti di potenziale lungo i conduttori. Il capitolo si conclude con una valutazione della validità dei modelli e offre spunti per possibili miglioramenti nella valutazione della corrosione indotta da correnti vaganti.

## Capitolo 2

# Fondamenti della corrosione

La corrosione è una delle ragioni principali dei danni alle tubazioni metalliche interrate; può essere suddivisa in corrosione chimica diretta o corrosione elettrochimica [6].

La corrosione diretta è un processo in cui, un materiale viene direttamente attaccato da un agente corrosivo, senza l'intervento di altri fattori, come la formazione di un rivestimento protettivo o la generazione di reazioni chimiche intermedie. Essa può avvenire per vari meccanismi, a seconda del tipo di materiale e dell'agente corrosivo coinvolto. Ad esempio, può essere causata da un'azione chimica diretta, dall'abrasione o dall'erosione di un materiale da parte di particelle abrasive presenti nell'ambiente.

In generale, questo tipo di corrosione è uno dei modi in cui i materiali possono degradarsi quando sono esposti a condizioni ambientali sfavorevoli. La comprensione di questo processo è importante per la progettazione di materiali resistenti alla corrosione e per la prevenzione della rottura e del deterioramento dei componenti e delle strutture [7].

In questa analisi, ci concentreremo maggiormente sullo studio della corrosione da correnti vaganti, cioè correnti che deviano dal percorso previsto. Tale fenomeno è la forma più grave di corrosione elettrochimica. Nell'ultima parte di questo capitolo, la sezione 2.8, si analizzerà più nel dettaglio un esempio di corrosione elettrochimica che riguarda il sistema di terra delle cabine elettriche, che saranno anche l'oggetto di simulazione del documento. Nell'ultima sezione 2.9 invece, vi sarà un'introduzione teorica sulle correnti indotte nelle strutture in cemento armato.

### 2.1 Tipi di corrosione

La corrosione è un processo naturale che comporta la degradazione dei materiali, i quali reagiscono chimicamente con l'ambiente che li circonda. Esistono infatti

diversi tipi di corrosione, ognuna delle quali può presentare un impatto significativo sulle infrastrutture interrate e cementizie. Possiamo in questo modo identificare e categorizzare i diversi tipi di corrosione, tenendo conto di vari aspetti ([8], [9], [10]), in figura 2.1:

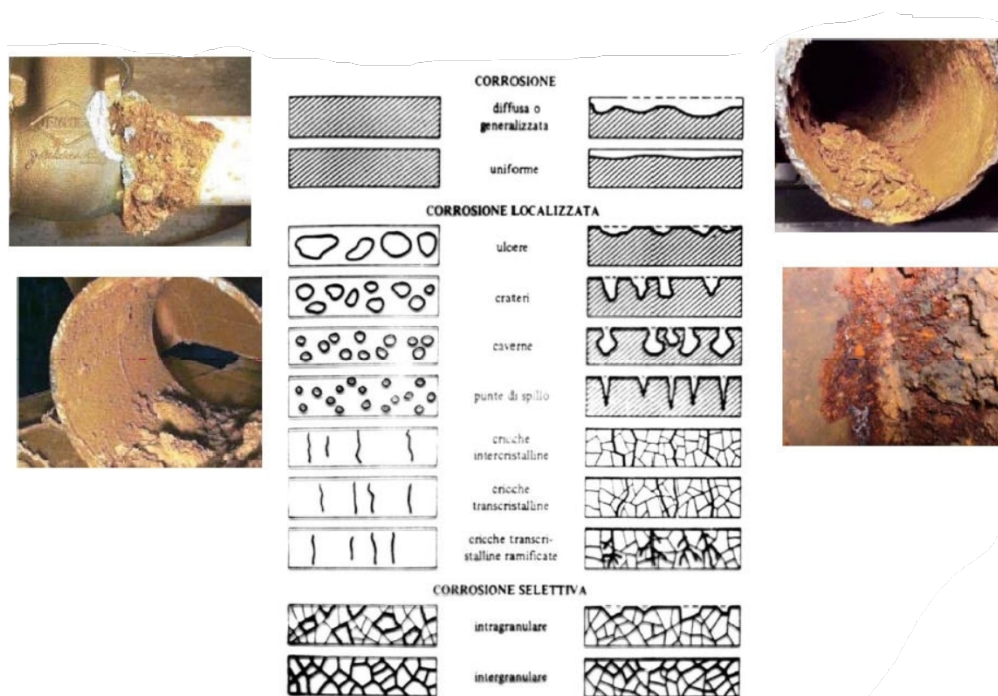


Figura 2.1: Morfologia della corrosione [11] .

- Corrosione uniforme, è uno dei tipi più comuni di deterioramento dei materiali metallici. Si tratta di una forma di corrosione che si verifica in modo omogeneo sulla superficie esposta del metallo, portando appunto, ad una perdita di materiale uniformemente distribuita su tutta la superficie di tale materiale. Questo tipo di corrosione è facilmente prevedibile e la velocità di sviluppo di tale fenomeno può essere misurata; questi particolari aiutano a pianificare la manutenzione o la sostituzione dei materiali. Alcuni esempi possono essere:
  - pannelli esterni delle automobili esposti a condizioni ambientali avverse come pioggia acida o sale (in ambienti marini o strade trattate per il ghiaccio);
  - Sistemi di tubazioni, dove la corrosione uniforme può verificarsi a causa dell'esposizione continua a fluidi corrosivi o all'umidità esterna.

- generalmente strutture metalliche esposte ad agenti atmosferici, come le travi in acciaio nei ponti o nei grattacieli, possono subire un'erosione uniforme a causa della loro esposizione continua agli elementi.
- La corrosione puntuale si manifesta in piccole aree localizzate, solitamente a causa della presenza di inclusioni di materiali diversi immersi nel metallo, di microclimi corrosivi, o della rottura del film passivo protettivo sulla superficie del metallo. Questo tipo di corrosione è particolarmente pericolosa, perché può portare alla rottura e distruzione graduale della struttura, se non viene rilevata e trattata in tempo. Le correnti vaganti possono aggravare la corrosione puntuale accelerando i processi elettrochimici in punti specifici della struttura. Alcuni esempi possono riguardare:
  - componenti navali, come eliche e scafi, possono sviluppare tale fenomeno a causa dell'acqua salata, che è altamente corrosiva.
  - impianti di desalinizzazione, come scambiatori di calore e le tubazioni i quali esposti continuamente ad ambienti caratterizzati da acqua salata e temperature elevate.
  - apparecchiature domestiche, che utilizzano o gestiscono acqua, come lavatrici e lavastoviglie.
- Corrosione galvanica (la quale verrà approfondita maggiormente), si verifica quando due metalli diversi sono in contatto in presenza di un elettrolita, portando alla formazione di una cella galvanica. Il metallo con il potenziale elettrochimico più basso (più anodico) si corrode più rapidamente del metallo più nobile (catodico). Questo tipo di corrosione è molto comune nelle infrastrutture interrate oppure in contesti in cui materiali differenti vengono impiegati ed utilizzati insieme, come ad esempio nel cemento armato.
- Corrosione da fessurazione, include la corrosione sotto tensione e la corrosione fessurativa da idrogeno. Essa è un processo pericoloso, che combina l'azione corrosiva con le tensioni meccaniche presenti in un materiale, portando alla formazione e propagazione di crepe, spesso aggravate da ambienti corrosivi esterni. Le correnti vaganti possono aumentare il rischio di accumulo di idrogeno, promuovendo la corrosione fessurativa. Alcuni esempi possono essere:
  - condotte del gas e del petrolio, che trasportano fluidi corrosivi sotto alta pressione;
  - componenti aeronautici, soggetti ad alte tensioni operative e dell'uso di leghe leggere sensibili a specifici ambienti corrosivi.

- impianti nucleari, in cui le componenti come le tubazioni e i reattori sono esposti a temperature elevate, radiazioni e fluidi corrosivi.
- Corrosione intergranulare, avviene lungo i bordi dei grani nei materiali cristallini, dove gli attacchi chimici possono provocare il deterioramento del legame presente tra i grani. Questo tipo di corrosione è particolarmente problematica per le leghe e può essere stimolata dalla presenza di impurità o dalla segregazione di elementi alle interfacce dei grani.
- Corrosione microbiologica, si verifica quando i microbi influenzano le reazioni chimiche sulla superficie dei materiali. Questo fenomeno può essere rilevante nelle infrastrutture interrato dove l'ambiente umido e spesso ricco di nutrienti favorisce lo sviluppo di microbi corrosivi.

E' necessario perciò comprendere i diversi tipi di corrosione, in quanto aiuta a identificare le specificità degli ambienti e la vulnerabilità delle infrastrutture interrato e cementizie, progettando misure di protezione più efficaci. Ogni tipo di corrosione presenta problematiche differenti che possono richiedere strategie di mitigazione specifiche. In tale documento si andrà a considerare l'impatto aggiuntivo delle correnti vaganti [9][8].

## 2.2 Retroscena storico

Il fenomeno della corrosione fu analizzato per la prima volta nel 1780 da Luigi Galvani, da cui prese il nome attuale [12]. Luigi Galvani è noto principalmente per le sue ricerche sull'elettricità animale e la galvanizzazione.

Tuttavia, i principi elettrochimici che Galvani ha studiato e che hanno portato alla scoperta della galvanizzazione, possono essere collegati al campo della corrosione. Infatti, le sue ricerche hanno gettato le basi per la comprensione delle reazioni elettrochimiche, che sono fondamentali per comprendere i meccanismi alla base della corrosione; in particolare, se due diversi metalli messi in collegamento tra loro ed immersi in una soluzione salina, collegati contemporaneamente ad una diversa regione del nervo scoperto di una zampa di rana, provocavano la contrazione della zampa stessa.

Il fenomeno della galvanizzazione, in presenza di un elettrolita, ha implicazioni nella comprensione della corrosione galvanica, in cui il metallo più reattivo si corrode più velocemente quando è in contatto con un metallo meno reattivo. Galvani chiamò questo fenomeno "*elettricità animale*", senza però comprenderne il significato elettrochimico.

Tali studi furono ripresi successivamente da Alessandro Volta e John Frederic Daniell, con la coniazione del termine "cella galvanica"; un dispositivo che converte l'energia chimica in energia elettrica attraverso reazioni redox spontanee. Queste

celle sono composte da due elettrodi immersi in una soluzione elettrolitica o collegati da un ponte salino, che consente il flusso di ioni tra i due elettrodi, e generano una differenza di potenziale elettrico.

La "cella galvanica" si collega indirettamente alla "cella voltaica" [13] (in figura 2.2), conosciuta da Alessandro Volta, il quale scoprì che l'accoppiamento galvanico è legato sostanzialmente alla differenza di nobiltà nella coppia metallica.

Il principio di base di una cella voltaica coinvolge la separazione dei reagenti coinvolti in due compartimenti, chiamati semicelle, che sono collegati attraverso un circuito esterno. Ogni semicella contiene un elettrodo e una soluzione elettrolitica. Durante il funzionamento della cella, avviene una reazione di ossidazione in uno degli elettrodi (anodo), in cui gli elettroni vengono rilasciati, e una reazione di riduzione nell'altro elettrodo (catodo), dove gli elettroni vengono assorbiti.

Il flusso di elettroni attraverso il circuito esterno, causato dalla differenza di potenziale tra gli elettrodi, crea corrente elettrica che può essere utilizzata per alimentare dispositivi elettrici. Nel frattempo, gli ioni prodotti dalle reazioni di ossidazione e riduzione si muovono attraverso l'elettrolita o il ponte salino per mantenere l'equilibrio di carica all'interno della cella.

Le celle voltaiche sono comunemente utilizzate in varie applicazioni, come batterie, accumulatori elettrochimici, sensori elettrochimici e altre tecnologie che richiedono un'alimentazione elettrica portatile o sostenibile.

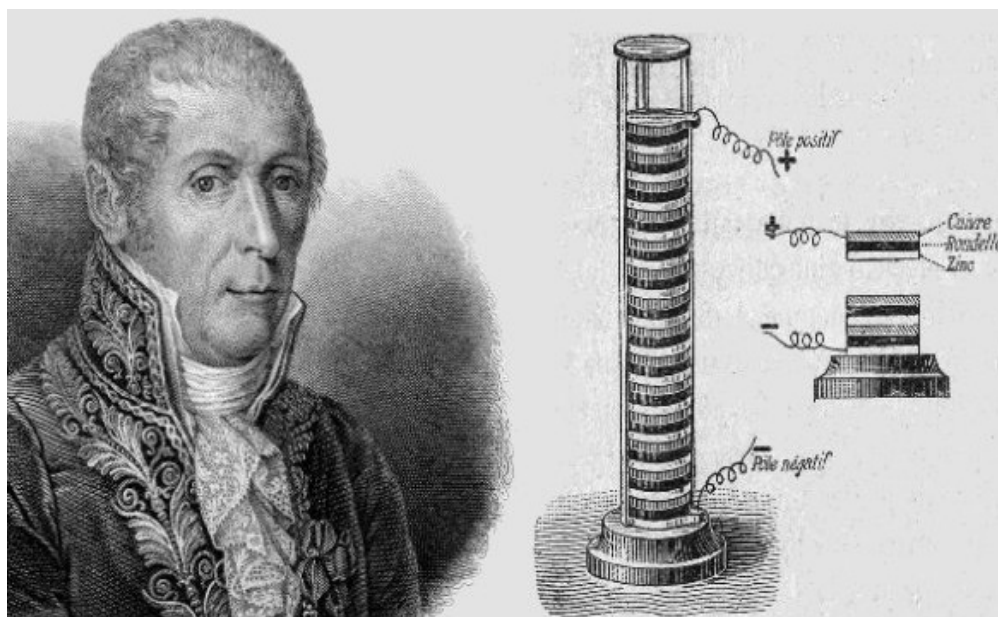


Figura 2.2: La pila di volta [14].

## 2.3 Elementi base sul meccanismo di corrosione elettrochimica

La corrosione può essere descritta come un processo di ossidazione, un attacco chimico o un fenomeno elettrico (elettrolisi). Il processo di corrosione è fondamentalmente di natura elettrochimica; la presenza di ossigeno è essenziale per la corrosione. Vi sono determinate condizioni in cui può verificarsi la corrosione; per tale motivo bisogna identificare i vari "attori" che la provocano.

Innanzitutto, è necessaria la presenza di un metallo da corrodere ed il metallo che si corrode ed è, per definizione, chiamato anodo. Il motivo per cui si corrode, risiede nell'instabilità termodinamica dei metalli; essa si riferisce alla tendenza dei metalli a reagire chimicamente con l'ambiente circostante per raggiungere uno stato energetico più stabile. In termini più specifici, quando un metallo è estratto dalla sua forma naturale, ad esempio, sotto forma di minerale o minerale metallico, viene spesso sottoposto a processi di trasformazione per ottenere la forma desiderata, come ad esempio fusione, estrusione, forgiatura o laminazione. Durante questi processi, il metallo può acquisire determinate impurità o tensioni interne che possono renderlo più suscettibile alla corrosione. Tale caratteristica è definita come grado di instabilità di un metallo [15].

La tabella 2.1 mostra un elenco dei metalli, in ordine di tendenza alla corrosione (serie galvanica), in un dato mezzo corrosivo. La serie galvanica o serie elettrochimica dei metalli, è una classificazione che ordina i metalli in base alla loro attività elettrochimica relativa in un ambiente specifico. Essa è utilizzata per prevedere il comportamento alla corrosione, quando due metalli diversi entrano in contatto elettrolitico tra loro. Siamo nella condizione in cui, nella soluzione vi è un eccesso di ioni positivi e l'anodo presenta un eccesso di ioni negativi. Poiché entrambe queste condizioni sono instabili, gli ioni in eccesso devono ricombinarsi.

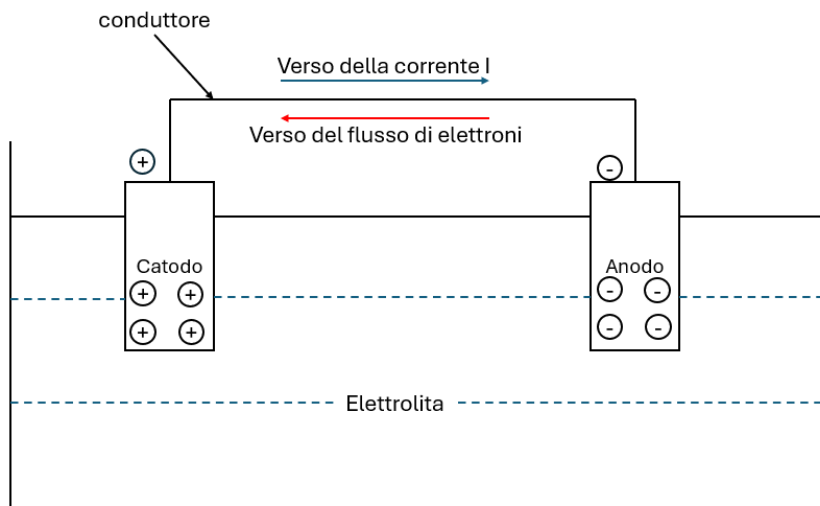
Il catodo, terzo "attore" per la corrosione, è il luogo in cui vengono accolti gli ioni in eccesso. Il catodo offre un luogo per scaricare gli ioni positivi della soluzione e da l'avvio della corrosione. Il processo di corrosione viene interrotto, non appena la carica del catodo diventa positiva, non riuscendo più ad assorbire gli ioni della soluzione.

Si forma in questo modo una cella composta: da un anodo con elettroni in eccesso (cariche negative) e un catodo con ioni metallici in eccesso (cariche positive) in una soluzione. Se l'anodo e il catodo sono collegati elettricamente, gli elettroni possono fluire verso il catodo e neutralizzare gli ioni positivi. Mentre gli ioni esistono solo in soluzione, gli elettroni viaggiano in circuiti metallici. Il flusso ordinato di elettroni dà vita all'elettricità.

Il quarto requisito per la corrosione è quindi, un conduttore tra anodo e catodo. La figura 2.3 rappresenta lo schema di una cella di corrosione, che è costituita



da un anodo e un catodo metallico, in soluzione, collegati esternamente da un conduttore metallico. L'anodo spinge gli ioni verso il catodo, attraverso la soluzione e gli elettroni (-) verso il catodo, attraverso il conduttore metallico. Quando gli elettroni e gli ioni si incontrano al catodo, si neutralizzano a vicenda e consentono alla reazione di procedere.



**Figura 2.3:** Schema esemplificativo di una cella elettrolitica.

**Tabella 2.1:** Serie galvanica dei metalli in acqua salata [15].

Metallo	Ioni formati	Potenziale
Litio	$Li^+$	+2,96
Rubidio	$Rb^+$	+2,93
Potassio	$K^+$	+2,92
Stronzio	$Sr^{2+}$	+2,92
Bario	$Ba^{2+}$	+2,90
Calcio	$Ca^{2+}$	+2,87
Sodio	$Na^+$	+2,71
Magnesio	$Mg^{2+}$	+2,40
Alluminio	$Al^{3+}$	+ 1,70
Berillio	$Be^{2+}$	+ 1,69
Manganese	$Mn^{2+}$	+1,10
Zinco	$Zn^{2+}$	+0,76
Cromo	$Cr^{2+}$	+0,56
Ferro (ferroso)	$Fe^{2+}$	+0,44
Cadmio	$Cd^{2+}$	+0,40
Indio	$In^{3+}$	+0,34
Tallio	$Tl^+$	+0,33
Cobalto	$Co^{2+}$	+0,28
Nichel	$Ni^{2+}$	+0,23
Stagno	$Sn^{2+}$	+0,14
Piombo	$Pb^{2+}$	+0,12
Ferro	$Fe^{3+}$	+0,04
Idrogeno	$H^+$	0,00
Antimonio	$Sb^{3+}$	- 0,10
Bismuto	$Bi^{3+}$	0,23
Arsenico	$As^{3+}$	0,30
Rame (rameico)	$Cu^{2+}$	- 0,34
Rame (rameoso)	$Cu^+$	- 0,47
Tellurio	$Te^{4+}$	- 0,56
Argento	$Ag^+$	- 0,80
Mercurio	$Hg^{2+}$	- 0,80
Palladio	$Pd^{2+}$	- 0,82
Platino	$Pt^{4+}$	- 0,86
Oro (aurico)	$Au^{3+}$	- 1,36
Oro (aureo)	$Au^+$	-1,50

## 2.4 Fattori che influenzano la corrosione

La corrosione elettrochimica è influenzata da vari di fattori che possono accelerare o rallentare il processo di deterioramento dei materiali metallici. Uno dei primi fattori riguarda il potenziale di riduzione dei metalli (mostrata in tabella 2.1), che è una caratteristica intrinseca che determina la loro reattività chimica. I metalli con potenziali di riduzione più negativi (più anodici) tendono a essere più suscettibili alla corrosione rispetto a quelli con potenziali di riduzione più positivi (più catodici). Ad esempio, se due metalli qualsiasi della serie galvanica, come ferro e rame, sono sepolti nel terreno e collegati insieme, a causa della differenza di potenziale esiste un flusso di corrente, poiché il ferro risulta più anodico rispetto al rame [15].

Un altro fattore riguarda la composizione chimica dell'elettrolita, (soluzione conduttiva in cui avviene la reazione elettrochimica) la quale può influenzare la corrosione. L'elettrolita agisce da mezzo attraverso cui avviene lo scambio di ioni elettrici tra il metallo e l'ambiente circostante. Ad esempio, la presenza di ioni aggressivi come cloruri, solfati o bicarbonati può accelerare la corrosione. Inoltre, il pH dell'elettrolita svolge un ruolo critico nella corrosione elettrochimica. Soluzioni altamente acide o altamente basiche possono alterare il potenziale di riduzione del metallo, accelerando il processo corrosivo. Ad esempio, soluzioni acide possono favorire la formazione di ioni idrogeno che possono reagire con il metallo, mentre soluzioni basiche possono favorire la formazione di ioni idrossido che possono alterare la superficie del metallo. Da non sottovalutare è anche la temperatura dell'elettrolita, che influisce sulla corrosione; le temperature più elevate causano un aumento della velocità delle reazioni chimiche coinvolte nella corrosione elettrochimica, accelerando il deterioramento del metallo.

Altri fattori che aumentano la velocità della corrosione sono [16]:

- velocità del flusso dell'elettrolita, ad esempio un flusso più rapido può rimuovere gli ioni corrosivi dalla superficie del metallo, riducendo la velocità della corrosione;
- la presenza di ossigeno nell'elettrolita favorisce la formazione di ioni idrossido e può accelerare la corrosione;
- geometria della superficie metallica (comprese le rugosità e le aree di ristagno) e i rivestimenti protettivi (pitture, vernici, galvanizzazione o anodizzazione).

Quindi, è essenziale condurre studi dettagliati sulla composizione chimica dell'elettrolita e sull'ambiente circostante al fine di identificare e mitigare i fattori che possono contribuire alla corrosione elettrochimica.

## 2.5 Concetti base sulle correnti disperse

Le strutture metalliche presenti nel sottosuolo, specialmente nelle aree urbane, sono sempre più numerose, di conseguenza, vengono a coesistere sempre di più, nello stesso ambiente, tubazioni dell'acqua, tubazioni del gas, tubazioni di teleriscaldamento, cavi telefonici, cavi d'energia dei vari sistemi di distribuzione, impianti di terra, ecc. Queste strutture, poste nell'ambiente elettrolitico (terreno oppure acqua), possono essere affette dal fenomeno della corrosione, causata sia dalla loro natura, sia dalla presenza di altri servizi che, per il loro funzionamento, sono fonte di campi elettrici nel terreno [17].

Tra le varie cause che scatenano il fenomeno della corrosione, assumono una rilevanza particolare le interferenze di tipo elettrico cui le strutture metalliche sono soggette (in figura 2.4). Col termine generico di interferenza si intende la variazione dello stato elettrico di una struttura, come conseguenza di un'alterazione del campo elettrico nell'ambiente, causata dalla presenza di un'altra struttura o di correnti disperse nel terreno.



**Figura 2.4:** Corrosione dei metalli dovuta a correnti galvaniche e/o correnti di dispersione [18].

### 2.5.1 Le sorgenti delle correnti vaganti

L'esistenza di campi elettrici nel terreno è legata a diverse cause; le principali sorgenti di correnti continue nel suolo, note anche come correnti vaganti, sono ([19][20] [21]):

- impianti industriali - operazioni industriali che coinvolgono l'elettricità, come la produzione di alluminio, la galvanizzazione o il trattamento elettrochimico dei metalli, possono generare correnti vaganti. Queste correnti possono essere causate da perdite di corrente elettrica o dalla disconnessione accidentale di dispositivi di protezione;

- strutture elettriche sottomarine - cavi elettrici sottomarini, linee di trasmissione e altre infrastrutture elettriche sottomarine possono generare correnti vaganti a causa della dispersione di corrente elettrica nell'acqua circostante;
- sistemi di trazione ferroviaria e tranviaria - dispersioni di corrente da linee aeree, perdite da sistemi di alimentazione elettrica, e reazioni elettrochimiche causate da differenze di potenziale elettrico tra i componenti metallici del sistema di trazione. Queste correnti vaganti possono provocare la corrosione accelerata dei componenti metallici, compromettendo la sicurezza e l'affidabilità dell'infrastruttura ferroviaria o tranviaria;
- fenomeni naturali - come le maree, i flussi e riflussi delle correnti marine e la presenza di minerali conduttori nell'acqua possono generare correnti vaganti che influenzano la corrosione dei metalli;
- altre sorgenti - i dispersori degli impianti di protezione catodica, le centrali telefoniche, i sistemi di trasmissione HVDC unipolari con ritorno a terra ...

### 2.5.2 Tipi di corrente vagante

Esistono principalmente tre tipi di corrente vagante, a seconda della sorgente di corrente [6]:

- corrente vagante in corrente continua (CC);
- corrente vagante in corrente alternata (CA);
- dovute all'impatto del campo magnetico terrestre.

A seconda dell'ampiezza e della direzione della corrente vagante, le quali sono variabili nel tempo, la corrente vagante CC può essere divisa in statica e dinamica. La corrente CC statica può portare a fenomeni di corrosione elettrolitica nel tempo, specialmente nelle strutture metalliche sepolte come tubazioni e cavi, poiché crea un flusso costante di elettroni attraverso il terreno. Le correnti vaganti dinamiche possono essere più difficili da prevedere e controllare rispetto a quelle statiche; esse possono causare effetti di corrosione intermittenti, poiché influenzata da cambiamenti nelle condizioni operative dei sistemi elettrici.

Gli effetti delle correnti vaganti CA sono più complessi, e alcune ricerche hanno dimostrato che la corrente vagante CA può provocare la corrosione solo in alcune circostanze particolari, cioè in presenza di correnti molto elevate, che vengono captate dalla struttura sepolta, per cui la densità di corrente nei punti in cui la corrente entra ed esce dalla struttura è estremamente alta [6].

### 2.5.3 Legge di Faraday

In una cella di corrosione, il rapporto tra la quantità di metallo che reagisce e la carica  $Q$  che provoca la reazione, è descritto quantitativamente dalla Legge di Faraday [22]:

$$m = kQ \quad (2.1)$$

dove  $m$  è il peso del metallo decomposto (in grammi) e  $k$  è l'equivalente elettrochimico del metallo in grammi/coulomb. Se la carica è prodotta da una corrente costante  $I$  per un periodo di tempo  $t$ , allora:

$$Q = It \quad (2.2)$$

Sostituendo nella eq. 2.1:

$$m = kIt \quad (2.3)$$

In questo caso, la costante  $k$  può essere espressa nel termine più popolare, kg/Ampere/anno, ovvero il tasso di corrosione annuale in kg applicando un Ampere di corrente costante. Alcuni valori di  $k$  per diversi metalli sono elencati nella Tabella 2.2.

**Tabella 2.2:** Tasso di corrosione annuale  $k$  di alcuni metalli [22].

Tipo di metallo	$k$ (kg/A/anno)
Alluminio	2.93
Ferro	9.12
Zinco	10.69
Rame	26.6

È noto che la corrente vagante CC è molto più pericolosa della corrente vagante CA. Secondo la legge di Faraday, 1 ampere di corrente continua dispersa, scaricata da una tubazione può consumare 10 kg di acciaio entro 1 anno [6]. Di solito l'attacco è estremamente localizzato e può avere conseguenze drammatiche soprattutto sugli oleodotti.

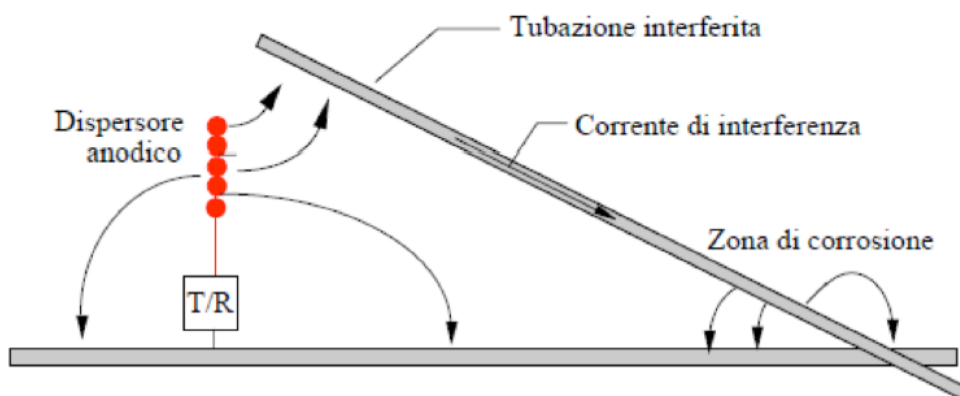
## 2.6 Analisi dei tipi di interferenza da corrente vagante

Le interferenze da corrente vagante possono essere problematiche in molti contesti, specialmente in quelli legati a sistemi elettrici e di trasporto. La corrente vagante si riferisce a qualsiasi corrente elettrica che si muove fuori dal percorso previsto. Di seguito, verranno illustrate i principali tipi di interferenze riguardanti la corrente vagante.

### 2.6.1 Interferenza della corrente continua

Questo tipo di interferenza può essere di due tipi: stazionaria o dinamica [23][24]. L'interferenza stazionaria si verifica in presenza di un campo elettrico costante, generato ad esempio da un dispersore anodico utilizzato come sistema di protezione catodica. L'intensità dell'interferenza dipende dalla vicinanza della struttura al dispersore anodico, poiché il campo elettrico è più forte quanto più vicine sono queste due componenti.

Ad esempio, quando due tubazioni si incrociano (figura 2.5), la tubazione più vicina al dispersore anodico riceve corrente che viene poi liberata nell'area di incrocio, causando corrosione localizzata in quella zona, mentre protegge l'altra zona. Invece,



**Figura 2.5:** Interferenza stazionaria tra due tubazioni interrate incrociate[24].

quando le due condotte sono disposte in parallelo (figura 2.6), l'area in cui la corrente si disperde tende ad essere molto più vasta e distribuita rispetto al caso di incrocio, e questo fenomeno è comunemente legato a regioni del terreno con bassa resistività.

In tutte le situazioni, se la struttura soggetta a interferenza possiede un rivestimento isolante, il trasferimento di corrente si verifica principalmente nelle aree del rivestimento, che presentano imperfezioni o danni. Questo comporta un serio rischio di corrosione dovuto all'alta densità di corrente in queste specifiche zone. L'interferenza dinamica avviene a causa di un campo elettrico che varia nel tempo. Si manifesta solamente in specifici intervalli temporali (figura 2.7, come nel caso delle correnti disperse da sistemi di trazione elettrica alimentati in corrente continua [23]).

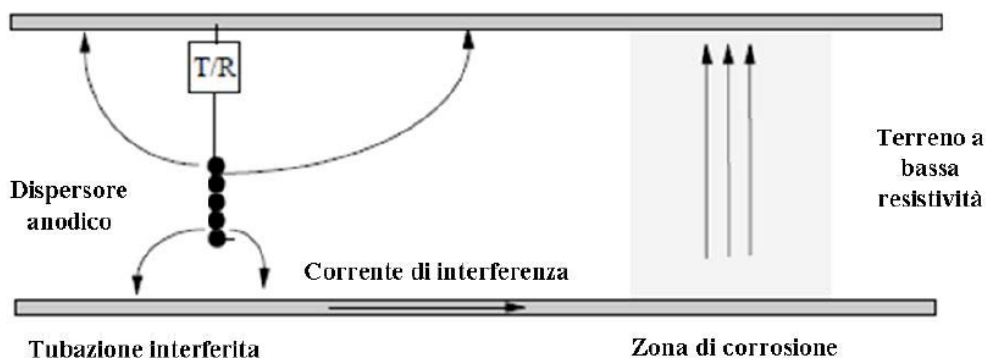


Figura 2.6: Interferenza stazionaria tra due tubazioni interrate parallele[24].

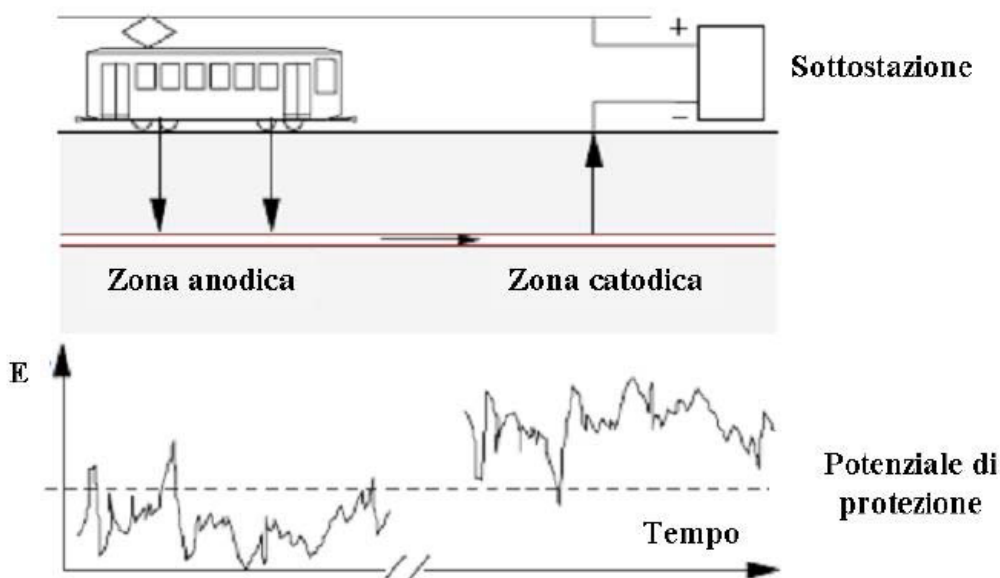


Figura 2.7: Interferenza non stazionaria causata da correnti disperse da un sistema di trasporto a Corrente continua [24].

L'interferenza è particolarmente evidente durante il transito di un treno, e, nonostante la breve durata dell'evento, i suoi effetti possono essere molto dannosi a causa delle alte correnti implicate.

Durante il passaggio della motrice, alimentata da un sistema di trazione a corrente continua, la corrente viaggia dal polo positivo della sottostazione lungo la linea di contatto fino al treno e ritorna alla sottostazione attraverso i binari.

Tuttavia, una parte di questa corrente potrebbe disperdersi nel terreno, interferendo con eventuali strutture metalliche interrate, come le tubature, specialmente nelle



vicinanze della sottostazione, dove la struttura agisce come anodo. L'attacco corrosivo si produce in genere in forma localizzata, soprattutto dove vi è presente un difetto dell'isolamento.

### 2.6.2 Interferenza da corrente alternata

Similmente all'interferenza da corrente continua, l'interferenza da corrente alternata può essere sia stazionaria che dinamica. La corrente alternata che causa interferenza può originarsi da sistemi di trazione alimentati a corrente alternata o da linee aeree ad alta tensione, attraverso processi di induzione o conduzione. In situazioni dove una tubazione si estende parallelamente o incrocia una linea ad alta tensione, può essere indotta una tensione alternata stazionaria. L'entità di queste tensioni dipende da vari fattori, come la potenza della linea ad alta tensione, le dimensioni dei pali di sostegno, la distanza tra la tubazione e la linea elettrica, la lunghezza del percorso comune, e la resistività del terreno e del rivestimento della tubazione [25], [23].

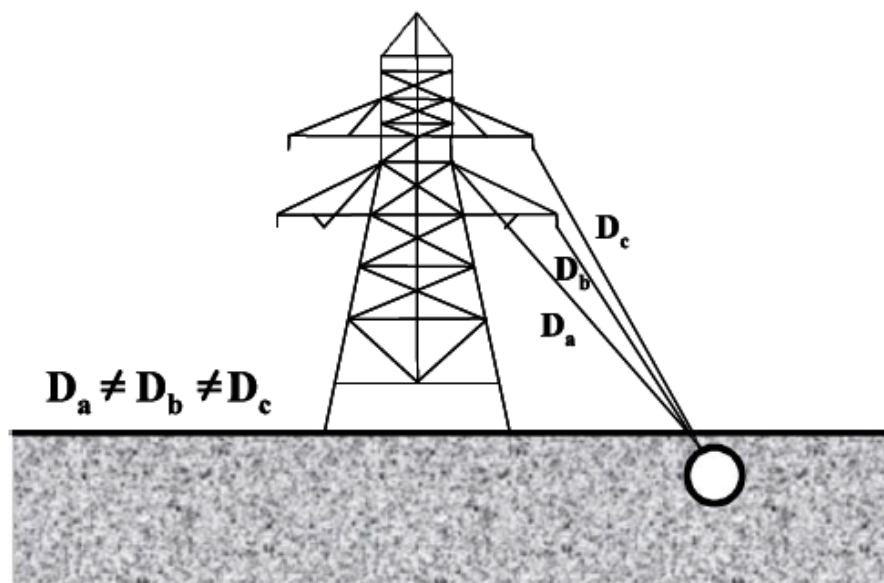
### 2.6.3 Interferenza per induzione magnetica

L'interferenza per induzione magnetica si verifica lungo tratti di tubazione che corrono paralleli a linee di alta tensione, figura 2.8. Questo fenomeno può generare potenziali elevati sulla condotta, anche a distanze considerevoli dal punto di accoppiamento.

Il processo di induzione si verifica quando una linea di alta tensione, con il neutro collegato a terra, è posizionata vicino a una tubazione interrata. Questa vicinanza genera un campo magnetico alternato tra la linea di alta tensione e il terreno, inducendo una corrente nella tubazione che ha la tendenza ad opporsi alle variazioni del campo magnetico induttore. Di conseguenza, la tubazione e il terreno circostante funzionano come il secondo avvolgimento di un trasformatore, con la linea di alta tensione agente come il primo avvolgimento.

Il caso dell'interferenza elettromagnetica tra linee di trasmissione elettrica e condutture è stato un tema di grande preoccupazione fin dagli inizi degli anni '60, principalmente a causa dell'incremento rapido del consumo energetico, specialmente nei paesi occidentali, ha portato all'adozione di livelli più elevati di carico e di corrente di corto circuito, rendendo il problema più acuto[26].

L'aumento costante del costo dei diritti di passaggio, adatti per linee elettriche e condutture, insieme alle recenti normative ambientali volte a proteggere la natura e la fauna selvatica, ha costretto varie compagnie a condividere passaggi per la posatura vicini o addirittura comuni per entrambi, nonostante la diversità delle infrastrutture.



**Figura 2.8:** Interferenza indotta su una tubazione [23].

Di conseguenza, situazioni in cui una conduttura è posata a una distanza ravvicinata da una linea di trasmissione per diversi chilometri sono frequenti oggi. Questa interferenza elettromagnetica è presente sia durante le condizioni di funzionamento normali sia in caso di guasti, e generalmente consiste di una componente induttiva, una conduttiva e una capacitiva. Tra le tre, la parte induttiva è quella dominante. La componente capacitiva può essere ignorata per le condutture interrate, mentre la parte conduttiva sorge solo in condizioni di guasto e, nello specifico, in casi in cui la conduttura è situata vicino alla struttura in guasto.

L'interferenza induttiva è il risultato del campo magnetico generato dalla linea elettrica, che induce tensioni in conduttori metallici adiacenti, come le condutture. In condizioni di guasto, alte tensioni e correnti possono essere indotte su condutture vicine, che possono risultare come pericoli per le persone o il personale operativo che tocca la conduttura o altre strutture metalliche ad essa connesse. Se la conduttura è elettricamente continua, cioè non è separata da flange isolanti, allora le tensioni e le correnti indotte "viaggiano" lungo tutta la sua lunghezza, anche se il guasto si verifica lontano dalla conduttura. Inoltre, c'è un alto rischio di danneggiamento del rivestimento della conduttura, delle flange isolanti o dei raddrizzatori, mentre la corrosione del metallo è accelerata.

## 2.7 Valutazione della corrente di corrosione

La corrente generata tra due metalli scorre dal catodo all'anodo nel circuito esterno; mentre nell'elettrolita (terreno) dall'anodo al catodo. Il metallo si corrode nel punto in cui la corrente lascia il metallo per entrare nell'elettrolita in cui è immerso. Al contrario, il metallo che riceve corrente dall'elettrolita non si corrode.

Il flusso di corrente generato è proporzionale alla differenza di potenziale, che vi è tra le due superfici metalliche, ed è inversamente proporzionale alla resistività del terreno. La resistività del terreno influisce direttamente sul potenziale elettrochimico; terreni con alta resistività tendono a ridurre la conducibilità elettrica, rallentando così il flusso di corrente elettrica tra il metallo e il terreno. Questo può influenzare il potenziale elettrochimico della superficie metallica, che a sua volta può accelerare o rallentare il processo di corrosione. Essa viene classificata ai fini della corrosione come indicato nella Tabella 2.3 [15].

**Tabella 2.3:** Classificazione della resistività del suolo.

Intervallo di resistività [ $\Omega \cdot m$ ]	Grado di Corrosione
0-10	Molto severo
10-20	Severo
20-50	Moderato
50-100	Lieve
>100	Molto Lieve

Nella letteratura esistono diverse tabelle che mostrano i range di resistività per vari tipi di suoli [27], [28]:

**Tabella 2.4:** Resistività media dei diversi tipi di terreno.

Tipo di terreno	Resistività media [ $\Omega \cdot m$ ]
Terreno organico bagnato	10
Terreno umido	$10^2$
Terreno secco	$10^3$
Terreno roccioso	$10^4$

La differenza di potenziale, una volta stabiliti i materiali, non può essere modificata; quindi, la corrente di corrosione generata da essi e l'entità della corrosione dipendono da altri parametri/fattori:

- rapporto tra l'area anodica e quella catodica;
- resistenza tra anodo e catodo;

- continuità elettrica della struttura interrata

### 2.7.1 Rapporto tra area anodica e catodica

Nella corrosione elettrochimica l'area catodica e l'area anodica sono due parti fondamentali della cella elettrochimica che descrivono al meglio il processo di corrosione. Le aree catodica e anodica dipendono da vari fattori, inclusa la geometria del metallo, la presenza di discontinuità nella superficie, la distribuzione dell'ambiente circostante e la conduttività elettrica del sistema.

L'area anodica è la regione dove avviene l'ossidazione del metallo con la conseguente perdita di elettroni. La corrosione sulla superficie anodica è governata non solo dalla corrente totale generata ma è anche funzione dell'intensità della corrente all'anodo. Poiché tutti gli altri fattori sono fissi, come la differenza di potenziale tra i due metalli e la resistività del suolo (per una data area), l'intensità della corrente anodica è principalmente una funzione delle aree relative delle superfici del catodo e dell'anodo [6].

L'area catodica è la regione dove avviene la riduzione dell'ossigeno o di un altro agente ossidante, generando elettroni. Per evitare la corrosione, si cerca di mantenere un elevato rapporto tra l'area dell'anodo e l'area del catodo, oppure si cerca di evitare di collegare i sistemi di messa a terra a piccole infrastrutture sotterrate. In base alla relazione che vi è tra le aree di interesse, vengono stabiliti i seguenti controlli:

- Controllo Catodico, in cui l'area anodica è più ampia dell'area catodica. Il flusso di corrente di corrosione porta alla polarizzazione del catodo; di conseguenza, il sistema di corrosione si avvicina al potenziale a circuito aperto dell'anodo. Pertanto, la corrente di corrosione generata è governata quasi interamente dalle caratteristiche di polarizzazione del catodo. Più piccolo è il catodo, più velocemente si polarizzerà e ridurrà la corrente di corrosione. Questa relazione di area può essere tollerata per un efficace controllo della corrosione. Se l'area dell'anodo rimane invariata in questo modo, l'intensità della corrente anodica aumenta in proporzione diretta all'area del catodo.
- Controllo anodico, in cui l'area catodica è più ampia dell'area anodica. Quando sono accoppiati due metalli, si verifica poco cambiamento nel potenziale del catodo, mentre l'anodo si polarizza quasi al potenziale a circuito aperto del catodo. La corrente di corrosione generata è governata quasi interamente dalle caratteristiche di polarizzazione dell'anodo ed è in proporzione diretta all'area dell'anodo.
- Controllo misto, in cui le aree catodica e anodica sono molto simili. Il flusso di corrente di corrosione porta alla polarizzazione sia dell'anodo che del catodo.

Il potenziale di questo sistema di corrosione si trova tra il potenziale a circuito aperto rispettivamente dell'anodo e del catodo.

Questo è il tipo di sistema spesso incontrato negli impianti industriali, in particolare negli impianti di cemento, che hanno messa a terra in rame, tubazioni di servizio e strutture sotterranee. Un'area di superficie catodica ampliata in un sistema di controllo misto aumenta le correnti di corrosione. È questa condizione che causa molte difficoltà di corrosione derivanti dall'uso di grandi quantità di rame sepolto e collegato a strutture sotterranee per ottenere una bassa resistenza di terra. La gravità di quanto sopra, può essere illustrata quando i sistemi di tubazioni rivestite interrate sono messi a terra. Sebbene il rivestimento riduca la corrente totale di corrosione generata, l'intensità della corrente di corrosione in qualsiasi difetto o area debole del tubo sarà maggiore. Pertanto, a meno che il rivestimento non sia perfetto, la penetrazione del tubo può essere più rapida rispetto a se il tubo fosse installato senza rivestimento. Pertanto, anche se un'area catodica ampia può offrire vantaggi nel controllo della corrosione sotto un sistema misto, è importante mantenere un equilibrio e ottimizzare le strategie di protezione per garantire una protezione efficace e duratura delle strutture metalliche.

## 2.7.2 Resistenza elettrica

La corrente della cella galvanica è inversamente proporzionale alla resistenza che vi è tra le superfici metalliche (nonché alla distanza tra di loro), la quale a sua volta è proporzionale alla resistività del terreno. Un terreno a bassa resistività presenterà una corrente di corrosione maggiore, rispetto ad un terreno ad alta resistività, con distanze considerevoli tra la tubazione e il sistema di messa a terra[15].

## 2.7.3 Continuità elettrica

La continuità elettrica tra le tubazioni interrate e gli impianti di terra è un aspetto fondamentale nella gestione della corrosione delle strutture interrate. Le tubazioni interrate, se collegate agli impianti di terra e se non appositamente realizzate per essere elettricamente continue mediante saldature, ecc., presenteranno una piccola area anodica rispetto all'impianto di terra. In pratica questo sistema può essere identificato come tubazioni con attacchi tramite flange.

Una corretta continuità elettrica può influenzare la distribuzione delle correnti elettriche nel terreno e contribuire a mitigare la corrosione delle tubazioni metalliche. Ciò riduce la probabilità di localizzazioni di corrente elettrica elevata, che possono causare corrosione localizzata o accelerata. Essa influisce anche sulla riduzione delle differenze di potenziale. Infatti, una buona continuità elettrica tra le tubazioni interrate e gli impianti di terra aiuta a mantenere un potenziale uniforme lungo la

lunghezza delle tubazioni. Ciò riduce il rischio di differenze di potenziale elettrico significative tra diverse parti della struttura, che possono accelerare la corrosione. La continuità elettrica è essenziale per l'efficacia dei sistemi di protezione catodica [15], [20], che utilizzano correnti elettriche per controllare la corrosione delle tubazioni interrate. Una buona continuità consente al sistema di protezione catodica di distribuire efficacemente la corrente lungo la lunghezza delle tubazioni e allo stesso tempo permette di minimizzare le perdite di corrente dovute alle discontinuità, che contribuiscono alla corrosione delle tubazioni.

## 2.8 Corrosione dei sistemi di terra delle cabine primarie

La corrosione nei sistemi di messa a terra delle cabine elettriche è un problema critico che può influenzare significativamente la sicurezza e l'affidabilità delle infrastrutture elettriche. Le cabine primarie svolgono un ruolo fondamentale nella distribuzione dell'energia elettrica, garantendo che l'elettricità sia distribuita in modo sicuro ed efficiente dalle reti di trasmissione ad alta tensione ai sistemi di distribuzione a bassa tensione.

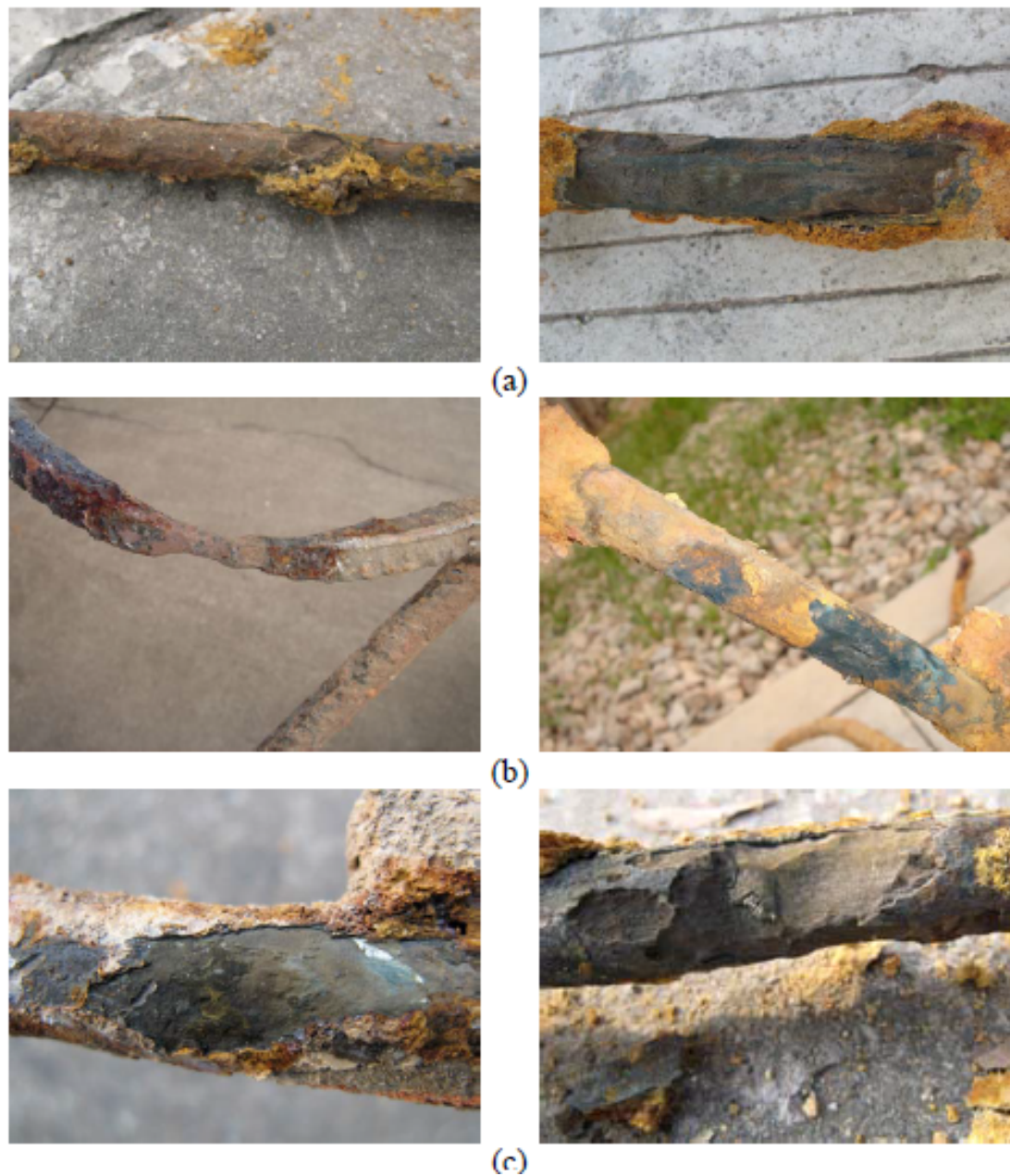
I sistemi di messa a terra all'interno di queste cabine sono progettati per fornire un percorso sicuro per la corrente elettrica in caso di guasto, proteggendo sia le persone che le apparecchiature. Tuttavia, l'esposizione costante a vari agenti corrosivi presenti nel suolo, come l'umidità, i sali solubili e le variazioni del pH, può compromettere l'integrità dei materiali di messa a terra, portando a fenomeni di corrosione che ne riducono l'efficacia, come visto nei paragrafi precedenti di questo capitolo.

La corrosione può manifestarsi in diverse forme, tra cui la corrosione uniforme, dove il deterioramento si verifica su tutta la superficie del materiale, e la corrosione localizzata o pitting, caratterizzata da attacchi puntuali che possono perforare il metallo (in figura 2.9), come anticipato nel paragrafo 2.1. Questi processi corrosivi possono indebolire i conduttori di messa a terra, aumentando il rischio di malfunzionamenti e riducendo la capacità del sistema di gestire correnti di guasto.

### 2.8.1 Materiali utilizzati per la messa a terra

Le reti di messa a terra possono essere in acciaio, presentando dei costi ridotti oppure in rame, le quali presentano una resistenza alla corrosione e conducibilità notevolmente migliori di quelle dell'acciaio.

Il rame è di gran lunga il metallo più comune utilizzato per i conduttori della rete di terra. L'acciaio rivestito di rame viene solitamente utilizzato per i picchetti di terra e talvolta per i conduttori di terra. Il motivo principale per utilizzare il rame



**Figura 2.9:** Forme di corrosione di (a) corrosione uniforme, (b) corrosione per vaiolatura e (c) Corrosione influenzata dai microbi nella rete di messa a terra della sottostazione [10].

è la sua proprietà di elevata conduttività e assenza di corrosione, poiché è catodico rispetto ad altri metalli che potrebbero essere sepolti nelle vicinanze. Pertanto

non vi è alcun dubbio sull'integrità della rete di terra, purché i conduttori siano di dimensioni adeguate e non soggetti a danni meccanici.

Purtroppo, però, una rete di rame forma celle galvaniche con tubi, condutture e altri materiali d'acciaio interrati, ai quali è collegata ed è quindi suscettibile ad accelerare la corrosione di questi ultimi. Si possono analizzare i criteri per la scelta dei materiali per un sistema di messa a terra, cioè:

- resistere alla fusione e al deterioramento dei giunti elettrici nella combinazione più avversa di entità della corrente di guasto e durata del guasto a cui potrebbe essere soggetto;
- meccanicamente robusto in misura elevata, soprattutto in luoghi esposti a danni fisici;
- avere una conduttività sufficiente, da non contribuire in modo sostanziale a pericolose differenze di potenziale locale.

Si può notare che possono essere vantaggiosamente utilizzati anche materiali diversi dal rame, quali alluminio, rame o acciaio.

## 2.8.2 Calcolo della corrosione complessiva

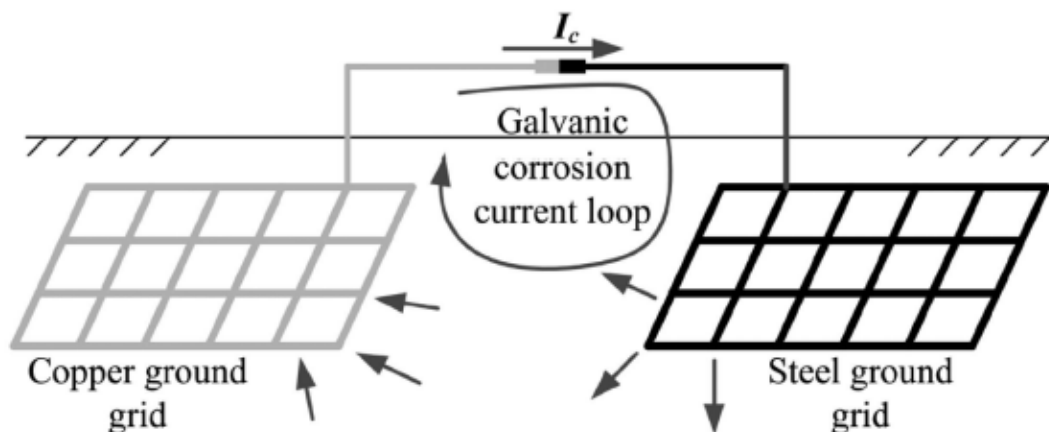
Le reti di messa a terra delle centrali elettriche situate a breve distanza l'una dall'altra sono spesso interconnesse per ridurre l'impedenza di terra. Quando il materiale da cui sono fatte queste reti di messa a terra è diverso, si verifica la corrosione galvanica, che minaccia gravemente la sicurezza di messa a terra di una centrale elettrica, un esempio è la figura 2.10.

Molti studi hanno condotto esperimenti sulla corrosione utilizzando piccole coppie galvaniche per derivare le influenze del materiale dell'elettrodo di terra, della temperatura, della resistività del suolo e del pH sulle caratteristiche della corrosione, per un'analisi qualitativa del tasso di corrosione galvanica della rete di messa a terra.

In effetti, nella pratica dei progetti di messa a terra delle centrali elettriche, ci sono numerosi casi in cui i conduttori metallici differenti sono connessi, come nelle centrali di accumulo per pompaggio, che impiegano sia conduttori piatti in acciaio che in rame, centrali elettriche che utilizzano la protezione catodica, e centrali elettriche in cui i conduttori in rame vengono utilizzati per ricostruire una rete di messa a terra in acciaio.

Per prevedere e valutare efficacemente la durata residua delle reti di messa a terra in acciaio e garantire la sicurezza di messa a terra, è necessario un metodo per calcolare il tasso di corrosione galvanica risultante dalla connessione delle reti di messa a terra composte da conduttori metallici diversi [29].





**Figura 2.10:** Schema corrosione galvanica quando sono collegate due reti di terra in rame e acciaio.

La valutazione della corrosione delle reti di terra, viene affrontata attraverso alcuni passaggi: valutazione della corrosione chimica dei due materiali ed in seguito, la formazione della cella galvanica, in cui l'elettrolita interposto, è il suolo.

### Corrosione Naturale della Rete di Messa a Terra in Acciaio

Il suolo è un mezzo eterogeneo che contiene diverse sostanze ossidanti, come l' $O_2$  e gli  $H^+$ . Quando una rete di messa a terra in acciaio viene sepolta nel terreno, si forma un doppio strato elettrico sulla superficie dell'elettrodo, il quale genera un potenziale dell'elettrodo e induce le seguenti reazioni elettrochimiche [29]:

1. **Reazione Anodica:**



2. **Reazione Catodica:**



Man mano che le due reazioni progrediscono, la quantità di  $Fe$  nell'elettrodo di terra diminuisce continuamente, così come il raggio del conduttore, questa è la corrosione naturale della rete di messa a terra in acciaio nel suolo. Le reazioni avvengono sulla stessa superficie dell'elettrodo e da questa si può calcolare il potenziale di corrosione  $E_{1,corr}$ :

$$E_{1,corr} = E_1 + \eta_1 = E_2 + \eta_2 \quad (2.6)$$

Dove:

- $E_1$  ed  $E_2$  e sono i potenziali di equilibrio delle reazioni 1 e 2 rispettivamente. Essi sono definiti dall'equazione di Nernst [30], in cui i potenziali delle reazioni anodiche e catodiche possano essere influenzati dai cambiamenti nella temperatura e nella composizione chimica dell'ambiente. Il potenziale di riduzione può essere espresso come:

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{[\text{Products}]}{[\text{Reactants}]} \right) \quad (2.7)$$

dove:

- $E$ , potenziale elettrochimico di equilibrio della reazione in questione.
  - $E^\circ$ , potenziale elettrodo standard a 25°C in una soluzione normale dello ione formato dall'ossidazione dei reagenti in questione.
  - $R$ , costante di distribuzione di Boltzmann, normalmente indicata come costante universale dei gas =  $8.31 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .
  - $T$ , temperatura assoluta, °K.
  - $n$ , la carica dello ione che viene ridotto.
  - $F$ , la costante di Faraday, il numero di coulomb per grammo-mole di elettroni =  $9.63 \times 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$ .
- $\eta_1$  e  $\eta_2$  sono le sovratensioni delle reazioni 1 e 2, dove  $\eta_1 > 0$  e  $\eta_2 < 0$ .

Quando i potenziali si discostano dal potenziale di equilibrio, la superficie dell'elettrodo diventa un anodo o un catodo. Tali sovratensioni dall'equazione di Tafel [30], sono definite come potenziale di riduzione, costituito da un potenziale di polarizzazione di attivazione e uno di concentrazione.

La sovratensione di attivazione è data da:

$$\eta_a = \beta_a \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (2.8)$$

dove:

- $\eta_a$ , sovratensione o variazione tra il potenziale misurato e il potenziale alla densità di corrente di interesse. Il pedice "a" indica che questa polarizzazione è la "polarizzazione di attivazione", che si verifica a basse densità di corrente vicino al potenziale di equilibrio.
- $\beta_a$ , pendenza di Tafel.
- $i$ , densità di corrente, A/m<sup>2</sup>.
- $i_0$ , densità di corrente di scambio, A/m<sup>2</sup>.

La sovratensione di concentrazione è definita come:

$$\eta_c = 2.3 \frac{RT}{nF} \log \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.9)$$

dove:

- $\eta_c$  è la sovratensione, o polarizzazione, causata dalla diffusione di specie riducibili alla superficie metallica.
- $F$  è la costante di Faraday.
- $i$  è la corrente sull'elettrodo.
- $i_L$  è la densità di corrente limite determinata dalla diffusività delle specie riducibili; questo è il tasso massimo di riduzione possibile per un dato sistema di corrosione.

Il potenziale di riduzione vale:

$$\eta_{\text{red}} = -\beta_c \log \frac{i}{i_0} + 2.3 \frac{RT}{nF} \log \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.10)$$

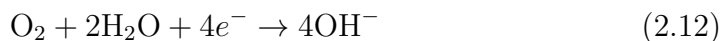
### Corrosione Naturale della Rete di Messa a Terra in Rame

Quando una rete di messa a terra in rame è sepolta nel suolo, avvengono le seguenti reazioni elettrochimiche sulla superficie dell'elettrodo di terra:

**1. Reazione Anodica:**



**2. Reazione Catodica:**



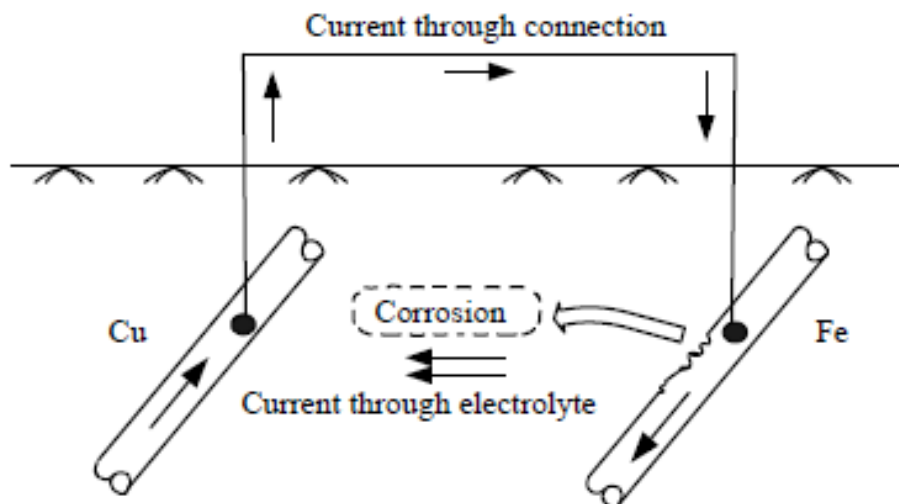
Il potenziale di corrosione  $E_{2,corr}$  della rete di messa a terra in rame può essere espresso come segue:

$$E_{2,corr} = E_3 + \eta_3 = E_4 + \eta_4 \quad (2.13)$$

Dove  $E_3$  ed  $E_4$  sono i potenziali di equilibrio delle due reazioni e  $\eta_3$  e  $\eta_4$  sono le sovratensioni delle reazioni, con  $\eta_3 > 0$  e  $\eta_4 < 0$ . [29]

### Corrosione galvanica tra i sistemi di terra

Per valutare la corrosione totale, possiamo considerare le due reti come due conduttori costituiti da due metalli differenti; esiste perciò una differenza di potenziale elettrico tra i due metalli, come in figura 2.11. L'elettrolita (suolo) permette ad una certa corrente di fluire e causa la corrosione nell'acciaio. La corrosione galvanica tende ad essere particolarmente grave se l'area superficiale del materiale anodico è piccola rispetto a quella del catodo. In questo caso, la corrente galvanica è concentrata su una piccola area anodica, risultando in una penetrazione corrosiva rapida del materiale anodico [10],[31].



**Figura 2.11:** Schema corrosione galvanica [31].

In questo caso il potenziale di corrosione di una rete di messa a terra in acciaio è notevolmente inferiore a quello di una rete di messa a terra in rame nel suolo, e c'è una notevole differenza di potenziale di corrosione  $\Delta E$  tra di loro:

$$\Delta E = E_{2,corr} - E_{1,corr} > 0 \quad (2.14)$$

Quando le reti di messa a terra in rame e acciaio sono connesse, la corrente fluisce dalla rete di messa a terra in rame a quella in acciaio a causa della differenza di potenziale di corrosione. Questa corrente aumenta il tasso di corrosione della rete di messa a terra in acciaio.

Secondo il principio elettrochimico, quando una corrente di corrosione galvanica fluisce attraverso lo strato doppio elettrico sulla superficie di un elettrodo di terra, le sue caratteristiche volt-ampere possono essere espresse nel seguente modo [32]:

$$i_{corr} = i_0 \left( e^{\frac{\alpha_a F \eta}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}} \right) \quad (2.15)$$

In questa equazione:

- $i_0$  è la densità di corrente di scambio della reazione dell'elettrodo sepolto;
- $\alpha_a$  e  $-\alpha_c$  sono i coefficienti di trasferimento di carica rispettivamente dell'anodo e del catodo;
- $R$  è la costante universale dei gas;
- $T$  è la temperatura
- $F$  è la costante di Faraday
- $\eta$  è la sovratensione all'interfaccia tra l'elettrodo e l'elettrolita.

### 2.8.3 Rimedi per la corrosione della rete di messa a terra delle cabine elettriche

I metodi più comuni, disponibili per la protezione delle reti di messa a terra in acciaio, includono la verniciatura metallica, la protezione catodica e la tolleranza alla corrosione nell'area trasversale dei conduttori.

La verniciatura è stata utilizzata per controllare il tasso di corrosione. L'acciaio zincato (galvanizzato) è il tipo di rivestimento più utilizzato. Il rivestimento di zinco protegge l'acciaio dalla corrosione attraverso due aspetti importanti, la passività e la galvanizzazione. La passività è la formazione di un sottile film superficiale ossidato, non conduttivo, che ostacola il flusso di corrente elettrica e riduce il tasso di corrosione. La galvanizzazione consiste nel fatto che lo zinco ha un alto potenziale elettrico e si sacrifica per proteggere l'acciaio. Tuttavia, la protezione fornita dal rivestimento di zinco dipende dal suo spessore e dalla corrosività del suolo. È stato osservato che, quando la continuità del rivestimento è distrutta, il tasso di corrosione del metallo base è normale o superiore alla norma. Pertanto, la galvanizzazione non è raccomandata come mezzo di protezione di base dei conduttori di messa a terra in acciaio.

La protezione catodica opera bloccando il flusso di corrente dal metallo all'elettrolita neutralizzandolo con una corrente più forte di polarità opposta da una fonte esterna. Anodi sacrificabili e corrente impressa sono i due metodi di base di protezione catodica. Si è scoperto che è piuttosto difficile fornire un sistema economico e affidabile per una protezione efficace dei conduttori in acciaio. Ciò è dovuto alla presenza di numerosi cavi, acciaio per rinforzi, colonne d'acciaio ecc., che generalmente sono connessi con la rete di messa a terra.

Inoltre, il sistema di corrente impressa può portare a una seria corrosione di altri metalli a meno che non si presti la dovuta attenzione al momento dell'installazione.

Le prestazioni affidabili dei sistemi di messa a terra in acciaio possono essere garantite selezionando un'area trasversale del conduttore in modo che le sue caratteristiche di fusione siano accettabili per anni di operazione. Per soddisfare questo requisito, dovrebbe essere prevista una tolleranza per la corrosione sia uniforme che a pitting durante la selezione dell'area dei conduttori di messa a terra basata sui dati di corrosione del suolo.[10]

Tali metodi di protezione verranno approfonditi nel capitolo 4.

## 2.9 Corrosione dell'acciaio indotta dalle correnti vaganti nelle infrastrutture

La corrosione dell'acciaio è spesso la causa principale di danni a vari tipi di infrastrutture, come ponti in acciaio, strutture in cemento armato, condutture e piattaforme marine. Un altro elemento importante riguardante la costruzione di infrastrutture è il cemento armato, in quanto presenta un basso costo e una facilità di formatura a temperatura ambiente. La sinergia di entrambi i materiali (cioè calcestruzzo e acciaio) fornisce una combinazione di elevata resistenza alla compressione ed elevate proprietà di trazione. Pertanto, il cemento armato è un materiale composito di uso globale e serve una varietà di applicazioni. Sebbene il cemento armato sia considerato di elevata durabilità, può soffrire di vari meccanismi di degrado legati al cemento o all'acciaio. La corrosione delle armature in acciaio è stata identificata come la ragione principale della ridotta durata di servizio delle strutture in cemento armato.

L'armatura in acciaio nel cemento armato è normalmente in uno stato termodinamicamente stabile. La passività dell'acciaio è dovuta rispettivamente all'elevata alcalinità della matrice del calcestruzzo e dell'acqua dei pori del calcestruzzo. Inoltre, il calcestruzzo funge da barriera fisica: il calcestruzzo ben consolidato e adeguatamente stagionato con un rapporto acqua-cemento ottimale ha una bassa permeabilità e funge da barriera contro la penetrazione di sostanze che inducono corrosione, come gli ioni cloruro o anidride carbonica.

Come già menzionato, l'acciaio d'armatura si corrode principalmente a causa della carbonatazione della matrice del calcestruzzo e della conseguente perdita di alcalinità nell'interfaccia acciaio-calcestruzzo e della presenza di ioni cloruro in quantità sufficienti in prossimità della superficie dell'acciaio. Indipendentemente dal fattore responsabile dell'innescò della corrosione, una volta distrutto il film passivo, la superficie dell'acciaio corrosivo funzionerà come un elettrodo misto cioè un "composito" di anodi (aree attive) e catodi (aree non attive). La separazione delle aree anodiche e catodiche sulla superficie dell'acciaio determina una differenza di potenziale e innesca reazioni di ossidazione e riduzione.

Durante il processo di corrosione, gli elettroni fluiscono dalle zone anodiche a quelle

catodiche, mentre gli ioni fluiscono nell'elettrolita circostante (si forma quindi una cella di corrosione). L'acqua dei pori del calcestruzzo funziona come mezzo acquoso; vale a dire funge da elettrolita complesso [21].

## Capitolo 3

# Correnti vaganti nei sistemi di trazione

Nell'ambito dei sistemi di trazione, uno degli aspetti meno visibili ma critici per la sostenibilità e la longevità delle infrastrutture è rappresentato dalle correnti vaganti. Con lo sviluppo dei sistemi di trazione, si sono gradualmente manifestati molti impatti negativi, come la corrosione elettrochimica sui binari e sulle infrastrutture metalliche sepolte di terzi, un esempio in figura 3.1, causati dalla corrente vagante. Questo tipo di corrosione elettrochimica causa inoltre, una grave minaccia per la struttura metallica sepolta e per la sicurezza delle persone.

Queste correnti elettriche non intenzionali, a causa del non perfetto isolamento binario-terreno (dalla norma CEI EN 50122-1 [1]), si disperdono nel terreno, rappresentando una problematica riguardante la progettazione e sicurezza nell'ingegneria delle infrastrutture interrato e cementizie. La loro gestione e mitigazione sono essenziali per garantire l'integrità e la sicurezza delle strutture a lungo termine.

Le correnti vaganti possono originarsi da diverse fonti, come visto nel paragrafo 2.5.1, legate principalmente ai sistemi di trazione elettrica, tra cui la propulsione ferroviaria e tranviaria. La dispersione di queste correnti nel terreno o attraverso altre strutture metalliche, può avere conseguenze severe, accelerando i processi corrosivi e compromettendo la durabilità delle infrastrutture. La comprensione delle dinamiche di tali correnti, delle loro origini e dei relativi effetti corrosivi è fondamentale per lo sviluppo di strategie efficaci di prevenzione e intervento.

In questo capitolo, si esploreranno le definizioni e le caratteristiche principali delle correnti vaganti, analizzando come e perché queste correnti si generano nei sistemi di trazione.

Successivamente, verranno discusse le implicazioni di queste correnti per le infrastrutture interrato e cementizie, evidenziando i rischi associati e le possibili soluzioni



per mitigare l'impatto corrosivo. Inoltre, si cercherà di fornire una panoramica dettagliata dello stato dell'arte, in particolar modo accentuando gli effetti, meccanismi e cause e tipi di protezione.



Figura 3.1: Esempi di corrosione [33].

### 3.1 Origini e cause delle correnti vaganti nei sistemi di trazione

Le correnti vaganti nei sistemi di trazione sono un fenomeno che può avere conseguenze significative sulla durabilità e sulla sicurezza delle infrastrutture interrato. Per affrontare efficacemente questa problematica, è fondamentale comprendere le diverse fonti da cui queste correnti possono originarsi.

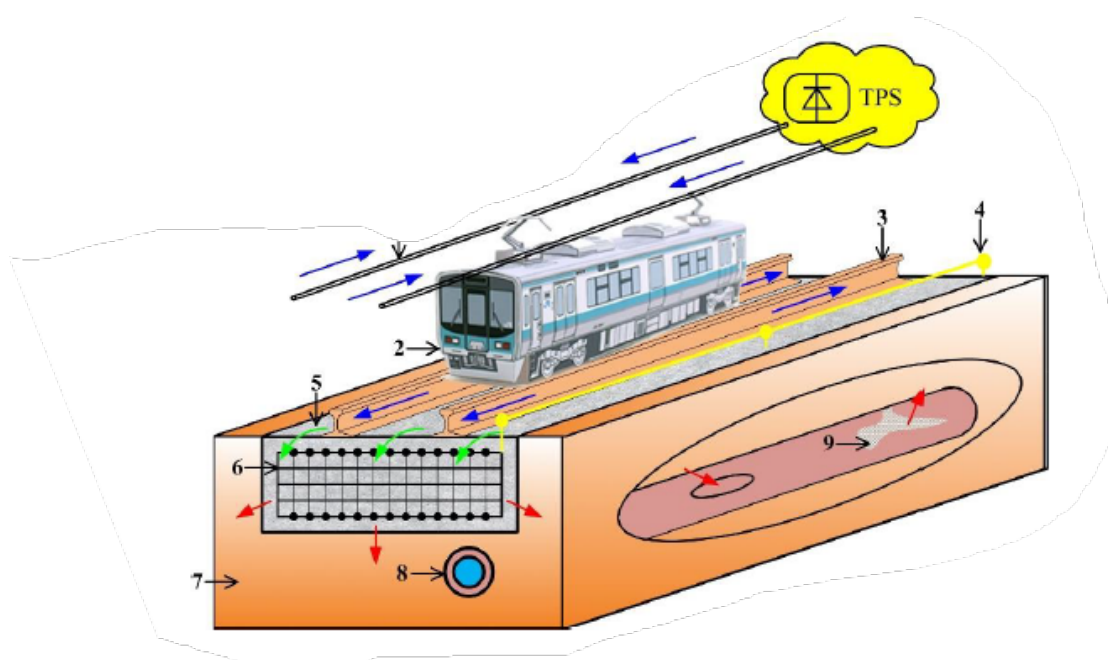
Una componente cruciale nella generazione di correnti vaganti nei sistemi di trazione ferroviaria, è la configurazione stessa del sistema di alimentazione. I sistemi di trazione elettrica, comunemente utilizzati per treni, tram, metropolitane includono componenti quali rotaie, cavi di alimentazione e il terreno, che insieme costituiscono il circuito di ritorno della corrente elettrica. Perciò, in un sistema ideale, la corrente segue un percorso definito e controllato per poi ritornare alla sua sorgente.

Tuttavia, vi sono diverse variabili legate alla configurazione stessa del sistema, che possono alterare il percorso della corrente, causando di conseguenza, dispersione e possibile corrosione. Oltre a questo fattore scatenante, vi sono altre motivi e cause che provocano la dispersione come ad esempio [8]:

- interazioni elettromagnetiche con altre infrastrutture elettriche vicine. Per esempio, linee di trasmissione ad alta tensione, impianti industriali, o altri sistemi di trasporto possono generare campi elettrici e magnetici che influenzano i sistemi di trazione, inducendo correnti non desiderate che possono migrare verso strutture interrato vicine.

- Il deterioramento fisico delle componenti del sistema di trazione, come la corrosione delle rotaie o il degrado dell'isolamento dei cavi, contribuisce significativamente alla formazione di correnti vaganti. Inoltre, giunti e connessioni inadeguate tra le sezioni delle rotaie possono creare resistenze localizzate elevate, spingendo la corrente a cercare percorsi alternativi meno resistenti, spesso una via di fuga preferenziale è il terreno.
- Le variazioni nella resistività del terreno dovute a fattori ambientali come umidità, temperatura e composizione chimica.
- Manutenzione inadeguata e un monitoraggio insufficiente delle condizioni dell'infrastruttura di trazione possono non rivelare tempestivamente aree a rischio di dispersione di corrente. L'assenza di controlli regolari e di interventi pro-attivi per riparare o migliorare l'isolamento e la continuità del circuito, può lasciare che le correnti vaganti si sviluppino, senza essere rilevate fino a quando non causano danni significativi.

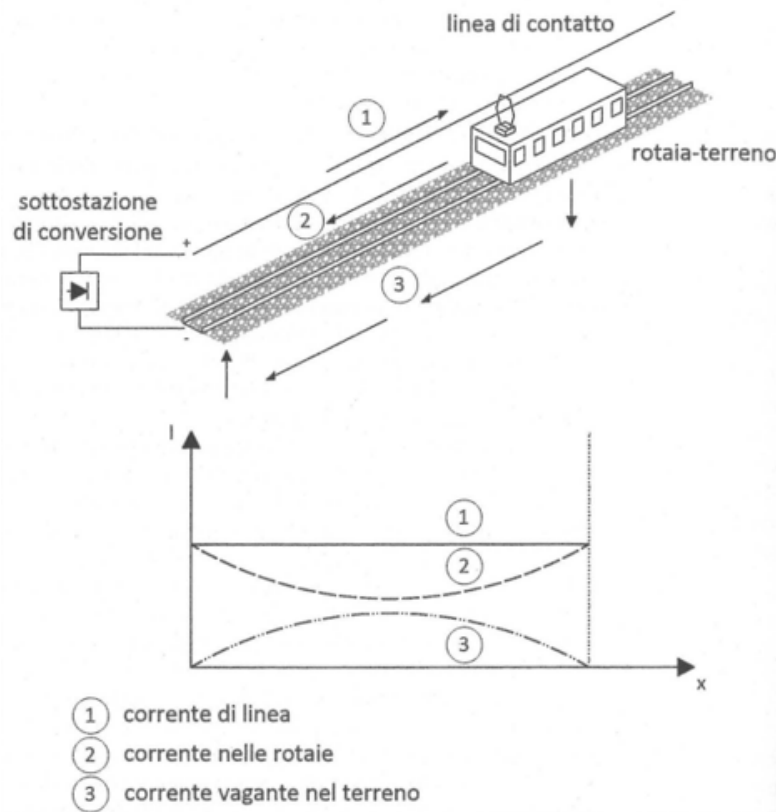
In definitiva, per la trazione, la corrente vagante costituisce un ramo della corrente di ritorno, che esce dalle rotaie e transita nel terreno, un esempio in figura 3.2.



**Figura 3.2:** Distribuzione della corrente vagante nel sistema di trazione, schema 3D [34].

### 3.2 Meccanismo di corrosione nei sistemi di trazione dovuti a correnti vaganti

La figura 3.3 mostra il tipico meccanismo di interferenza della corrente vagante derivante dalla trazione elettrica con il terreno.



**Figura 3.3:** Quota della corrente vagante nel terreno generata dalla presenza in linea di un convoglio ferroviario [17].

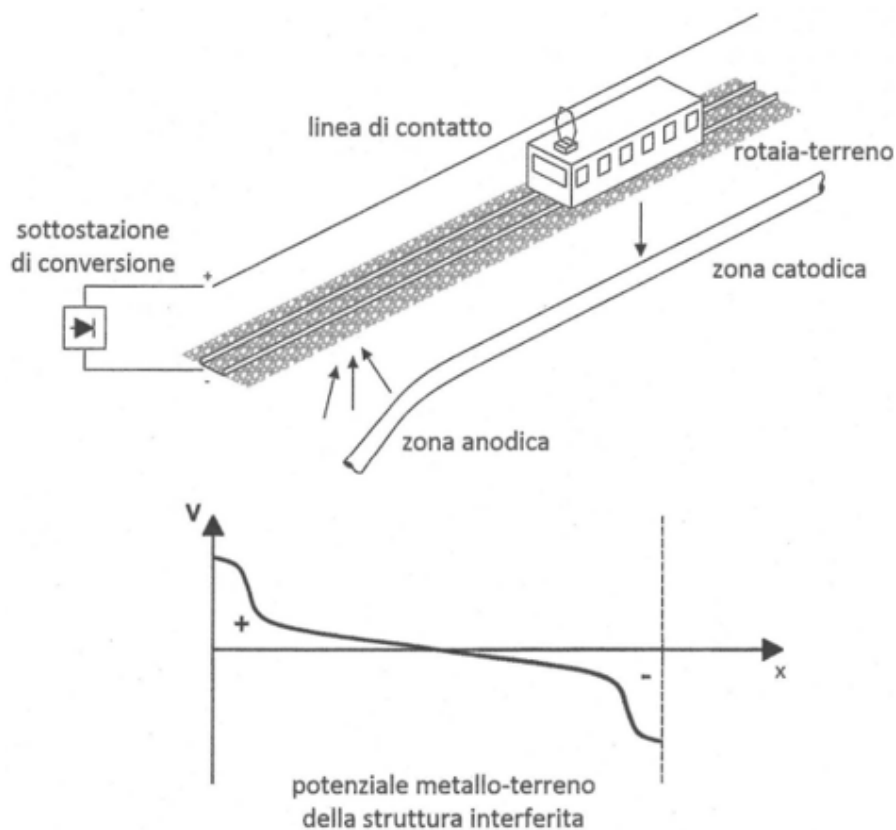
La corrente di alimentazione scorre lungo la linea di contatto aerea, attraversa le motrici di trazione e torna alla sottostazione elettrica SSE, lungo le rotaie. Poiché la resistenza rotaia-terra non può essere resa infinita e la resistenza di rotaia non è diversa da zero, una parte di corrente entrerà nel terreno, con conseguente sviluppo della corrente vagante [6] [35].

Se il binario, conduttore di "ritorno" del circuito di trazione, fosse perfettamente isolato dal terreno, la corrente si chiuderebbe (sotto forma di corrente di elettroni, o corrente di prima specie) tra ogni locomotore e le SSE, senza interessare il terreno. Ciò, in realtà, non accade mai. Il tipo di costruzione dell'armamento ferroviario,

nonché i percorsi fisici del binario, che non sempre costituiscono la via più diretta per il ritorno delle correnti, esibiscono l'esistenza di un'aliquota importante della corrente sia condotta dal terreno. In base ai rilievi sperimentali, tale aliquota può raggiungere in alcuni casi, il 70% della corrente totale [17].

Nell'illustrazione della figura 3.3 si vede come in una situazione semplice, costituita da un unico locomotore ed un'unica SSE, la somma della corrente vagante e della corrente condotta dalle rotaie, rilevate su un'ideale sezione infinita, ortogonale al binario, eguagli in ogni istante (con segno contrario) la corrente circolante nella linea di contatto.

Se vi è presente una struttura metallica interrata nell'ambiente circostante, si avrebbe la costituzione di un'ulteriore via preferenziale per le correnti vaganti. Il potenziale della struttura rispetto al terreno viene alterato come mostrato nella figura 3.4, con la creazione di almeno una zona catodica, dove le correnti entrano nella struttura, e di almeno una zona anodica, dove le correnti escono dalla struttura per tornare alla SSE. La creazione della zona anodica costituisce pericolo di corrosione.



**Figura 3.4:** Corrente vagante nel terreno raccolta da una struttura estranea e spostamento del potenziale della struttura rispetto all'elettrolita [17].

Il principio di base della diffusione delle correnti vaganti è mostrato in Figura 3.5 [19][34][36]. In tale figura si nota la formazione di tre aree per la corrente vagante:

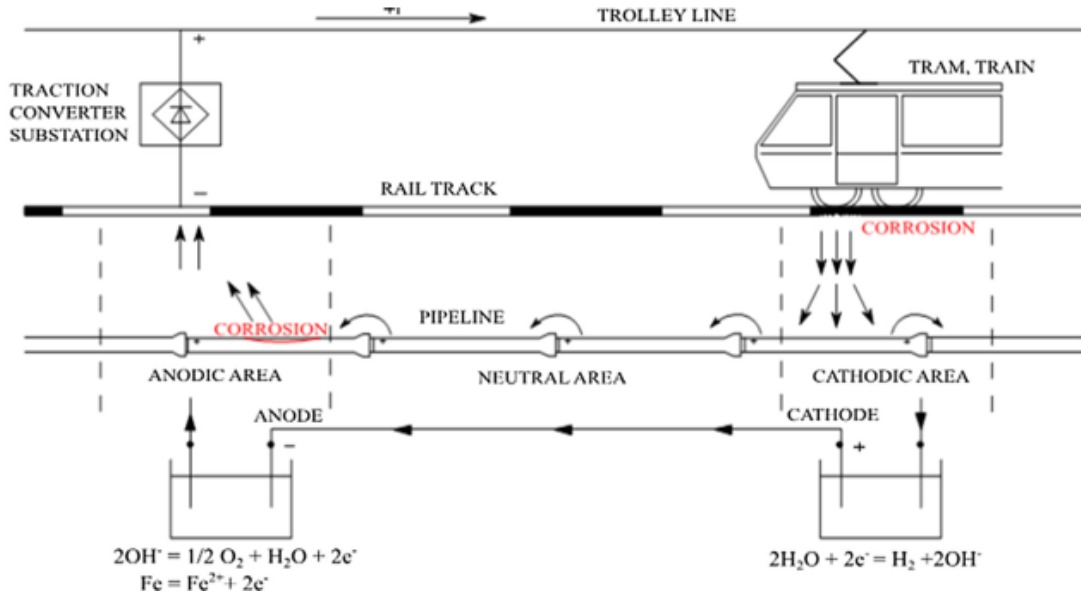


Figura 3.5: Principio base della diffusione delle correnti vaganti [19].

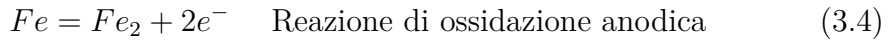
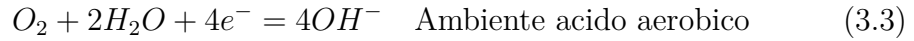
- Area catodica, che si forma quando la corrente vagante entra nella tubazione metallica interrata; in tale area avviene la reazione di riduzione. Il potenziale della struttura metallica si ridurrà quando si verificherà la reazione di riduzione. Questa zona non è minacciata dalla corrosione elettrochimica, ma se il valore potenziale nella zona catodica è troppo grande, viene generata la precipitazione di idrogeno sulla superficie della tubazione, che causerà la caduta del rivestimento anticorrosivo dalla tubazione interrata. **Corrosione da evoluzione dell'idrogeno(catodo)**



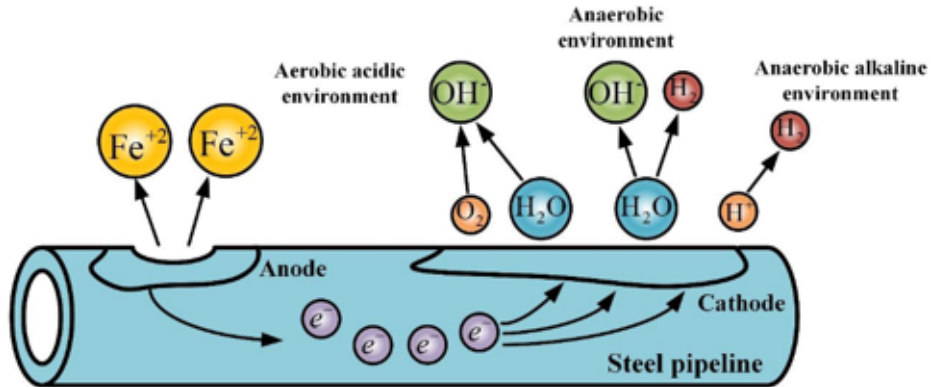
- Area anodica [6][19], che si forma quando la corrente vagante lascia le strutture conduttrici, ovvero dove avviene una reazione di corrosione anodica, con conseguente ossidazione (dissoluzione) del metallo. Quest'ultimo perde elettroni, che passano alla zona catodica, dove avvengono, come anticipato precedentemente, le reazioni di riduzione. Questa zona è spesso associata alla formazione di ruggine sul ferro o al deterioramento di altri metalli a causa dell'ossidazione. La velocità di corrosione e l'estensione del danno possono

dipendere da molti fattori, inclusa la composizione del metallo, la presenza di rivestimenti protettivi, la natura dell'ambiente corrosivo e soprattutto presenta di correnti di dispersione [34].

**Corrosione per assorbimento di ossigeno (anodo)**



Il potenziale della tubazione interrata aumenterà quando si verifica la reazione di ossidazione. Il metallo viene ossidato per produrre ioni metallici immessi nell'elettrolita (suolo). Quindi si produce la corrosione del metallo a causa della perdita di ioni metallici.



**Figura 3.6:** Elaborazione delle reazioni chimiche che avvengono sulla tubazione interrata a causa delle correnti vaganti [34].

I danni provocati dalla corrosione elettrochimica possono raggiungere livelli significativi di gravità, poiché la parte danneggiata dell'apparecchio deve essere sostituita con una nuova. Durante la riparazione del componente, si potrebbe avere gran parte dell'impianto fuori servizio. Non solo per la tubazione metallica, la corrente vagante accelera il tasso di corrosione, ma anche per una varietà di strutture metalliche come la rotaia, i suoi accessori, il cemento armato, mettendo a repentaglio la salute e la vita delle persone. Alcuni esempi di danni ai dispositivi causati dalle correnti vaganti sono mostrati in figura 3.7.



Figura 3.7: Esempi di corrosione da correnti vaganti [34].

### 3.3 Aspetti di sicurezza

Le prescrizioni riguardanti la corrente di dispersione per la trazione sono:

- CEI EN 50122-2 Provvedimenti contro gli effetti delle correnti vaganti causati da sistemi di trazione a corrente continua [1];
- CEI EN 50122-3 Interazione mutua di sistemi di trazione a corrente alternata e a corrente continua [1];
- Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua CEI EN 50123 [2].

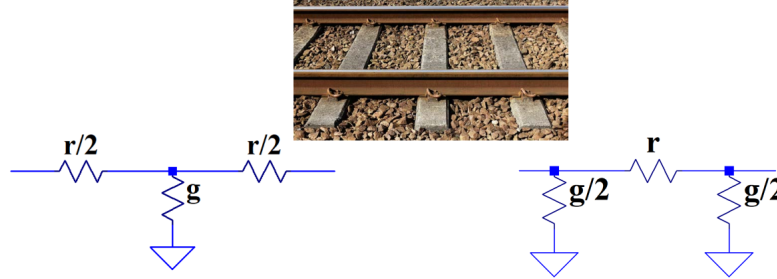
Dalle norme sopra citate, emergono due problematiche di riferimento:

1. limitazione del potenziale di rotaia sotto i limiti di sicurezza;
2. protezione contro la corrosione dei corpi metallici interrati dovuti alle correnti vaganti.

Di seguito vengono analizzati entrambi gli aspetti.

### 3.3.1 Caratteristiche del potenziale di rotaia

I due parametri che regolano l'andamento delle correnti disperse e del potenziale di rotaia sono la *resistenza di rotaia*  $r$  e la *conduttanza verso terra*  $g$ .



**Figura 3.8:** Modello a T o  $\pi$  del binario [37].

L'esperienza dimostra che non vi sono danni ai binari per 25 anni se la corrente vagante media per unità di lunghezza non supera  $I'_{max} = 2,5mA/m$ , per il singolo binario. Se i valori della conduttanza verso terra  $G_{RE}$  e del potenziale medio di rotaia non supera certi valori, tali investigazione non è necessaria [1][38]:

$$G_{RE} \leq 0,5S/km \quad U_{RE} \leq +5V \quad \text{piattaforme aperte (ferrovia)}$$

$$G_{RE} \leq 2,5S/km \quad U_{RE} \leq +1V \quad \text{piattaforme chiuse (stradali)}$$

dall'equazione:

$$G_{RE} = I/U_{RE} \quad (3.5)$$

Il rispetto di tale requisito non garantisce però la totale non corrosione della rotaia. Come possiamo misurare però, la resistenza di rotaia e la conduttanza verso terra?

#### Misura della resistenza di rotaia

Per misurare tale parametro consideriamo la seguente figura 3.9. Viene considerato un tratto di binario, in cui le rotaie sono collegate in cortocircuito, a una distanza tra esse di almeno 20 m. Si applica un generatore di tensione CC a metà tra le due rotaie, con un interruttore che apre e chiude il circuito. La corrente, in questo modo, si divide nei due rami di binario.

E' necessario misurare le tensioni  $U_{on/off}$  dell'interruttore, da eliminare dalla misura eventuali disturbi. Le conduttanze  $g$  su tratti piccoli sono trascurabili, per questo motivo si effettua la misura su tratti corti (10 m).

In seguito, viene effettuata una misura di corrente, dall'equazione:

$$R_{R,10m} = \frac{(U_{A,on} - U_{A,off}) + (U_{B,on} - U_{B,off})}{I} \quad (3.6)$$



Le misure vanno effettuate in assenza di corrente di trazione. Inoltre, la corrente  $I$  di misura deve essere periodicamente interrotta e stabilita, al fine di verificare altri effetti durante il periodo di interruzione. In tale equazione 3.6, vengono calcolate anche le cadute di tensione  $U_A$  e  $U_B$  per ognuna delle due sezioni.

Un altro requisito da rispettare è, che all'interno dell'area di misura non vi devono essere collegamenti e connessioni, anche se induttive, tra le rotaie e/o tra i binari.

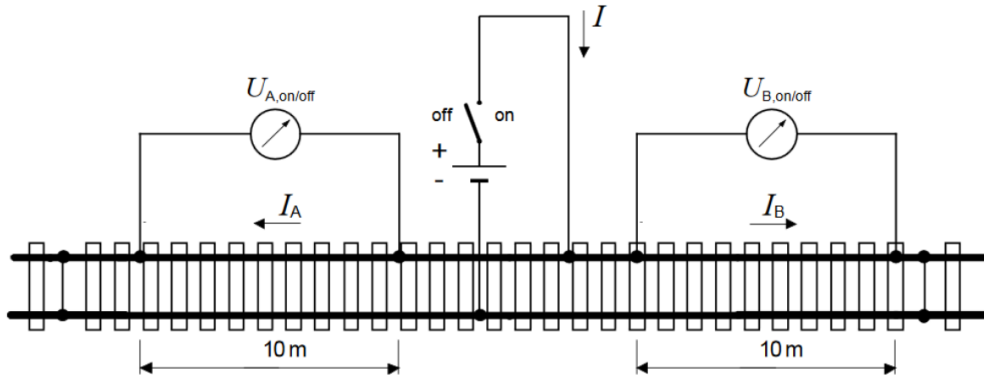


Figura 3.9: Circuito di misura della resistenza di rotaia di lunghezza 10 m [1].

### Misura della conduttanza verso terra

Per descrivere tale misura, si farà utilizzo della seguente figura 3.10. Si separa un pezzo di rotaia, con la sezione di binario esaminata, divisa dal resto della linea mediante giunti isolati o interruzione di rotaia. La lunghezza della sezione non deve superare i 2 km.

La corrente nel circuito deve essere interrotta e stabilita, quindi è necessario un interruttore. Bisogna inoltre, predisporre un dispersore (indicato con "1" in figura 3.10, con cui si andrà a misurare il potenziale di rotaia nel tratto di binario separato. Il generatore di tensione CC è posizionato tra la rotaia e il pezzo di binario staccato. Dalla seguente equazione si ricava:

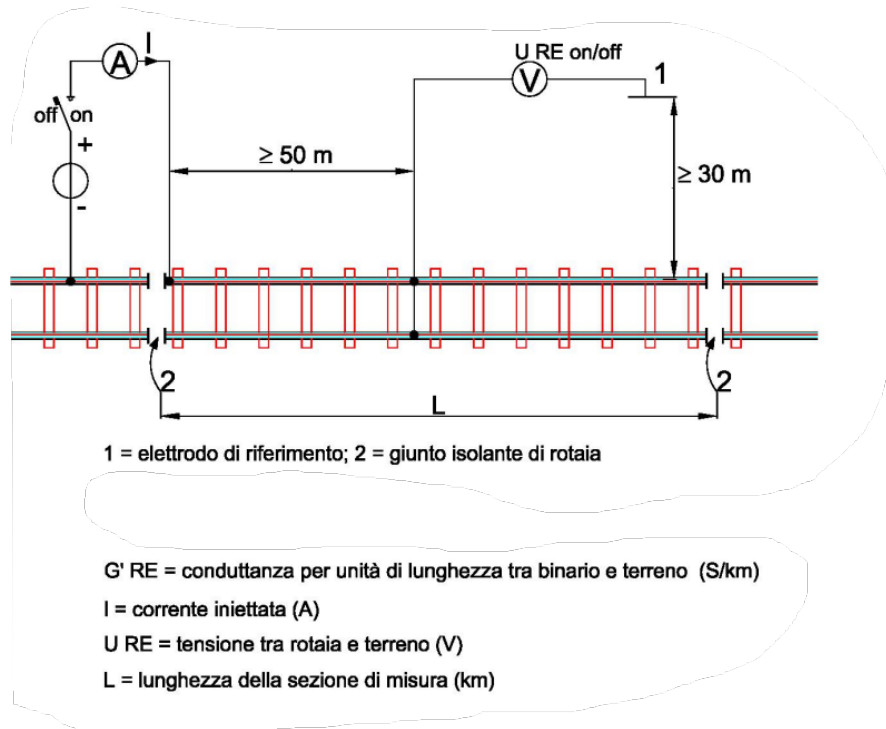
$$G_{RE} = \frac{1}{L} \cdot \frac{I}{U_{RE,on} - U_{RE,off}} \quad (3.7)$$

Anche in questo caso, deve essere verificata la corretta posizione delle connessioni addizionali tra le rotaie e la terra, come ad esempio i VLD, al fine di non disturbare i risultati della misura. Con un modello matematico, attraverso i dati raccolti di  $r$  e  $g$  è possibile valutare teoricamente il potenziale di rotaia, cioè la corrente dispersa. Tale valutazione però è problematica a causa:

- la conduttanza  $g$  dipende dalla superficie di contatto delle rotaie verso il terreno e dalla resistività del terreno;

- la resistività del terreno non è costante, in quanto, quest'ultimo risulta non omogeneo.

Per i seguenti motivi, sono più attendibili le misure effettuate sul campo.



**Figura 3.10:** Conduttanza per unità di lunghezza per sezioni di binario senza strutture civili [1].

### 3.3.2 Schema di messa a terra del ritorno della trazione

Quando si definiscono e si progettano i sistemi di messa a terra per un sistema di trasporto in corrente continua, è fondamentale considerare diversi aspetti, con un'enfasi particolare sulla sicurezza elettrica, inclusa la tensione di contatto, e sulla riduzione delle correnti vaganti.

Benché un sistema senza messa a terra possa minimizzare le correnti indesiderate, è essenziale implementare adeguati collegamenti a terra per regolare la tensione dei binari e prevenire la formazione di potenziali pericolosi ad alta tensione, che potrebbero rappresentare un rischio per la sicurezza sia del personale che delle attrezzature [38], [34], [21]. Inoltre, la messa a terra del binario ha una grande influenza sul potenziale del binario e sulla corrente vagante, pertanto molti studi hanno analizzato il potenziale del binario mediante un modello di distribuzione della corrente vagante, fornendo una guida teorica per la scelta del metodo di messa

a terra.

Il dispositivo di protezione da sovratensione (OVPD) viene utilizzato per classificare i diversi schemi di messa a terra e mantenere il potenziale della rotaia entro l'intervallo consentito dalle norme [1].

Tra gli approcci adottati per la messa a terra dei sistemi di trazione a corrente continua si annoverano, in figura 3.11:

- **Messa a terra solida:** un collegamento diretto a terra che garantisce un percorso per le correnti di guasto. I cavi negativi della SSE sono collegati a terra senza impedenza interposta per garantire il potenziale zero della SSE e soddisfare i requisiti di sicurezza. Questo schema consente alle correnti vaganti di fluire, in modo irregolare, tra il bus negativo della SSE e qualsiasi percorso metallico sotterraneo nelle vicinanze. Inoltre, grandi correnti possono fluire attraverso i binari tra diverse SSE a causa delle differenze inevitabili di potenziale di terra, causate, ad esempio, dall'utilizzo di diversi punti di alimentazione di media tensione delle utenze.
- **Schema flottante:** un sistema in cui i componenti non sono direttamente collegati a terra, riducendo così l'esposizione a correnti vaganti. I cavi negativi della SSE non sono collegati a terra, riducendo così la corrente vagante ma aumentando il potenziale dei binari alla SSE e altrove. Come è noto, nei punti dove si troveranno le motrici, il potenziale dei binari sarà massimo. Tali potenziali possono rappresentare un pericolo per i passeggeri, quindi è essenziale fornire un meccanismo di protezione per motivi di sicurezza. I livelli di tensione di contatto ammissibili sono indicati in primo luogo nella norma EN 50122-1[1], che permette una soglia variabile a seconda della durata. Solitamente si raggiunge un compromesso impostando dispositivi limitatori di tensione attivi (VLD).
- **Messa a terra con diodi o tiristori:** utilizzo di diodi o tiristori per dirigere il flusso delle correnti in un modo che protegge il sistema. Quando i diodi o i tiristori sono in funzione, gli schemi di messa a terra che li utilizzano operano allo stesso modo dello schema a terra solida per le correnti in ingresso al terminale negativo; in assenza di attivazione, questi sistemi funzionano come uno schema flottante. Pertanto, tali schemi possono essere visti come una fusione degli approcci a terra solida e flottante, o meglio, come un metodo di messa a terra selettivo che si attiva solo per neutralizzare i potenziali positivi sui binari. In aggiunta, le matrici per la raccolta delle correnti vaganti, posizionate a intervalli regolari sotto i binari, sono collegate tramite un diodo al cavo longitudinale dedicato alla raccolta di tali correnti.
- **Messa a terra tramite contattori o interruttori:** impiego di questi dispositivi per controllare la connessione a terra in specifiche situazioni.

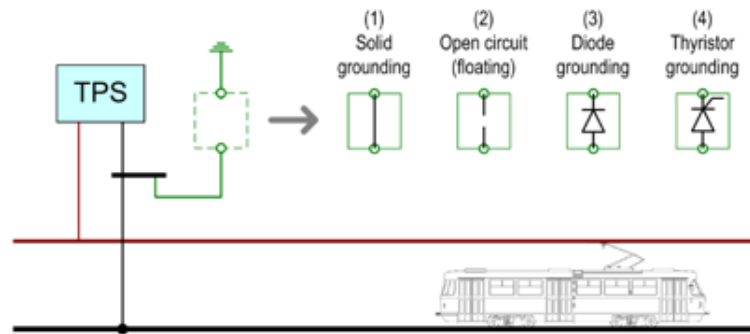


Figura 3.11: Schemi di messa a terra per la trazione [38].

### 3.4 Modelli di Analisi della Distribuzione della Corrente Vagante nei Sistemi di Trazione

La distribuzione della corrente vagante nei sistemi di trazione è un problema complesso; esso è relativo al campo di corrente elettrica, il quale influenza le varie strutture presenti in prossimità di esso. La geometria, le dimensioni delle strutture e la posizione relativa tra le locomotive influenza tale distribuzione. Per prevenire la corrosione da corrente vagante, è necessario analizzare i fattori che influenzano la distribuzione della corrente vagante, al fine di poter costruire un modello teorico tra corrente vagante e i possibili fattori influenzanti[34]. I modelli più utilizzati presentano le seguenti ipotesi:

1. semplificano il problema tridimensionale in un problema piano;
2. semplificano il problema del campo elettrico relativo alla corrente in un problema di circuito con parametri di distribuzione.
3. studio del modello di distribuzione delle correnti vaganti, nel caso di più motrici e diverse sottostazioni di alimentazione, con la semplificazione del modello a una sola motrice con una singola SSE, oppure una sola motrice con doppia alimentazione (alimentazione bilaterale, nel caso ferroviario).

Nel complesso, per analizzare la distribuzione della corrente vagante vengono utilizzati diversi metodi, tra cui:

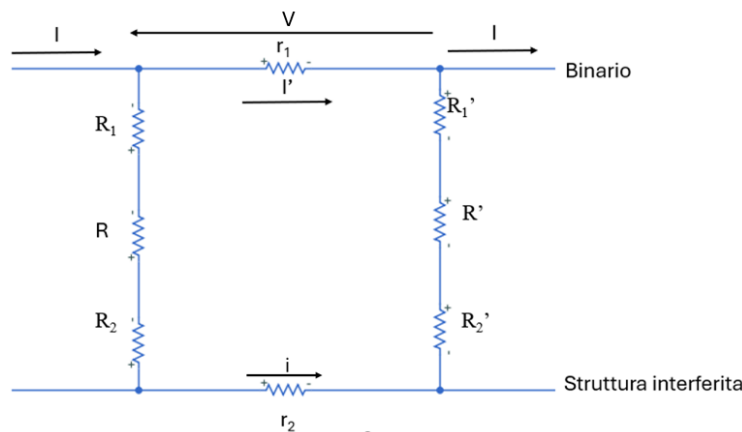
- modello di rete di tipo resistivo [39];
- modello a celle finite [22];
- modello a celle finite a  $\pi$  [40];

- modello del circuito di ritorno a terra [34];
- modello a strato semi-cilindrico equivalente [41];
- elettrodo emisferico modello basato sul campo elettrico [42];
- modello a sezione longitudinale (per ogni sezione viene sviluppato un circuito trasversale equivalente sulla base di una modellazione 3D del terreno) [43];
- modello basato sul metodo Tableau [44].

Verrà posta una particolare attenzione sul modello di rete di tipo resistivo semplificato e sul modello mediante elettrodi sferici.

### 3.4.1 Circuito equivalente resistivo a parametri concentrati

Analizziamo un primo modello teorico semplificato, che ha come scopo il calcolo della corrente che abbandona il binario per chiudersi lungo la struttura interferita [17]. Il circuito equivalente utilizzato per calcolare tale valore è rappresentato in figura 3.12, valido per il caso con unico locomotore e di un'unica SSE.



**Figura 3.12:** Circuito equivalente resistivo binario-struttura interrata.

Dove:

- $I, I', i$ , sono rispettivamente la corrente complessiva, assorbita dal binario e quella raccolta dalla struttura interferita;
- $r_1$  e  $r_2$  sono le resistenze longitudinali del binario e della struttura;
- $R_1, R_1'$  e  $R_2, R_2'$  sono le resistenze trasversali, supposte concentrate, del binario e della struttura;

- $R, R'$  sono le resistenze equivalenti del terreno.

Attraverso la legge di Kirchhoff delle correnti si ricava:

$$I = I' + i \quad (3.8)$$

La struttura interferita risulta essere attraversata dal seguente valore di correnti:

$$i = \frac{I' r_1}{R_1 + R + R_2 + R'_2 + R' + R'_1 + r_2} \quad (3.9)$$

L'aliquota percentuale vale:

$$i_{\%} = \frac{i}{I} 100 = \frac{r_1}{r_1 + R_1 + R + R_2 + R'_2 + R' + R'_1 + r_2} \quad (3.10)$$

### 3.4.2 Modello delle correnti vaganti mediante elettrodi sferici

Per illustrare i componenti di base che influenzano i livelli di correnti vaganti generati da un sistema di trazione CC, nella figura 3.13 è mostrato un semplice modello di circuito di alimentazione da un'unica SSE. Questo modello presuppone che la resistenza del sistema di contatto aereo verso terra sia molto elevata e che non vi sia nessun accoppiamento tra il circuito positivo e la terra [45].

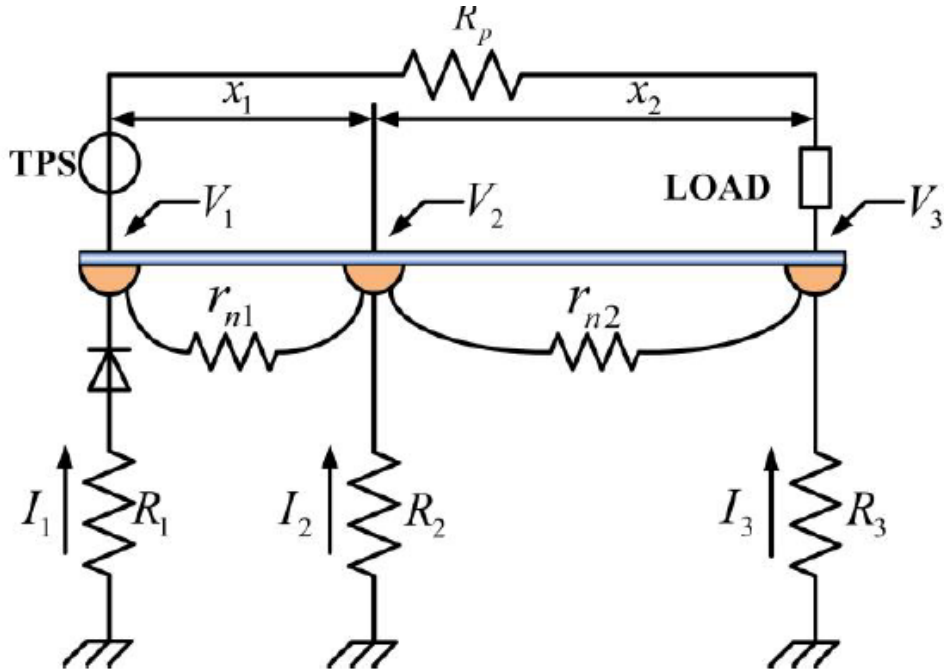


Figura 3.13: Modello delle correnti vaganti mediante elettrodi sferici[34].

La distribuzione della corrente vagante nel percorso rotaia-terreno è stata considerata, assumendo la condizione ideale con resistenze rotaia-terra uniformemente distribuite, con la condizione al contorno, che vi sia presente un danno all'isolamento tra la rotaia e la terra.

In questo modello, la resistenza rotaia-terra è stata concentrata su un elettrodo emisferico equivalente, quindi è stata derivata la relazione tra il potenziale della rotaia e la corrente vagante in prossimità della rotaia in movimento [34],[46].

Il gradiente potenziale elettrico è stato calcolato utilizzando la teoria del campo generato dal flusso della corrente della rotaia, il modello misura il potenziale sviluppato tra due punti nella terra e l'entità di questo, come effetti diretti della corrente vagante sulle strutture di servizio interrate, mostrato in figura 3.14. Il gradiente del potenziale terrestre viene calcolato dalla seguente equazione:

$$E = \frac{\rho I \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)}{\pi l} \quad (3.11)$$

Dove:  $\rho$  è la resistività del terreno [ $\Omega\text{cm}$ ],  $I$  è l'intensità della corrente della sorgente [A],  $d_1, d_2$  sono distanze dalla sorgente alla struttura interrata,  $l$  è la lunghezza della sorgente di corrente [cm] (parallela ai binari). Sulla base di questo modello, la distribuzione del campo elettrico sotterraneo utilizza un elettrodo emisferico per calcolare la corrente di corrosione che scorre attraverso la tubazione interrata.

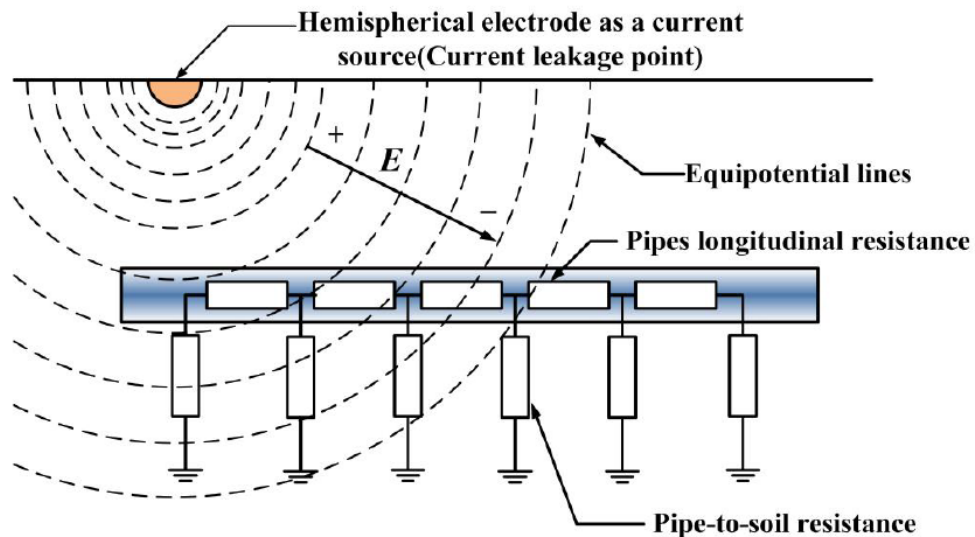


Figura 3.14: Modello del gradiente del potenziale di terra[34].

## 3.5 Mitigazione, prevenzione e protezione da correnti vaganti

Nei sistemi di trazione, il rapporto tra le correnti vaganti e la corrosione è una questione critica. Questi sistemi includono non solo il binario e il letto su cui poggiano, ma anche eventuali elementi strutturali come il rivestimento della galleria, l'impalcato del viadotto e varie infrastrutture nelle vicinanze oppure interrate appartenenti a terzi. Questi componenti sono spesso esposti, totalmente o parzialmente, a fenomeni corrosivi causati dalle correnti vaganti.

L'analisi dettagliata e il monitoraggio regolare delle strutture coinvolte sono fondamentali per mantenere l'efficacia dei sistemi di protezione dalle correnti vaganti e garantire la sicurezza a lungo termine delle infrastrutture coinvolte [47].

Come precedentemente analizzato, la corrosione si verificherà in ogni punto in cui la corrente passa da un conduttore metallico, come una barra di rinforzo nel calcestruzzo, all'elettrolita (cioè, il calcestruzzo). La dispersione di corrente si verificherà dalle aree del binario sia in un sistema flottante che in un sistema collegato a terra. I binari sono quindi la parte del sistema ferroviario dove si verifica la corrosione a meno che non siano perfettamente isolati dalla terra. Il livello di corrosione può influenzare la durata di vita dei binari. Se questi ultimi sono posizionati in un'area dove non ci sono altri conduttori metallici, l'unico rischio di corrosione è per i binari. Tuttavia, un sistema di trasporto potrebbe essere posizionato in un tunnel realizzato in calcestruzzo armato o in un contesto urbano, vicino a cavi elettrici, condutture del gas e servizi simili [48].

Per tale motivi, i sistemi di protezione dalle correnti vaganti (SCPS) sono stati progettati per mitigare gli effetti delle correnti di dispersione. Queste correnti possono essere intercettate attraverso specifiche sezioni dedicate al drenaggio delle correnti vaganti (SCD). Queste sezioni sono strategicamente posizionate lungo i binari per catturare la corrente indesiderata e convogliarla verso collettori di corrente vagante. Da qui, la corrente è reindirizzata verso la SSE, chiudendo il circuito e riducendo significativamente il rischio di corrosione delle infrastrutture.

### 3.5.1 Drenaggio della corrente vagante

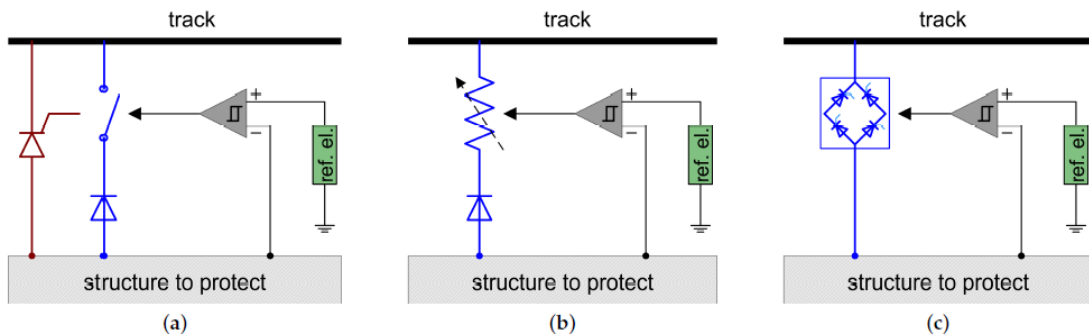
Un collegamento di drenaggio rappresenta una connessione conduttiva realizzata tramite un cavo isolato che collega la rotaia a una tubazione interrata. Questo collegamento offre un percorso alternativo per la corrente, consentendo il ritorno della stessa alla rotaia. L'obiettivo principale di tale collegamento è abbassare il potenziale delle aree anodiche, riducendo così il rischio di corrosione dannosa causata dalle correnti vaganti che potrebbero influenzare le tubazioni e altre parti conduttrici a contatto con il suolo[38].

Il collegamento drenante è tipicamente posizionato nei punti in cui la rotaia e



la tubazione si incrociano o sono molto vicine e parallele. La scelta del sito per l'installazione del collegamento è cruciale per assicurare l'accessibilità alle apparecchiature di controllo e per evitare interferenze con il traffico. Esistono vari metodi per implementare la protezione da corrente vagante attraverso i collegamenti di drenaggio, in figura 3.15:

- Drenaggio diretto, un metodo passivo che collega la struttura minacciata (come la tubazione) a un punto di riferimento che sia sufficientemente elettronegativo, con l'intento di spostare verso il basso il potenziale dell'area anodica. Tuttavia, questa soluzione può trasferire il rischio di corrosione a un'altra struttura, richiedendo ulteriori interventi di mitigazione.
- Drenaggio polarizzato, dove le correnti vaganti non possono fluire fuori dalla struttura protetta attraverso l'elettrolita. Si utilizza un diodo in serie per dirigere il flusso della corrente in una direzione selezionata. Questo sistema è efficace per mantenere il potenziale della struttura protetta a un livello sicuro, tranne che per brevi periodi di tempo, ad esempio quando un treno passa vicino alla sottostazione.
- Drenaggio forzato, metodo in cui la corrente vagante viene scaricata tramite una tensione applicata esternamente (ad esempio, da un raddrizzatore controllato) o sfruttando la differenza di tensione naturale tra la tubazione e le rotaie.



**Figura 3.15:** Schemi di drenaggio della corrente di dispersione: (a) implementazione comune mediante interruttore unidirezionale (con diodo) o diodo controllato (tiristore), (b) schema con resistore controllabile e (c) drenaggio forzato mediante raddrizzatore controllato [38].

Un sistema di drenaggio della corrente vagante SCD è progettato per essere implementato attraverso l'uso di armature longitudinali indipendenti o una griglia di rinforzo (collocate sotto le rotaie per intercettare efficacemente la corrente vagante

lungo la loro estensione, illustrato nelle figure 3.16 e 3.18. Questi elementi sono cruciali per gestire e ridirigere la corrente dispersa, prevenendo così danni da corrosione.

Un aspetto fondamentale di questa configurazione è che tali armature SCD devono rimanere isolate dall'armatura principale del binario per evitare cortocircuiti indesiderati e, al contempo, devono mantenere una connessione elettrica ottimale con le parti più suscettibili a disperdere corrente. Questo accoppiamento conduttivo mirato è essenziale per il funzionamento efficace del sistema.

Per quanto riguarda l'isolamento, l'uso di materiali come teli isolanti non è considerato praticabile in questa applicazione a causa delle loro potenziali implicazioni negative sulla robustezza strutturale del binario. Di conseguenza, l'approccio prevalente all'isolamento consiste nell'impiego di strati di cemento posizionati sopra e sotto gli elementi SCD. Questa soluzione garantisce un adeguato isolamento mantenendo l'integrità strutturale necessaria per sopportare il carico dinamico e le sollecitazioni a cui il binario è sottoposto.



(a)



(b)

**Figura 3.16:** Dettagli del drenaggio delle correnti vaganti utilizzando (a) armature e (b) griglie [47].

L'acciaio da costruzione solitamente ha una resistività elettrica 13-14 volte superiore a quella del rame. Poiché le proprietà meccaniche di queste armature catturanti sono di secondaria importanza [47].

Quando si implementano armature, queste sono tipicamente posizionate in modo uniforme sotto la base della rotaia. Tuttavia, la distribuzione di queste armature deve considerare l'interferenza con i dispositivi verticali che alloggiavano le viti di fissaggio degli elementi. Analogamente, nell'uso di una griglia di intercettazione, è essenziale che le aperture della griglia corrispondano ai centri delle maglie per una corretta integrazione.

La distanza tra le armature o la griglia e la rotaia con il relativo sistema di fissaggio dovrebbe essere minimizzata per massimizzare la conduttanza trasversale e l'efficienza di intercettazione della corrente. Idealmente, le sezioni SCD dovrebbero confinare la corrente dispersa fino a quando non viene raccolta dall'SCC (Sistema Collettore di Corrente). Tuttavia, questo processo può anche comportare una perdita di corrente dal circuito SCD verso altre parti del rinforzo.

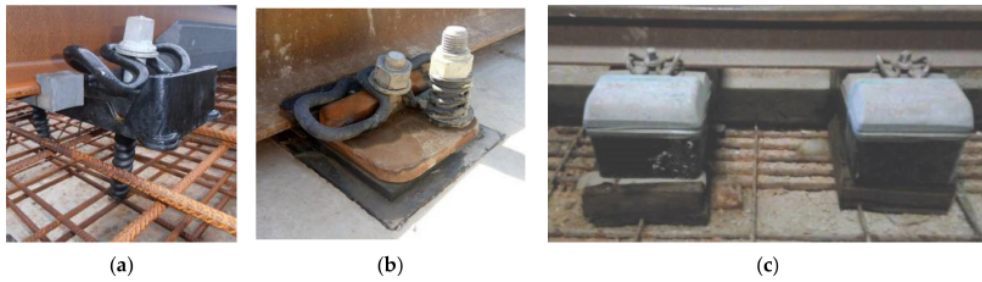
Per affrontare queste sfide, possono essere adottate diverse strategie, tra cui:

- incrementare selettivamente la resistenza del percorso trasversale della corrente mediante uno strato isolante, preservando le proprietà meccaniche;
- Utilizzare uno strato di cemento più spesso nella parte inferiore rispetto a quella superiore;
- Ottimizzare i valori di resistenza longitudinale dell'SCD per contrastare le perdite attraverso la resistenza trasversale.

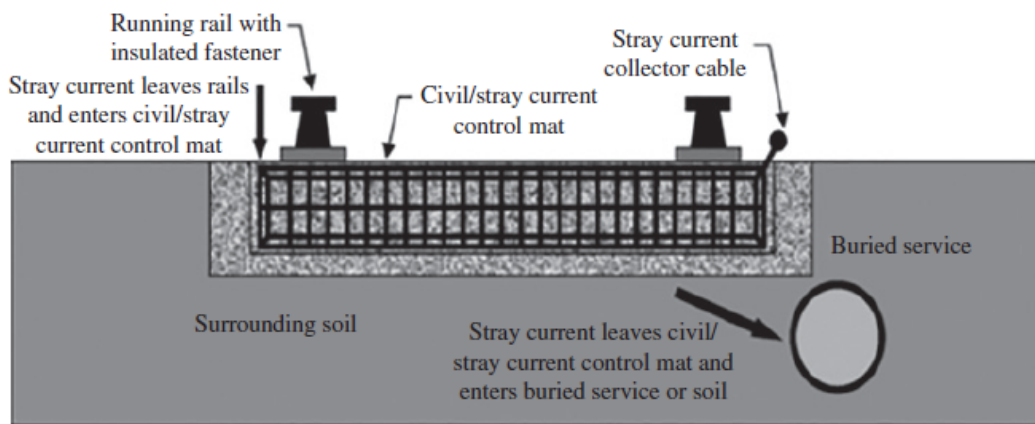
È importante notare che l'uso dell'SCD a una distanza così ridotta può leggermente ridurre l'isolamento delle rotaie, che sarebbe maggiore se gli elementi SCD venissero rimossi e sostituiti con calcestruzzo, mantenendo invariata la restante geometria. Inoltre, la corrente di dispersione può fuoriuscire dalla rotaia come dispersione superficiale sopra e sotto i cuscinetti isolanti, specialmente in presenza di umidità e sporco eccessivi, o lungo elementi di fissaggio e viti in caso di danneggiamento del binario. Questo rende l'SCD meno efficace nel catturare la corrente dispersa in queste circostanze, poiché il percorso di dispersione si estende verticalmente e si allontana rapidamente dall'area protetta sotto le rotaie.

Un'alternativa è l'uso di sistemi preassemblati e blocchi flottanti, che sono generalmente esenti da questi problemi grazie alla loro configurazione di fissaggio preassemblata e ben isolata dalle interazioni con il calcestruzzo colato. In queste configurazioni, la dispersione di corrente avviene principalmente lungo la superficie del blocco, come mostrato in figura 3.17.[47]

Sebbene queste tecniche siano state implementate per mitigare i rischi di corrosione, alcuni operatori ferroviari europei hanno osservato che i collegamenti di drenaggio possono a volte aumentare la dispersione di corrente vagante e intensificare la corrosione delle strutture coinvolte. Pertanto, tali collegamenti sono spesso considerati come misure supplementari o temporanee e non come soluzioni definitive.[38]



**Figura 3.17:** Dettagli di (a) una cabina di fissaggio e un blocco isolante, (b) cuscinetti isolanti e (c) la tecnica dei blocchi flottanti [47].



**Figura 3.18:** Sistema di raccolta delle correnti vaganti sotto la rotaia [48].

## Capitolo 4

# Misurazione, monitoraggio, prevenzione e protezione dalla corrente vagante

Le infrastrutture interrato sono essenziali per la sostenibilità e l'efficienza delle moderne reti urbane e industriali. Tuttavia, queste strutture sono costantemente esposte a fenomeni di degrado dovuti a vari fattori ambientali e operativi, tra cui le correnti vaganti derivanti dai sistemi di trazione.

Il monitoraggio e la gestione efficace di tale fenomeno sono quindi di fondamentale importanza per la durata delle infrastrutture. Questo capitolo si propone di esplorare in dettaglio i metodi e le tecnologie attualmente disponibili per la misurazione, il rilevamento e il monitoraggio delle correnti vaganti. L'obiettivo è fornire una panoramica delle strategie più efficaci in questo campo, adottate per mitigare il rischio di corrosione delle infrastrutture interrato. Il focus sarà rivolto alle tecniche di rilevamento e di monitoraggio.

### 4.1 La misurazione delle correnti vaganti in corrente continua

La misurazione delle correnti vaganti viene effettuata per passi, in cui si ha come obiettivo la determinazione della direzione, della polarità e della densità di corrente del campo di corrente di terra [19] [6]. Lo scopo ultimo di questa misurazione è la valutazione della probabilità del rischio corrosivo delle strutture che vengono colpite da tale fenomeno. Tale indagine passa attraverso la determinazione:

- della resistività specifica del suolo tramite il metodo di Wenner;

- della presenza dei campi di corrente nel terreno;
- sulla base dei risultati dei punti precedenti, si determinano degli indicatori che valutano l'intensità, la direzione e la frequenza delle correnti vaganti.

#### 4.1.1 Misura della resistività del terreno

La resistività specifica del suolo è il parametro fondamentale che determina l'aggressività corrosiva del suolo. Essa viene determinata come la resistenza di un cubo di spigolo pari a un metro, al quale è applicato una corrente continua in direzione perpendicolare alla parete stessa del cubo. In generale, se si misura un valore basso di resistività specifica del suolo, il rischio corrosivo risultante è maggiore, e viceversa [19].

Sono stati sviluppati diversi metodi per determinare il valore di resistività specifica del suolo, ma il metodo più comunemente utilizzato è il metodo di profilatura della resistività tramite la disposizione degli elettrodi di Wenner.

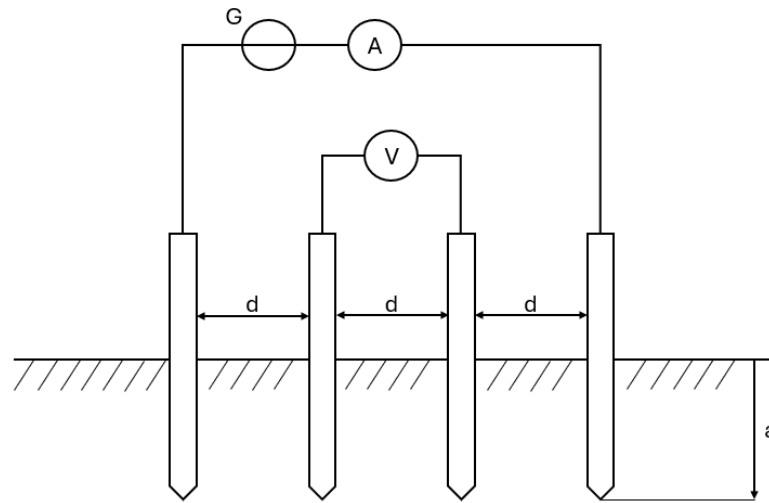
Il metodo Wenner è un metodo rigorosamente valido per elettrodi sferici di piccole dimensioni interrati, ma se la distanza tra i dispersori è più grande della profondità del terreno, con buona approssimazione, si può estendere la validità. La procedura prevede l'immersione nel terreno di quattro sonde ad una certa distanza  $d$  ed una medesima profondità  $a$ , con  $d \gg a$  [49]. La disposizione dei dispersori viene effettuata nel seguente modo: due sono collegati ad un generatore a corrente alternata (detti dispersori amperometrici) e gli altri due sono collegati ad un voltmetro (detti dispersori voltmetrici), come in figura 4.1.

La resistenza del terreno  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] risulta essere dalla seguente formula:

$$\rho = 2\pi d \frac{\Delta U}{I} = 2\pi d R \quad (4.1)$$

Dove:

- $U$  è la tensione tra gli elettrodi di tensione [V];
- $I$  è la corrente di prova [A];
- $d$  è la distanza tra gli elettrodi [m] ;
- $R$  è la resistenza tra gli elettrodi di tensione [ $\Omega$ ].



**Figura 4.1:** Metodo di Wenner.

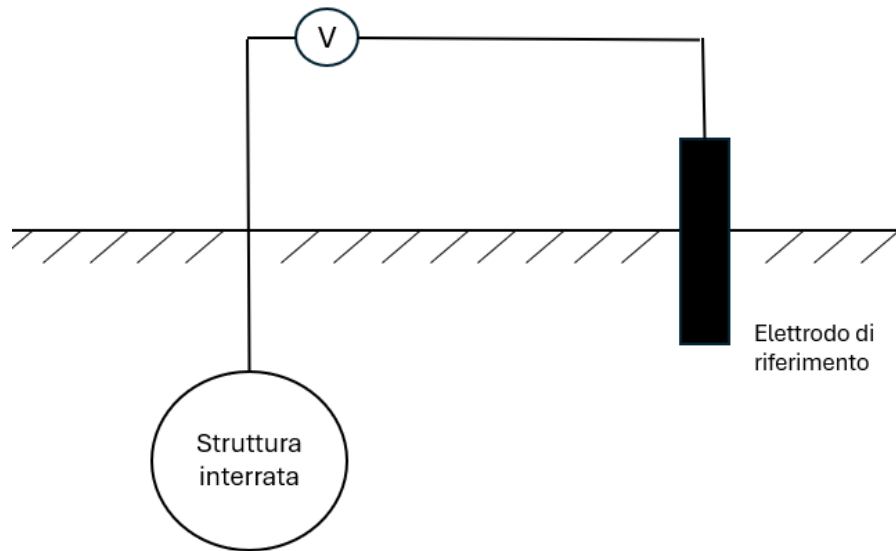
Il terreno non è omogeneo, quindi è importante fare più misure della resistività, prendendo un punto come riferimento e variando la distanza  $d$ , ottenendo dei risultati più coerenti.

#### 4.1.2 Misura dell'intensità del campo elettrico di terra

La misura dell'intensità del campo elettrico di terra si basa sulla misura della differenza di potenziale tra elettrodi non polarizzabili, con un potenziale elettrochimico costante elettrodo-terra [19]. Il potenziale di una struttura interrata, rispetto ad un elettrodo di riferimento, ha un valore costante quando non sono presenti correnti vaganti. Questo valore è nominato potenziale stazionario[32]. Il potenziale di una struttura cambia drasticamente nelle regioni in cui si verificano correnti vaganti, come risultato della polarizzazione indotta del materiale stesso. I cambiamenti possono avvenire sia in direzione positiva che negativa in relazione al potenziale stazionario. Pertanto, sulla base della misurazione del potenziale di campo di una struttura e delle variazioni del segnale misurato, si può dedurre la presenza di correnti vaganti.

Il principio di misurazione del potenziale di polarizzazione della struttura metallica interrata è mostrato in Figura 4.2. La misura del potenziale può essere eseguita con un voltmetro ad alta resistenza interna (minimo  $100 \text{ k}\Omega/\text{V}$ ). Una delle uscite del misuratore è collegata alla struttura interrata con un cavo, mentre il secondo ingresso del misuratore è collegato all'elettrodo di riferimento, che è posizionato sulla superficie del terreno il più vicino possibile alla struttura. L'elettrodo di riferimento più frequentemente utilizzato è il rame/solfato di rame  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , il

cui potenziale non cambia con la variazione della corrente o delle condizioni di misurazione [50].



**Figura 4.2:** Circuito per la misurazione del potenziale delle strutture.

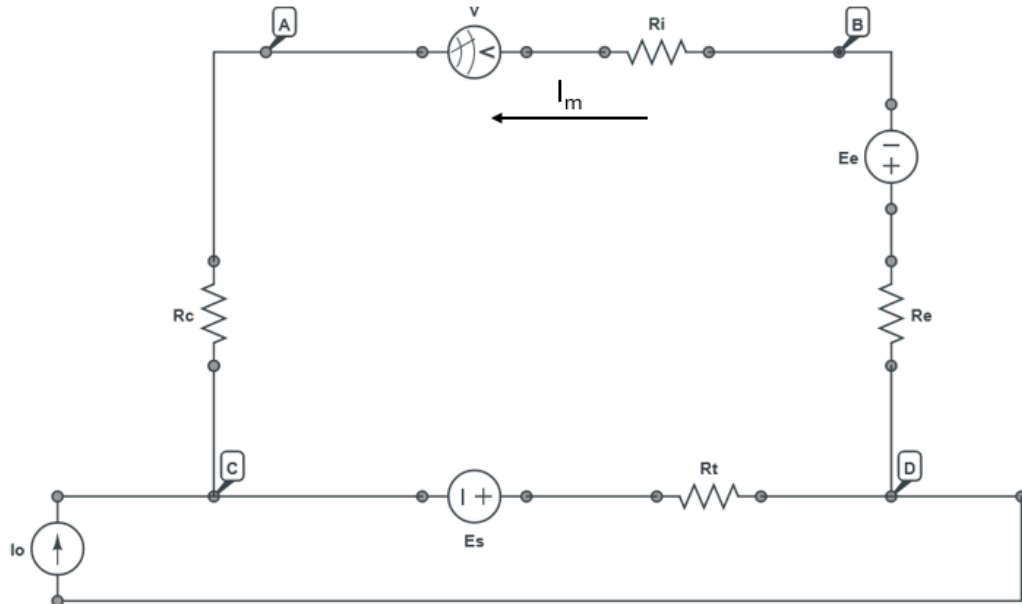
Analizziamo più nel dettaglio tale circuito; per una struttura interferita, il circuito equivalente di misura è quello illustrato nella figura 4.3, dove:

- $R_i$  è la resistenza interna del voltmetro;
- $R_c$  è la resistenza dei conduttori di misura;
- $R_e$  è la resistenza interna dell'elettrodo di riferimento;
- $R_t$  è la resistenza tra la superficie del metallo e la superficie dell'elettrodo di riferimento;
- $E_s$  è la f.e.m. dell'emicella struttura-ambiente;
- $E_e$  è la f.e.m. dell'emicella costituita dall'elettrodo di riferimento;
- $I_m$  è la corrente della maglia di misura;
- $I_o$  è la corrente interferente esterna.



In assenza di disturbi, la corrente  $I_0$  risulta essere zero, per cui il potenziale registrato tra i punti A e B può essere descritto come segue:

$$V_{BA} = G_s - G_e - I_m(R_c + R_e + R_t) \approx E_s - E_e \quad (4.2)$$



**Figura 4.3:** Circuito equivalente di misura nel caso di struttura interferita.

Se la resistenza interna  $R_i$  del voltmetro è particolarmente alta, ne consegue che la corrente  $I_m$  è estremamente ridotta. Pertanto, il potenziale misurato corrisponde quasi esattamente a quello naturale, che deriva dalla differenza tra le due emicelle. In caso di interferenze, la misurazione sul voltmetro è influenzata dalla caduta di tensione causata dalla corrente vagante  $I_o$ , che circola nel sistema, rendendo la lettura come segue:

$$V_{BA} = E_s - E_e - I_m \cdot (R_c + R_e + R_t) - I_o \cdot R_t \quad (4.3)$$

In questa situazione, la lettura del potenziale non è determinata esclusivamente dalla differenza tra le due emicelle, ma è influenzata anche da un fattore di errore correlato al prodotto di  $R_t$  (che aumenta allontanandosi dalla superficie della struttura metallica) per  $I_o$ . Per minimizzare questo errore, è essenziale posizionare l'elettrodo di riferimento il più vicino possibile alla struttura interessata, riducendo così  $R_t$ . In situazioni comuni dove la struttura è interrata e non facilmente accessibile, il punto migliore per collocare l'elettrodo, al fine di minimizzare l'errore, si

trova in prossimità della generatrice superiore della struttura.

Poiché le correnti vaganti risultano ampiamente variabili nel tempo (essendo legate alla posizione dei convogli, alla regolazione delle stazioni di conversione, ecc.) i potenziali debbono essere registrati per periodi di tempo significativi, in pratica non meno di 24 ore[17]. La lettura comparata dei diagrammi di potenziale consente di individuare le zone soggette a diventare anodiche, di valutarne il tempo di persistenza in tale stato e di determinare le zone che, contemporaneamente, diventano catodiche.

Attualmente la misura può essere realizzata utilizzando dei voltmetri digitali a microprocessore e registratori digitali collegati a un PC. Utilizzando gli strumenti software specializzati, è possibile elaborare i dati misurati in modo continuo. Dopo la misurazione, viene determinato il valore massimo e medio della tensione in ciascuna direzione. Successivamente, da queste tensioni e distanze tra gli elettrodi, si calcola il valore massimo e medio dell'intensità del campo elettrico utilizzando l'equazione:

$$E_{\max} = \frac{U_{\max}}{l} \quad (4.4)$$

$$E_{\text{mean}} = \frac{U_{\text{mean}}}{l} \quad (4.5)$$

Dove:

- $E_{\max}$  è il valore massimo dell'intensità del campo elettrico [ $V \cdot m^{-1}$ ];
- $E_{\text{mean}}$  è il valore medio dell'intensità del campo elettrico [ $V \cdot m^{-1}$ ];
- $U_{\max}$  è il valore massimo della tensione misurata [V] ;
- $U_{\text{mean}}$  è il valore medio della tensione misurata [V];
- $l$  è la distanza degli elettrodi [m].

Attraverso tali analisi si può valutare il pericolo di corrosione nell'area esaminata misurando la variazione di potenziale. Utilizzando il valore medio dell'intensità del campo elettrico calcolato, si riesce a identificare la categoria del campo della corrente verso terra. La suddivisione dei tipi di campo della corrente di terra, basata sul valore medio dell'intensità del campo elettrico, può essere classificata secondo la tabella 4.1.

**Tabella 4.1:** Classificazione dei campi della corrente di terra basata sul valore dell'intensità del campo elettrico [19].

E [ $mV \cdot m^{-1}$ ]	Campo di corrente
<0.5	debole
0.5-5	medio
>5	Intenso

### 4.1.3 Determinazione della densità di corrente

Sulla base del valore misurato della resistività specifica del terreno e sulla base della determinazione dell'intensità del campo elettrico del terreno dalla misurazione della differenza di potenziale tra elettrodi non polarizzabili[19], il valore massimo e medio della densità di corrente viene calcolato utilizzando l'equazione:

$$J_{\text{Max}} = \frac{E_{\text{Max}}}{\rho} \quad (4.6)$$

$$J_{\text{mean}} = \frac{E_{\text{mean}}}{\rho} \quad (4.7)$$

Dove:

- $J_{\text{max}}$  è il valore massimo della densità di corrente [ $A \cdot m^{-2}$ ];
- $J_{\text{mean}}$  è il valore medio della densità di corrente [ $A \cdot m^{-2}$ ];
- $\rho$  è il valore misurato della resistività specifica del terreno [ $\Omega \cdot m$ ]

In base al valore medio calcolato della densità di corrente vengono determinati l'ambiente corrosivo risultante e la classe di corrosione. Si può quindi delineare una classificazione degli ambienti corrosivi in 4 classi, in base al valore calcolato della densità di corrente, come in tabella 4.2.

**Tabella 4.2:** Classificazione dell'ambiente corrosivo e della classe di corrosione basata sul valore della densità di corrente [19].

J [ $\mu \cdot A \cdot m^{-2}$ ]	Ambiente corrosivo	Classe di corrosione
<0.1	molto debole	I
0.1-3	medio	II
3-100	Intenso	III
>100	Molto intenso	IV

## 4.2 Aspetti generali riguardanti la protezione da corrosione

Un approccio efficace per determinare se un materiale sarà soggetto a corrosione quando viene a contatto con una specifica sostanza consiste nell'uso di tabelle di corrosione. Queste tabelle offrono una panoramica delle varie combinazioni tra materiali e elettroliti e indicano la suscettibilità alla corrosione per ciascuna di queste combinazioni. Sono uno strumento utile nelle fasi iniziali della progettazione, permettendo la selezione di materiali più appropriati per una specifica applicazione da un insieme limitato di opzioni.

Nel caso dei sistemi di trazione e infrastrutture interrate di terzi, l'utilizzo di una coppia di materiali metallici compatibili non è evitabile, si deve ricorrere a strategie più sofisticate [12],[8].

### 4.2.1 Tipi di protezione contro la corrosione

Per contrastare la corrosione, è possibile adottare metodi di protezione sia passivi che attivi. La protezione passiva si focalizza sull'isolamento fisico della superficie del metallo dall'ambiente circostante o da altri metalli, principalmente attraverso l'applicazione di rivestimenti. Queste tecniche di protezione possono includere diversi tipi di materiali o applicazioni [12], [8], [51]:

- Film di pittura protettiva: Questi possono essere applicati sull'intera superficie del materiale o solamente nelle aree più vulnerabili alla corrosione, fornendo una barriera fisica contro agenti esterni corrosivi, in figura 4.4.
- Rivestimenti protettivi: Materiali come il polietilene, utilizzato secondo normative specifiche, il bitume, o il poliuretano sono spesso impiegati per rivestire l'esterno delle tubature in acciaio interrate. Anche nastri di polietilene autoadesivi applicati a freddo sono comunemente usati in queste applicazioni, nelle figure 4.5, 4.6.
- Ossidazione anodica: Questo processo viene utilizzato per metalli come l'alluminio, il nichel o il cobalto. La formazione di uno strato di ossido sopra il metallo passiva la superficie, isolandola efficacemente dall'ambiente esterno.
- Zincatura: Questo metodo impiega lo zinco come rivestimento protettivo per il ferro. Il metallo viene immerso in un bagno fuso di zinco; poiché lo zinco è più reattivo rispetto al ferro, protegge il ferro dall'ossidazione, anche se parti della superficie ferrosa rimangono scoperte.

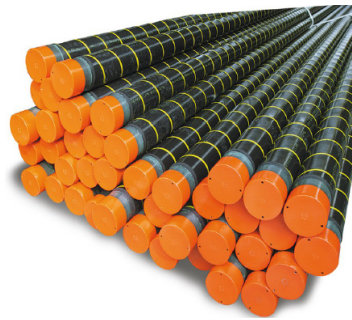
- Cromatura: Usata per proteggere il ferro, la cromatura consiste nel rivestire elettroliticamente la superficie del ferro con cromo, un metallo più nobile che fornisce una barriera resistente contro la corrosione.



**Figura 4.4:** Tubazioni rivestite di pittura protettiva [12].



**Figura 4.5:** Rivestimento poliuretano di tubazioni [12].



**Figura 4.6:** Tubazioni isolate per metanodotti [12].

La protezione attiva, nota anche come protezione catodica, è un metodo avanzato basato su principi elettrochimici, volto a proteggere le strutture metalliche da processi corrosivi in ambienti particolarmente aggressivi. Questa tecnica si realizza applicando una corrente continua tra due elettrodi: uno definito anodo e l'altro, il metallo da proteggere, catodo. Tale configurazione elettrochimica porta a un abbassamento del potenziale del metallo catodico, rallentando significativamente la sua velocità di corrosione [52], [12].

Il processo di protezione catodica può essere attivato in due scenari distinti:

- Protezione in corso di corrosione, cioè la corrosione del metallo è già iniziata, l'intervento catodico mira a ridurre l'attività corrosiva fino a fermarla

completamente. In questo caso, si parla propriamente di protezione catodica.

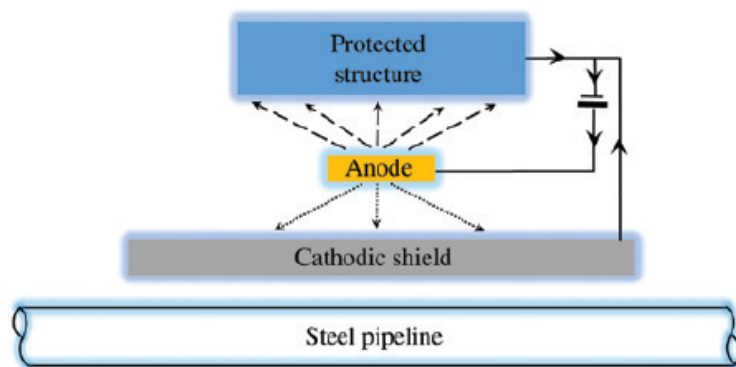
- Prevenzione della corrosione, nel caso in cui metallo non ha ancora iniziato a corrodersi, l'applicazione della protezione catodica può prevenire l'avvio del processo corrosivo, fungendo da misura preventiva.

### 4.3 Tecniche di protezione contro la corrosione delle infrastrutture interrate

Questa sezione si occuperà nello specifico delle tecniche di protezione riguardante le strutture interrate contro la corrosione da corrente vagante. Oltre all'applicazione generale di rivestimenti protettivi analizzati nella sezione 4.2.1, si esamineranno le seguenti tecniche: schermi elettrici, applicazione di giunti isolanti e la protezione catodica.

#### 4.3.1 Scudo elettrico

Quando una struttura metallica si trova nell'area di influenza di una fonte di corrente vagante circostante, è possibile ridurre la quantità di corrente vagante raccolta utilizzando schermi elettrici. Nella schermatura catodica, l'obiettivo è minimizzare la quantità di corrente vagante che raggiunge la struttura a rischio. Una barriera metallica (o "schermo"), polarizzata catodicamente, viene posizionata sul percorso della corrente vagante, come mostrato in figura 4.7. Lo schermo rappresenta un percorso a bassa resistenza preferenziale per la corrente vagante, riducendo così il flusso di corrente vagante sulla struttura interferita.



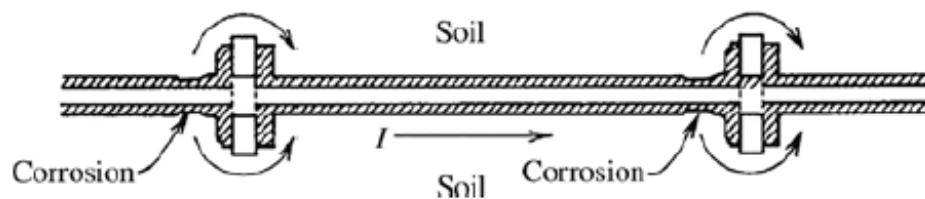
**Figura 4.7:** Schema di uno schermo catodico per ridurre al minimo l'interferenza anodica [21].

Lo schermo metallico è collegato con il catodo della fonte di interferenza e il valore della corrente vagante raccolta è continuamente monitorato.

Se lo schermo è connesso al terminale negativo dell'alimentazione della struttura interferente, bisogna considerare i suoi effetti sui livelli di protezione della struttura interferente. Sebbene gli schermi possano ridurre l'assorbimento di corrente vagante, è possibile che la corrente di interferenza fluisca al di fuori dall'area di raccolta verso punti di scarico remoti, dove la struttura metallica interferita potrebbe subire corrosione.

### 4.3.2 Giunti isolanti

Introducendo uno o più giunti isolanti nelle tubazioni, è possibile rendere queste strutture, meno favorevoli al passaggio delle correnti vaganti. Questi giunti sono comunemente impiegati per ridurre i danni dovuti a tali correnti. Nonostante ciò, se le tensioni diventano particolarmente elevate, potrebbero non essere sufficienti a impedire che la corrente aggiri i giunti isolanti [21] [53]. Questo può portare a fenomeni di corrosione nelle aree adiacenti ai giunti (in figura 4.8).



**Figura 4.8:** Effetto della corrente che scorre lungo una tubazione interrata sulla corrosione in prossimità di giunti isolati [53].

## 4.4 Protezione catodica

La protezione catodica è il metodo di protezione più promettente per le condutture. Fu usata per la prima volta negli anni '20 per proteggere condutture interrate che trasportavano petrolio e gas. Nei decenni successivi, si è verificato un enorme sviluppo nei sistemi di protezione catodica. All'inizio di questo secolo, migliaia di condutture e cavi interrati sono efficacemente protetti dalla protezione catodica. Essa è applicata anche a serbatoi di stoccaggio, navi, strutture di perforazione offshore, condensatori e ponti in cemento[16].

L'applicazione di tale tecnica di protezione è generalmente obbligatoria per gasdotti e oleodotti ad alta pressione. Inoltre, il CP viene spesso utilizzato per condotte idriche e contenitori interrati. I principi fondamentali e i criteri di protezione

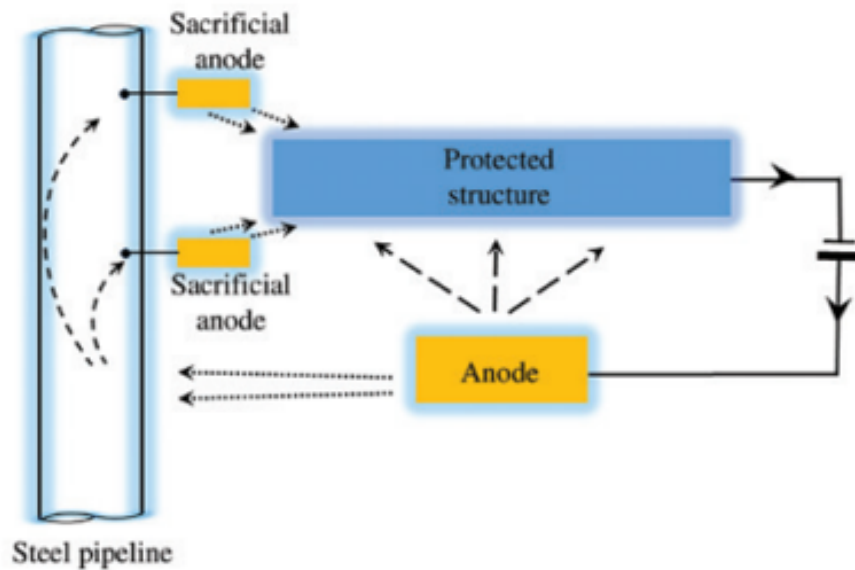
pertinenti sono stabiliti nella norma EN ISO 15589-1 [5] e UNI EN 13509 [4]. In base alla norma EN 50162 [3] sono generalmente richiesti verifiche per la valutazione di queste strutture per quanto riguarda la protezione contro la corrosione da correnti vaganti. Tuttavia, la mutua interazione tra la distribuzione del campo elettrico e la progettazione geometrica non è stata generalmente considerata, con conseguente significatività limitata dei dati misurati. Pertanto spesso non era possibile né fornire una valutazione del rischio di corrosione dovuto a correnti vaganti, secondo le norme sopra menzionate, né verificare l'efficacia della protezione catodica in caso di disturbi DC [54]. La corrosione da interferenza a causa di correnti vaganti nelle strutture metalliche circostanti si verifica a causa delle variazioni nei campi di potenziale, sia in direzione positiva che negativa, create dai sistemi di protezione catodica. Esistono due principali tipi di corrosione da interferenza: corrosione da interferenza anodica e corrosione da interferenza catodica [55].

#### 4.4.1 Protezione catodica ad anodo sacrificale

Nel sistema di protezione catodica ad anodo sacrificale, la corrosione è prevenuta attraverso l'uso di un metallo che, secondo la serie galvanica, è più elettronegativo rispetto alla tubazione da proteggere. Questo metodo è illustrato schematicamente nella figura 4.9. Nel processo di accoppiamento galvanico, il metallo più nobile della coppia viene protetto catodicamente, mentre il metallo meno nobile si sacrifica, erodendosi anodicamente. Gli anodi sacrificabili, che non richiedono energia esterna, fungono da sorgenti energetiche autonome e richiedono scarsa manutenzione[16]. La corrente viene scaricata da questi anodi anziché dalla struttura a rischio. L'importanza di posizionare gli anodi vicino alla struttura interferente è evidente: per ridurre al minimo la resistenza alla corrente che scorre dagli anodi. Gli anodi meno nobili genereranno una corrente CP, compensando così piccole quantità di correnti vaganti residue che continuano ad essere scaricate dalla struttura interferita [21]. Per garantire l'efficienza di un anodo sacrificale, si devono considerare diversi fattori:

- Il potenziale elettrico tra l'anodo e la struttura protetta deve essere sufficiente per prevenire la formazione di celle di corrosione.
- L'anodo non deve subire una polarizzazione eccessiva mentre eroga corrente.
- L'anodo deve mantenere un'alta efficienza, ovvero la corrente derivante dalla sua dissoluzione deve essere efficacemente utilizzata per la protezione catodica.





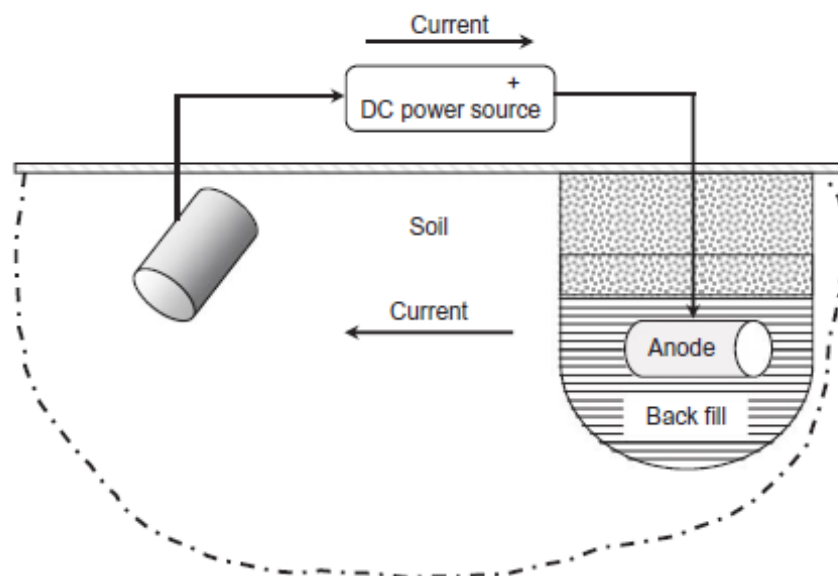
**Figura 4.9:** Schema degli anodi sacrificali per mitigare l'interferenza catodica [21].

Per quanto riguarda i materiali, il magnesio e lo zinco sono tra gli anodi galvanici più usati a causa della loro efficacia nel proteggere le tubazioni. L'alluminio è anche utilizzato, specialmente in leghe con stagno, indio, mercurio o gallio per prevenire la sua passivazione e mantenere la produzione di corrente [30],[56].

#### 4.4.2 Protezione catodica a corrente impressa

Per tale protezione si impiega corrente continua proveniente da una fonte esterna, come mostrato in figura 4.10, come un raddrizzatore, per polarizzare catodicamente la tubazione. Questo metodo, noto come sistema a corrente impressa, è particolarmente efficace per proteggere tubazioni non rivestite o con rivestimento insufficiente grazie alla sua elevata capacità di erogazione di corrente. Per gli anodi, si utilizzano materiali resistenti come ferro arricchito con il 14% di silicio, carbone o grafite, comuni nella protezione delle tubazioni. I sistemi ICS richiedono una manutenzione costante, dato che si basano su una fonte di alimentazione e molteplici connessioni elettriche, a differenza dei sistemi con anodi sacrificabili [30], [55],[16]. Nei mezzi neutri o alcalini aerati, il principale processo catodico di corrosione è la riduzione dell'ossigeno. L'efficienza di questo processo dipende dalla disponibilità di ossigeno e dalla sua capacità di diffondersi fino al sito di corrosione catodica.

Di conseguenza, la corrente applicata deve essere adeguata dinamicamente, richiedendo l'uso di sistemi di controllo automatico. Si utilizzano sistemi a potenziale controllato in tali contesti, dove il potenziale necessario per la protezione è impostato e la corrente impressa viene adeguata di conseguenza[56].



**Figura 4.10:** Schema di sistema di protezione catodica a corrente impressa [16].

## Capitolo 5

# Analisi dell'impatto di correnti vaganti continue su strutture metalliche interrate

In questo capitolo, verranno presentati i risultati delle simulazioni sull'analisi dell'impatto delle correnti vaganti continue su strutture metalliche interrate. Nel contesto della mia analisi, ho preso in considerazione diversi software di simulazione e modellazione legate alle correnti vaganti continue, tra cui:

- FreeFem è particolarmente indicato per simulazioni che richiedono flessibilità, rapidità di calcolo e la gestione di dati complessi su più mesh, ma richiede un investimento maggiore in termini di apprendimento rispetto ad altri strumenti [57].
- Biodeg è un software open-source scritto in FreeFEM, C++ e Python per la modellazione della degradazione dei biomateriali metallici e la simulazione del comportamento di biodegradazione di dispositivi medici e impianti metallici in esperimenti di corrosione [58].
- CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Field, Grounding and Soil Structure Analysis) è un potente set di strumenti software integrati, utilizzabile per analizzare con precisione i problemi legati alla messa a terra, al campo elettromagnetico e alle interferenze elettromagnetiche. In quanto piattaforma basata su elementi di contorno, permette la modellazione e la valutazione delle correnti vaganti [59].

- ANSYS è un software di simulazione ingegneristica avanzata che utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM), delle differenze finite (FDM) e altri metodi numerici per risolvere problemi complessi in vari ambiti dell'ingegneria. Viene utilizzato in una vasta gamma di settori, tra cui meccanica, elettronica, termodinamica, aerospaziale e automobilistico, per modellare e simulare il comportamento di sistemi fisici reali. I moduli necessari per svolgere le simulazioni riguardanti le correnti vaganti sono: Maxwell ANSYS, specializzato nella simulazione di campi elettromagnetici a bassa frequenza, ed Electrochemistry impiegato per modellare reazioni di corrosione e la loro relazione con le correnti vaganti [60].
- COMSOL Multiphysics è un pacchetto software che include un'analisi agli elementi finiti, un risolutore e una simulazione per una varietà di applicazioni fisiche e ingegneristiche, in particolare fenomeni accoppiati e multifisici. Il software consente interfacce utente basate sulla fisica tradizionale e sistemi accoppiati di equazioni differenziali parziali. Esso offre un ambiente di sviluppo integrato e un flusso di lavoro unico per applicazioni elettriche, meccaniche, idrodinamiche, acustiche e chimiche [61].

Ogni software offre specifiche funzionalità che potrebbero essere utili per il modello sviluppato, ma la scelta finale è ricaduta su COMSOL. Questa decisione è stata motivata dalla sua versatilità, dalla capacità di gestire complessi problemi di elettromagnetismo accoppiati con la meccanica strutturale, e dalle sue potenti capacità di risolvere problemi multifisici, permettendo un'analisi dettagliata e precisa. COMSOL ha inoltre un'interfaccia intuitiva e un'ampia gamma di strumenti di simulazione che facilita l'integrazione di diversi aspetti per la simulazione di modelli.

Nel presente lavoro, per lo studio dei fenomeni riguardanti le correnti vaganti, è stato utilizzato esclusivamente il pacchetto AC/DC Module. Sebbene il pacchetto Electrochemistry avrebbe potuto fornire strumenti più specifici e avanzati per la simulazione di processi elettrochimici, non è stato possibile impiegarlo a causa dell'assenza della licenza necessaria per il suo utilizzo. Questo ha comportato l'adozione di metodi alternativi e la modellazione semplificata, sfruttando le capacità offerte dall'AC/DC Module.

Il Modulo AC/DC, ramo "Campi Elettrici e Correnti" contiene interfacce fisiche per l'analisi di campi elettrici, distribuzioni di potenziale elettrico, densità di carica e conservazione della corrente a frequenze relativamente basse. Gli effetti induttivi sono trascurabili.

L'obiettivo principale di queste analisi è comprendere la distribuzione delle correnti vaganti in terreni omogenei, in presenza di una platea di fondazione di un edificio, che contiene i ferri di armatura collegati a un impianto di messa a terra in rame. In particolare, si intende esaminare l'interazione di queste correnti con le strutture

metalliche interrate, con lo scopo di fornire una base solida per lo studio dei fenomeni di corrosione indotta. I risultati ottenuti, sotto forma di distribuzioni di corrente e mappe di gradiente potenziale elettrico, offrono una visione dettagliata dei processi coinvolti.

Le equazioni di governo del seguente modulo sono:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (5.1)$$

dove:

- $\mathbf{E}$  rappresenta l'intensità del campo elettrico;
- $\mathbf{J}$  rappresenta la densità di corrente.

La densità di corrente  $\mathbf{J}$  nell'elettrolita del suolo segue la legge di Ohm e la sua relazione costitutiva è la seguente:

$$J = \sigma E, \quad (5.2)$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica del materiale.

Per determinare il campo elettrico, possiamo usare l'equazione di Laplace nel caso di una regione senza cariche libere:

$$\nabla^2 V = 0, \quad (5.3)$$

dove  $V$  è il potenziale elettrico.

Il campo elettrico  $\mathbf{E}$  è dato dal gradiente negativo del potenziale elettrico:

$$E = -\nabla V. \quad (5.4)$$

Le condizioni di interfaccia nei modelli dovranno soddisfare le seguenti equazioni:

$$E_{1t} = E_{2t}, \quad J_{1n} = J_{2n}, \quad (5.5)$$

dove:

- $\mathbf{E}_{1t}$  e  $\mathbf{E}_{2t}$  rappresentano le componenti tangenziali dell'intensità del campo elettrico;
- $\mathbf{J}_{1n}$  e  $\mathbf{J}_{2n}$  rappresentano le componenti normali della densità di corrente.

## **5.1 Modello 1 - Interazione tra il conduttore in rame e acciaio scollegati senza il blocco di cemento**

Il primo modello esamina le interazioni elettriche tra tre materiali distinti: il terreno, un conduttore in rame e un conduttore in acciaio. L'obiettivo principale è

valutare il comportamento elettrico di ciascun elemento e le reciproche influenze nel contesto di una distribuzione di corrente elettrica uniforme nel terreno. Il rame, grazie alla sua elevata conduttività elettrica, è ampiamente utilizzato in applicazioni elettriche e, in questo contesto, rappresenta l'elemento principale del sistema di messa a terra, garantendo la dispersione sicura delle correnti elettriche nel terreno. L'acciaio, d'altra parte, sebbene caratterizzato da proprietà conduttive inferiori rispetto al rame, è qui considerato nella sua funzione di ferri d'armatura. Lo studio delle interazioni tra rame e acciaio permette di comprendere come i campi elettrici, generati all'interno del sistema, influiscano sui materiali, con particolare attenzione alle dinamiche che si instaurano tra il sistema di messa a terra in rame e le armature in acciaio. Il terreno, infine, rappresenta un ambiente eterogeneo e meno conduttivo, ma fondamentale per simulare le condizioni realistiche di un sistema che coinvolge elementi metallici esposti a campi elettrici.

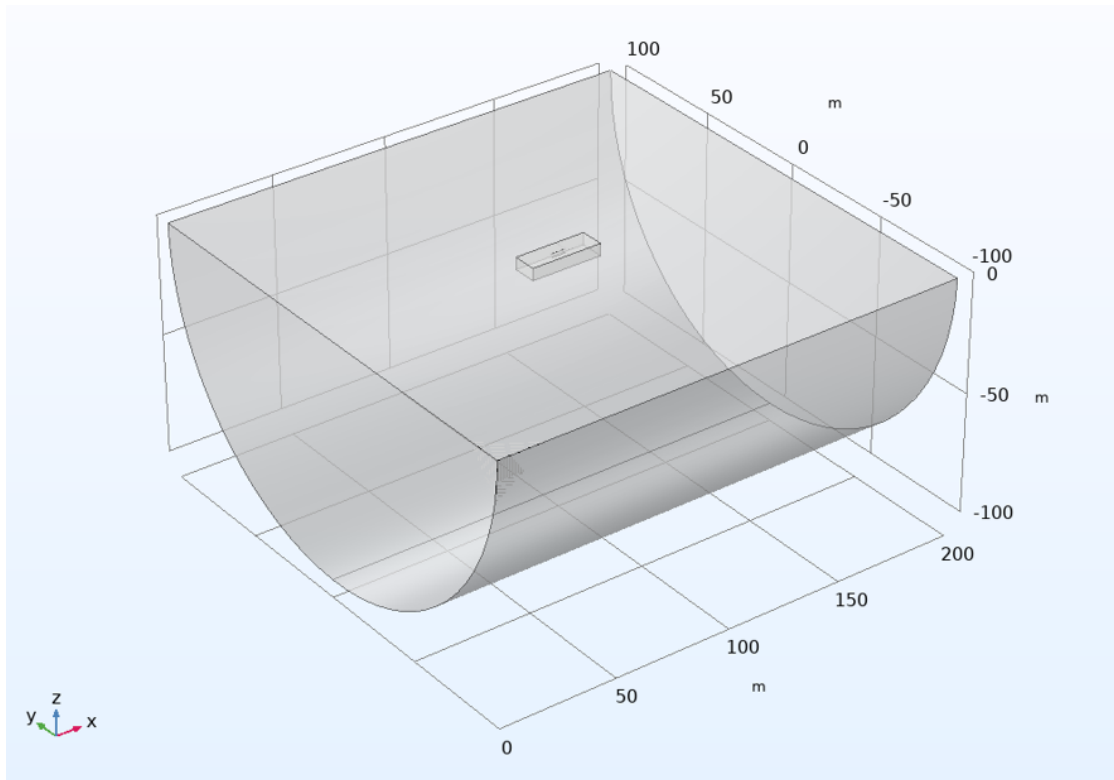
Il primo modello di simulazione è stato definito secondo la seguente geometria, in figura 5.1:

- il terreno è un semicilindro di raggio pari a 100 metri e lunghezza assiale di 200 metri; quest'ultima è distribuita lungo l'asse  $x$ . Esso rappresenta il volume all'interno del quale si propaga la corrente vagante. Esso è stato scelto per garantire che l'interazione tra il campo elettrico generato dalla corrente vagante e gli elementi interrati fosse correttamente modellata e uniforme.
- un cilindro di raggio pari a 0.02 metri e una lunghezza pari a 6 metri, rappresentante il conduttore in rame. Tale elemento è stato posizionato ad una profondità di 2 metri, e ad una distanza  $x$  dal riferimento (sorgente di corrente) pari a 97 metri ( $x=97\text{m}$ ,  $y=0$ ,  $z=-2$ ).
- il conduttore in acciaio è un cilindro di raggio pari a 0.02 metri e lunghezza pari a 6 metri, costruito in 3D parallelo sull'asse  $x$ . Esso è posizionato sopra il conduttore in rame ad una profondità di 0.5m ( $x=97\text{m}$ ,  $y=0$ ,  $z=-0.5$ );

In questo contesto, verranno analizzati tre casi distinti:

- **Caso 1:** l'interazione tra terreno e conduttore in rame senza il conduttore in acciaio;
- **Caso 2:** l'interazione tra terreno e conduttore in acciaio senza il conduttore in rame;
- **Caso 3:** l'interazione combinata tra il terreno, il conduttore in rame e in acciaio.

Le proprietà dei materiali sono registrate in termini di resistività elettrica  $\rho$  e permittività elettrica relativa  $\epsilon_r$ , riportate nella tabella 5.1,[62],[63][64].



**Figura 5.1:** Geometria del modello 1.

**Tabella 5.1:** Proprietà del suolo, del rame e dell'acciaio.

<b>Materiale</b>	<b>Proprietà</b>	<b>Valore</b>	<b>Unità</b>
Terreno	Resistività elettrica ( $\rho$ )	200	$\Omega \cdot \text{m}$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	5	-
Rame	Resistività elettrica ( $\rho$ )	$1.667 \times 10^{-8}$	$\Omega \cdot \text{m}$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	1	-
Acciaio	Resistività elettrica ( $\rho$ )	$1 \times 10^{-6}$	$\Omega \cdot \text{m}$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	1	-

Un terreno con una resistività di  $200 \Omega \cdot \text{m}$  rappresenta una condizione di terreno moderatamente conduttivo, tipico di aree con suoli misti o con moderato contenuto d'acqua. Questo valore è frequentemente riscontrato in terreni argillosi o in suoli con composizione variabile. Non è un terreno altamente conduttivo (come quelli molto umidi), ma nemmeno un suolo ad alta resistività, come terreni rocciosi o desertici [27].

### 5.1.1 Condizioni al Contorno

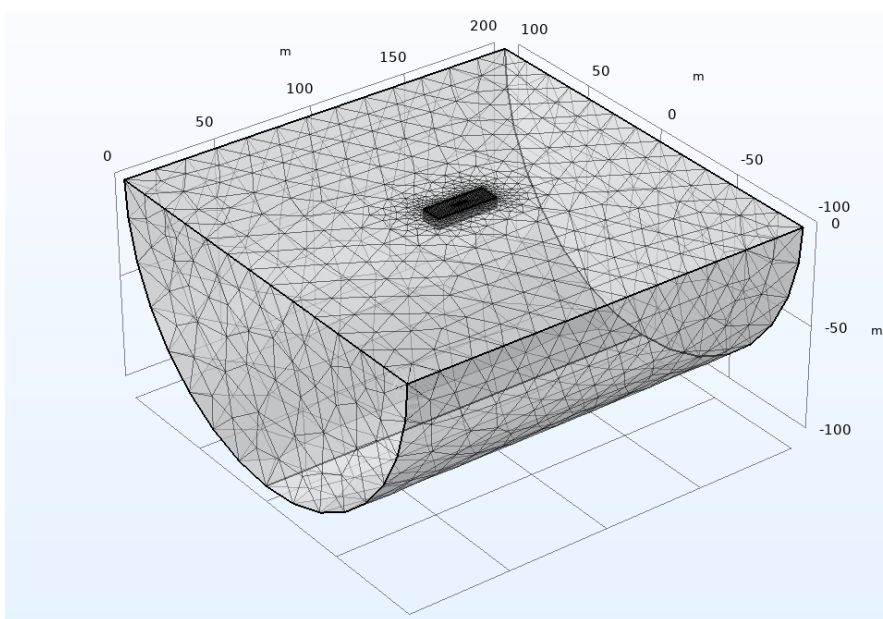
Per simulare l'effetto delle correnti vaganti sui conduttori interrati, sono state impostate specifiche condizioni al contorno nel modello:

- **Densità di Corrente Normale:** È stata applicata una densità di corrente normale in regime continuo di  $0,001 \text{ A/m}^2$  su una delle estremità del semicilindro, simulando l'ingresso di una corrente vagante nel terreno, proveniente da una sorgente in corrente continua. La superficie totale è di circa  $15707 \text{ m}^2$ , da cui risulta una corrente entrante totale di  $15.7 \text{ A}$ . Si ipotizza che il flusso di corrente in ingresso sia uniforme nel terreno.
- **Isolamento Elettrico:** Le superfici laterali del semicilindro sono state impostate come isolanti elettrici  $J_n = 0$ , impedendo qualsiasi flusso di corrente attraverso queste superfici. Questa condizione è fondamentale per garantire che la corrente vagante interagisca principalmente con le tubazioni interrate senza dispersione sulle altre facce.
- **Condizione di Terra:** L'estremità opposta del semicilindro è stata impostata come condizione di "Terra" per permettere alla corrente di uscire dal sistema. Questa rappresenta un punto di riferimento per il potenziale elettrico e simula un percorso di ritorno della corrente vagante verso la sorgente, chiudendo il circuito elettrico e permettendo un'analisi completa della distribuzione di corrente.
- **Continuità della densità di corrente normale** alla superficie, applicata sui contorni del semicilindro, rappresentante il terreno; questo significa che la corrente che fluisce da un dominio all'altro; attraverso tali contorni non cambia improvvisamente, come visto nell'equazione 5.5, in cui il flusso di corrente normale entra da una superficie ed esce in egual quantità dalla superficie opposta.

### 5.1.2 Analisi e Costruzione della Mesh

La qualità della mesh è un fattore cruciale per garantire l'accuratezza delle simulazioni numeriche. In questo lavoro, sono state generate e analizzate diverse mesh per ottimizzare il bilanciamento tra accuratezza della simulazione e tempo di calcolo. La costruzione della mesh è stata suddivisa in più fasi, considerando le diverse geometrie presenti nel modello, come il terreno e le tubazioni interrate, mostrate in figura 5.2.





**Figura 5.2:** Mesh del modello distribuita su più livelli.

La mesh generata per il terreno utilizza una discretizzazione tetraedrica non strutturata. Per garantire un'adeguata risoluzione nelle aree di interesse, è stata utilizzata una dimensione degli elementi predefinita di tipo "Normale". Nelle aree lontane dai conduttori, la densità della mesh è stata mantenuta relativamente bassa per ridurre il tempo di calcolo.

I metalli sono stati necessariamente costruiti con una mesh più fitta per poter catturare con più precisione i fenomeni fisici di interesse.

Per migliorare ulteriormente la risoluzione nella regione intorno ai metalli, è stato introdotto un elemento geometrico parallelepipedo terreno, attorno ad essi di dimensioni: larghezza=30m, profondità=10m e altezza pari=5m. Questo elemento aggiuntivo ha permesso di raffinare ulteriormente la mesh in questa regione senza aumentare inutilmente la densità di mesh nel resto del dominio.

L'implementazione di queste strategie di raffinamento della mesh ha garantito che il modello fosse sufficientemente accurato nelle aree critiche, mantenendo un tempo di soluzione accettabile.

Per garantire che la simulazione fornisca risultati accurati, è stata effettuata una valutazione dettagliata della qualità della mesh. La mesh utilizzata per il modello è composta da un totale di 2419338 tetraedri. Un modo per ottenere rapidamente una panoramica della mesh creata è quello di visualizzare le statistiche fornite direttamente da COMSOL Multiphysics.

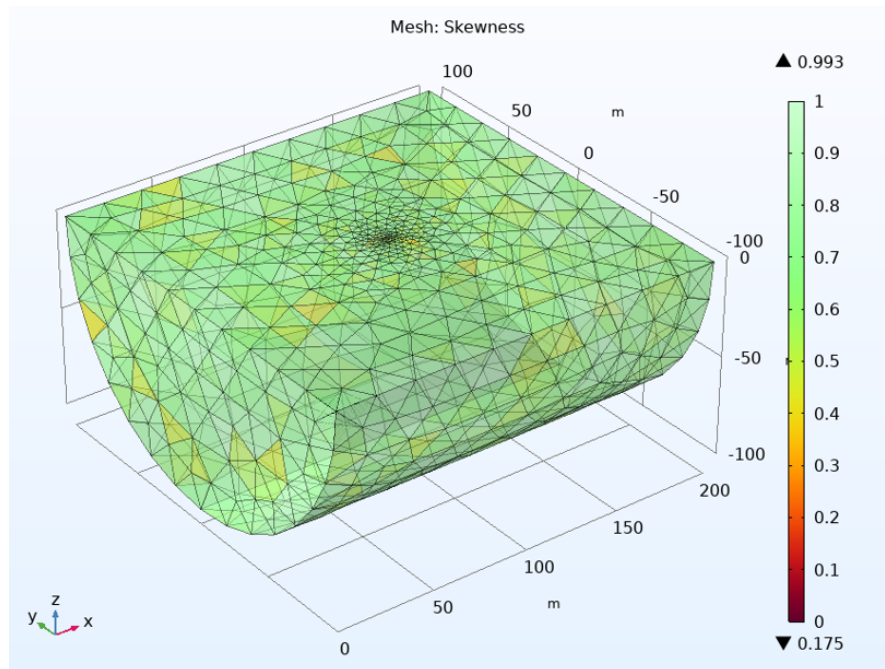
La misura della Skewness è una grandezza di controllo adatta per la maggior parte dei tipi di mesh; questa misura di qualità si basa sullo skew equiangolari che

penalizza gli elementi con angoli grandi o piccoli rispetto agli angoli in un elemento ideale. Questa misura di qualità viene utilizzata anche quando si segnalano la qualità degli elementi difettosi durante la generazione di mesh. Con la misura dell'angolo massimo, solo gli elementi con angolazione di grandi dimensioni sono penalizzati, rendendo questa opzione particolarmente adatta per le maglie in cui sono desiderati elementi anisotropi, come le mesh di strato limite.

I risultati dell'analisi della qualità della mesh sono rappresentati dai seguenti dati:

- **Qualità minima degli elementi:** 0.2101
- **Qualità media degli elementi:** 0.7089
- **Rapporto volumi degli elementi:** 1.373e-11
- **Volume della mesh:** 3.127e6 m<sup>3</sup>

La maggior parte degli elementi presentano valori di qualità della *Skewness* accettabili, suggerendo che la mesh ha una qualità complessiva buona, con un numero limitato di elementi distorti, che potrebbero influire negativamente sulla precisione della simulazione. Tale risultato può essere visualizzato anche dalla figura 5.3, che presenta un'analisi grafica sulla qualità della mesh di tutto il sistema.

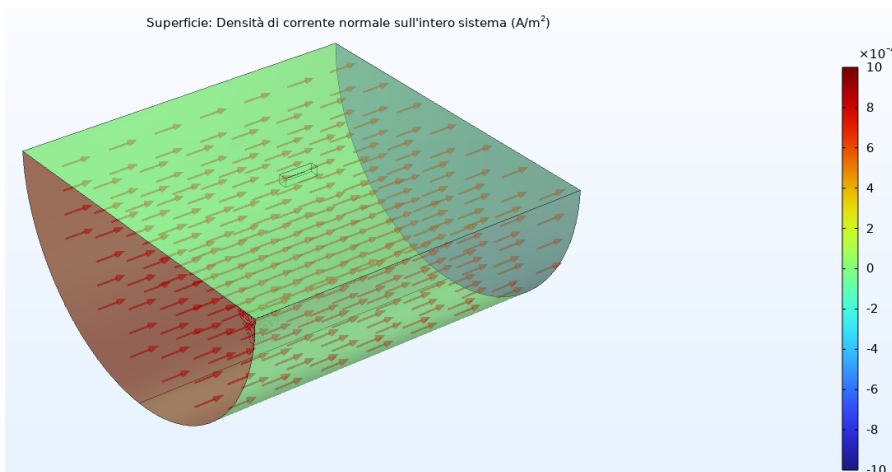


**Figura 5.3:** Valutazione grafica della Mesh in termini di Skewness.

### 5.1.3 Validità del Modello

Per verificare la validità del modello, è necessario effettuare un bilancio di corrente per l'intero sistema e per i domini in rame e acciaio.

Partiamo dall'intero sistema, verificando che esso segua il comportamento voluto. Tale verifica può essere ultimata graficamente, analizzando la figura 5.4.



**Figura 5.4:** Valutazione della densità di corrente sull'intero sistema.

Si potrebbe analizzare come grandezza sia l'intensità di corrente che la densità di corrente, in quanto le superfici coinvolte nel calcolo sono uguali.

Come si può notare dalle frecce di flusso  $\vec{J}$ , nell'immagine 5.4, la densità di corrente entra dalla base di sinistra con un valore di  $0.001 \text{ A/m}^2$  ed esce con lo stesso valore dalla superficie di destra. Le superfici laterali del sistema riportano un valore di densità di corrente pari a  $0 \text{ A/m}^2$ .

Per quanto riguarda il dominio dell'elemento in rame, si può utilizzare la seguente formula di base:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (5.6)$$

Dove:

- $I$  è la corrente totale (in Ampere).
- $\vec{J}$  è la densità di corrente (in  $\text{A/m}^2$ ).
- $d\vec{A}$  è l'elemento di superficie normale alla direzione del flusso della corrente (in  $\text{m}^2$ ).
- $S$  è la superficie attraverso cui passa la corrente (nel nostro caso, la sezione trasversale del conduttore).

L'intensità di corrente  $I$  è data dall'integrale della densità di corrente  $\vec{J}$  lungo una superficie  $S$  perpendicolare al flusso della corrente, cioè una sezione trasversale del conduttore. Le intensità di corrente sono state rilevate, impostando come dataset le due basi del cilindro in rame e acciaio ed effettuando un'integrale di superficie della densità di corrente su queste ultime. I risultati ottenuti sono (riferimento caso 3, appendice A):

- **Corrente in ingresso:**  $102.9 \mu A$
- **Corrente in uscita:**  $103.7 \mu A$

L'errore relativo tra la corrente in ingresso e quella in uscita è stato calcolato utilizzando la formula dell'errore relativo:

$$\text{Errore Relativo} = \frac{|I_{\text{out}} - I_{\text{in}}|}{I_{\text{in}}} \approx \frac{|103.7 - 102.9|}{102.9} \approx 0.00777 \quad (5.7)$$

Di conseguenza, la precisione del modello è risultata essere:

$$\text{Precisione} = (1 - \text{Errore Relativo}) \times 100\% \approx (1 - 0.00777) \times 100\% \approx 99.2\% \quad (5.8)$$

I risultati ottenuti per l'acciaio sono:

- **Corrente in ingresso:**  $95.98 \mu A$
- **Corrente in uscita:**  $95.38 \mu A$

L'errore relativo tra la corrente in ingresso e quella in uscita è stato calcolato utilizzando la formula dell'errore relativo:

$$\text{Errore Relativo} = \frac{|I_{\text{out}} - I_{\text{in}}|}{I_{\text{in}}} \approx \frac{|95.38 - 95.98|}{95.98} \approx 0.00625 \quad (5.9)$$

Di conseguenza, la precisione del modello è risultata essere:

$$\text{Precisione} = (1 - \text{Errore Relativo}) \times 100\% \approx (1 - 0.00625) \times 100\% \approx 99.3\% \quad (5.10)$$

Il modello presenta un'alta precisione, quindi può essere considerato accurato e affidabile per simulare la distribuzione delle correnti e del gradiente del potenziale elettrico nei conduttori interrati.

#### **5.1.4 Risultati**

Lo studio applicato al modello è di tipo stazionario. Il risolutore fornisce come risultati automatici per il modulo AC/DC, la caduta di potenziale elettrico, campo elettrico e il gradiente di potenziale elettrico.

I risultati saranno presentati singolarmente per ciascuno dei tre casi studiati, in modo da poter permettere una chiara visione delle interazioni elettriche tra il terreno e i conduttori coinvolti.

Uno dei primi risultati è la distribuzione del potenziale su tutto il sistema, visibile graficamente nella figura 5.5:

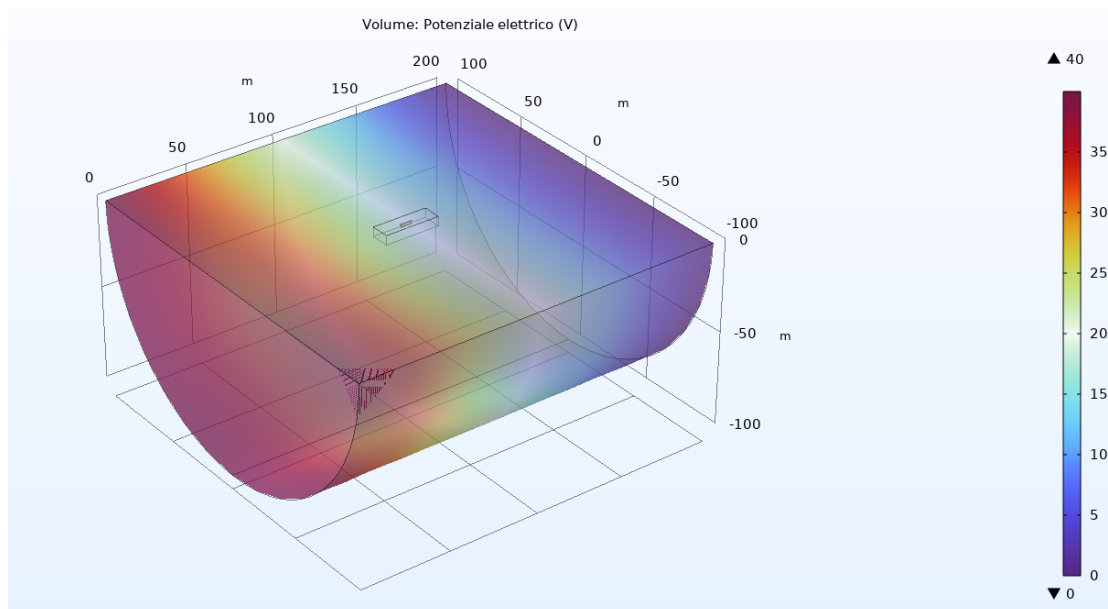


Figura 5.5: Distribuzione del potenziale V sul sistema.

### Caso 1: terreno e rame senza il conduttore in acciaio

Nel caso 1, l'analisi si è concentrata sul conduttore in rame immerso nel terreno. In particolare, sono stati studiati tre aspetti principali: il gradiente di potenziale elettrico nel terreno nell'intorno del contorno del conduttore, la distribuzione della densità di corrente superficiale e la corrente totale che attraversa il conduttore.

#### Gradiente di potenziale elettrico

Un conduttore di rame immerso in un terreno con un certo gradiente di potenziale, assorbe una quantità significativa di corrente all'inizio del conduttore e la disperde in egual quantità all'uscita; questo accade perché è la distanza su cui si ha il massimo gradiente di potenziale rispetto al terreno. Vicino alle estremità del cilindro, i valori massimi del gradiente di potenziale indicano una transizione più rapida del campo elettrico, dovuto al cambio di materiale. Notiamo infatti, dalle figure 5.6 e 5.7, che i massimi di gradiente di potenziale in prossimità delle basi presentano dei valori intorno a  $14.2 \text{ V/m}$ , i quali poi decrescono a  $10^{-3}$ - $10^{-4} \text{ V/m}$  verso la metà del conduttore. Tale andamento sarà comune per tutti gli altri casi analizzati.

Di seguito viene riportata una tabella con una successione di valori puntuali del gradiente di potenziale elettrico intorno al conduttore in rame, lungo la direzione x. I valori verranno presi dalla coordinata  $x=97\text{m}$  fino alla coordinata  $x=103\text{m}$ , tali coordinate indicano la posizione lungo l'asse x del conduttore in rame.

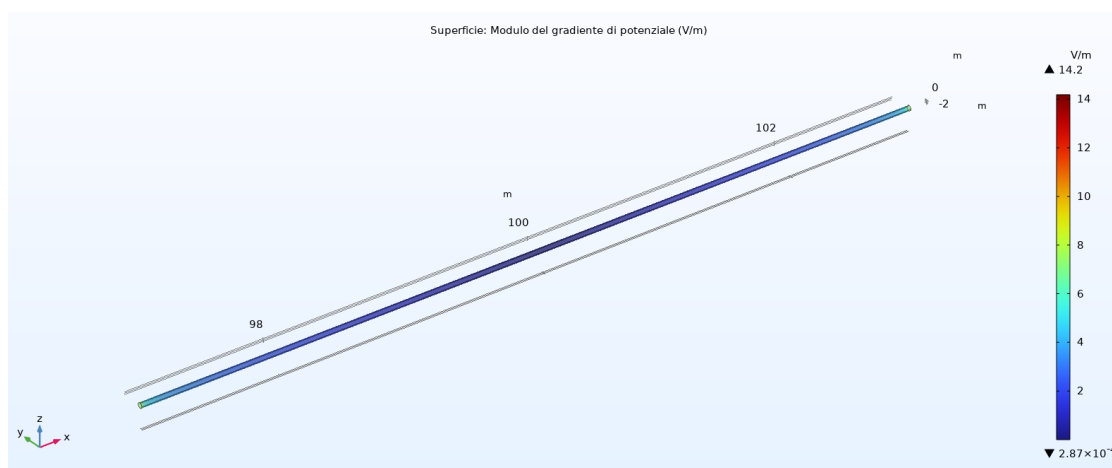
### Densità di corrente

Il campo di corrente è strettamente collegato con il campo del potenziale elettrico, e quindi di conseguenza con il campo elettrico. Come anticipato precedentemente, ci si aspetta che un conduttore di rame, immerso in un terreno con un certo gradiente di potenziale, assorba una quantità significativa di corrente all'inizio del conduttore e la disperda in egual quantità all'uscita, con valori via via decrescente a metà della superficie del conduttore. Tale risultato è evidente graficamente dalle figure 5.8 e 5.9.

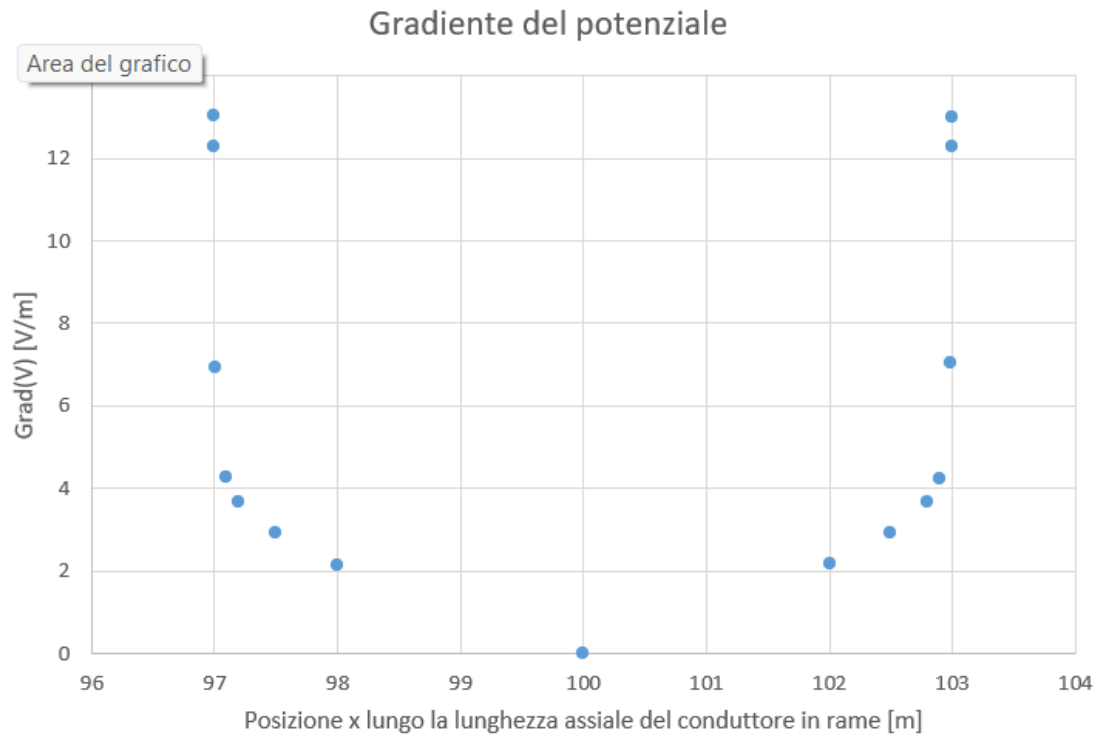
La densità di corrente superficiale è bassa al centro e aumenta verso le estremità, dove la corrente è "attratta" a fluire attraverso il cilindro di rame.

Come analizzato per il gradiente di potenziale sono stati misurati negli stessi punti i valori della densità di corrente superficiale descritti nella tabella 5.3.

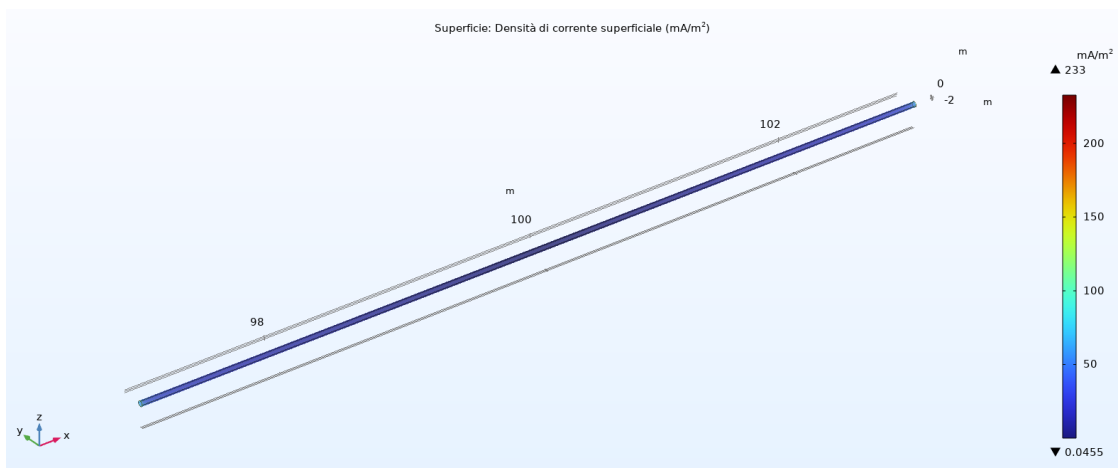
Oltre alla densità di corrente superficiale è interessante analizzare anche la densità di corrente nel volume del cilindro di rame. Poiché il cilindro è un conduttore con una certa lunghezza e la corrente viene forzata a fluire lungo l'asse principale, il centro diventa la regione attraverso cui tutta la corrente deve passare. Di conseguenza, la densità di corrente raggiunge il massimo in quella regione, perché il conduttore al centro "canalizza" il flusso di corrente, come si vede dall'immagine 5.10. Come si nota dalla tabella 5.4 la corrente totale assorbita è pari a  $6.672\text{ mA}$ .



**Figura 5.6:** Caso 1: Gradiente del potenziale elettrico vicino al conduttore di rame Cu.



**Figura 5.7:** Caso 1: Grafico del Gradiente del potenziale elettrico vicino al conduttore di rame Cu.



**Figura 5.8:** Caso 1: Densità di corrente sulla superficie del rame.

**Tabella 5.2:** Caso 1: Tabella dei valori del gradiente di potenziale elettrico intorno al conduttore in rame in funzione della posizione sull'asse x.

posizione asse X [m]	Grad(V) [V/m]
97	13,05
97,001	12,29
97,01	6,947
97,1	4,256
97,2	3,661
97,5	2,918
98	2,153
100	0,00918
102	2,163
102,5	2,931
102,8	3,675
102,9	4,216
102,99	7,061
102,999	12,29
103	13,01

**Tabella 5.3:** Caso 1: Tabella dei valori della densità di corrente ingresso/uscita dal rame.

posizione asse X [m]	Densità di corrente [mA/m <sup>2</sup> ]
97	222,6
97,001	187,7
97,01	69,41
97,1	42,35
97,2	36,72
97,5	29,01
98	21,56
100	0,0492
102	21,61
102,5	29,2
102,8	36,64
102,9	42,27
102,99	69,9
102,999	182,7
103	220,1



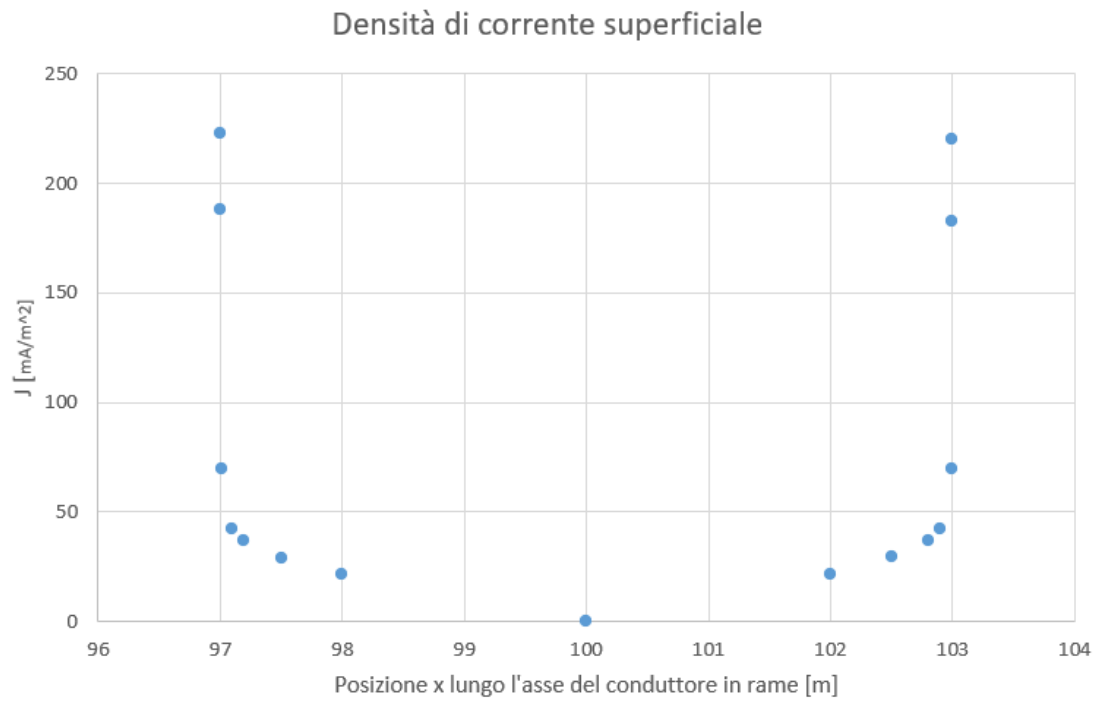


Figura 5.9: Caso 1: Grafico della Densità di corrente sulla superficie del rame.

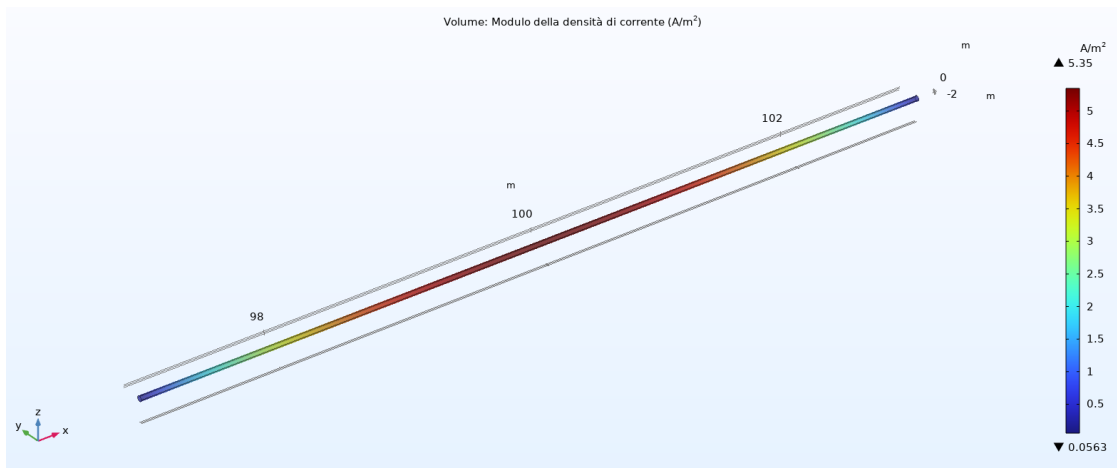


Figura 5.10: Densità di flusso netto di corrente nel volume del cilindro di rame in diverse sezioni trasversali.

**Tabella 5.4:** Caso 1: Corrente I [mA] che circola nel conduttore in rame (singolo elemento interrato nel terreno) in diverse sezioni trasversali lungo il suo asse.

<b>Posizione [m]</b>	<b>Corrente (mA)</b>
97	0,1113
97,2	1,285
98	4,069
99	6,039
100	6,672
101	6,038
102	4,066
102,8	1,284
103	0,1115

## Caso 2: terreno e acciaio senza il conduttore in rame

Il caso 2 è duale al caso 1, in quanto l'attenzione questa volta si focalizza sull'interazione tra il conduttore in acciaio e il terreno, senza la presenza del conduttore in rame.

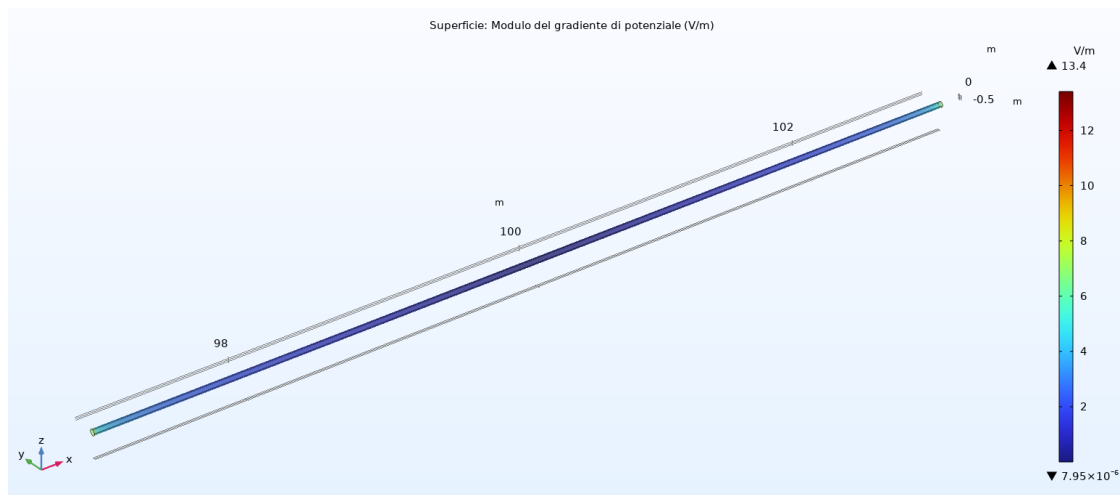
### Gradiente di potenziale elettrico

Il conduttore in acciaio come singolo elemento interrato esibisce i seguenti valori di gradiente del potenziale, i quali sono compresi tra  $7.95 \times 10^{-6}$  V/m e circa 13.4, V/m, come descritto nella figura 5.11. L'andamento del potenziale è simile a quello visto per il rame, ma con valori rispetto al precedente inferiori, come si nota in tabella 5.5; questo è dato dalle proprietà intrinseche del materiale, come la sua resistività elettrica e la densità di corrente che attraversa l'acciaio.

### Densità di corrente

La densità di corrente superficiale raggiunge un massimo di  $213 \text{ mA/m}^2$ , in figura 5.12, leggermente inferiore al rame come singolo elemento nel terreno, come si nota nella figura 5.8 e tabella 5.6. Come visto per l'andamento nel conduttore in rame, si ha comunque un'alta densità di corrente sull'acciaio, poiché tutto il flusso deve essere condotto dal solo conduttore interrato, senza il supporto di un conduttore con maggiore conducibilità.

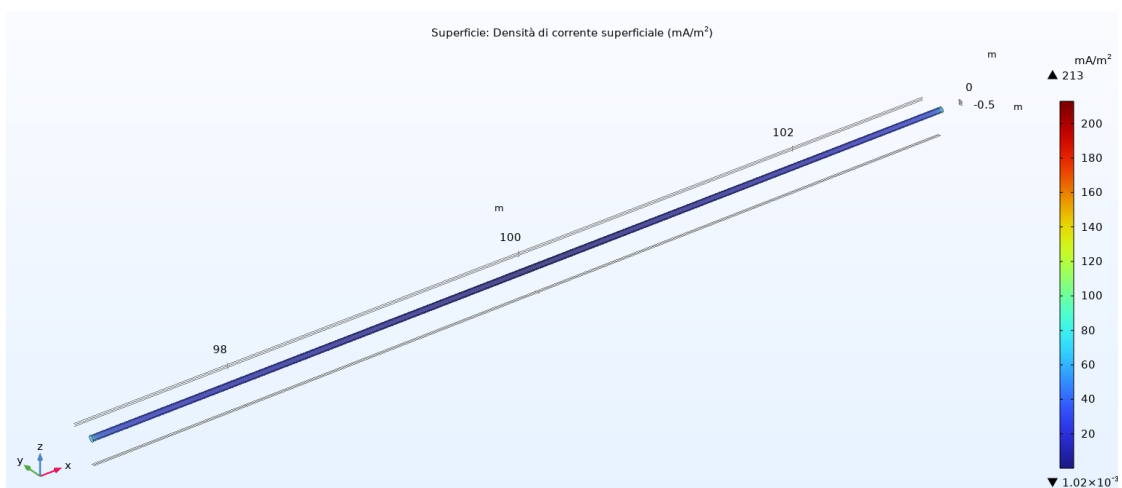
La corrente totale assorbita dall'acciaio risulta leggermente inferiore al rame, in quanto ha una conducibilità inferiore. Tali risultati sono evidenti nella tabella 5.7, che descrive la corrente nell'acciaio in varie superfici trasversali, lungo la direzione assiale del conduttore, con valore massimo pari a 5.898 mA.



**Figura 5.11:** Caso 2: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio.

**Tabella 5.5:** Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio.

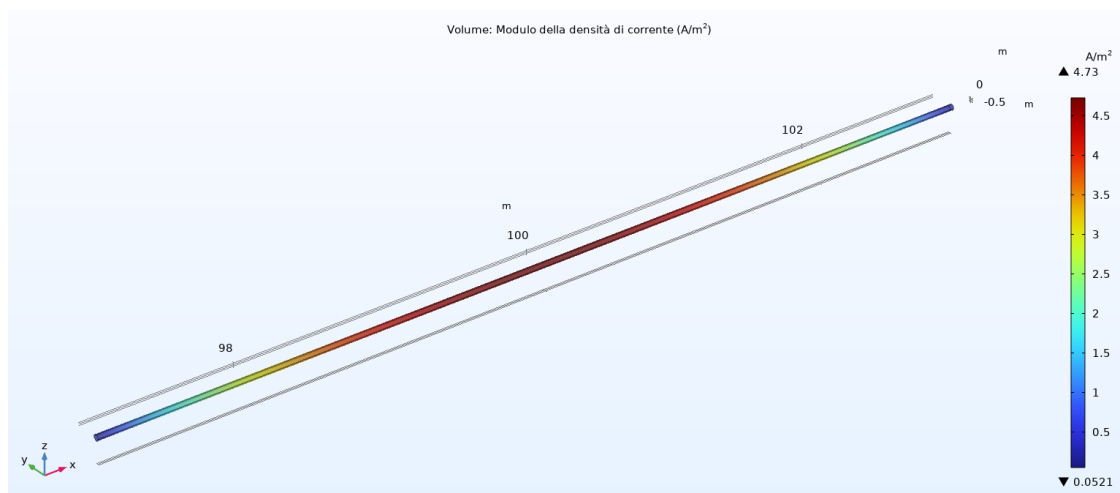
Posizione [m]	Potenziale (V/m)
97	12,43
97,001	11,54
97,01	6,544
97,1	3,967
97,2	3,427
97,5	2,706
98	1,933
100	0,00642
102	1,944
102,5	2,667
102,8	3,675
102,9	3,982
102,99	6,575
102,999	11,19
103	12,01



**Figura 5.12:** Caso 2: Densità di corrente sulla superficie del conduttore in acciaio.

**Tabella 5.6:** Densità di corrente sulla superficie dell'acciaio in funzione della posizione sull'asse x.

Posizione [m]	Densità di corrente (mA/m <sup>2</sup> )
97	199,8
97,001	166,1
97,01	65,39
97,1	39,43
97,2	34,13
97,5	26,94
98	19,15
100	0,00366
102	19,42
102,5	26,48
102,8	34,14
102,9	39,57
102,99	65,25
102,999	166,6
103	198,7



**Figura 5.13:** Caso 2: Densità di flusso di corrente netto nel volume del conduttore in acciaio.

**Tabella 5.7:** Corrente I [mA] che circola nel conduttore in acciaio (singolo elemento interrato nel terreno) in diverse sezioni trasversali lungo il suo asse.

<b>Posizione [m]</b>	<b>Corrente (mA)</b>
97	0,1033
97,2	1,19
98	3,674
99	5,362
100	5,898
101	5,362
102	3,674
102,8	1,19
103	0,1039

### **Caso 3: Rame e Acciaio scollegati**

Il caso 3 tiene conto del modello 1 completo, in cui si hanno interrati due metalli con proprietà elettriche differenti.

#### **Gradiente di potenziale elettrico**

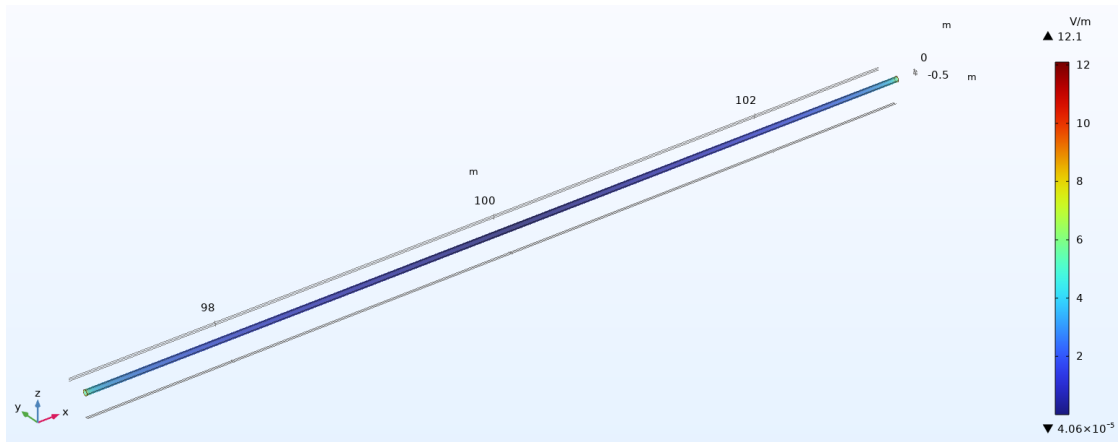
Quando l'acciaio interagisce con un conduttore di rame, gran parte della corrente fluirà attraverso il rame, il quale ha una conducibilità molto più alta. Di conseguenza, il gradiente di potenziale vicino al dominio in acciaio diminuisce, poiché la corrente totale che deve essere sostenuta dall'acciaio è ridotta, come si nota nella figura 5.14. Infatti, il gradiente del potenziale elettrico mostra valori compresi tra  $4.06 \times 10^{-5}$  V/m e un massimo di circa 12.1V/m. Il conduttore in acciaio ha un'interazione significativa con il rame; infatti anche il gradiente di potenziale elettrico sul rame si riduce, confrontato con il primo caso. Il gradiente del potenziale elettrico vicino al rame raggiunge un massimo di 12.6V/m, visibile in figura 5.15 e in tabella 5.8. Il gradiente di potenziale elettrico è direttamente correlato al campo elettrico nel materiale, dato dalla relazione 5.4. Con l'aggiunta dell'acciaio, il campo elettrico si ridistribuisce nel sistema, per soddisfare le nuove condizioni di continuità della corrente e di conservazione della carica.

#### **Densità di corrente**

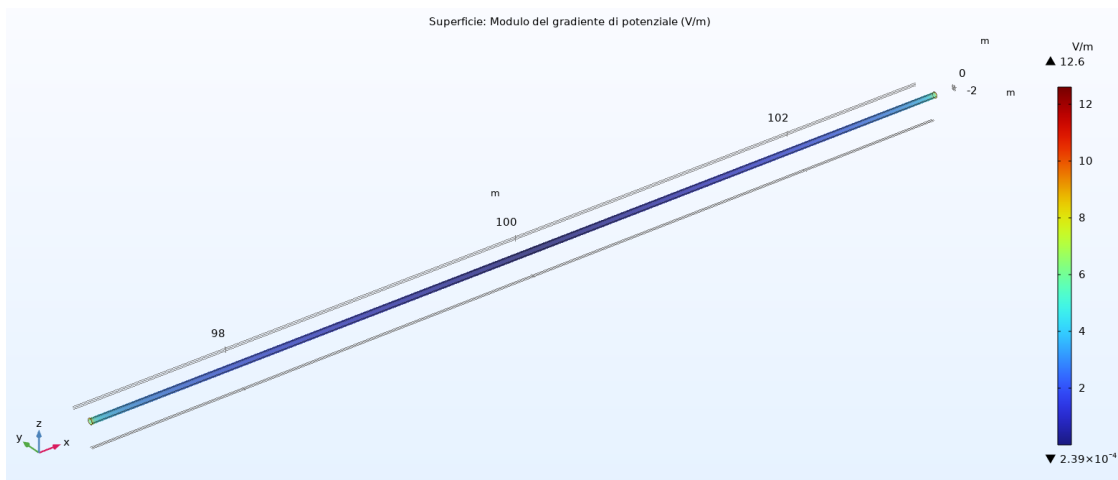
Nel sistema in cui il conduttore di rame è accoppiato a un altro conduttore con minore conducibilità (l'acciaio), una frazione significativa della corrente totale preferirà fluire attraverso il rame, dove l'opposizione al flusso di corrente (resistività) è minore. Ciononostante, la presenza dell'acciaio riduce la densità di corrente sul rame, rispetto al caso 1. La densità di corrente superficiale massima sul rame è di  $207 \text{ mA/m}^2$ , in figura 5.16. Come nel caso precedente i valori massimi si trovano in prossimità delle estremità del conduttore, punto da cui vi entra più corrente.

La densità di corrente superficiale massima sull'acciaio raggiunge i  $198 \text{ mA/m}^2$ , in figura 5.17. La tabella 5.9 raccoglie alcuni valori significativi di confronto della densità di corrente superficiale sui due conduttori.

Risulta interessante visualizzare anche la corrente assorbita dai metalli, nella tabella 5.10; come ci si aspettava, tali valori sui metalli accoppiati risultano inferiori rispetto ai casi 1 e 2. Il rame, come previsto, assorbe una quantità maggiore di corrente rispetto all'acciaio.



**Figura 5.14:** Caso 3: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio.

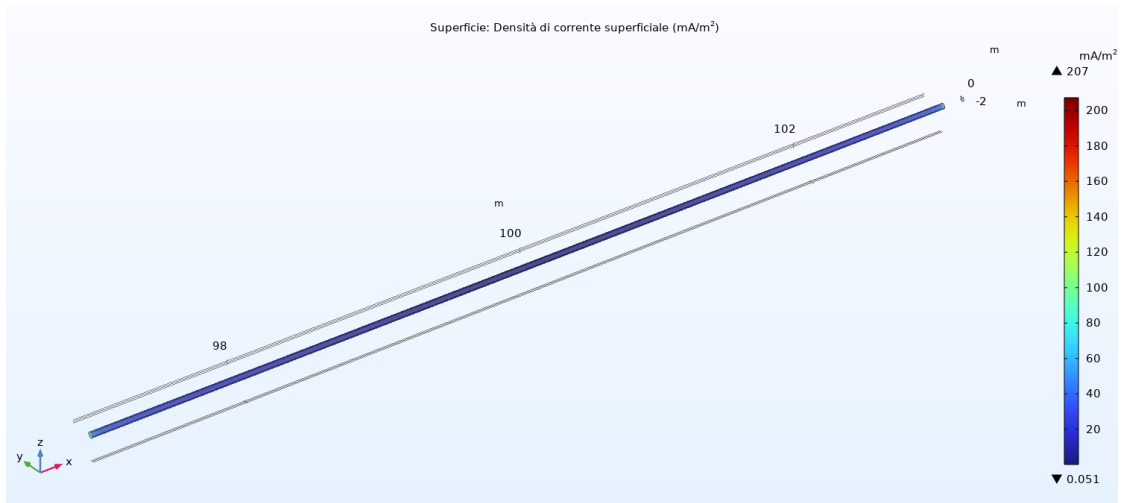


**Figura 5.15:** Caso 3: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame.



**Tabella 5.8:** Caso 3: Confronto del gradiente di potenziale in prossimità dei domini in rame e acciaio.

Posizione [m]	Rame (V/m)	Acciaio (V/m)
97	12,24	11,68
97,001	11,36	10,47
97,01	6,419	5,976
97,1	3,865	3,591
97,2	3,314	3,09
97,5	2,576	2,354
98	1,871	1,655
100	0,00271	0,00232
102	1,873	1,663
102,5	2,597	2,368
102,8	3,337	3,079
102,9	3,863	3,611
102,99	6,445	6,002
102,999	10,35	10,34
103	11,799	11,24



**Figura 5.16:** Caso 3: Densità di corrente superficiale sul conduttore in rame.

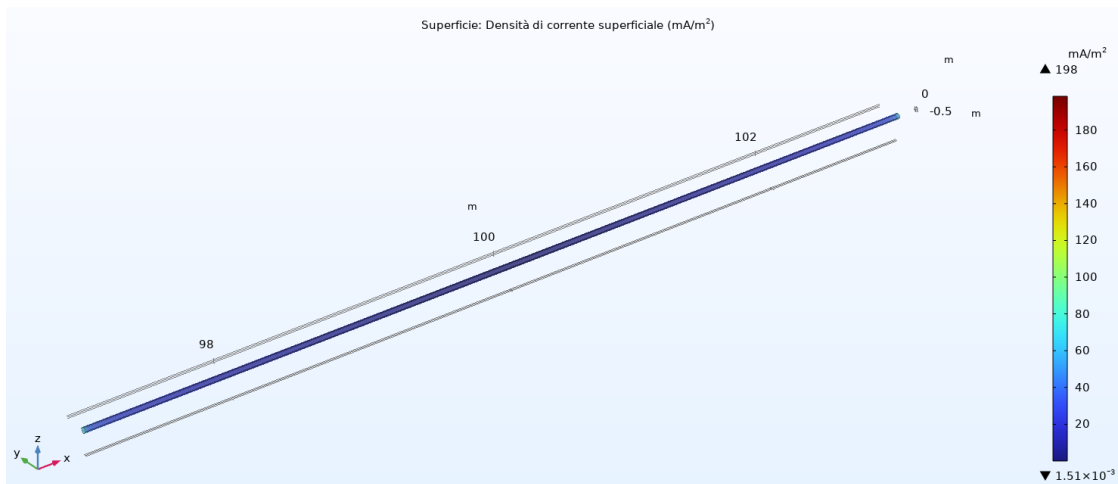


Figura 5.17: Caso 3: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio.

Tabella 5.9: Confronto della densità di corrente superficiale tra rame e acciaio in funzione della coordinata x.

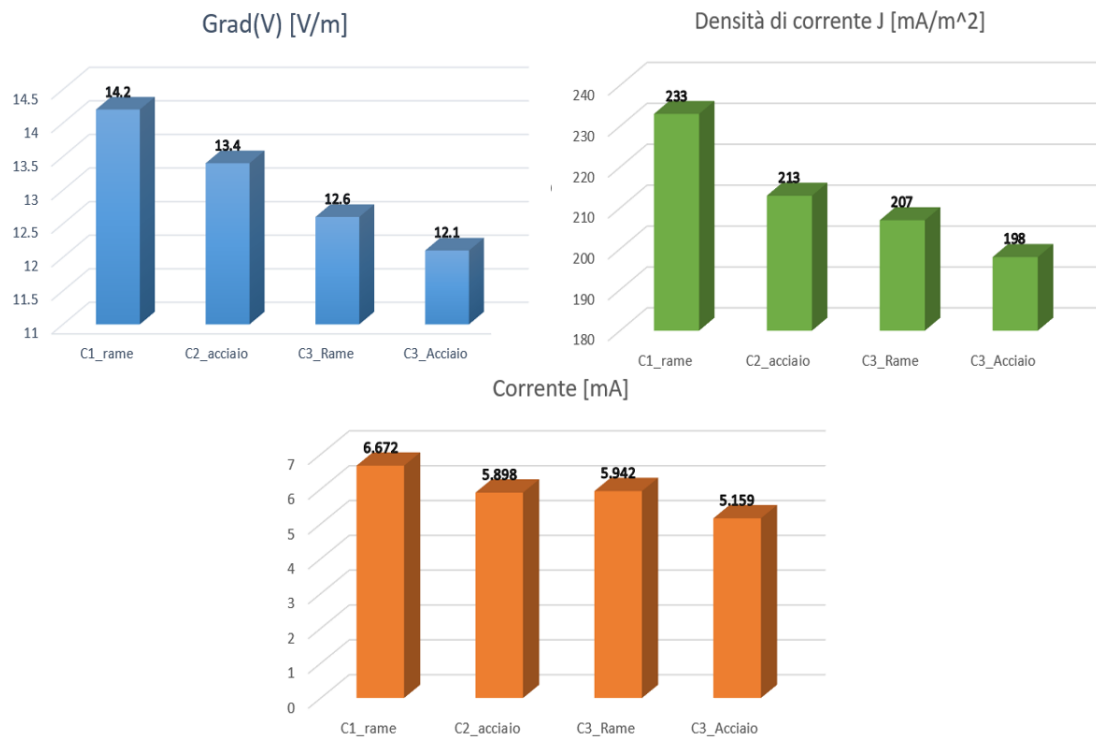
Posizione [m]	Rame (mA/m <sup>2</sup> )	Acciaio (mA/m <sup>2</sup> )
97	198,2	179,9
97,001	162,7	151,7
97,01	64,05	59,77
97,1	38,65	35,55
97,2	33,26	30,74
97,5	25,6	23,54
98	18,61	16,5
100	0,0293	0,00866
102	18,59	16,42
102,5	25,95	23,23
102,8	33,33	30,81
102,9	38,41	35,71
102,99	64,1	60,41
102,999	179,2	149,8
103	198,4	174,63

**Tabella 5.10:** Confronto della corrente  $I$  [mA] che circola nel conduttore in rame e acciaio in diverse sezioni trasversali lungo i loro assi.

Posizione [m]	Rame (mA)	Acciaio (mA)
97	0,1029	0,09598
97,2	1,186	1,088
98	3,689	3,289
99	5,402	4,718
100	5,942	5,159
101	5,401	4,718
102	3,688	3,29
102,8	1,186	1,088
103	0,1037	0,09538

**Tabella 5.11:** Confronto dei casi analizzati nel Modello 1, in termini di gradiente di potenziale elettrico massimo [V/m], densità di corrente massima [mA/m<sup>2</sup>] e corrente totale assorbita [mA].

Casi - metallo	$Grad(V)_{Max}$ [V/m]	$J_{Max}$ [mA/m <sup>2</sup> ]	$I_{tot}$ [mA]
<b>Caso 1 - Rame</b>	14.2	233	6.672
<b>Caso 2 - Acciaio</b>	13.4	213	5.898
<b>Caso 3 - Rame</b>	12.6	207	5.942
<b>Caso 3 - Acciaio</b>	12.1	198	5.159



**Figura 5.18:** Risultati finali in termini di gradiente di potenziale Grad(V) massimo [V/m], J Densità di corrente massima [mA/m²] e I corrente totale [mA] che attraversa i conduttori, a confronto dei casi: C1, interazione tra terreno e conduttore in rame; C2, interazione tra terreno e conduttore in acciaio; C3, interazione combinata tra terreno, rame e acciaio (riferimento appendice A).

### 5.1.5 Influenza dei Parametri Fisici sulle Proprietà Elettriche del Sistema

L'obiettivo di questo capitolo è quello di esplorare come la variazione di determinati parametri fisici influenzino il passaggio di corrente nel conduttore di rame interrato. In particolare, si esaminano due variabili chiave: la resistività elettrica del terreno circostante e la lunghezza assiale del conduttore di rame.

La resistività del terreno gioca un ruolo fondamentale nel determinare l'efficacia della dispersione della corrente elettrica. Infatti, terreni con caratteristiche diverse possono comportarsi in maniera significativamente differente, influenzando i campi elettrici, le distribuzioni di potenziale e le densità di corrente attorno al conduttore. Un altro parametro di interesse è la lunghezza del conduttore di rame. In questo contesto, si analizzano diverse configurazioni della barra di rame, valutando come la lunghezza del conduttore influisca sulle proprietà di dispersione della corrente, sulla potenziale corrosione e sul campo elettrico prodotto nel terreno.

#### Effetto della Resistività del Terreno

Il terreno, che è rappresentato da un semicilindro in cui è immerso il conduttore in rame, è stato modellato con differenti valori di resistività, variando da  $10 \Omega \cdot m$  a  $10000 \Omega \cdot m$  [27]. Lo scopo è comprendere come il cambiamento nella capacità del terreno di condurre corrente influisce sul comportamento elettromagnetico del sistema, in particolare sul gradiente del potenziale elettrico intorno alla barra di rame.

Ogni simulazione mostra la capacità del terreno di distribuire il campo elettrico al variare della resistività. Il rame è attraversato dalla stessa corrente e presenta densità di corrente superficiali simili in tutte le simulazioni; tali grandezze non sono influenzate dalla resistività del terreno, come si può notare dalla figura 5.20.

Analizziamo a questo punto come varia il gradiente di potenziale caso per caso:

- Con una resistività relativamente bassa, pari a  $10 \Omega \cdot m$ , il terreno è considerato moderatamente conduttivo, permettendo alla corrente di disperdersi più facilmente nel terreno. Questo tipo di terreno è spesso associato a condizioni di umidità elevate, come terreni paludosi, torba bagnata, o suoli saturi d'acqua [27]. Il gradiente di potenziale elettrico misurato intorno alla barra raggiunge valori massimi di  $0.709 \text{ V/m}$ , con una concentrazione evidente alle estremità del conduttore, in figura 5.21. Questo indica una distribuzione piuttosto omogenea del campo elettrico lungo la barra, ma con un maggiore accumulo del campo vicino alle estremità. Quando il terreno è molto conduttivo, il rischio di correnti vaganti e di formazione di celle galvaniche aumenta. Queste correnti vaganti possono contribuire a una maggiore corrosione dei materiali metallici, come acciaio o rame, che sono interrati o a contatto con il terreno.

- Aumentando la resistività del terreno a  $100 \Omega \cdot \text{m}$ , si osserva un incremento del gradiente del potenziale elettrico, che raggiunge valori massimi di  $7.09 \text{ V/m}$ , con una concentrazione sempre più accentuata del campo elettrico in prossimità delle estremità del conduttore, 5.22. La minore capacità del terreno di condurre elettricità implica che il campo elettrico rimanga più confinato intorno alla barra di rame. Questo tipo di terreno potrebbe essere un terreno argilloso o sabbioso con una moderata quantità di umidità [27]. Con un aumento della resistività, diminuisce il rischio di corrosione elettrochimica, poiché la formazione e il flusso di corrente tra le strutture metalliche e il terreno sono meno favoriti.
- Resistività ancora più alta, pari a  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ , comporta un ulteriore aumento del gradiente di potenziale fino a  $70.9 \text{ V/m}$ , in figura 5.23. Anche in questo caso, il campo elettrico si concentra particolarmente alle estremità del conduttore, mentre il terreno non riesce più a dissipare il campo elettrico in modo efficace. Questo tipo di terreno potrebbe essere costituito da sabbia asciutta, ghiaia secca o terreni aridi con basso contenuto di umidità [27], [19].
- Infine, in un terreno caratterizzato da una resistività estremamente alta di  $10000 \Omega \cdot \text{m}$ , il gradiente di potenziale intorno alla barra di rame raggiunge valori molto elevati, fino a  $708 \text{ V/m}$ , con una concentrazione massima alle estremità del conduttore, 5.24. Il passaggio della corrente elettrica è estremamente limitato. Questo valore di resistività è tipico di terreni estremamente aridi o di rocce solide, come graniti, calcare o altri tipi di substrato roccioso [27], [19]. Ciò significa che la formazione di correnti elettrochimiche è molto rara, e il rischio di corrosione elettrochimica è drasticamente ridotto. Sebbene un terreno con alta resistività sia vantaggioso per limitare la corrosione, esso rappresenta un problema per i sistemi di messa a terra. Questo potrebbe significare che per ottenere una buona messa a terra in un terreno così resistivo, potrebbe essere necessario installare più conduttori di terra o utilizzare tecniche speciali (come l'uso di agenti chimici o sistemi di messa a terra estesi) per ridurre la resistenza di terra complessiva [27].

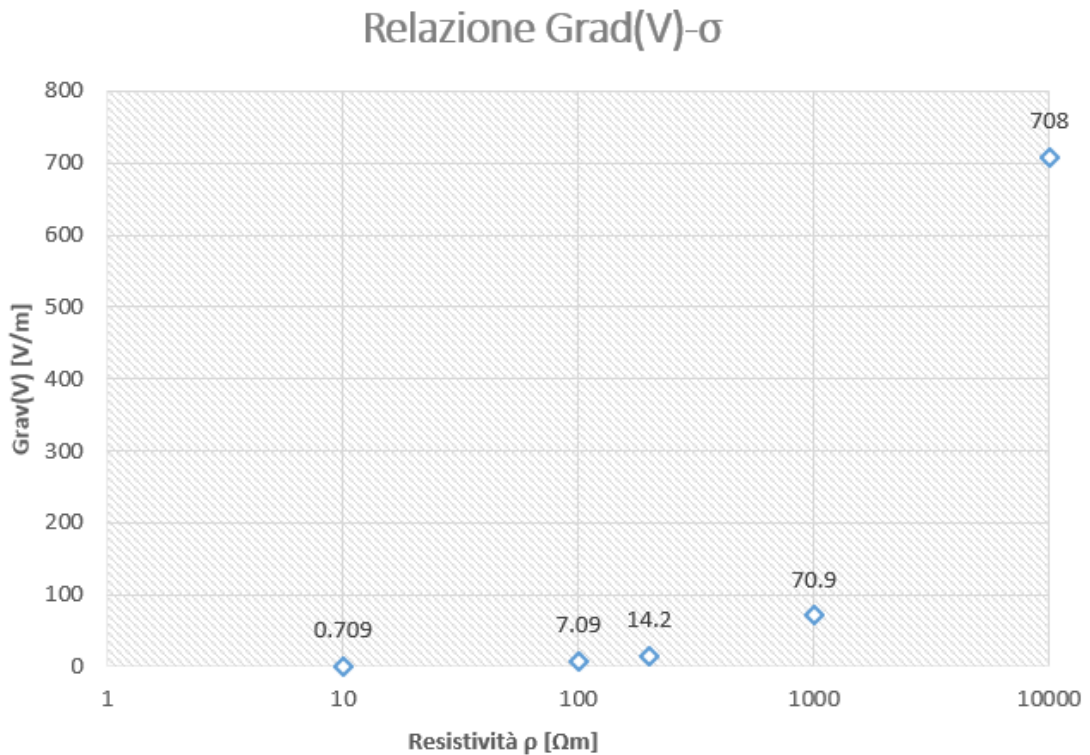
Quindi, avere una resistività del terreno sempre più alta in prossimità di un sistema di terra comporta un aumento dei rischi per la sicurezza, sia dal punto di vista della protezione contro le scosse elettriche, sia in termini di protezione contro la dispersione delle correnti di guasto. Infine, quest'analisi risulta fondamentale per valutare l'eventuale rischio di corrosione elettrochimica con basse resistività del terreno.

I risultati sono stati raggruppati nella tabella 5.12, di qui si è ottenuto il seguente grafico nella figura 5.19.

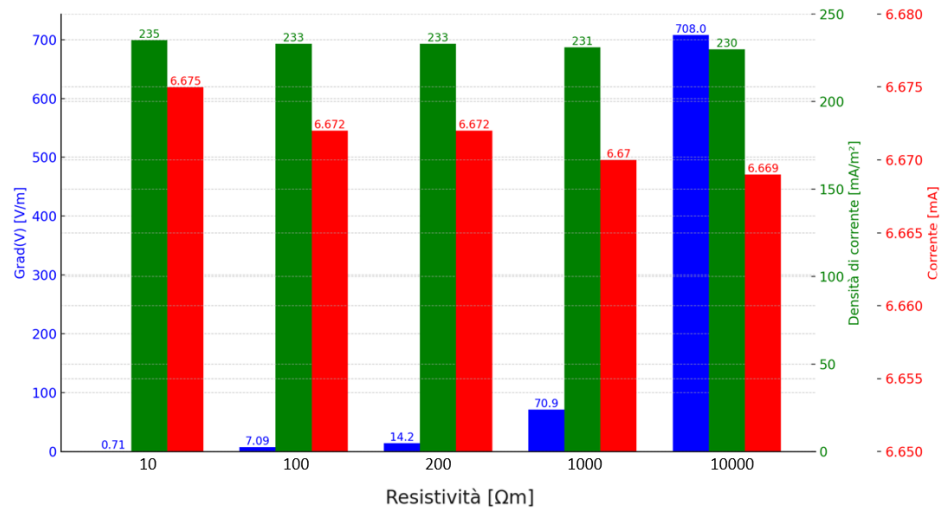
Possiamo affermare che il gradiente di potenziale  $\text{Grad}(V)$  è direttamente proporzionale alla resistività  $\rho$ . Quando la resistività aumenta, il gradiente di potenziale aumenta proporzionalmente.

**Tabella 5.12:** Relazione tra Resistività e Gradiente di Potenziale Massimo rilevato.

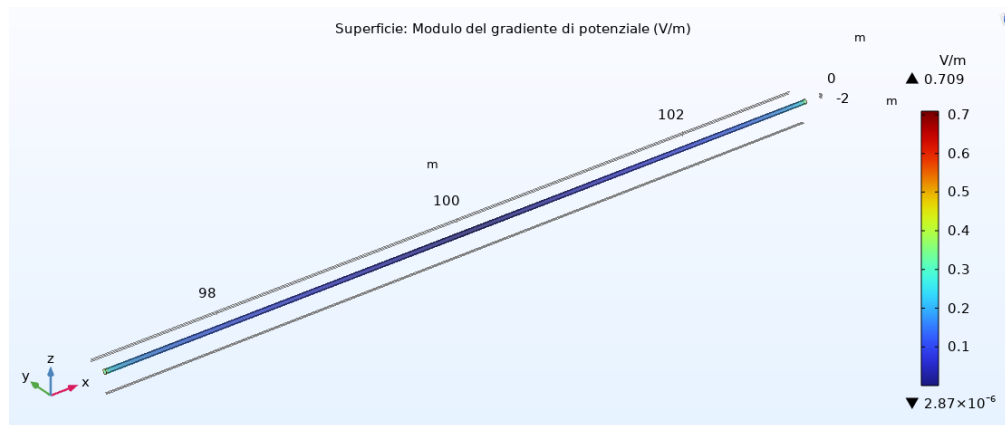
Resistività $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]	Grad(V) Massimo [V/m]
10	0.709
100	7.09
200	14.2
1000	70.9
10000	708



**Figura 5.19:** Grafico del gradiente di potenziale elettrico massimo in funzione della variazione di resistività elettrica.

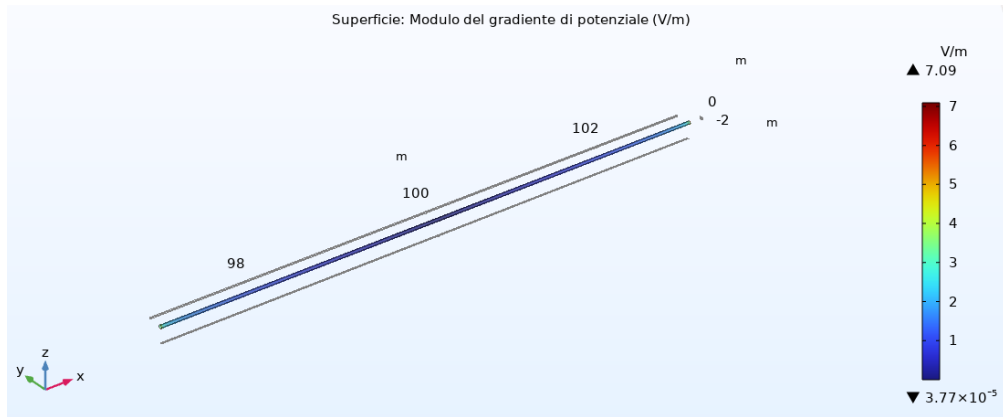


**Figura 5.20:** Grafico del gradiente di potenziale massimo, densità di corrente superficiale massima e corrente nel conduttore massima, in funzione della resistività elettrica del terreno.

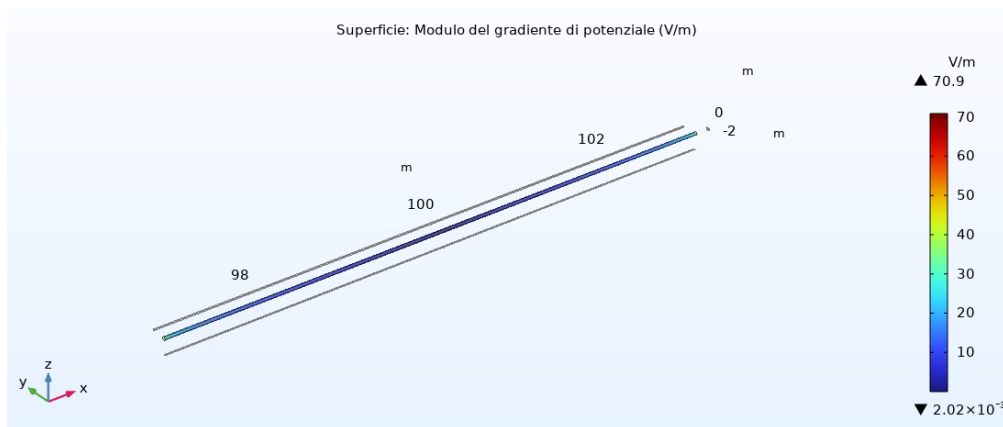


**Figura 5.21:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a  $10 \Omega \cdot m$ .

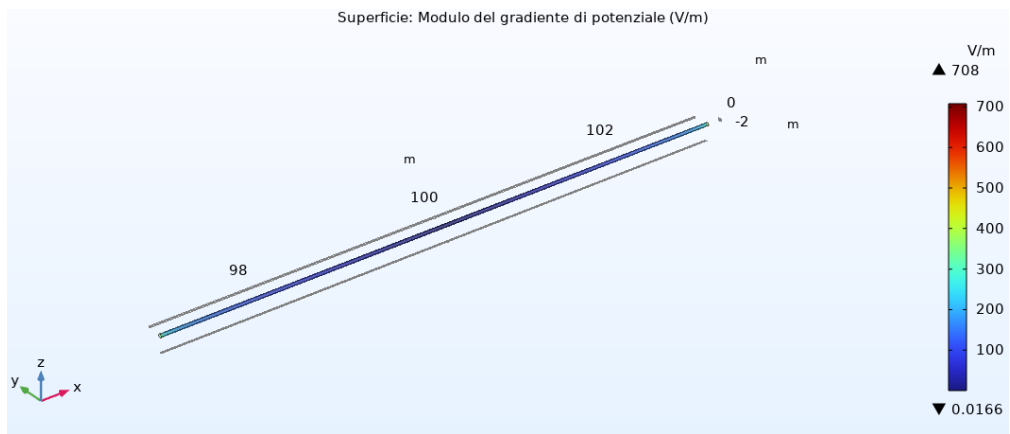




**Figura 5.22:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a  $100 \Omega \cdot m$ .



**Figura 5.23:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a  $1000 \Omega \cdot m$ .



**Figura 5.24:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una resistività del terreno pari a  $10000 \Omega \cdot \text{m}$ .

## **Influenza della Lunghezza del Conduttore di Rame**

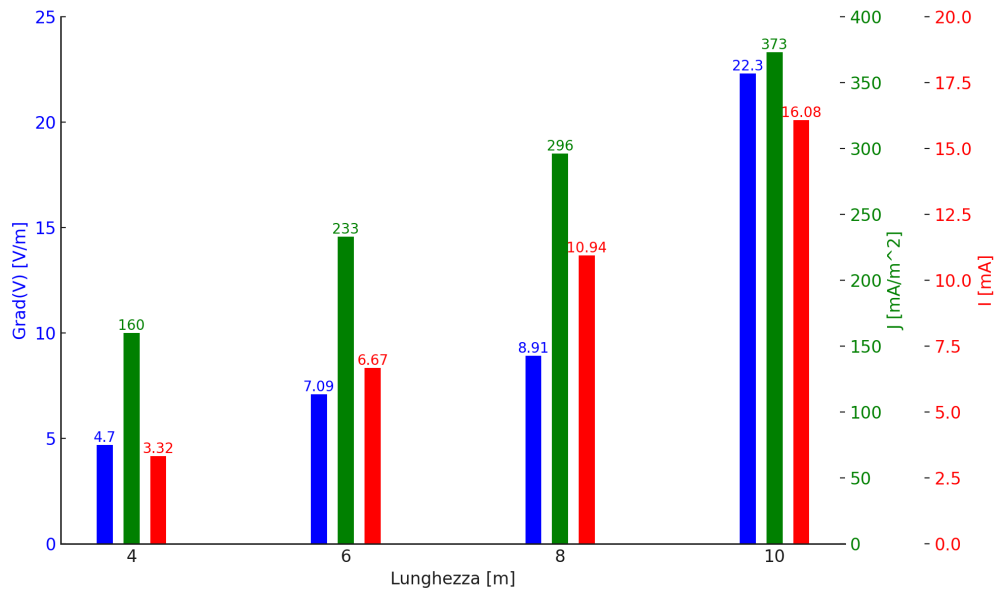
Successivamente, l'analisi si è concentrata sull'influenza della lunghezza assiale del conduttore di rame sul passaggio della corrente nella barra. Nello studio in questione, si è considerata la barra di rame in diverse configurazioni con lunghezze variabili da 4m, 6m, 8m e 10m mantenendo immutati il contesto ambientale e le condizioni al contorno. Analizziamo caso per caso:

- Il grafico del gradiente di potenziale intorno alla barra di rame lunga 4 m mostra un valore massimo di 4.7 V/m, in figura 5.26. Esso aumenta in prossimità delle estremità del conduttore, mentre diminuisce nella zona centrale. La densità di corrente superficiale ha un valore massimo di 160 mA/m<sup>2</sup>, in figura 5.27. Anche in questo caso, la densità è più elevata alle estremità della barra, dove si verifica un'alta concentrazione di corrente elettrica. Questo comportamento si ripete per tutti i casi. La corrente totale sottratta dal conduttore al terreno è di 3.325 mA.
- Con una barra più lunga, di 6 m, il gradiente di potenziale raggiunge un massimo di 7.09 V/m, in figura 5.28. Anche la densità di corrente superficiale aumenta considerevolmente rispetto al caso precedente, con un massimo di 233 mA/m<sup>2</sup>, in figura 5.29. La corrente totale sottratta dal conduttore aumenta a 6.673 mA. Questo incremento è coerente con la lunghezza maggiore della barra, che permette al conduttore di assorbire una quantità maggiore di corrente, pur mantenendo una distribuzione concentrata alle estremità.
- Con una lunghezza di 8 m, il gradiente di potenziale continua a salire, raggiungendo un valore massimo di 8.91 V/m, in figura 5.30. La densità di corrente superficiale raggiunge un valore massimo di 296 mA/m<sup>2</sup>, confermando la tendenza all'aumento della densità di corrente alle estremità della barra, in figura 5.31. La corrente totale sottratta dal conduttore aumenta notevolmente, raggiungendo 10.94 mA.
- Il conduttore che presenta una lunghezza assiale di 10m, presenta anche i valori più alti di gradiente di potenziale nelle sue vicinanze 22.3 V/m e anche i valori più alti di densità di corrente superficiale 373 mA/m<sup>2</sup> e corrente assorbita, come si può notare dalle figure 5.32 e 5.33. La corrente totale assorbita è pari a 16.08 mA.

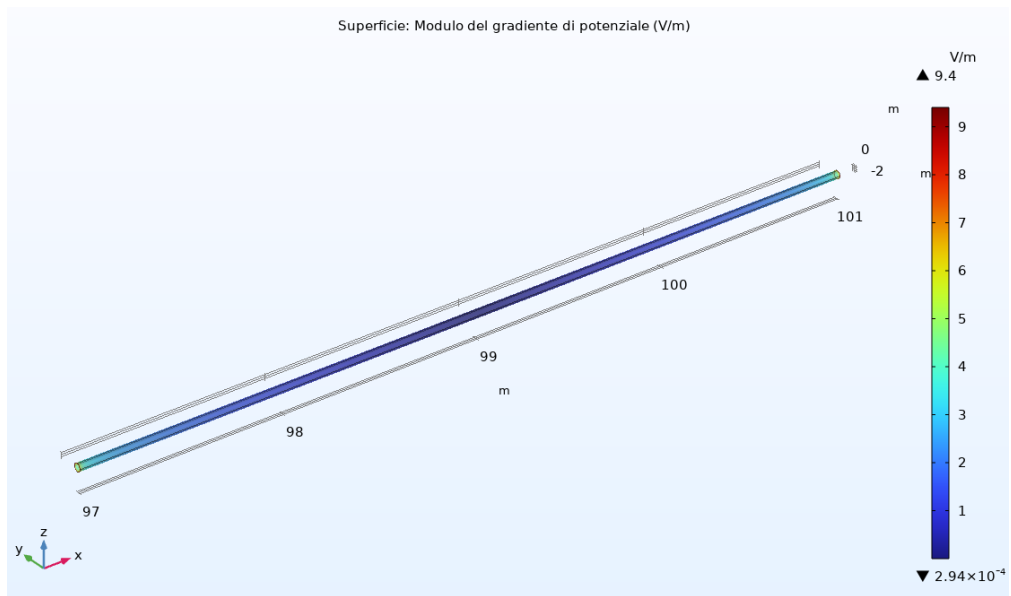
Da questa analisi emerge chiaramente che l'aumento della lunghezza del conduttore comporta un aumento del gradiente di potenziale e della densità di corrente superficiale. I risultati sono stati raccolti nella tabella seguente 5.13.

**Tabella 5.13:** Relazione tra Lunghezza della barra, Gradiente di Potenziale Massimo, Densità di Corrente Massima e Corrente Totale assorbita.

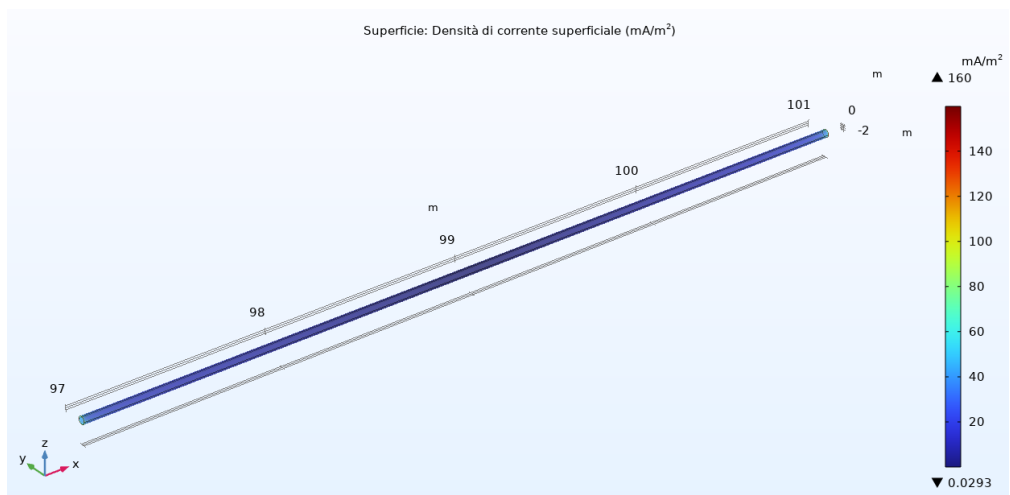
Lunghezza [m]	Grad(V) [V/m]	J [mA/m <sup>2</sup> ]	I [mA]
4	4.7	160	3.325
6	7.09	233	6.673
8	8.91	296	10.94
10	22.3	373	16.08



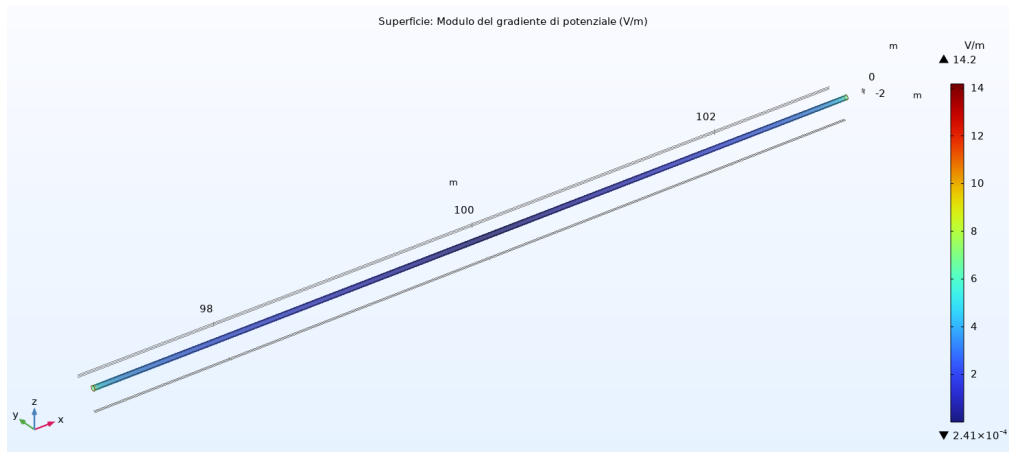
**Figura 5.25:** Grafico della dipendenza del gradiente di potenziale massimo, densità di corrente superficiale massima e corrente nel conduttore massima, dalla lunghezza assiale del conduttore in rame.



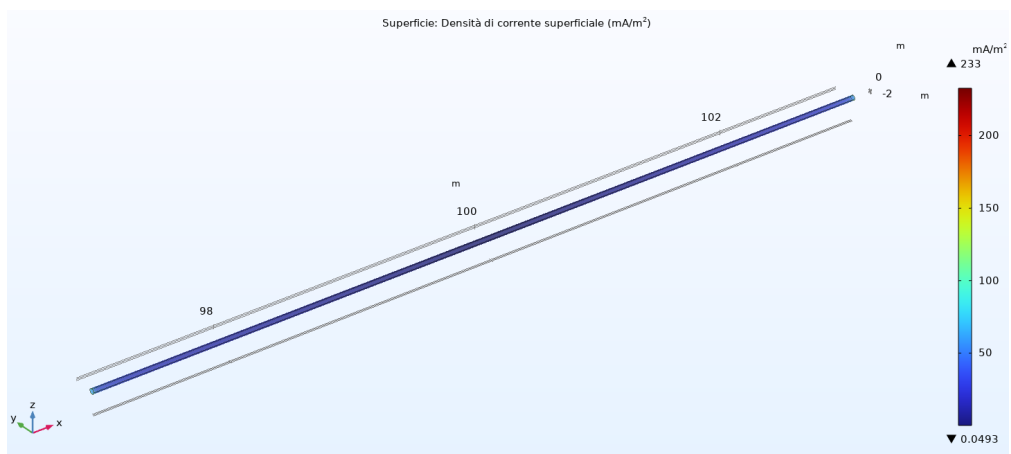
**Figura 5.26:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 4 metri.



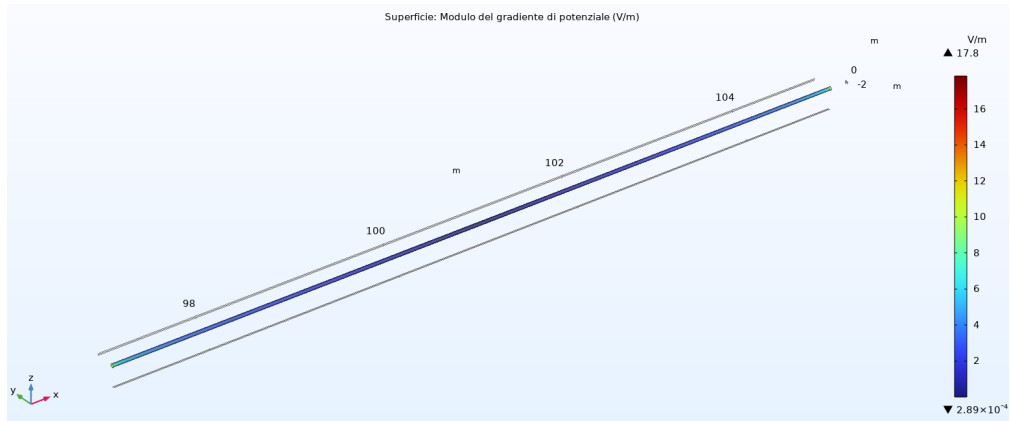
**Figura 5.27:** Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 4 metri.



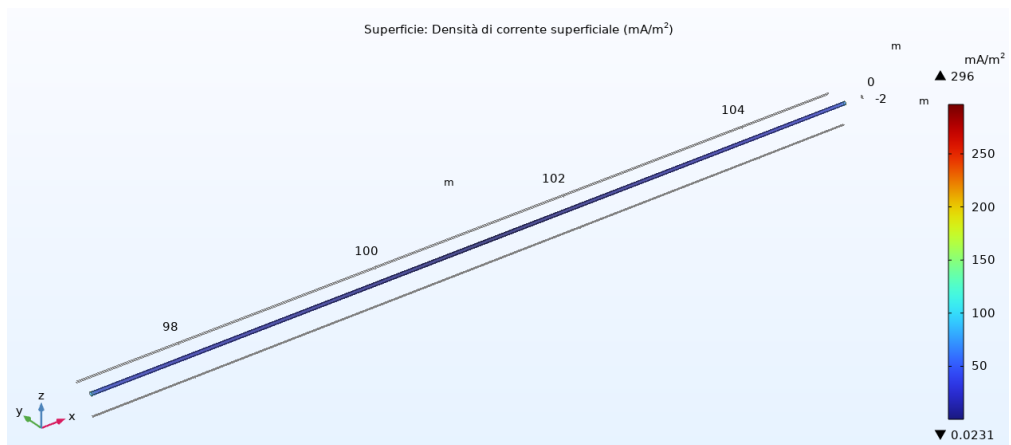
**Figura 5.28:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 6 metri.



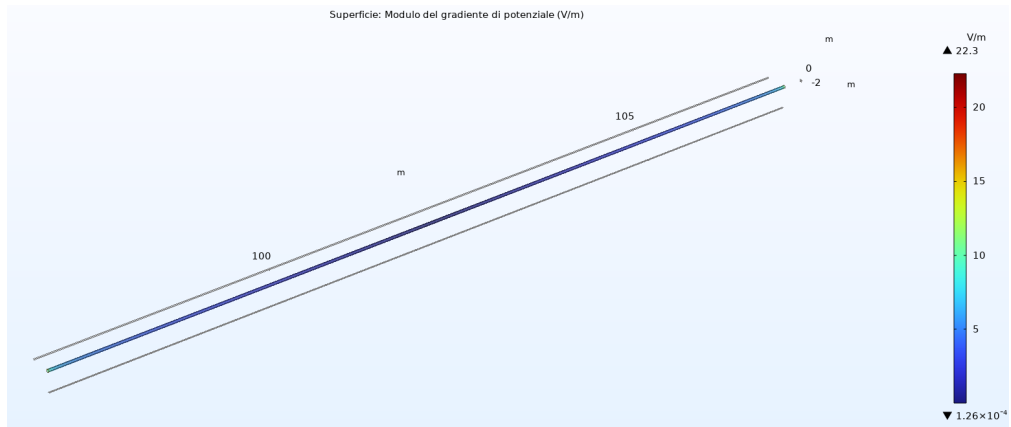
**Figura 5.29:** Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 6 metri.



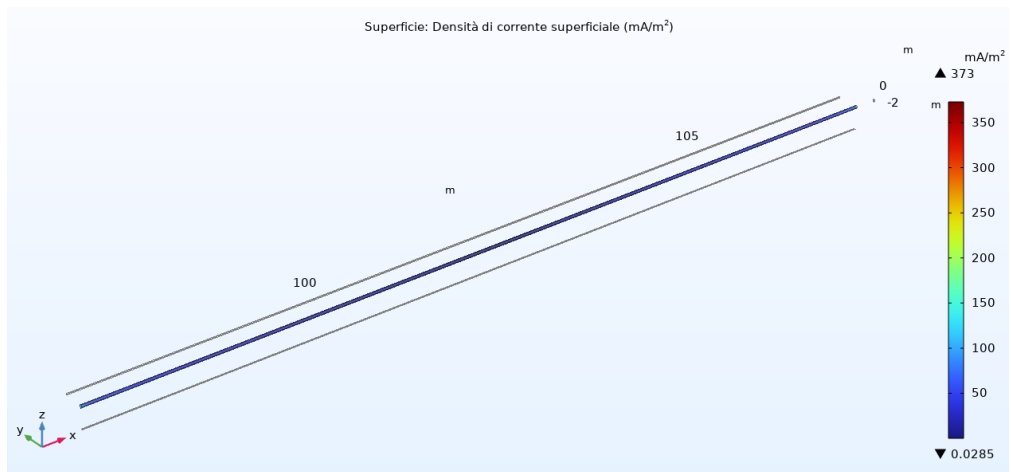
**Figura 5.30:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 8 metri.



**Figura 5.31:** Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 8 metri.



**Figura 5.32:** Gradiente di potenziale elettrico nelle prossimità del conduttore in rame con una lunghezza assiale di 10 metri.



**Figura 5.33:** Densità di corrente sul conduttore in rame con una lunghezza assiale di 10 metri.



## 5.2 Modello 2 - Interazione tra il conduttore in rame e il conduttore in acciaio immerso nel blocco di cemento

La geometria sviluppata per il secondo modello è un'integrazione del modello precedente, che presentava una configurazione tridimensionale caratterizzata dal dominio terreno, in cui vi erano interrati i conduttori in rame e acciaio. In tale modello è stato aggiunto un nuovo elemento: cemento in cui è immerso il conduttore in acciaio. L'insieme dei due elementi rappresenta il cemento armato di una platea di fondazione.

Il blocco di cemento ha la forma di un parallelepipedo di dimensioni 0.3x0.3x6.4m . Il seguente elemento è stato posizionato secondo le seguenti coordinate (x=96.8m, y=-0.15, z=-0.35). Le dimensioni e le proprietà del terreno, del conduttore in rame e in acciaio rimangono invariate, come descritte nel paragrafo 5.1. Questa geometria, in figura 5.34 è stata scelta per rappresentare accuratamente un caso reale in cui un sistema di terra in rame è in contatto attraverso il terreno con una platea di fondazione in cemento [65], senza un collegamento diretto tra acciaio e rame.

Le proprietà del cemento sono state considerate in due condizioni fisiche differenti [66],[67], descritte nella tabella 5.14.

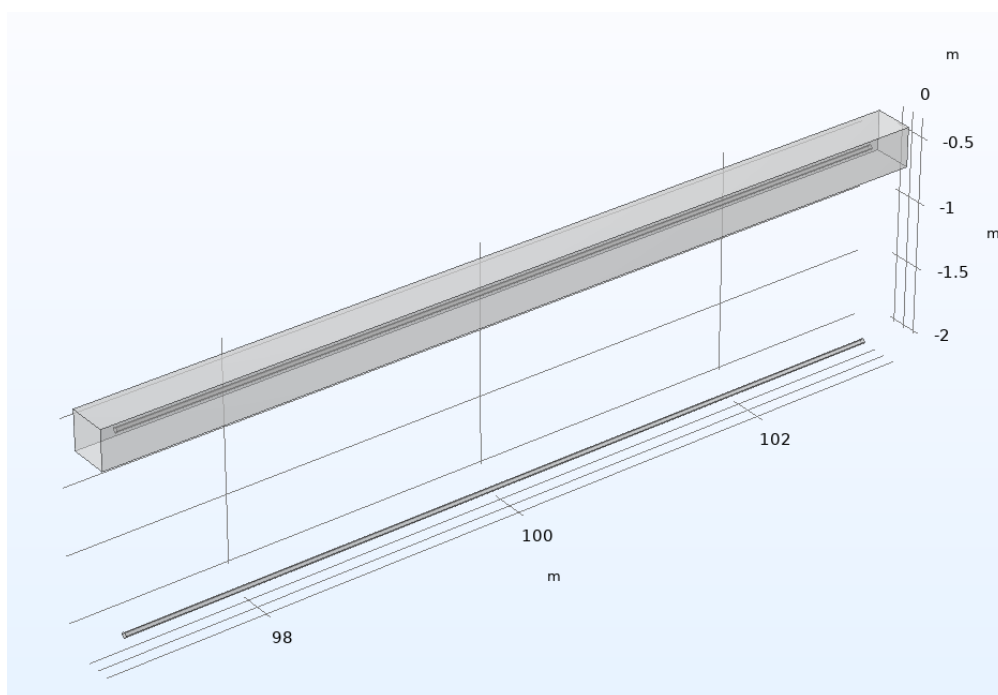
**Tabella 5.14:** Proprietà elettriche dei materiali.

Materiale	Proprietà	Valore	Unità
<b>Cemento bagnato</b>	Resistività elettrica ( $\rho$ )	100	$\Omega \cdot m$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	10	-
<b>Cemento asciutto</b>	Resistività elettrica ( $\rho$ )	1000	$\Omega \cdot m$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	10	-
<b>Terreno</b>	Resistività elettrica ( $\rho$ )	200	$\Omega \cdot m$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	5	-
<b>Rame</b>	Resistività elettrica ( $\rho$ )	$1.667 \times 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	1	-
<b>Acciaio</b>	Resistività elettrica ( $\rho$ )	$1 \times 10^{-6}$	$\Omega \cdot m$
	Permittività relativa ( $\epsilon_r$ )	1	-

La scelta di un cemento con resistività di  $100 \Omega \cdot m$  è una pratica comune quando si desidera migliorare l'efficacia di un sistema di messa a terra, soprattutto in condizioni operative in cui il cemento potrebbe essere esposto all'umidità. In condizioni normali, il cemento bagnato ha una resistività più bassa rispetto al terreno circostante; questo tipo di configurazione potrebbe garantire una minimizzazione

del rischio di elevati potenziali di passo e di contatto, che potrebbero mettere a rischio il personale o le apparecchiature elettriche nella progettazione di una cabina[27].

Il cemento asciutto ha una resistività di  $1000 \Omega \cdot m$ , la differenza significativa tra il terreno e il cemento deve essere considerata con attenzione. Il cemento, in questo caso, ostacola il passaggio della corrente attraverso i ferri di armatura, aumentando la resistenza complessiva del sistema. Questa condizione simula una condizione peggiorativa a livello di sicurezza perché aumenta la resistenza di terra [27]. Le condizioni al contorno sono le stesse descritte nel modello 1.



**Figura 5.34:** Geometria del modello 2.

### 5.2.1 Analisi della Mesh

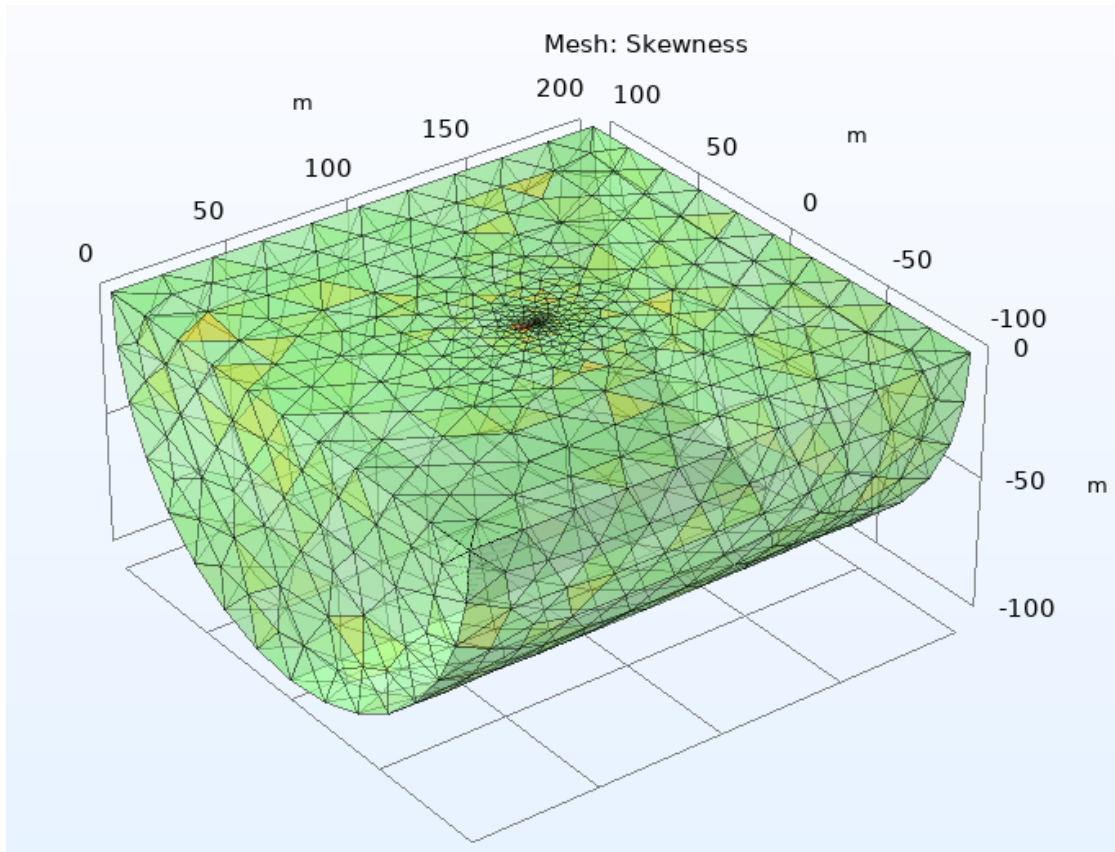
La mesh generata per gli elementi terreno, conduttore in rame e acciaio, mesh supplementare rispecchia quella utilizzata per il modello 1, utilizzando una discretizzazione tetraedrica non strutturata.

Per la struttura in cemento, si è optato per una grandezza degli elementi mesh intermedia tra i domini acciaio e rame e il dominio mesh supplementare del terreno. Il passo successivo è la valutazione dettagliata della qualità della mesh. La mesh utilizzata per il modello è composta principalmente da elementi tetraedrici, con

un totale di 2576000 tetraedri. I risultati dell'analisi della qualità della mesh sono descritti dai seguenti dati:

- **Qualità minima degli elementi:** 0.2001
- **Qualità media degli elementi:** 0.698
- **Rapporto volumi degli elementi:** 1.372e-11
- **Volume della mesh:** 3.127e6 m<sup>3</sup>

Come nel caso precedente, la maggioranza degli elementi presentano valori di qualità della Skewness accettabili, suggerendo che la mesh ha una qualità complessiva buona. Lo stesso risultato può essere visualizzato anche dalla figura 5.35, che presenta un'analisi grafica sulla qualità della mesh di tutto il sistema.



**Figura 5.35:** Valutazione grafica della mesh in termini di Skewness per il modello 2.

## 5.2.2 Validità del modello 2

Per verificare la validità di tale modello, come per il modello 1, effettueremo un bilancio di corrente per l'intero sistema e per i domini acciaio e rame, considerando uno dei casi peggiori come il 6 o il 7. L'ambiente di studio e le condizioni al contorno non sono cambiate, quindi la densità di corrente entra dalla base di sinistra con un valore di  $0.001 \text{ A/m}^2$  ed esce con lo valore dalla superficie di destra, mantenendosi a  $0 \text{ A/m}^2$  sulle facce laterali, come mostrato precedentemente nella figura 5.3. Valutiamo anche il valore di corrente che entra ed esce dalla superficie trasversale del dominio in acciaio nel caso 6 (riferimento appendice A):

- **Corrente in ingresso:**  $26.28 \mu\text{A}$
- **Corrente in uscita:**  $26.38 \mu\text{A}$

L'errore relativo tra la corrente in ingresso e quella in uscita è stato calcolato utilizzando la formula dell'errore relativo:

$$\text{Errore Relativo} = \frac{|J_{\text{out}} - J_{\text{in}}|}{J_{\text{in}}} \approx \frac{|26.38 - 26.28|}{26.28} \approx 0.00381 \quad (5.11)$$

Di conseguenza, la precisione sul dominio acciaio risultata essere:

$$\text{Precisione} = (1 - \text{Errore Relativo}) \times 100\% \approx (1 - 0.00381) \times 100\% \approx 99.6\% \quad (5.12)$$

Per il dominio rame abbiamo i seguenti dati:

- **Corrente in ingresso:**  $107.9 \mu\text{A}$
- **Corrente in uscita:**  $109.1 \mu\text{A}$

L'errore relativo risulta:

$$\text{Errore Relativo} = \frac{|J_{\text{out}} - J_{\text{in}}|}{J_{\text{in}}} \approx \frac{|109.1 - 107.9|}{107.9} \approx 0.0111 \quad (5.13)$$

La precisione sul dominio rame risultata essere:

$$\text{Precisione} = (1 - \text{Errore Relativo}) \times 100\% \approx (1 - 0.0111) \times 100\% \approx 98.8\% \quad (5.14)$$

Notiamo come rispetto al modello 1, la precisione sul dominio rame sia leggermente diminuita, a causa dell'aggiunta di un altro elemento.

### 5.2.3 Risultati del modello 2

In questo paragrafo, verrà analizzato come l'aggiunta del blocco in cemento, utilizzato come platea di fondazione, influisca sulla distribuzione di corrente e sul gradiente di potenziale, all'interno di un sistema già contenente due metalli interrati in rame e acciaio.

Si confrontano quattro casi distinti:

- Caso 4: Conduttore in acciaio come singolo metallo interrato immerso nel cemento asciutto;
- Caso 5: Conduttore in acciaio come singolo metallo interrato immerso nel cemento bagnato;
- Caso 6: Platea di fondazione con cemento asciutto più acciaio con il conduttore in rame senza il collegamento tra metalli;
- Caso 7: Platea di fondazione con cemento bagnato più acciaio e conduttore in rame senza il collegamento tra metalli.

Il confronto tra questi scenari, in aggiunta agli scenari del modello 1, permette di ampliare lo studio sull'interazione elettrica tra i due metalli sepolti nel terreno e il blocco di cemento e come essa influisca sulle caratteristiche della densità di corrente e del gradiente elettrico. Le variazioni di tali caratteristiche sono da attribuire alle diverse proprietà conduttive e permittività relativa dei materiali.

#### **CASO 4: Conduttore in acciaio come singolo metallo interrato immerso nel cemento asciutto**

Il caso quattro riguarda la platea di fondazione senza il conduttore in rame, con il blocco di cemento in condizioni asciutte.

##### **Gradiente di potenziale**

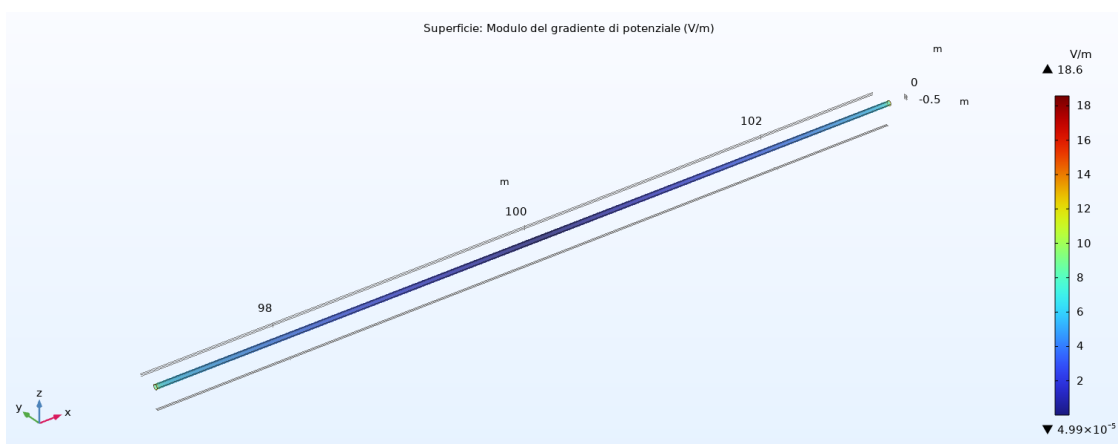
Il gradiente del potenziale elettrico mostra valori fino a circa 18.6V/m; questo è il valore massimo osservato tra i casi analizzati, come si nota dalla figura 5.36; questo è dato dalla differenza di resistività tra il terreno e il cemento asciutto. Tale valore indica che vi sono alti valori di potenziale attorno all'acciaio quando è inglobato nel cemento asciutto, senza la presenza del conduttore in rame. L'assenza di questo ultimo, che di solito assorbe parte della corrente elettrica, combinata con la presenza del cemento, provoca un campo elettrico più intenso attorno all'acciaio, come si può anche notare dalla tabella 5.15.

##### **Densità di corrente**

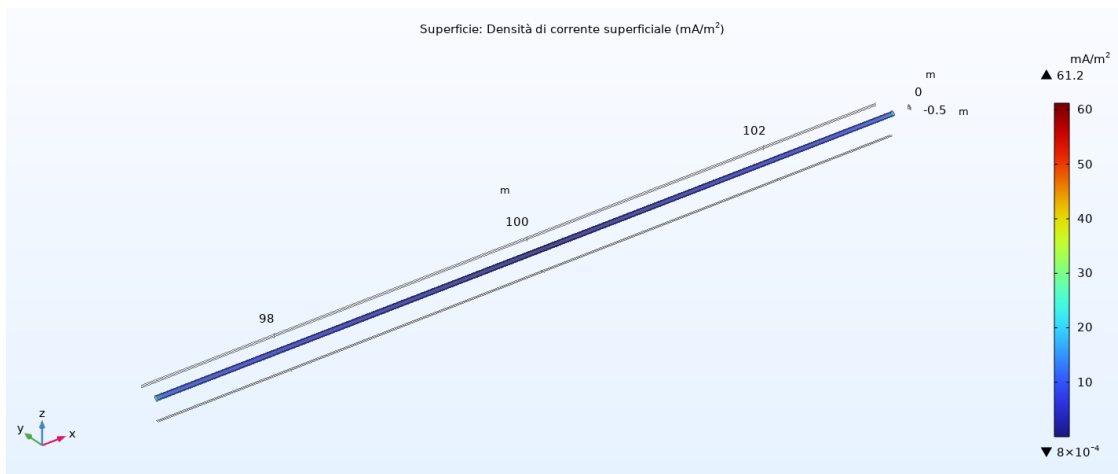
Il cemento agisce come un isolante parziale, per cui la densità di corrente superficiale è drasticamente ridotta, con un valore massimo di 61.2 mA/m<sup>2</sup>, come mostrato in figura 5.37. Il cemento essendo meno conduttivo, ha probabilmente contribuito

a deviare gran parte della corrente vagante. Questo comporta una significativa riduzione della densità di corrente sull'acciaio, a causa dell'attenuazione del campo elettrico generato dal cemento. Sono state raccolte alcune misure di tale grandezza nella tabella 5.17.

Notiamo, dalla tabella 5.17, che anche la corrente assorbita in tale condizioni è diminuita drasticamente.



**Figura 5.36:** Caso 4: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio con cemento asciutto.



**Figura 5.37:** Caso 4: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio con cemento in condizioni di asciutto.

**Tabella 5.15:** Caso 4: Tabella dei valori del gradiente di potenziale elettrico intorno al conduttore in acciaio in funzione della posizione sull'asse x.

posizione asse X [m]	Grad(V) [V/m]
97	17,47
97,001	16,2
97,01	9,311
97,1	6,049
97,2	5,591
97,5	4,805
98	3,724
100	0,000873
102	3,706
102,5	4,829
102,8	5,603
102,9	6,094
102,99	9,395
102,999	15,66
103	16,94

**Tabella 5.16:** Caso 4: Tabella dei valori della densità di corrente in funzione della posizione sull'asse x.

posizione asse X [m]	Densità di corrente [mA/m <sup>2</sup> ]
97	52,42
97,001	43,62
97,01	19,68
97,1	13,09
97,2	12,19
97,5	10,57
98	8,362
100	0,0366
102	8,374
102,5	10,67
102,8	12,16
102,9	13,11
102,99	19,68
102,999	43,38
103	52,68

**Tabella 5.17:** Caso 4: Corrente I [mA] che circola nel conduttore in acciaio in varie superfici trasversali, immerso nel blocco di cemento asciutto.

<b>Posizione[m]</b>	<b>Corrente (mA)</b>
97	0,0289
97,2	0,3605
98	1,267
99	1,945
100	2,167
101	1,944
102	1,266
102,8	0,3606
103	0,02901



## **CASO 5: Cemento bagnato e Acciaio**

Il comportamento del cemento bagnato, caratterizzato da una resistività pari a  $100 \Omega \cdot m$ , presenta alcune differenze significative rispetto al cemento asciutto ( $1000 \Omega \cdot m$ ), in termini di distribuzione del campo elettrico, densità di corrente superficiale e corrente assorbita dall'acciaio.

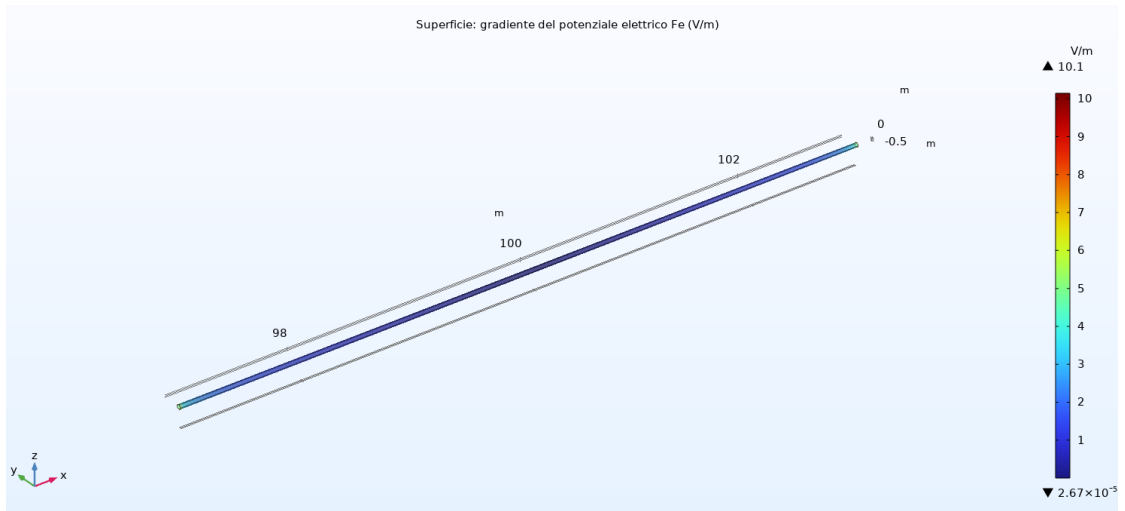
### **Gradiente di potenziale**

Osservando il gradiente di potenziale elettrico, dalla figura 5.38, il cemento bagnato mostra valori generalmente inferiori rispetto al cemento asciutto, con valori massimi che raggiungono i  $10.1V/m$ . Questo indica che il cemento bagnato è in grado di distribuire più efficacemente il campo elettrico attorno all'acciaio, riducendo il gradiente potenziale in prossimità del conduttore, come si può notare dalla tabella 5.18. Tuttavia, tale capacità di dissipazione comporta un effetto opposto sul flusso di corrente.

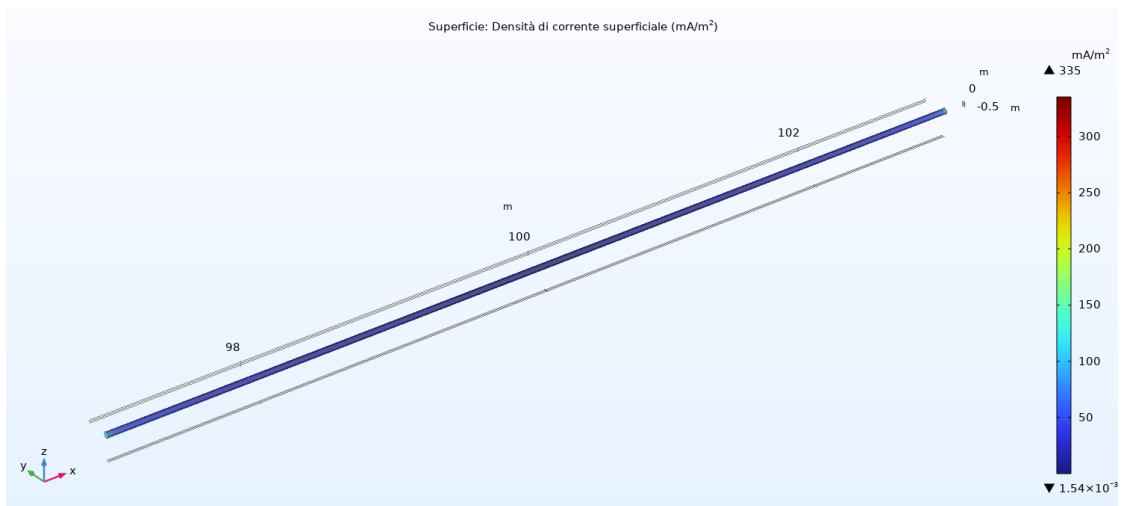
### **Densità di corrente**

Per quanto riguarda la densità di corrente superficiale, si osservano valori decisamente superiori nel caso del cemento bagnato, rispetto al caso 4. In particolare, il cemento bagnato, essendo più conduttivo rispetto al terreno, facilita il passaggio della corrente vagante verso l'acciaio, con picchi di densità che raggiungono valori di  $335 mA/m^2$ , molto superiori rispetto a quelli osservati con il cemento asciutto. Questo si traduce in una maggiore esposizione dell'acciaio alle correnti vaganti, che può portare a rischi maggiori di fenomeni corrosivi; ciò è testimoniato dalla figura 5.39 e dalla tabella 5.19.

Infine, la corrente assorbita dall'acciaio è sensibilmente più elevata nel caso del cemento bagnato rispetto a quello asciutto. I valori di corrente misurati nelle varie sezioni trasversali mostrano che il cemento bagnato permette il passaggio di una quantità di corrente maggiore, con valori che superano i  $7 mA$ , rispetto ai valori più contenuti, inferiori a  $2 mA$ , nel caso del cemento asciutto. Questo risultato, in tabella 5.20, indica che, nonostante il cemento bagnato offra una migliore distribuzione del campo elettrico, la sua bassa resistività comporta un flusso di corrente più intenso verso l'acciaio, aumentando il rischio di corrosione elettrochimica. Al contrario, il cemento asciutto, pur non distribuendo il campo elettrico con la stessa efficacia, limita il flusso di corrente verso l'acciaio, riducendo il rischio di danni a lungo termine.



**Figura 5.38:** Caso 5: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato.



**Figura 5.39:** Caso 5: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato.

**Tabella 5.18:** Gradiente di potenziale elettrico intorno al conduttore in Acciaio, immerso nel blocco di cemento bagnato.

Posizione [m]	Grad(V)[V/m]
97	9,644
97,001	8,868
97,01	5,027
97,1	2,866
97,2	2,381
97,5	1,733
98	1,21
100	0,000263
102	1,203
102,5	1,741
102,8	2,381
102,9	2,878
102,99	5,073
102,999	8,619
103	9,278

**Tabella 5.19:** Densità di corrente sulla superficie del conduttore in Acciaio, immerso nel blocco di cemento bagnato.

Posizione [m]	Densità di corrente [mA/m <sup>2</sup> ]
97	277.3
97.001	249.4
97.01	100.17
97.1	57.09
97.2	47.13
97.5	34.6
98	24.08
100	0.0292
102	24.12
102.5	34.04
102.8	47.49
102.9	57.33
102.99	100.93
102.999	250.5
103	280.9

**Tabella 5.20:** Corrente I [mA] che circola nel conduttore in acciaio in varie sezioni trasversali, immerso nel blocco di cemento bagnato.

<b>Posizione[m]</b>	<b>Acciaio [mA]</b>
97	0.1599
97.2	1.75
98	4.939
99	6.991
100	7.635
101	6.991
102	4.939
102.8	1.75
103	0.1605

## **Caso 6: Platea di fondazione con cemento asciutto più acciaio con il conduttore in rame**

La platea di fondazione ha un ruolo strutturale (come una fondazione tipica), ma agisce anche come una barriera contro le correnti vaganti in condizioni di cemento asciutto. Il cemento, a seconda del suo stato (bagnato o asciutto), ha una diversa capacità di condurre o bloccare le correnti elettriche, influenzando la corrente attraverso il conduttore in acciaio.

In presenza del conduttore in rame, il sistema fondazione con l'acciaio inglobato viene parzialmente "alleggerito" dalla responsabilità di condurre le correnti vaganti. Il rame agisce come un circuito preferenziale per il flusso di corrente, riducendo l'esposizione dell'acciaio a flussi intensi di corrente vagante.

Vediamo come tali asserzioni vengano esplicitate dal modello di simulazione.

### **Gradiente di potenziale**

Il gradiente di potenziale elettrico misurato attorno ai conduttori interrati di acciaio e rame mostra delle differenze significative a seconda della presenza o meno del cemento. In assenza di cemento, i valori risultano più elevati per entrambi i materiali, testimoniati dal caso 3.

Tuttavia, con l'aggiunta del cemento attorno all'acciaio, il comportamento del gradiente di potenziale cambia. Sull'acciaio aumenta rispetto alla configurazione senza cemento, raggiungendo un valore massimo di 16.9V/m, in figura 5.40. Questo comportamento può essere attribuito alla maggiore resistività del cemento rispetto al terreno circostante, che porta a una minore dissipazione del campo elettrico attorno all'acciaio.

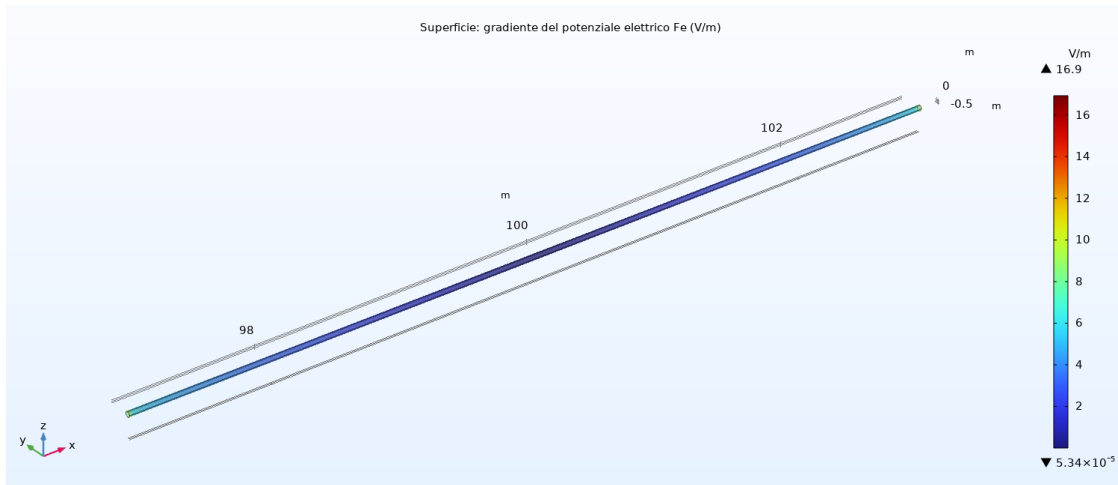
Nel caso del rame, il gradiente di potenziale rimane più stabile, però rispetto al caso 3, aumenta leggermente raggiungo un valore massimo di 14.2V/m con l'aggiunta del cemento, visibile in figura 5.41. Il riscontro più evidente di tali asserzioni è ispezionabile nella tabella 5.21.

### **Densità di corrente**

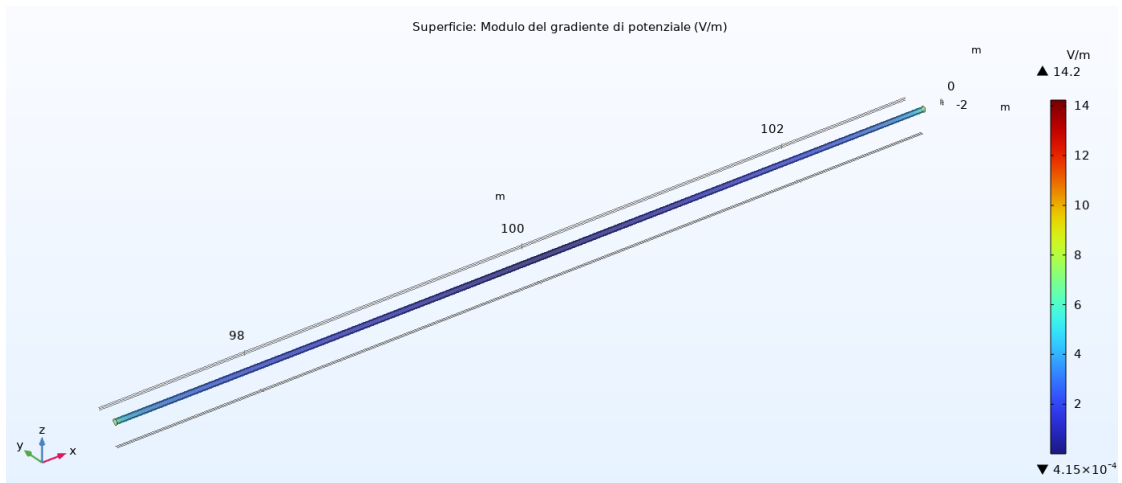
Nonostante l'aumento del gradiente di potenziale, si osserva una diminuzione significativa della densità di corrente superficiale e della corrente assorbita dall'acciaio rispetto ai Casi 3 e 4, come si può notare dalla figura 5.42 e dalla tabella 5.23. Questo indica che, sebbene il cemento isoli parzialmente l'acciaio, limitando il passaggio della corrente attraverso la sua superficie, si ha un aumento di potenziale elettrico localmente. In altre parole, il cemento riduce l'intensità della corrente che raggiunge l'acciaio, ma ciò avviene a costo di un gradiente di potenziale più elevato, specialmente nelle zone vicine alle basi trasversali dell'acciaio.

Nel caso del conduttore in rame, si osservano differenze significative nei valori di densità di corrente superficiale e corrente assorbita a seconda che sia accoppiato all'acciaio senza cemento o all'acciaio inglobato nel cemento in condizioni di asciutto. Con l'introduzione del cemento attorno all'acciaio, i valori di densità di corrente

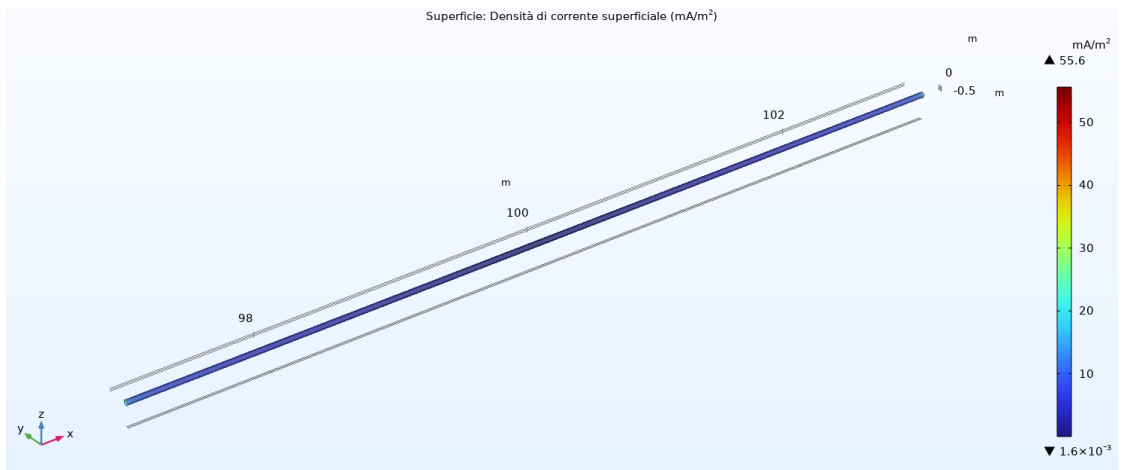
sul rame aumentano ulteriormente rispetto a caso 3, arrivando a  $230 \text{ mA/m}^2$ , ispezionabile nella figura 5.43. Questo incremento indica che il cemento agisce come un parziale isolante per l'acciaio, riducendo il flusso di corrente che lo attraversa e inducendo così un carico maggiore sul rame, che si assume il ruolo di conduttore preferenziale per la corrente vagante, come si nota dalla tabella 5.22. Questo comportamento si riflette anche nei valori di corrente assorbita, con il rame che assorbe circa  $5.942 \text{ mA}$  e l'acciaio  $1.872 \text{ mA}$ . Tali valori sono presenti anche nella tabella 5.23



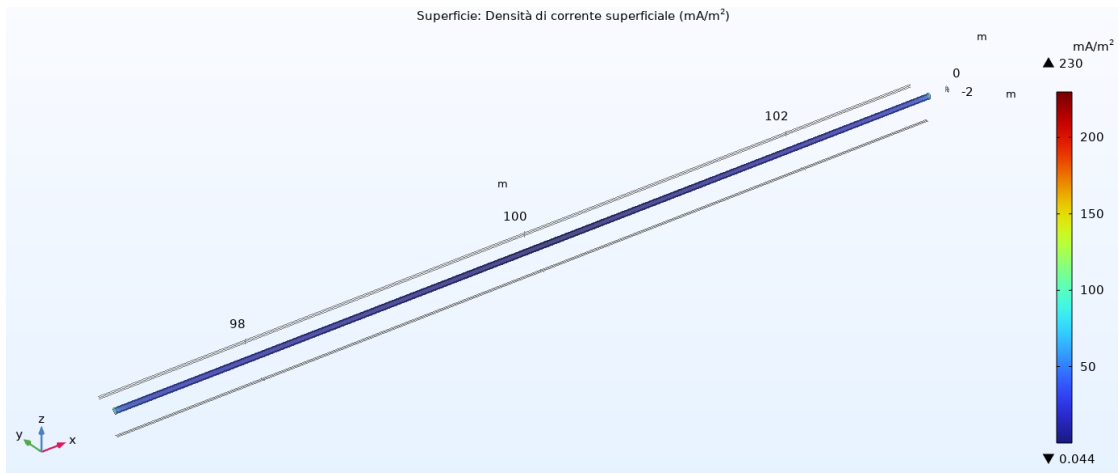
**Figura 5.40:** Caso 6: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento asciutto con l'aggiunta del conduttore in rame.



**Figura 5.41:** Caso 6: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con cemento in condizioni di asciutto con l'acciaio in esso inglobato.



**Figura 5.42:** Caso 6: Densità di corrente conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento asciutto con l'aggiunta del conduttore in rame.



**Figura 5.43:** Caso 6: Densità di corrente sulla superficie del conduttore in rame con cemento in condizioni di asciutto con l'acciaio in esso inglobato.

**Tabella 5.21:** Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio inglobato nel blocco di cemento asciutto e Rame.

Posizione[m]	Acciaio [V/m]	Rame [V/m]
97	15.73	12.63
97.001	14.68	11.89
97.01	8.406	6.765
97.1	5.426	4.084
97.2	4.978	3.569
97.5	4.188	2.807
98	3.153	2.06
100	0.000572	0.00129
102	3.138	2.055
102.5	4.199	2.806
102.8	4.984	3.543
102.9	5.442	4.107
102.99	8.484	6.826
102.999	14.19	11.97
103	15.56	12.84



**Tabella 5.22:** Confronto della densità di corrente tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento in condizioni di asciutto e Rame.

Posizione[m]	Acciaio [mA/m <sup>2</sup> ]	Rame [mA/m <sup>2</sup> ]
97	47.91	209.6
97.001	40.92	174.1
97.01	16.73	67.4
97.1	10.87	40.99
97.2	9.948	35.26
97.5	8.319	28.01
98	6.289	20.41
100	0.0289	0.182
102	6.281	20.57
102.5	8.356	27.9
102.8	9.925	35.33
102.9	10.87	40.84
102.99	16.85	68.09
102.999	41.12	173.3
103	48.04	213.3

**Tabella 5.23:** Confronto della corrente I [mA] che circola attraverso le superfici trasversali del conduttore in rame e del conduttore in acciaio, inglobato in un blocco di cemento in condizioni di asciutto.

Posizione [m]	Acciaio [mA]	Rame [mA]
97	0.02628	0.1079
97.2	0.3254	1.252
98	1.69	3.939
99	1.12	5.816
100	1.872	6.413
101	1.69	5.811
102	1.12	3.935
102.8	0.3254	1.252
103	0.02638	0.1091

## **Caso 7: Platea di fondazione con cemento bagnato più acciaio e conduttore in rame**

In presenza di cemento bagnato, il sistema presenta caratteristiche diverse rispetto al caso con cemento asciutto in termini di gradiente di potenziale, densità di corrente superficiale e corrente assorbita.

### **Gradiente di potenziale**

Il gradiente di potenziale elettrico subisce variazioni significative quando il conduttore in acciaio è inglobato nel cemento bagnato. In generale, con il cemento asciutto, che ha un'alta resistività, il gradiente nell'intorno dell'acciaio risulta più elevato, come visto nel caso precedente, in quanto il cemento asciutto, agendo da isolante, riduce il flusso di corrente, ma accumula un campo elettrico più forte attorno all'acciaio. Al contrario, quando si utilizza cemento bagnato (bassa resistività), il gradiente di potenziale diminuisce in modo evidente, con valori massimi di  $9.4 \text{ V/m}$ . Questa riduzione è dovuta alla maggiore capacità del cemento bagnato di distribuire il campo elettrico, permettendo una riduzione del potenziale nel sistema, come si nota dalla figura 5.44.

Anche il rame presenta differenze nel comportamento del gradiente tra i due scenari. Nel caso del cemento asciutto, il rame mostrava nel suo intorno valori di gradiente leggermente inferiori rispetto all'acciaio, mantenendosi comunque su valori relativamente elevati. Quando il cemento è bagnato, si osserva una riduzione rispetto allo scenario asciutto intorno al rame, con valori di massimi di  $13.2 \text{ V/m}$  rispetto a valori più alti in assenza di cemento bagnato, visibile in figura 5.45.

In sintesi, il cemento bagnato contribuisce a ridurre il gradiente di potenziale sia per l'acciaio che per il rame, favorendo una maggiore dissipazione del campo elettrico nel sistema, come si nota dalla tabella 5.24.

### **Densità di corrente**

La densità di corrente superficiale e la corrente assorbita presentano differenze significative rispetto allo scenario con il cemento asciutto. Il cemento bagnato, che ha una resistività più bassa, presenta una la densità di corrente superficiale sull'acciaio aumentata in modo significativo, raggiungendo un picco di  $310 \text{ mA/m}^2$ , in figura 5.46. Questo incremento riflette la maggiore capacità del cemento bagnato di condurre corrente rispetto al terreno, permettendo un maggiore flusso di corrente attraverso l'acciaio in confronto al cemento asciutto.

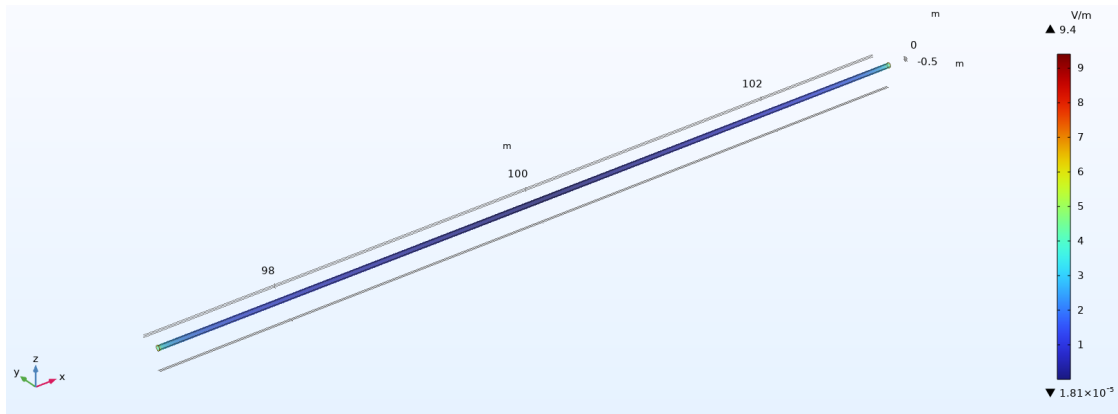
Per quanto riguarda il rame, i valori di densità di corrente sono sempre elevati, ma in calo rispetto al caso precedente. Il rame mostra un valore massimo di  $212 \text{ mA/m}^2$  nella sezione iniziale, ispezionabile nella figura 5.47. Questo suggerisce che, nel caso del cemento bagnato, parte della corrente, che nel caso di cemento asciutto, sarebbe fluita principalmente nel rame viene ora distribuita anche attraverso l'acciaio, grazie alla maggiore conducibilità del cemento bagnato e alla maggiore area di assorbimento rispetto al rame delle linee di campo. L'andamento di della densità

di corrente si denota anche dalla tabella 5.25.

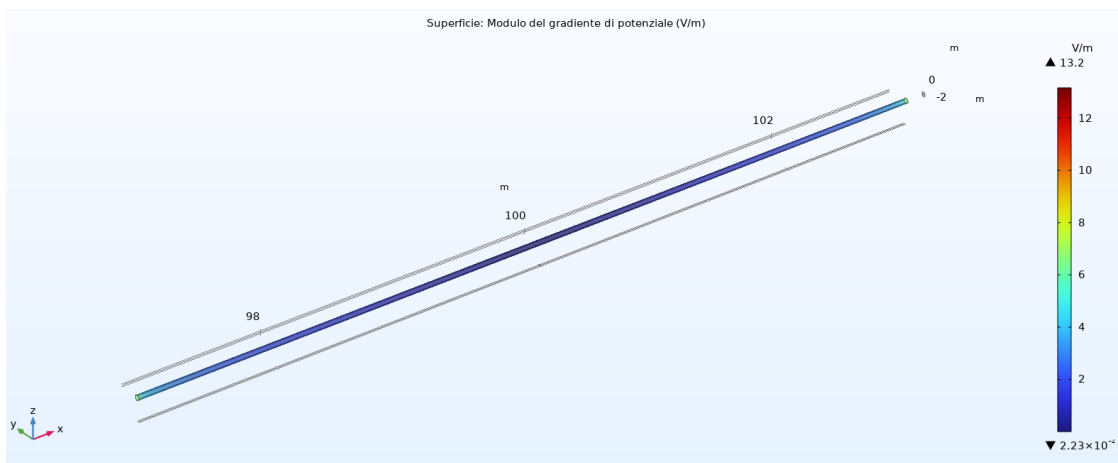
La corrente assorbita dai due metalli segue lo stesso trend. Con il cemento asciutto, l'acciaio assorbe una quantità relativamente ridotta di corrente, mentre con il cemento bagnato, l'acciaio assorbe quantità significativamente maggiori di corrente, raggiungendo un massimo di 6.720 mA, a dimostrazione che il cemento bagnato permette un maggiore flusso di corrente verso l'acciaio.

Per il rame, la corrente assorbita è leggermente inferiore, con un massimo di 5.717 mA. Questo comportamento riflette una redistribuzione della corrente tra i due conduttori, con l'acciaio che assorbe più corrente in presenza di cemento bagnato, come si può notare dalla tabella 5.26.

Si può affermare quindi, che il cemento asciutto limita il flusso di corrente verso l'acciaio, mentre il cemento bagnato aumenta significativamente sia la densità di corrente superficiale che la corrente assorbita sul metallo, grazie alla sua minore resistività.



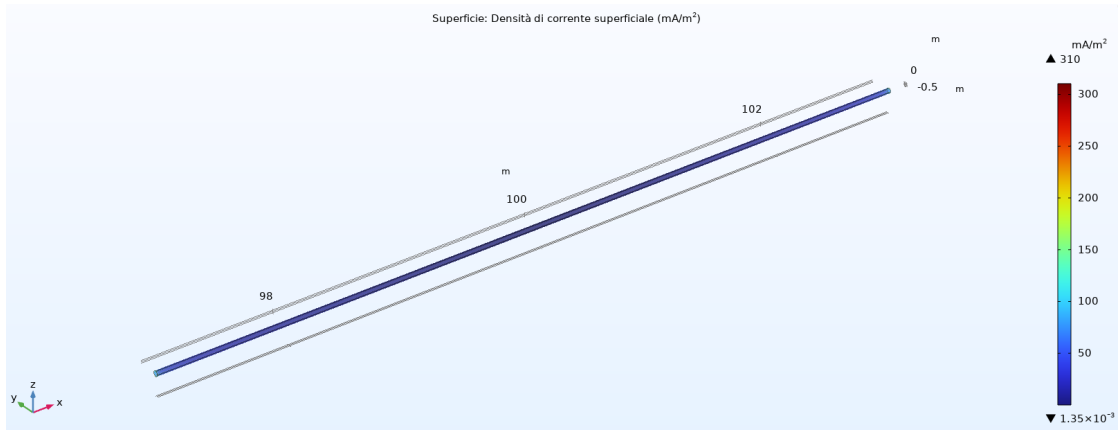
**Figura 5.44:** Caso 7: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato con l'aggiunta del conduttore in rame.



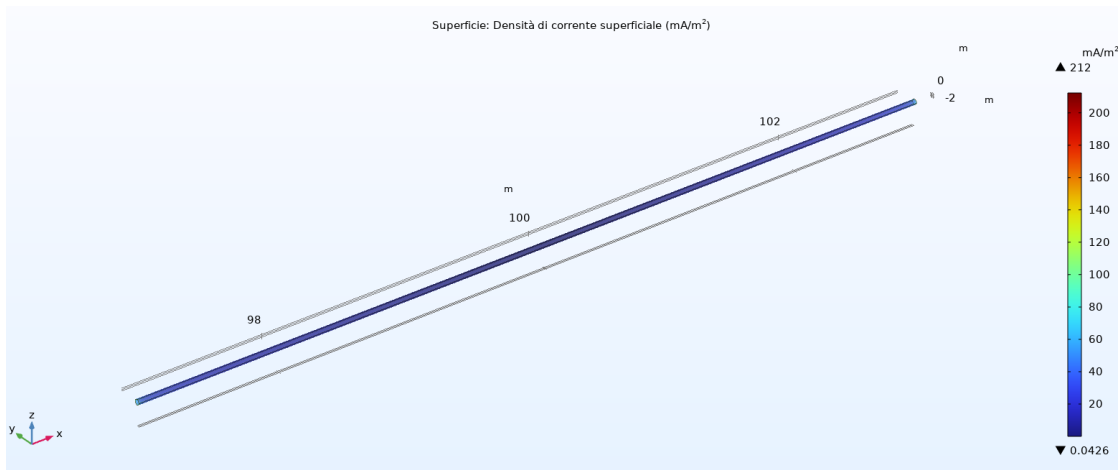
**Figura 5.45:** Caso 7: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con un blocco di cemento bagnato con l'acciaio in esso inglobato.

**Tabella 5.24:** Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame.

Posizione[m]	Acciaio [V/m]	Rame [V/m]
97	8.882	12.37
97.001	8.225	11.4
97.01	4.63	6.219
97.1	2.619	3.716
97.2	2.159	3.222
97.5	1.534	2.495
98	1.031	1.781
100	0.000388	0.00686
102	1.035	1.781
102.5	1.542	2.499
102.8	2.163	3.211
102.9	2.636	3.737
102.99	4.678	6.268
102.999	8.085	11.09
103	8.649	12.01



**Figura 5.46:** Caso 7: Densità di corrente conduttore in acciaio immerso in un blocco di cemento bagnato con l'aggiunta del conduttore in rame.



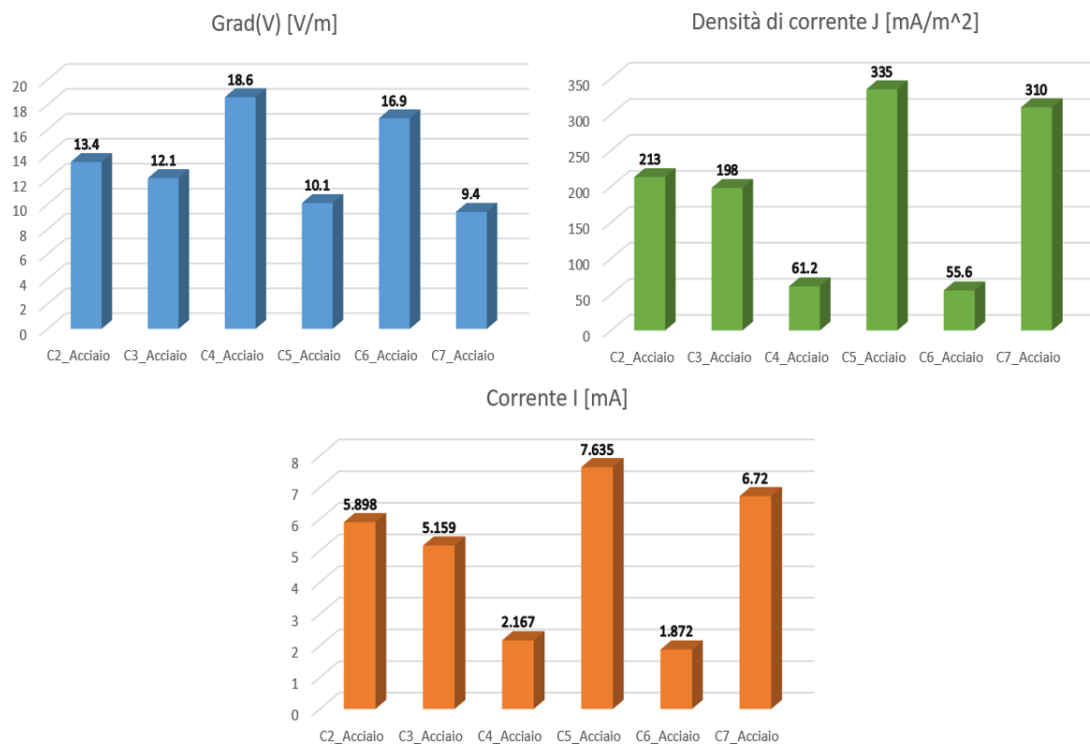
**Figura 5.47:** Caso 7: Densità di corrente sulla superficie del conduttore in rame con cemento in condizioni di bagnato con l'acciaio in esso inglobato.

**Tabella 5.25:** Confronto della densità di corrente tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame.

Posizione[m]	Acciaio [mA/m <sup>2</sup> ]	Rame [mA/m <sup>2</sup> ]
97	278.8	192.7
97.001	234.1	156
97.01	92.4	61.92
97.1	52.57	37.12
97.2	43.11	31.99
97.5	30.56	24.77
98	20.52	17.85
100	0.102	0.107
102	20.48	17.68
102.5	30.63	25.02
102.8	43.21	31.87
102.9	52.73	37.27
102.99	92.76	62.76
102.999	237.3	150.1
103	274.9	196.5

**Tabella 5.26:** Confronto della corrente I[mA] che circola attraverso le superfici trasversali del conduttore in rame e del conduttore acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato.

Posizione[m]	Acciaio [mA]	Rame [mA]
97	0.148	0.09996
97.2	1.61	1.153
98	4.45	3.57
99	6.189	5.204
100	6.72	5.717
101	6.189	5.201
102	4.45	3.565
102.8	1.61	1.152
103	0.1486	0.1001



**Figura 5.48:** Risultati del modello 2 in termini di gradiente di potenziale Grad(V) Massimo [V/m], J Densità di corrente massima [mA/m<sup>2</sup>] e I corrente massima [mA] nel conduttore in acciaio (riferimento appendice A).

### 5.3 Modello 3 - Interazione tra il conduttore in rame e il conduttore in acciaio collegati, con la presenza del blocco di cemento

Il Modello 3, riprende gli elementi aggiunti negli altri due modelli: quindi ha il terreno che è un semicilindro, in cui sono sotterrati un conduttore cilindrico di rame e uno in acciaio, con proprietà definite nella tabella 5.1. Ad una profondità di 0.5 metri si trova la platea di fondazione, i cui elementi sono stati definiti nella tabella 5.14.

Tra l'acciaio della platea e il conduttore in rame vi sono due collegamenti, i quali rappresentano dei collegamenti logici, in quanto le superfici laterali di questi ultimi sono isolate dal terreno circostante di modo che non interferiscano con esso. I collegamenti sono disegnati come due cilindri di raggio 0.005 m posizionati lungo le seguenti coordinate tridimensionali (x, y, z), come si può anche apprezzare dalla figura 5.49:

- collegamento 1 (97.2, 0, -2);
- collegamento 2 (102.8, 0, -2);

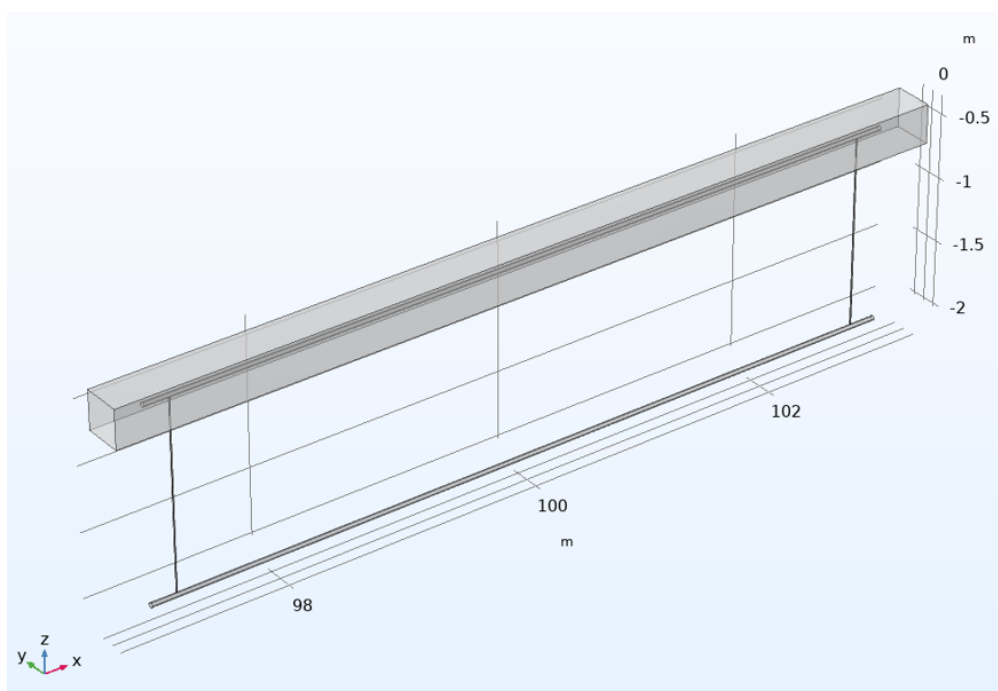


Figura 5.49: Modello 3 Geometria.



I collegamenti sono stati modellati per studiare l'effetto, a livello di correnti e gradiente di potenziale, che si verifica quando i ferri di armatura di una platea di fondazione sono connessi ad un impianto di terra in rame. Tali collegamenti hanno la stessa conduttività dell'acciaio e una permittività relativa pari a 1.

### 5.3.1 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno rispecchiano quelle dei modelli precedenti. In aggiunta a questi sono state definite:

- Isolamento elettrico sulle facce laterali dei collegamenti, cioè  $J_n = 0A/m^2$ . I collegamenti verticali creano un percorso preferenziale per la corrente tra il conduttore in acciaio e il conduttore in rame. Senza l'isolamento laterale, la corrente si disperderebbe nel terreno circostante, ma grazie alla condizione di isolamento la corrente è costretta a fluire attraverso i collegamenti.
- Continuità applicata ai punti di collegamento tra i due metalli in contatto elettrico. Questa condizione forza il potenziale elettrico ad essere continuo attraverso il confine tra i due materiali. Questo è necessario per soddisfare le leggi dell'elettrostatica, in particolare la condizione che non ci siano accumuli di carica libera all'interfaccia. Pertanto, il gradiente di potenziale elettrico attraverso i materiali deve adattarsi per mantenere la condizione di continuità. Questo avviene perché, per mantenere un flusso di corrente continuo, le variazioni del potenziale devono essere coerenti attraverso l'interfaccia. Se ci fosse una grande differenza di gradiente di potenziale tra i due metalli nei punti di collegamento, ci sarebbe un accumulo di carica che violerebbe la condizione di equilibrio elettrostatico. Quindi:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_1 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_2$$

### 5.3.2 Analisi della mesh

La mesh generata per gli elementi terreno, conduttore in rame, acciaio, e mesh supplementare è identica agli altri modelli. Per garantire un'adeguata risoluzione nei punti di collegamenti si è utilizzata una mesh molto fine, con una riduzione drastica degli elementi mesh sui contorni.

La mesh è composta principalmente da elementi tetraedrici, con un totale di 2920204 tetraedri. I risultati dell'analisi della qualità della mesh sono rappresentati, come per gli altri due modelli in forma grafica dalla figura 5.50 e dai seguenti dati:

- **Qualità minima degli elementi:** 0.169
- **Qualità media degli elementi:** 0.6568
- **Volume della mesh:** 3.128e6 m<sup>3</sup>

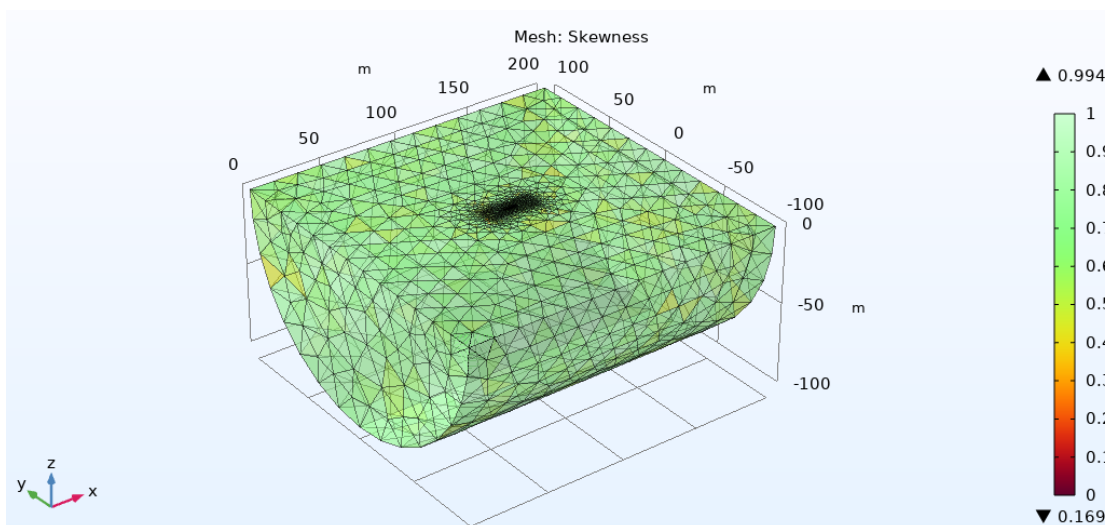


Figura 5.50: Modello 3 valutazione grafica della mesh in termini di Skewness.

### 5.3.3 Validità del modello 3

Per verificare la validità di tale modello, come abbiamo realizzato per i modelli precedenti, effettueremo un bilancio di corrente per l'intero sistema e per i domini acciaio e rame e collegamenti. L'ambiente di studio e le condizioni al contorno sono rispettati, la densità di corrente entra dalla base di sinistra con un valore di  $0.001 \text{ A/m}^2$  ed esce con lo stesso valore dalla superficie di destra, mantenendosi a  $0 \text{ A/m}^2$  sulle facce laterali.

Valutiamo anche il valore di corrente che entra ed esce dalla superficie trasversale del dominio in acciaio, prendendo in analisi il caso 9 (riferimento appendice A):

- **Corrente in ingresso:**  $148.8 \mu\text{A}$
- **Corrente in uscita:**  $147.6 \mu\text{A}$

L'errore relativo tra la corrente in ingresso e quella in uscita è stato calcolato utilizzando la formula dell'errore relativo:

$$\text{Errore Relativo} = \frac{|I_{\text{out}} - I_{\text{in}}|}{I_{\text{in}}} \approx \frac{|147.6 - 148.8|}{148.8} \approx 0.00806 \quad (5.15)$$

Di conseguenza, la precisione sul dominio acciaio risultata essere:

$$\text{Precisione} = (1 - \text{Errore Relativo}) \times 100\% \approx (1 - 0.00806) \times 100\% \approx 99.2\% \quad (5.16)$$

Per il dominio rame abbiamo i seguenti dati:

- **Corrente in ingresso:**  $100.2 \mu\text{A}$

- **Corrente in uscita:**  $100.4 \mu A$

L'errore relativo risulta:

$$\text{Errore Relativo} = \frac{|I_{\text{out}} - I_{\text{in}}|}{I_{\text{in}}} \approx \frac{|100.4 - 100.2|}{102.2} \approx 0.00199 \quad (5.17)$$

La precisione sul dominio rame risultata essere:

$$\text{Precisione} = (1 - \text{Errore Relativo}) \times 100\% \approx (1 - 0.00199) \times 100\% \approx 99.8\% \quad (5.18)$$

Valutiamo anche la condizione sui contorni su uno dei collegamenti, valutando la corrente che entra/esce nei domini rame-acciaio. Consideriamo il collegamento 1 (97.2, 0, -2):

- **Corrente in uscita dall'acciaio:**  $546.3 \mu A$
- **Corrente in entrata al rame:**  $543.9 \mu A$

L'errore relativo risulta:

$$\text{Errore Relativo} = \frac{|I_{\text{out}} - I_{\text{in}}|}{I_{\text{in}}} \approx \frac{|543.9 - 546.3|}{31.17} \approx 0.00439 \quad (5.19)$$

La precisione sul collegamento 1 risulta:

$$\text{Precisione} = (1 - \text{Errore Relativo}) \times 100\% \approx (1 - 0.00439) \times 100\% \approx 99.5\% \quad (5.20)$$

Notiamo come l'implementazione di una mesh adeguata sui domini e contorni del modello di simulazione abbia mantenuto dei valori molto alti di precisione e adeguatezza nel calcolo delle grandezze di interesse.

### 5.3.4 Risultati del modello 3

In questo paragrafo, verrà analizzato il comportamento dei due metalli collegati in due punti differenti e come essi influiscano sulla distribuzione di corrente e sul gradiente di potenziale.

Si confrontano due casi distinti:

- Caso 8: Platea di fondazione con cemento asciutto con il conduttore in acciaio e rame collegati;
- Caso 9: Platea di fondazione con cemento bagnato con il conduttore in acciaio e rame collegati.

Il confronto tra i casi 8 e 9 evidenzierà l'impatto delle condizioni del cemento (asciutto contro bagnato) sulla distribuzione della corrente e del campo elettrico nel sistema e come i collegamenti tra i metalli influenzino tali distribuzioni.

## Caso 8: Platea di fondazione con cemento asciutto con il conduttore in acciaio e rame collegati

### Gradiente di potenziale

L'analisi del gradiente di potenziale elettrico, espresso in V/m, su rame e acciaio ha rivelato un comportamento coerente con la distribuzione attesa della corrente vagante. Il gradiente di potenziale risulta massimo vicino alle estremità dei conduttori e tende a ridursi verso la parte centrale, sia per il rame che per l'acciaio. Nella simulazione, il valore massimo del gradiente di potenziale per il rame si attesta intorno a 13.3 V/m, in figura 5.51, mentre per l'acciaio raggiunge un valore massimo di 16 V/m, in figura 5.52. Questa differenza nei valori riflette la diversa conducibilità elettrica tra i due materiali, con l'acciaio che presenta una resistenza elettrica maggiore rispetto al rame.

L'introduzione dei collegamenti logici tra acciaio e rame porta a una maggiore interazione tra i due conduttori. Nei punti di collegamento, il gradiente di potenziale elettrico si riduce drasticamente, in quanto i collegamenti sono conduttori ad alta conducibilità, segnalando così una condivisione del campo elettrico, che permette un livellamento del potenziale tra i due materiali. Questo effetto è visibile sia sull'acciaio che sul rame, e porta a una diminuzione locale del gradiente che non si osserva nel caso 6. In queste regioni, il gradiente di potenziale si mantiene su valori molto bassi, dell'ordine di  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  V/m, in tabella 5.3.4, indicando che la transizione della corrente tra i due materiali avviene in modo uniforme senza particolari accumuli di potenziale o discontinuità elettriche.

### Densità di corrente

La densità di corrente superficiale sull'acciaio mostra un comportamento interessante. Essa presenta dei picchi alle estremità e nelle vicinanze dei collegamenti pari a 46 – 47 mA/m<sup>2</sup>; sul rame essa è decisamente superiore, però con le stesse similitudini rispetto alla posizione dei picchi pari a 210 – 247 mA/m<sup>2</sup>, tali dati sono visibili in forma grafica dalle figure 5.53 e 5.54 e numericamente nella tabella 5.29. Nei punti di collegamento tra rame e acciaio, si nota un effetto interessante: le densità di corrente sull'acciaio e sul rame sono molto alte sopra i 2000 mA/m<sup>2</sup>; questo indica la presenza di un collegamento metallico.

Notiamo inoltre, che le densità di corrente mostravano più fluttuazioni, a causa del trasferimento di corrente tra i due conduttori, rispetto al caso precedente con i metalli scollegati.

Per quanto riguarda la corrente assorbita, rispetto al caso 6, si ha un aumento della corrente totale assorbita sul conduttore in rame e una diminuzione della stessa sul conduttore in acciaio, come si può notare dalla tabella 5.30. Il collegamento logico tra acciaio e rame nel caso 8 crea un'importante interazione tra i due conduttori, facilitando un trasferimento di corrente che porta a una redistribuzione della densità di corrente e della corrente assorbita nei punti di collegamento. Un altro punto

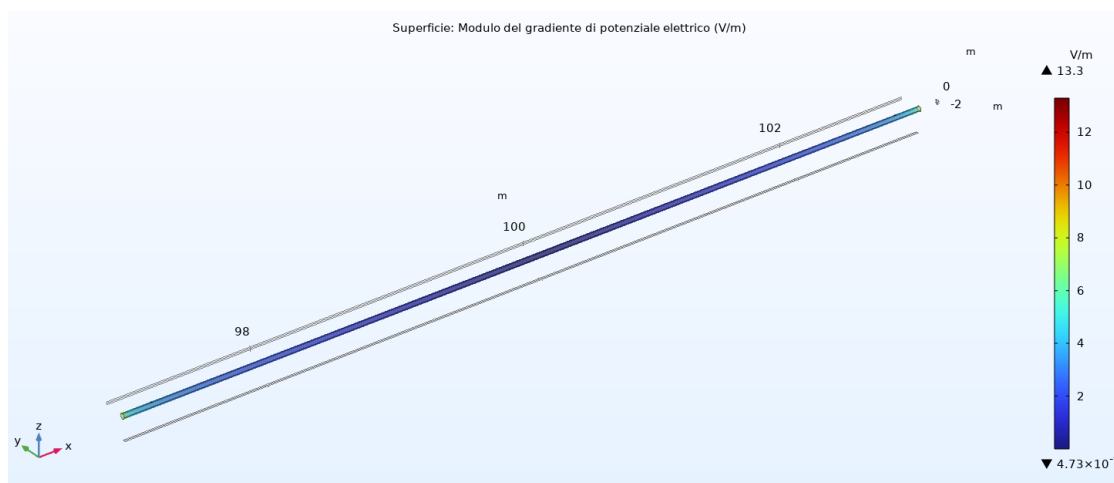
interessante è valutare quanta corrente passa nei collegamenti, tali valori sono descritti nella tabella 5.27:

**Tabella 5.27:** Corrente trasferita per il collegamento 1 e il collegamento 2.

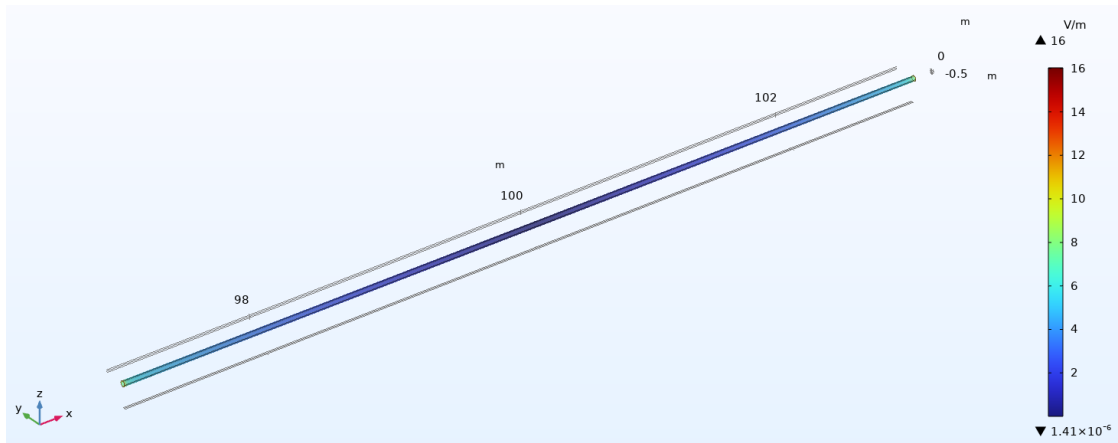
Collegamento	Materiale	Corrente ( $\mu\text{A}$ )
Collegamento 1	Acciaio	135.8 $\mu\text{A}$
	Rame	135.6 $\mu\text{A}$
Collegamento 2	Acciaio	138.1 $\mu\text{A}$
	Rame	137.9 $\mu\text{A}$

Questi valori simili indicano che i collegamenti logici tra i due conduttori facilitano un bilanciamento quasi perfetto della corrente tra acciaio e rame. La piccola differenza tra le correnti dimostra che il collegamento consente un flusso efficiente e stabile, assicurando che la corrente venga distribuita in modo uniforme tra i due materiali, grazie alla loro elevata conducibilità. Questi dati assicurano anche che la condizione di continuità sia rispettata.

Inoltre, un'ultima verifica essenziale da effettuare è quella di analizzare la densità di corrente superficiale normale alla superficie di uno dei collegamenti, che come si vede dalla figura 5.55, presenta valori pari a  $0 \text{ mA/m}^2$ . La condizione di isolamento è stata rispettata.



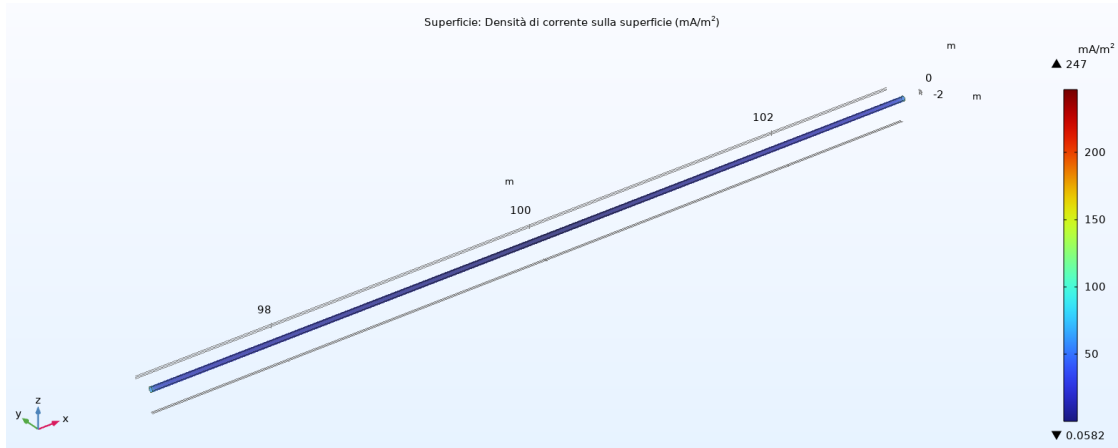
**Figura 5.51:** Caso 8: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati.



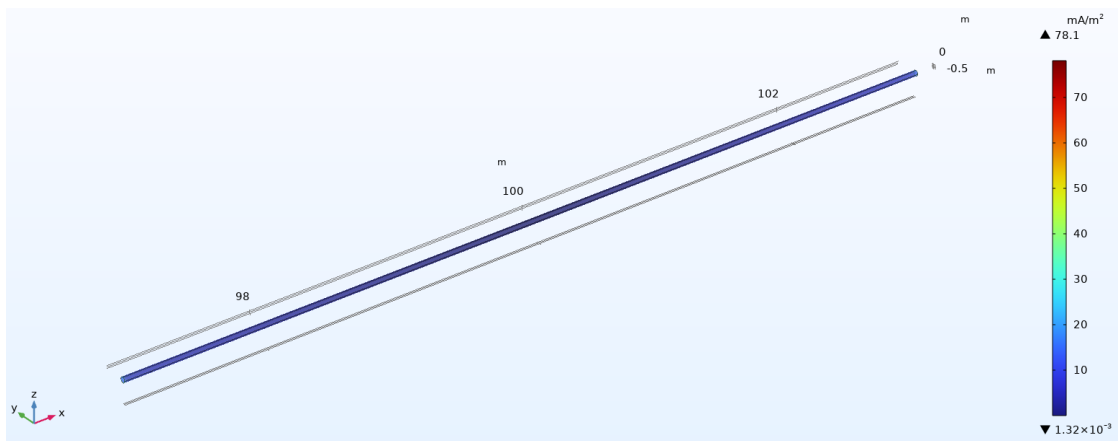
**Figura 5.52:** Caso 8: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati.

**Tabella 5.28:** Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento asciutto e Rame, collegati tra loro.

Posizione[m]	Acciaio [V/m]	Rame [V/m]
97	13.89	12.74
97.001	13.21	11.73
97.01	8.384	6.804
97.1	5.425	4.092
97.195	5.264	3.783
97.2	$1.15 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-6}$
97.205	5.201	3.708
97.5	4.174	2.809
98	3.128	2.049
100	0.000361	0.00252
102	3.136	2.072
102.5	4.171	2.807
102.795	5.201	3.71
102.8	$1.21 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-6}$
102.805	5.27	3.784
102.9	5.441	4.11
102.99	8.411	6.844
102.999	13.62	11.75
103	14.25	12.05



**Figura 5.53:** Caso 8: Densità di corrente sul conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati.



**Figura 5.54:** Caso 8: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati.

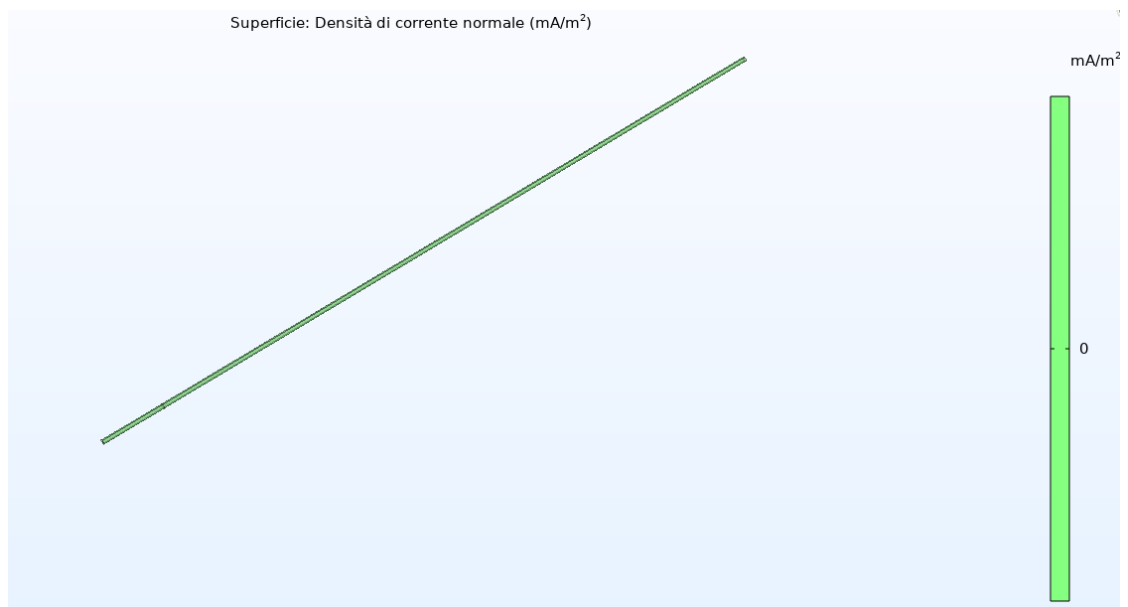
**Tabella 5.29:** Confronto della densità di corrente tra Acciaio,inglobato in un blocco di cemento asciutto e Rame, collegati tra loro.

Posizione [m]	Acciaio [mA/m <sup>2</sup> ]	Rame [mA/m <sup>2</sup> ]
97	46.27	216.6
97.001	40.84	181.4
97.01	16.71	67.61
97.1	10.86	40.96
97.195	47.94	71.28
97.2	2106	2181
97.205	32.01	70.99
97.5	8.297	28.06
98	6.252	20.42
100	0.0126	0.193
102	6.251	20.58
102.5	8.336	28.01
102.795	28.05	76.27
102.8	2201	2209
102.805	72.91	76.47
102.9	10.91	41.18
102.99	16.75	68.1
102.999	41.53	189.4
103	47.52	214.5

**Tabella 5.30:** Confronto della corrente attraverso le superfici trasversali del conduttore in Acciaio, inglobato in un blocco di cemento asciutto e del conduttore in Rame, collegati tra loro.

Posizione [m]	Acciaio [mA]	Rame [mA]
97	0.02641	0.1082
97.2	0.3144	1.349
98	0.9808	4.073
99	1.55	5.948
100	1.732	6.547
101	1.55	5.947
102	0.9809	4.073
102.8	0.3143	1.348
103	0.02619	0.1096





**Figura 5.55:** Modello 3: Densità di corrente sulla superficie laterale di uno dei collegamenti.

### **Caso 9: Platea di fondazione con cemento bagnato on il conduttore in acciaio e rame collegati**

L'ultimo caso analizzato considera il comportamento del sistema con la platea di fondazione in cemento bagnato e i conduttori in acciaio e rame collegati tra loro. Questo scenario consente di valutare l'effetto della maggiore conducibilità del cemento bagnato sulla distribuzione della corrente e del campo elettrico, confrontando i risultati con quelli ottenuti nei casi precedenti con cemento asciutto.

#### **Gradiente di potenziale**

Nel confronto tra il caso 9 (cemento bagnato con collegamenti tra rame e acciaio) e il caso 7 (cemento bagnato senza collegamenti tra rame e acciaio), emergono differenze significative nella distribuzione del gradiente di potenziale elettrico. Nel caso 9, la presenza dei collegamenti logici tra i conduttori permette una forte redistribuzione del gradiente di potenziale elettrico, particolarmente evidente nelle sezioni dei collegamenti, dove esso si riduce drasticamente fino a valori minimi di  $10^{-6}$ - $10^{-7}$ V/m. Questa riduzione è il risultato della conduzione facilitata dei collegamenti, la quale consente uno scambio diretto di corrente tra acciaio e rame. Notiamo inoltre come i massimi sui due metalli si riducono a 12.2 V/m e 8.98 V/m sull'acciaio, valori ispezionabili nelle figure 5.56 e 5.57 e dalla tabella 5.3.4.

#### **Densità di corrente**

Il caso 9, in cui vi è il blocco di cemento bagnato con collegamenti tra acciaio e rame è da confrontare con il caso 7, senza i collegamenti tra i metalli. Questi ultimi modificano significativamente la distribuzione della corrente nel sistema, come si nota dalle figure 5.58 e 5.59. Nel caso 9, la densità di corrente superficiale sull'acciaio e sul rame mostra picchi estremamente elevati nei punti di collegamento, dove i valori raggiungono  $8000 \text{ mA/m}^2$  sull'acciaio e sul rame, dove si ha il collegamento metallico. Questo è un chiaro indicatore del fatto che i collegamenti logici favoriscono uno scambio diretto e intenso di corrente tra i due conduttori. Tale fenomeno è fisicamente giustificato dalla bassa resistenza offerta dai collegamenti, che permettono alla corrente di fluire liberamente tra rame e acciaio, riducendo le differenze di potenziale e aumentando localmente la densità di corrente.

Anche la corrente assorbita riflette questa differenza di configurazione. Notiamo infatti come rispetto al caso 7, nel caso 9, la corrente sul conduttore in rame sia aumentata, mentre in modo speculare, sia diminuita sul conduttore in acciaio, come si nota dalla tabella 5.34.

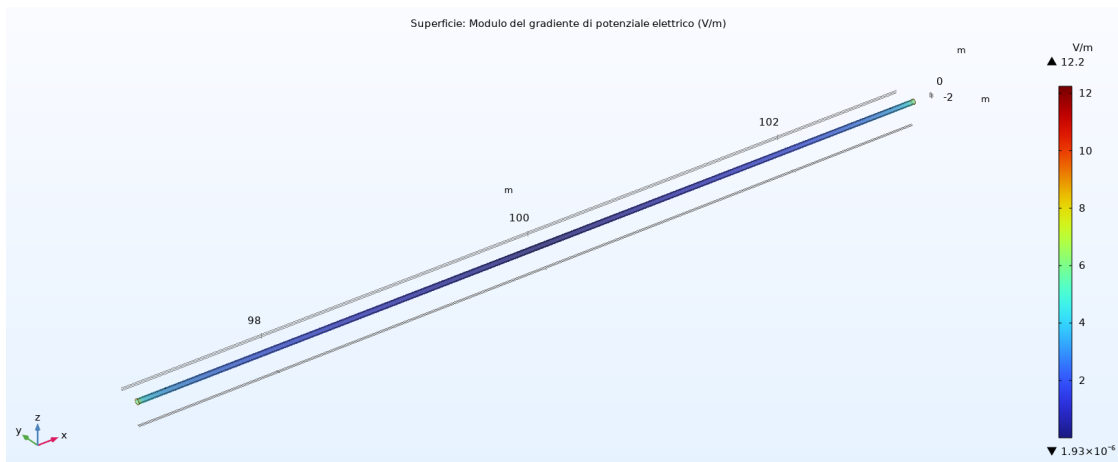
I valori di corrente scambiata tra acciaio e rame nei due collegamenti sono visibili nella tabella 5.31. Essi indicano un flusso quasi equilibrato tra i due conduttori. Questi risultati confermano che i collegamenti logici tra acciaio e rame non solo permettono un trasferimento diretto di corrente, ma garantiscono anche una divisione bilanciata del carico elettrico tra i due conduttori.

Questo comportamento potrebbe essere cruciale per ridurre la corrente vagante sul

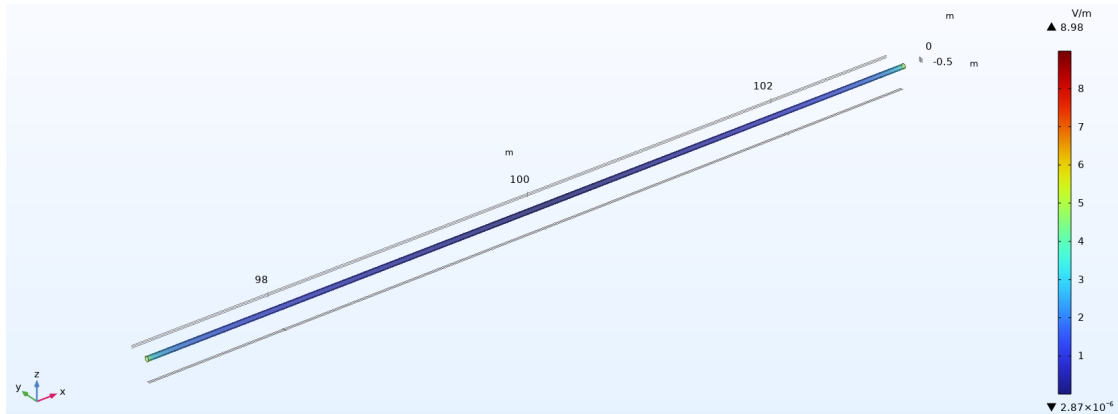
conduttore in acciaio.

**Tabella 5.31:** Corrente trasferita per il collegamento 1 e il collegamento 2.

Collegamento	Materiale	Corrente ( $\mu\text{A}$ )
Collegamento 1	Acciaio	546.3 $\mu\text{A}$
	Rame	543.9 $\mu\text{A}$
Collegamento 2	Acciaio	537.4 $\mu\text{A}$
	Rame	534.7 $\mu\text{A}$



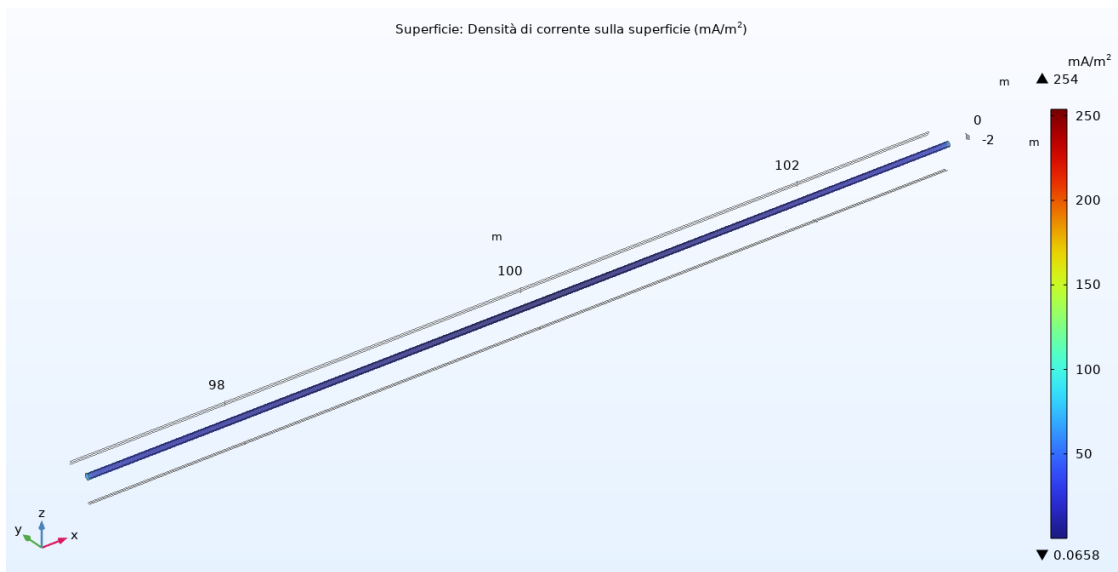
**Figura 5.56:** Caso 9: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.



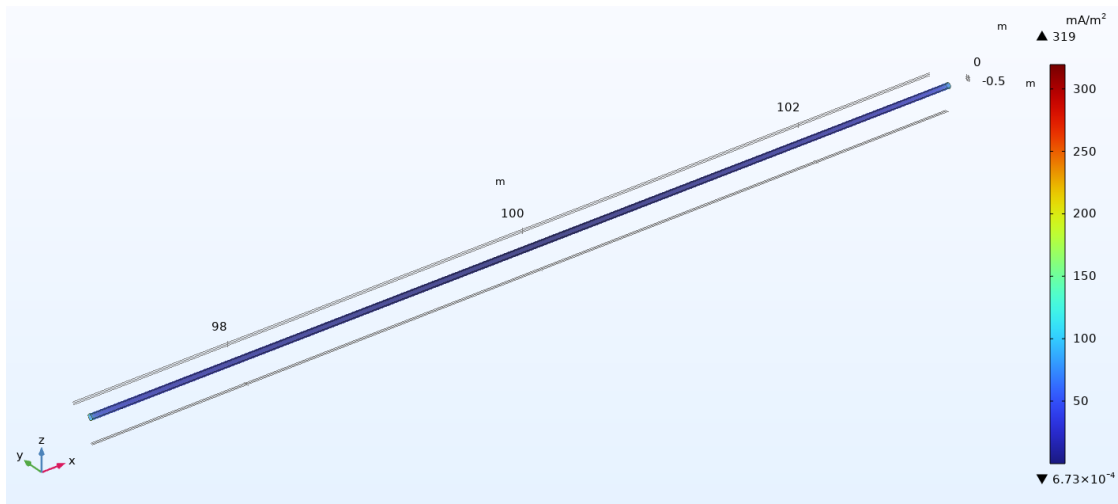
**Figura 5.57:** Caso 8: Gradiente di potenziale intorno al dominio del conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.

**Tabella 5.32:** Confronto del gradiente di potenziale tra Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame, collegati tra loro.

Posizione [m]	Acciaio [V/m]	Rame [V/m]
97	8.333	12.03
97.001	7.506	10.9
97.01	4.611	6.246
97.1	2.642	3.726
97.195	2.304	3.424
97.2	$4.83 \times 10^{-6}$	$4.33 \times 10^{-6}$
97.205	3.352	3.708
97.5	1.541	2.492
98	1.027	1.774
100	0.000261	0.00172
102	1.034	1.784
102.5	1.532	2.483
102.795	3.353	3.71
102.8	$4.67 \times 10^{-6}$	$4.17 \times 10^{-6}$
102.805	3.426	3.784
102.9	2.631	3.733
102.99	4.701	6.217
102.999	7.956	11.08
103	8.311	11.95



**Figura 5.58:** Caso 8: Densità di corrente sul conduttore in rame con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.



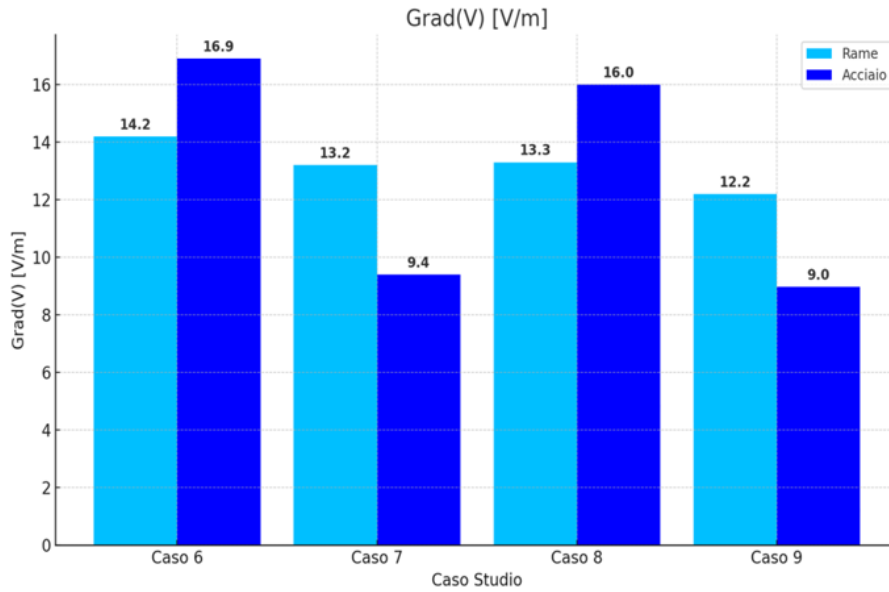
**Figura 5.59:** Caso 9: Densità di corrente superficiale sul conduttore in acciaio con i due metalli (rame e acciaio) collegati, cemento bagnato.

**Tabella 5.33:** Confronto della densità di corrente tra Acciaio,inglobato in un blocco di cemento bagnato e Rame, collegati tra loro.

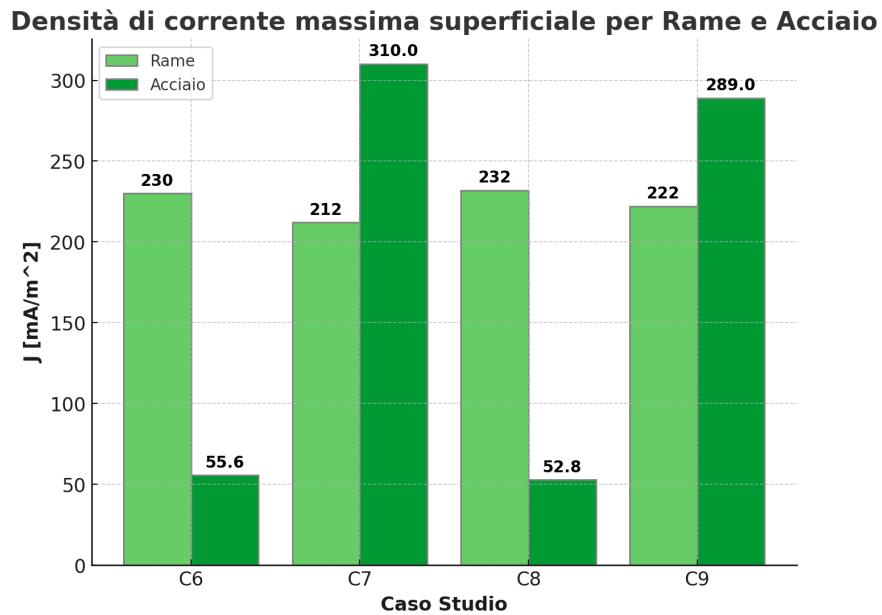
Posizione [m]	Acciaio [mA/m <sup>2</sup> ]	Rame [mA/m <sup>2</sup> ]
97	259.5	193.2
97.001	229.9	157.9
97.01	91.94	62.26
97.1	52.58	37.38
97.195	204.4	201.7
97.2	8352	8656
97.205	94.05	200.9
97.5	30.69	24.86
98	20.51	17.94
100	0.0426	0.0877
102	20.69	17.77
102.5	30.45	25.54
102.795	94.71	198.6
102.8	7873	8320
102.805	193.1	170.9
102.9	92.12	37.45
102.99	16.75	62.86
102.999	222.8	151.6
103	249.4	196.8

**Tabella 5.34:** Confronto della corrente attraverso le sezione trasversali del conduttore in Acciaio, inglobato in un blocco di cemento bagnato e del conduttore in Rame, collegati tra loro.

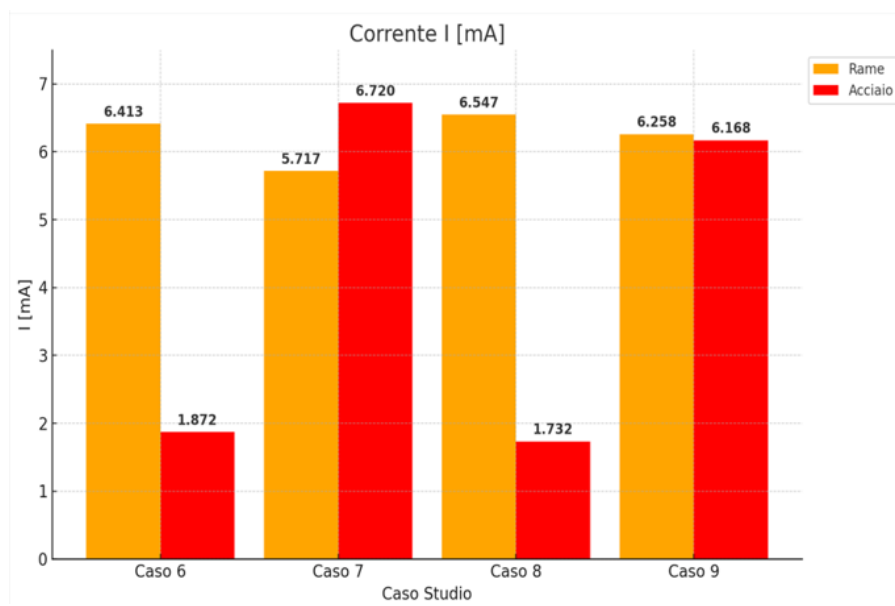
Posizione [m]	Acciaio [mA]	Rame [mA]
97	0.1488	0.1002
97.2	1.575	1.692
98	3.9	4.111
99	5.637	5.744
100	6.168	6.258
101	5.638	5.744
102	3.901	4.109
102.8	1.574	1.691
103	0.1476	0.1004



**Figura 5.60:** Confronto tra i casi C6, C7, C8, C9 (riferimento appendice A), in termini di gradiente di potenziale massimo [V/m] in prossimità dei conduttori in acciaio e rame.



**Figura 5.61:** Confronto tra i casi C6, C7, C8, C9 (riferimento appendice A), in termini di densità di corrente superficiale massima  $J$  [mA/m²] rilevata sui conduttori in acciaio e rame.



**Figura 5.62:** Confronto tra i casi C6, C7, C8, C9 (riferimento appendice A), in termini di corrente massima che circola nei conduttori in acciaio e rame.



## 5.4 Considerazioni finali

L'analisi condotta su nove casi diversi, tramite i tre modelli COMSOL analizzati, ha consentito di valutare in maniera approfondita l'effetto di un flusso di corrente continua uniforme nel terreno, pari all'incirca a 15 A, distribuito su un'area di  $15707 \text{ m}^2$ , su strutture interrato costituite da un blocco di cemento e due conduttori in acciaio e rame. Questo sistema nel suo complesso rappresenta una platea di fondazione di un edificio e il sistema di messa a terra. Attraverso lo studio delle differenze di densità di corrente, gradiente di potenziale e conduzione elettrica nei vari scenari, è stato possibile identificare alcune tendenze importanti che influiscono sulla distribuzione della corrente nelle strutture e sul loro comportamento elettrochimico.

L'analisi si concentrerà su un paragone tra tutti i casi studiati finora. Tale confronto verrà fatto in termini di corrente totale che circola nei conduttori interrati, densità di corrente massima e gradiente di potenziale massimo intorno ad essi, rispetto al dominio esterno che li circonda. La tabella seguente mostra in modo sintetico un riepilogo dei casi analizzati:

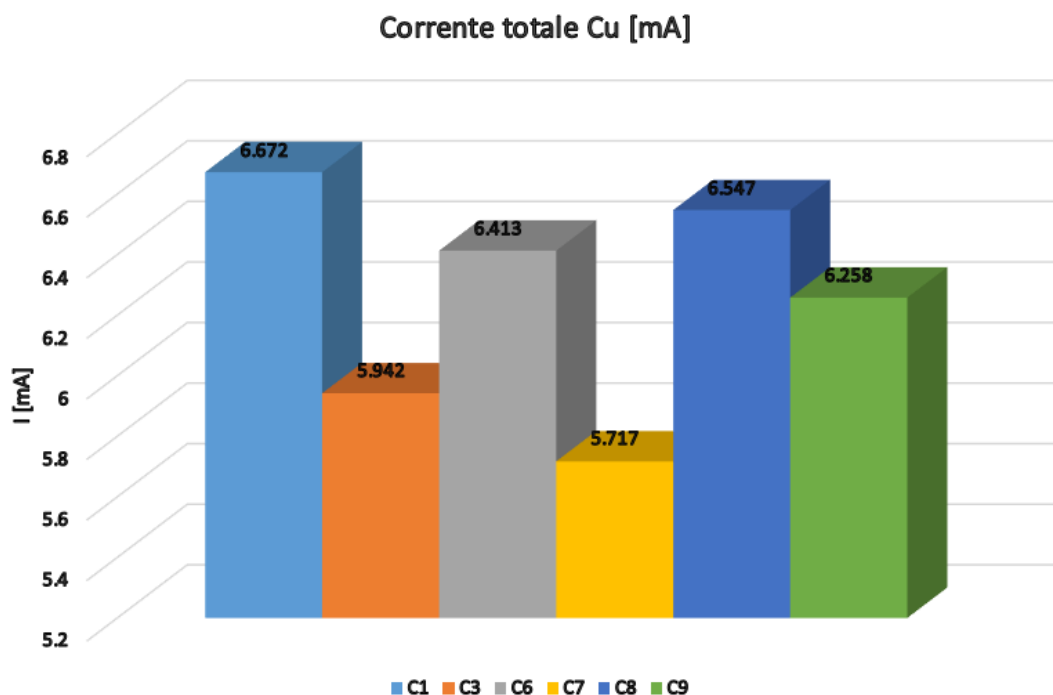
**Tabella 5.35:** Tabella riepilogativa dei casi studiati.

	Rame	Acciaio	Cemento Asciutto	Cemento Bagnato	Colleg. metalli
C1	X				
C2		X			
C3	X	X			
C4		X	X		
C5		X		X	
C6	X	X	X		
C7	X	X		X	
C8	X	X	X		X
C9	X	X		X	X

Dal grafico 5.63 della corrente assorbita dal rame si osserva che:

- Nel **Caso 1** (rame isolato), nel conduttore in rame circola la quantità maggiore di corrente riscontrata tra i vari casi, **6.672 mA**, poiché non vi sono altri conduttori che influenzano la distribuzione della corrente vagante.
- Quando il rame è combinato con l'acciaio, come nel **Caso 3**, la corrente nel rame diminuisce ad un valore di **5.942 mA**, questo perché l'acciaio contribuisce a ridistribuire parte della corrente vagante.
- Nei **Casi 6, 7, 8 e 9** (in presenza di platea in cemento), si nota una riduzione complessiva della corrente che circola nel rame; quando il cemento è bagnato

(**5.717 mA** nel **Caso 7** e **6.258 mA** nel **Caso 9** rispetto alla corrente del caso 1), mentre con il cemento asciutto nel rame circola più corrente (**6.413 mA** e **6.547 mA** nei **Casi 6 e 8**). Questo riflette la maggiore conducibilità del cemento bagnato rispetto al terreno, che facilita il flusso di corrente sul conduttore in acciaio e la riduce sul conduttore in rame. Grazie ai collegamenti una buona parte della corrente assorbita dall'acciaio viene trasferita al conduttore in rame.



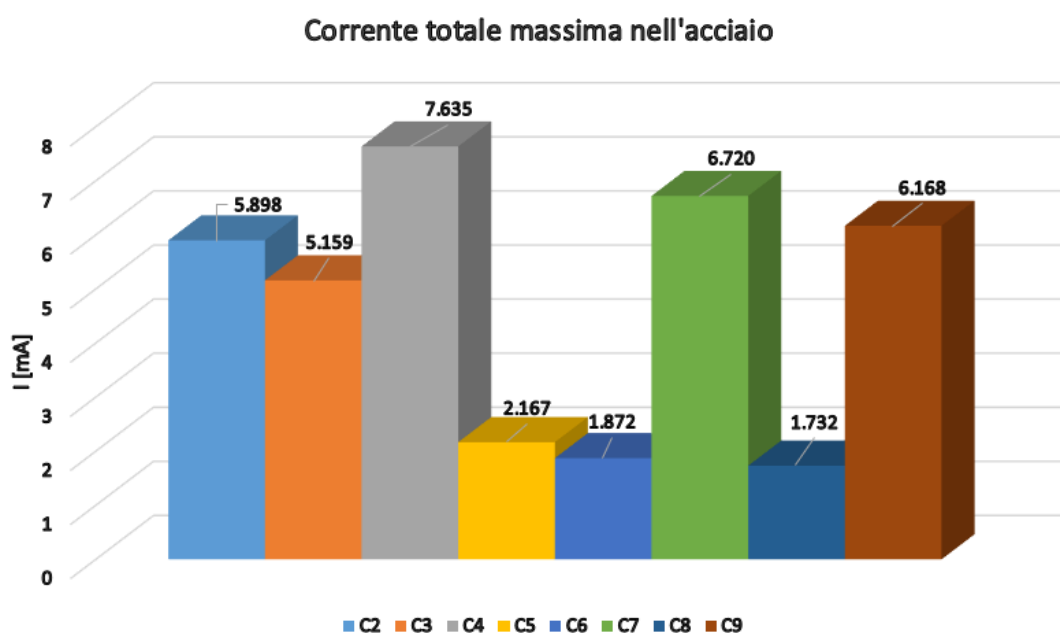
**Figura 5.63:** Confronto della corrente totale  $I$  massima [mA] che circola nel conduttore in rame nei vari casi studio, riferimento appendice A.

Il grafico 5.64 della corrente totale assorbita dall'acciaio mostra un comportamento complementare:

- Nel **Caso 2**, l'acciaio è attraversato da **5.898 mA**, ma quando è combinato con il rame, come nel **Caso 3**, la corrente nel conduttore scende a **5.159 mA**, poiché parte della corrente viene condivisa con il rame, migliorando le condizioni, in termini di corrente vagante nell'acciaio.
- Nei **Casi 4 e 5** (acciaio in cemento asciutto e bagnato), si nota un forte contrasto: con il cemento asciutto nell'acciaio circola una corrente minore (**2.167 mA**), perché il cemento asciutto si comporta come uno schermo

isolante; mentre con il cemento bagnato la corrente nel conduttore aumenta significativamente a **7.635 mA**, questo perché la resistività del cemento bagnato è minore rispetto al terreno.

- Nei **Casi 6, 7, 8 e 9**, l'acciaio è attraversato da correnti inferiori quando è presente il collegamento con il rame e il cemento è asciutto (**1.872 mA** e **1.732 mA** nei **Casi 6 e 8**); mentre con il cemento bagnato, la corrente nell'acciaio pari a **6.720 mA** e **6.168 mA** nei casi **Casi 7 e 9** è inferiore ai **Casi 6 e 8**, rispettivamente, perché una parte della corrente passa dall'acciaio al rame, attraverso i collegamenti.

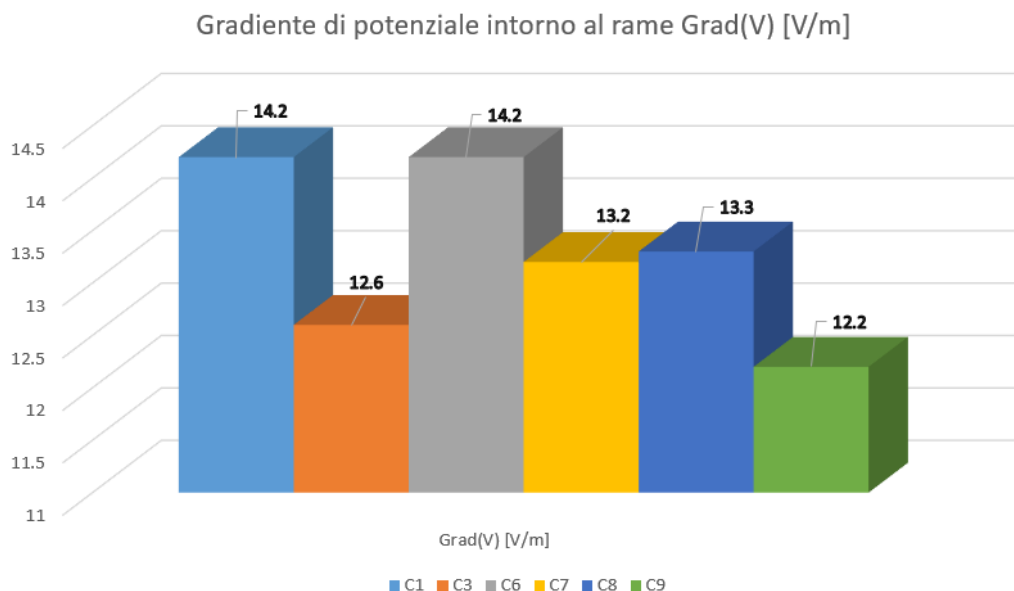


**Figura 5.64:** Confronto della corrente totale  $I$  [mA] che circola nell'acciaio nei vari casi studio, riferimento appendice A.

Per quanto riguarda il gradiente di potenziale intorno al rame dal grafico 5.65:

- Il valore massimo di **14.2 V/m** è osservato sia nel **Caso 1** (rame isolato) sia nel **Caso 6** (rame con platea in cemento asciutto). Questo indica che, in condizioni di cemento asciutto, il campo elettrico in prossimità del conduttore in rame è più intenso.
- Nel **Caso 3** (combinazione rame-acciaio) e nel **Caso 7** (cemento bagnato), il gradiente scende a **12.6 V/m** e **13.2 V/m**, rispettivamente, segnalando che la combinazione con altri conduttori o con un mezzo più conduttivo del terreno,

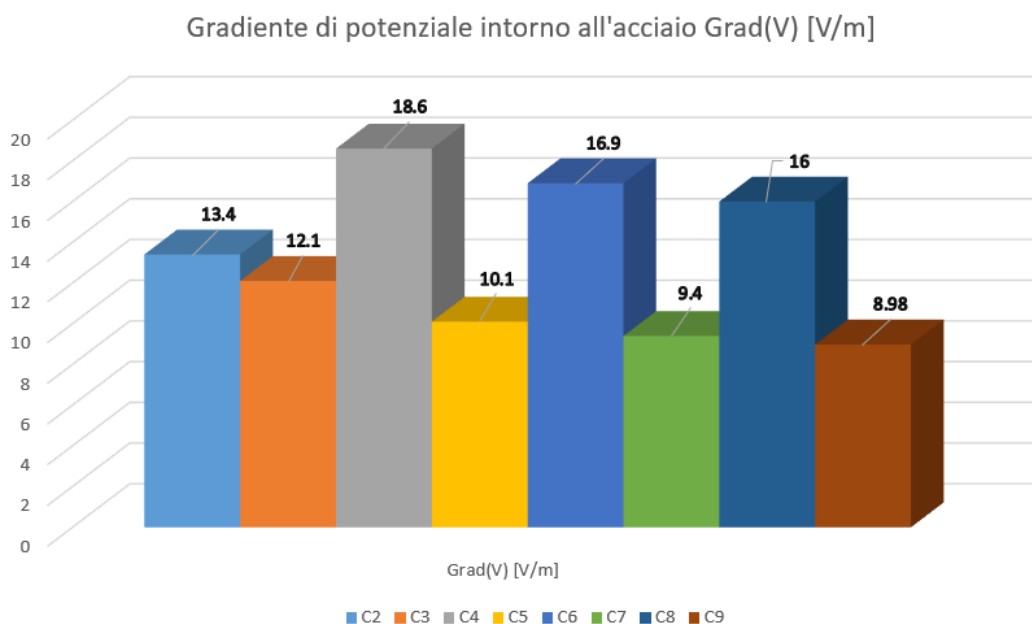
come il cemento bagnato, riduce l'intensità del campo elettrico attorno al rame.



**Figura 5.65:** Confronto del gradiente di potenziale massimo intorno al conduttore di rame nei vari casi analizzati, riferimento appendice A.

Il gradiente di potenziale intorno all'acciaio mostra un comportamento analogo, dalla figura 5.66:

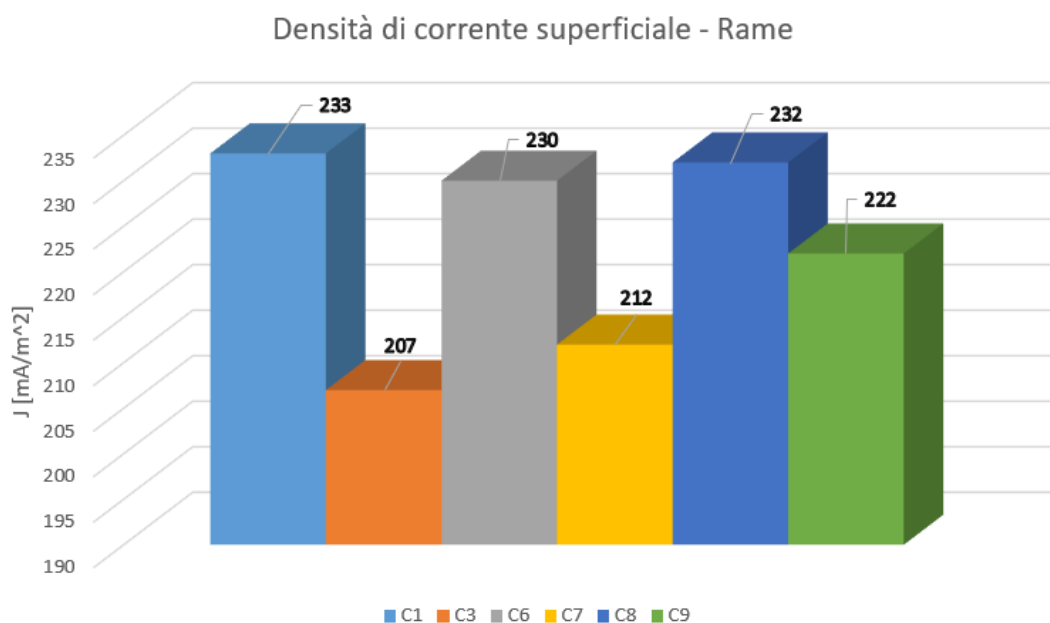
- Il valore massimo di **18.6 V/m** è registrato nel **Caso 4** (acciaio in cemento asciutto), mentre nel **Caso 5** (cemento bagnato) scende a **10.1 V/m**, confermando che il cemento asciutto oppone più resistenza al passaggio della corrente vagante, causando di contro un campo elettrico più intenso.
- Nel **Caso 3** (acciaio combinato con rame) il gradiente di potenziale in prossimità dell'acciaio risulta inferiore (pari a **13.4 V/m**) rispetto a quello del rame, in quanto nell'acciaio passa meno corrente.
- Nel **Caso 6** (platea in cemento asciutto con rame e acciaio), il gradiente è molto elevato (**16.9 V/m**), in quanto l'acciaio è immerso nel cemento che una resistività elettrica maggiore del terreno.
- Nei **Casi 8 e 9** (collegamento tra rame e acciaio), il gradiente scende ulteriormente a **16 V/m** nel caso asciutto e **8.98 V/m** nel caso bagnato, mostrando come la presenza di collegamenti tra i conduttori e il mezzo circostante influenzi la redistribuzione del campo elettrico.



**Figura 5.66:** Confronto del gradiente di potenziale massimo intorno al conduttore d'acciaio nei vari casi analizzati, riferimento appendice A.

Nel grafico 5.67 è rappresentata la densità di corrente superficiale massima per il rame nei sei diversi casi di studio analizzati (C1, C3, C6, C7, C8, C9), espressa in  $[mA/m^2]$ . Si nota che:

- il **caso C1**, che presenta il valore di densità di corrente più elevato, in quanto il rame è l'unico elemento interrato. Questo valore dipende dalle caratteristiche del terreno e dalla proprietà elettriche del rame;
- il **caso C3** mostra il valore più basso di densità di corrente, pari a **207**  $[mA/m^2]$ , in quanto il rame è interrato insieme ad un altro elemento conduttore, che assorbe le linee del campo di corrente;
- i casi intermedi, **C6, C7, C8 e C9**, con densità di corrente comprese tra **212**  $[mA/m^2]$  e **232**  $[mA/m^2]$ , evidenziano una variabilità che potrebbe essere associata alle diverse caratteristiche fisiche del sistema, come le proprietà elettriche del cemento in diverse condizioni fisiche (asciutto o bagnato) e la presenza dei collegamenti tra i metalli. Si nota che con il collegamento tra rame e acciaio, nei casi C8 e C9, la densità di corrente aumenta sul conduttore in rame, rispetto ai casi C6 e C7 rispettivamente, ciò è dovuto al fatto, che parte delle linee di campo, che prima attraversano il conduttore in acciaio, vengono assorbite dal conduttore in rame.



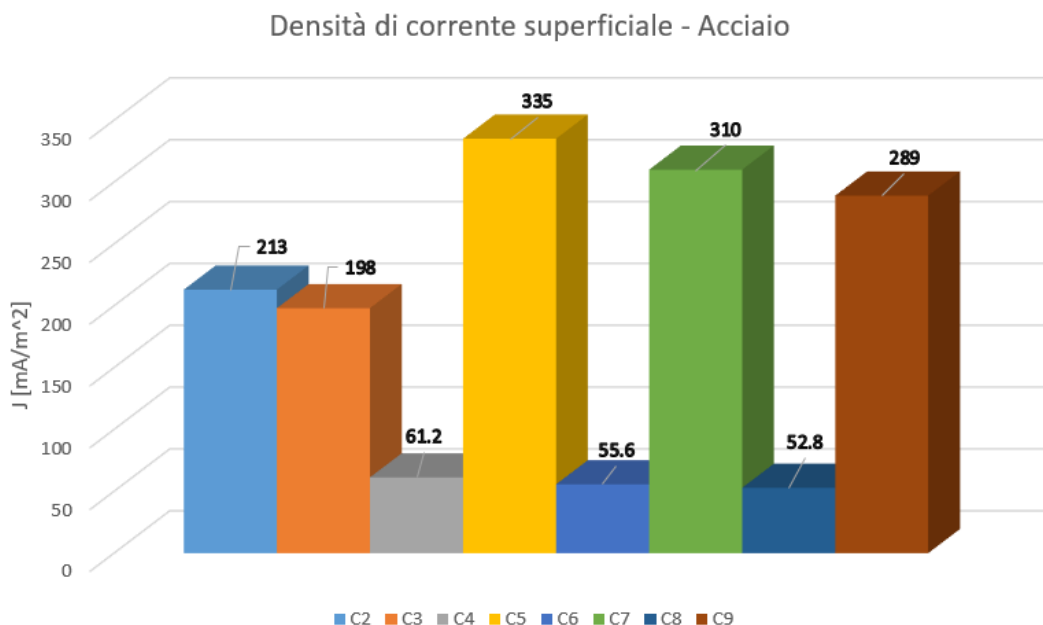
**Figura 5.67:** Confronto della densità di corrente massima superficiale  $J$  [ $mA/m^2$ ] sul conduttore in rame nei vari casi analizzati, riferimento appendice A.

Il grafico 5.68 mostra invece, la densità di corrente superficiale massima per l'acciaio nei diversi casi di studio (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9), espressa in [ $mA/m^2$ ]. La densità di corrente rappresenta un fattore cruciale per valutare la probabilità di corrosione, in particolare per materiali conduttivi come l'acciaio, che può essere soggetto a gravi fenomeni di corrosione elettrochimica.

I valori di  $J$  variano significativamente tra i diversi scenari:

- il **caso C5**, che corrisponde all'acciaio immerso nel cemento bagnato senza la presenza del rame, mostra il valore più alto di densità di corrente. Questo è dovuto al fatto che il cemento bagnato ha una resistività inferiore al terreno e, in assenza di altri conduttori, questa condizione potrebbe facilitare l'innescio di fenomeni di corrosione.
- Al contrario, il **caso C8**, che rappresenta la situazione con conduttori in acciaio e rame collegati, con l'acciaio immerso nel blocco di cemento asciutto, mostra la densità di corrente più bassa per l'acciaio. Questo scenario suggerisce che la presenza di entrambi i metalli collegati in condizioni di cemento asciutto riduce il rischio di corrosione sull'acciaio. Il cemento asciutto, con una resistività molto più alta di quella del terreno, non è l'ideale per un sistema di messa a terra, in quanto, aumenta la resistenza di terra con conseguenze sull'efficienza del sistema di messa a terra.

- il caso **C2** (solo acciaio senza rame) presenta una densità di corrente pari a **213** [ $mA/m^2$ ], superiore al caso combinato **C3** **198** [ $mA/m^2$ ], in cui sono presenti sia rame che acciaio. Questo dimostra che la presenza del rame può ridurre la densità di corrente superficiale sull'acciaio.

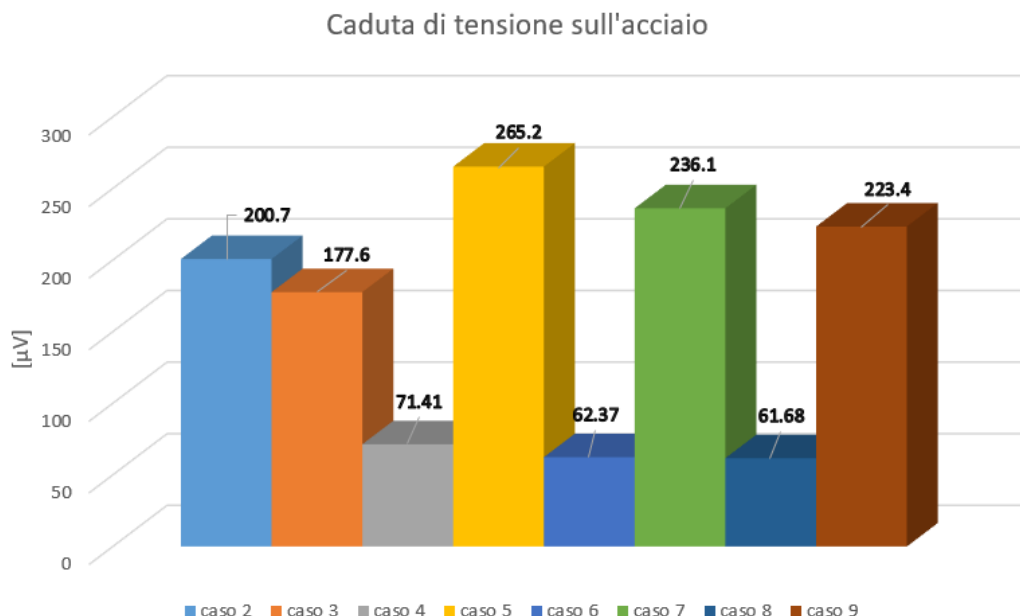


**Figura 5.68:** Confronto della densità di corrente massima superficiale  $J$  [ $mA/m^2$ ] sul conduttore in acciaio nei vari casi analizzati, riferimento appendice A.

L'obiettivo principale, come anticipato precedentemente, è quello di valutare l'impatto delle correnti vaganti sui ferri di armatura in un sistema di messa a terra con una platea di fondazione in cemento armato e una rete di terra in rame. In particolare, abbiamo analizzato diversi scenari riguardanti le interazioni tra il terreno, il cemento e i materiali metallici coinvolti, in modo da comprendere come le correnti vaganti influiscano sulla corrosione dell'acciaio e come l'accoppiamento con il rame possa modificare questo processo.

I risultati evidenziano che l'accoppiamento tra il conduttore in rame e quello in acciaio porta a una significativa riduzione della densità di corrente superficiale, gradiente di potenziale e corrente che circola nell'acciaio, rispetto ai casi in cui l'acciaio è isolato o immerso solo nel cemento (casi C2, C4, C5).

Questi risultati possono essere confrontati anche con la caduta di tensione sull'acciaio nei vari scenari, come mostrato in figura 5.69.



**Figura 5.69:** Confronto della caduta di tensione sull'acciaio [ $\mu V$ ] nei vari casi analizzati.

Secondo la norma CEI EN 50162, per evitare effetti inammissibili di correnti vaganti su strutture in calcestruzzo armato o strutture metalliche, si considera la tensione sul conduttore metallico. La tensione massima sui ferri di armatura deve essere inferiore  $+200mV$  [3]. Notiamo dalla figura 5.69, che tali valori sono ampiamente sotto tale soglia, in quanto la corrente vagante entrante nel terreno ha un valore di 15 A distribuita su un'area molto vasta di  $15707 m^2$ .

Notiamo inoltre, che il collegamento diretto tra i ferri di armatura in acciaio e il conduttore in rame ha ulteriormente migliorato la protezione dell'acciaio dalla corrosione, abbassando il gradiente di potenziale massimo, la caduta di tensione massima, la densità di corrente massima e la corrente che circola nel conduttore. Questo suggerisce che, in applicazioni pratiche, l'integrazione dei ferri di armatura collegati ad un sistema di messa a terra in rame potrebbe rappresentare una strategia efficace per ridurre il rischio di corrosione elettrochimica indotta dalle correnti vaganti.

## 5.5 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha esaminato in dettaglio l'interazione tra un flusso di corrente vagante in continua e dei conduttori interrati, in particolare rame e acciaio, attraverso una serie di simulazioni sviluppate con COMSOL. I diversi modelli



implementati, che hanno considerato condizioni ambientali differenti (come la presenza di cemento asciutto o bagnato) e varie configurazioni di collegamento tra i conduttori, hanno permesso di valutare come le proprietà fisiche influenzino le grandezze elettriche critiche come il gradiente di potenziale, la densità di corrente e la corrente assorbita.

I risultati ottenuti mostrano chiaramente come la conducibilità del terreno, ma allo stesso tempo, anche dei materiali come il cemento e la sua condizione fisica, influisca notevolmente sulle dinamiche di distribuzione della corrente. In particolare, l'acciaio risulta più vulnerabile alle correnti vaganti quando è interrato o inglobato nel cemento, senza la presenza del rame, con un aumento significativo della densità di corrente, caduta di tensione e corrente assorbita. La presenza del rame crea vie preferenziali per la corrente, influenzando sia il gradiente di potenziale e caduta di tensione sia la corrente assorbita dai due conduttori.

In conclusione, la ricerca ha dimostrato che l'accoppiamento tra rame e acciaio, così come l'aggiunta di collegamenti diretti tra i ferri di armatura e il rame, rappresentano una soluzione efficace per ridurre il rischio di corrosione nei ferri di armatura soggetti a correnti vaganti. L'analisi di questi modelli permette di evidenziare l'importanza di considerare attentamente le condizioni fisiche e le proprietà dei materiali coinvolti nella progettazione e protezione delle infrastrutture interrato. Inoltre, i risultati sottolineano la necessità di strategie di protezione mirate, come l'uso di protezioni catodiche o l'isolamento dei collegamenti, per mitigare i rischi di corrosione indotta da correnti vaganti.

Un ulteriore sviluppo di questa ricerca potrebbe essere l'integrazione del modulo Electrochemistry con il modulo AC/DC, già utilizzato per le simulazioni. Questo approccio consentirebbe un'analisi più approfondita dei fenomeni elettrochimici legati alla corrosione, permettendo di modellare con maggiore precisione i processi di trasferimento di carica e di valutare l'efficacia delle strategie di protezione. Tale integrazione rappresenterebbe un passo avanti significativo verso una comprensione più completa delle dinamiche della corrosione in presenza di correnti vaganti e contribuirebbe ulteriormente al miglioramento della sicurezza e della durabilità delle infrastrutture metalliche.

# Appendice A

## Tabelle Risultati

Legenda dei casi:

- C1: l'interazione tra terreno e conduttore in rame senza il conduttore in acciaio;
- C2: l'interazione tra terreno e conduttore in acciaio senza il conduttore in rame;
- C3: l'interazione combinata tra il terreno, il conduttore in rame e in acciaio.
- C4: Conduttore in acciaio come singolo metallo interrato immerso nel cemento asciutto, senza il conduttore in rame;
- C5: Conduttore in acciaio come singolo metallo interrato immerso nel cemento bagnato, senza il conduttore in rame;
- C6: Platea di fondazione con cemento asciutto più acciaio con il conduttore in rame, senza il collegamento tra i conduttori;
- C7: Platea di fondazione con cemento bagnato più acciaio e conduttore in rame, senza il collegamento tra i conduttori;
- C8: Platea di fondazione con cemento asciutto con il conduttore in acciaio e rame collegati;
- C9: Platea di fondazione con cemento bagnato con il conduttore in acciaio e rame collegati.

**Tabella A.1:** Confronto del gradiente di potenziale [V/m] intorno al conduttore di rame tra vari casi (C1, C3, C6, C7, C8, C9).

Pos.	C1	C3	C6	C7	C8	C9
97	13.05	12.24	12.63	12.37	12.74	12.03
97.001	12.29	11.36	11.89	11.4	11.73	10.9
97.01	6.947	6.419	6.765	6.219	6.804	6.246
97.1	4.256	3.865	4.084	3.716	4.092	3.726
97.2	3.661	3.314	3.569	3.222	1.05e-6	4.33e-6
97.5	2.918	2.576	2.807	2.495	2.809	2.492
98	2.153	1.871	2.06	1.781	2.049	1.774
100	9.18e-3	2.71e-3	1.29e-3	6.86e-3	2.52e-3	1.72e-3
102	2.163	1.873	2.055	1.781	2.072	1.784
102.5	2.931	2.597	2.806	2.499	2.807	2.483
102.8	3.675	3.337	3.543	3.211	1.10e-6	4.17e-6
102.9	4.216	3.863	4.107	3.737	4.11	3.733
102.99	7.061	6.445	6.826	6.268	6.844	6.217
102.999	12.29	10.35	11.97	11.09	11.75	11.08
103	13.01	11.799	12.84	12.01	12.05	11.95

**Tabella A.2:** Confronto della densità di corrente superficiale [mA/m<sup>2</sup>] sul conduttore di rame tra vari casi (C1, C3, C6, C7, C8, C9).

Pos.	C1	C3	C6	C7	C8	C9
97	222.6	198.2	209.6	192.7	216.6	193.2
97.001	187.7	162.7	174.1	156	181.4	157.9
97.01	69.41	64.05	67.4	61.92	67.61	62.26
97.1	42.35	38.65	40.99	37.12	40.96	37.38
97.2	36.72	33.26	35.26	31.99	210.4	865.6
97.5	29.01	25.6	28.01	24.77	28.06	24.86
98	21.56	18.61	20.41	17.85	20.42	17.94
100	0.0492	0.0293	0.182	0.107	0.193	0.0877
102	21.61	18.59	20.57	17.68	20.58	17.77
102.5	29.2	25.95	27.9	25.02	28.01	25.54
102.8	36.64	33.33	35.33	31.87	35.33	832
102.9	42.27	38.41	40.84	37.27	41.18	37.45
102.99	69.9	64.1	68.09	62.76	68.1	62.86
102.999	182.7	179.2	173.3	150.1	189.4	151.6
103	220.1	198.4	213.3	196.5	214.5	196.8

**Tabella A.3:** Confronto della corrente totale [mA] che circola in diverse sezioni trasversali del conduttore di rame, nei vari casi (C1, C3, C6, C7, C8, C9).

Posizione	C1	C3	C6	C7	C8	C9
97	0.1112	0.1029	0.1079	0.09996	0.1082	0.1002
97.2	1.285	1.186	1.252	1.153	1.349	1.692
98	4.069	3.689	3.939	3.57	4.073	4.111
99	6.039	5.402	5.816	5.204	5.948	5.744
100	6.672	5.942	6.413	5.717	6.547	6.258
101	6.038	5.401	5.811	5.201	5.947	5.744
102	4.066	3.688	3.935	3.565	4.073	4.109
102.8	1.284	1.186	1.252	1.152	1.348	1.691
103	0.1115	0.1037	0.1091	0.1001	0.1096	0.1004

**Tabella A.4:** Confronto del gradiente di potenziale [V/m] intorno al contorno del conduttore in acciaio per vari casi (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9).

Pos.	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
97	12.43	11.68	9.644	17.47	15.73	8.882	13.89	8.333
97.001	11.54	10.47	8.868	16.2	14.68	8.225	13.21	7.506
97.01	6.544	5.976	5.027	9.311	8.406	4.63	8.384	4.611
97.1	3.967	3.591	2.866	6.049	5.426	2.619	5.425	2.642
97.2	3.427	3.09	2.381	5.591	4.978	2.159	1.15e-6	4.83e-6
97.5	2.706	2.354	1.733	4.805	4.188	1.534	4.174	1.541
98	1.933	1.655	1.21	3.724	3.153	1.031	3.128	1.027
100	6.42e-3	2.32e-3	2.63e-4	8.73e-4	5.72e-4	3.88e-4	3.61e-4	2.61e-4
102	1.944	1.663	1.203	3.706	3.138	1.035	3.136	1.034
102.5	2.667	2.368	1.741	4.829	4.199	1.542	4.171	1.532
102.8	3.675	3.079	2.381	5.603	4.984	2.163	1.21e-6	4.67e-6
102.9	3.982	3.611	2.878	6.094	5.442	2.636	5.441	2.631
102.99	6.575	6.002	5.073	9.395	8.484	4.678	8.411	4.701
102.999	11.19	10.34	8.619	15.66	14.19	8.085	13.62	7.956
103	12.01	11.24	9.278	16.94	15.56	8.649	14.25	8.311

**Tabella A.5:** Confronto della densità di corrente superficiale [mA/m<sup>2</sup>] sul conduttore in acciaio tra vari casi (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9).

Pos.	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
97	199.8	179.9	277.3	52.42	47.91	278.8	46.27	259.5
97.001	166.1	151.7	249.4	43.62	40.92	234.1	40.84	229.9
97.01	65.39	59.77	100.17	19.68	16.73	92.4	16.71	91.94
97.1	39.43	35.55	57.09	13.09	10.87	52.57	10.86	52.58
97.2	34.13	30.74	47.13	12.19	9.948	43.11	210.6	835.2
97.5	26.94	23.54	34.6	10.57	8.319	30.56	8.297	30.69
98	19.15	16.5	24.08	8.362	6.289	20.52	6.252	20.51
100	0.00366	0.00866	0.0292	0.0366	0.0289	0.102	0.0126	0.0426
102	19.42	16.42	24.12	8.374	6.281	20.48	6.251	20.69
102.5	26.48	23.23	34.04	10.67	8.356	30.63	8.336	30.45
102.8	34.14	30.81	47.49	12.16	9.925	43.21	220.1	787.3
102.9	39.57	35.71	57.33	13.11	10.87	52.73	10.91	92.12
102.99	65.25	60.41	100.93	19.68	16.85	92.76	16.75	16.75
102.999	166.6	149.8	250.5	43.38	41.12	237.3	41.53	222.8
103	198.7	174.63	280.9	52.68	48.04	274.9	47.52	249.4

**Tabella A.6:** Confronto della corrente totale [mA] che circola in diverse sezioni trasversali dell'acciaio, nei vari casi (C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9).

Pos.	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
97	0.1033	0.09598	0.1599	0.0289	0.02628	0.148	0.02641	0.1488
97.2	1.19	1.088	1.75	0.3605	0.3254	1.61	0.3144	1.575
98	3.674	3.289	4.939	1.267	1.12	4.45	0.9808	3.9
99	5.362	4.718	6.991	1.945	1.69	6.189	1.55	5.637
100	5.898	5.159	7.635	2.167	1.872	6.72	1.732	6.168
101	5.362	4.718	6.991	1.944	1.69	6.189	1.55	5.638
102	3.674	3.29	4.939	1.266	1.12	4.45	0.9809	3.901
102.8	1.19	1.088	1.75	0.3606	0.3254	1.61	0.3143	1.574
103	0.1039	0.09538	0.1605	0.02901	0.02638	0.1486	0.02619	0.1476

# Bibliografia

- [1] EN 50122-2:2022-09. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie e metropolitane - Impianti fissi - Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno Parte 2: Misure contro gli effetti delle correnti vaganti causate da sistemi di trazione a corrente continua* (cit. alle pp. 2, 34, 41–45).
- [2] BS EN 50123-2:2003. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua* (cit. alle pp. 2, 41).
- [3] EN 50162:2004-08. *Protezione contro la corrosione da correnti vaganti causate dai sistemi elettrici a corrente continua* (cit. alle pp. 3, 66, 154).
- [4] BS EN 13509:2003. *Protezione contro la corrosione da correnti vaganti causate dai sistemi elettrici a corrente continua* (cit. alle pp. 3, 66).
- [5] BS EN ISO 15589-1:2017. *Industrie petrolifere, petrolchimiche e del gas naturale – Protezione catodica dei sistemi di tubazioni* (cit. alle pp. 3, 66).
- [6] Zhi-guang Chen, Chao-kui Qin, Yang-jun Zhang e Xian-chao Yang. «Application of a stray current monitoring system base upon virtual instrument». In: *2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics*. IEEE. 2010, pp. 341–344 (cit. alle pp. 5, 15, 16, 22, 37, 39, 55).
- [7] Orville W Zastrow. «Underground corrosion and electrical grounding». In: *IEEE Transactions on Industry and General Applications* 3 (1967), pp. 237–243 (cit. a p. 5).
- [8] Pierre R Roberge e P Eng. *Corrosion engineering*. McGraw-Hill New York, NY, USA: 2008 (cit. alle pp. 6, 8, 35, 62).
- [9] Tony JA Richardson. *Shreir's corrosion*. Elsevier, 2009 (cit. alle pp. 6, 8).
- [10] Zhou Mi, Wang Jianguo, Liu Yang, Xiang Nianwen, Sun Zhen, Chen Junjie e Fang Chunhua. «Causes, forms and remedies of substation grounding grid corrosion». In: *2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application*. IEEE. 2008, pp. 186–189 (cit. alle pp. 6, 25, 30, 32).
- [11] Mauro Cavallini, V Di Cocco, F Iacoviello et al. *Materiali metallici*. CEF, 2014 (cit. a p. 6).

- [12] Mattia Golo. «Corrosione galvanica: cause, effetti e protezione». In: () (cit. alle pp. 8, 62, 63).
- [13] Gian Carlo Agnoli. «Reazioni d'ossidazione». In: *Reazioni d'ossidazione* (2009), pp. 1000–1019 (cit. a p. 9).
- [14] Gianfranco Dioguardi. *La scienza come invenzione: Alessandro Volta*. Sellerio, 2000 (cit. a p. 9).
- [15] Sundar Rajan e Srinivasa I Venugopalan. «Corrosion and grounding systems». In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 4 (1977), pp. 297–306 (cit. alle pp. 10, 12, 13, 21, 23, 24).
- [16] Branko N Popov. *Corrosion engineering: principles and solved problems*. Elsevier, 2015 (cit. alle pp. 13, 65–68).
- [17] Fabrizio Marignetti. *La trazione ferroviaria. I sistemi a guida vincolata*. Società Editrice Esculapio, 2019 (cit. alle pp. 14, 37, 38, 47, 60).
- [18] Ascend Performance Materials Operations LLC. *FlexaTram™-BHM Formulated Amines*. Brochure. Rev. 11/2017. 1010 Travis Street, Suite 900, Houston, TX 77002, United States, nov. 2017 (cit. a p. 14).
- [19] Michal Regula, Marek Siranec, Alena Otcenasova e Marek Hoger. «Possibilities of the stray current measurement and corrosive risk evaluation». In: *Electrical Engineering* 104.4 (2022), pp. 2497–2513 (cit. alle pp. 14, 39, 55–57, 61, 96).
- [20] W Brian Holtsbaum. *Cathodic protection survey procedures*. NACE International, 2009 (cit. alle pp. 14, 24).
- [21] Zhipei Chen, Dessi Koleva e Klaas van Breugel. «A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure». In: *Corrosion Reviews* 35.6 (2017), pp. 397–423 (cit. alle pp. 14, 33, 44, 64–67).
- [22] J Goodman Yu e CJ Goodman. «Stray current design parameters for DC railways». In: *Proceedings of the ASME/IEEE Spring Joint Railroad Conference*. IEEE. 1992, pp. 19–28 (cit. alle pp. 16, 46).
- [23] MARCO SILVIO PARENTI. «Effetto della corrente alternata sull'innescamento e sulla propagazione della corrosione dei materiali a comportamento attivo-passivo». In: (2009) (cit. alle pp. 17, 19, 20).
- [24] Pietro Pedferri e Marco Ormellese. *Corrosion science and engineering*. Vol. 720. Springer, 2018 (cit. alle pp. 17, 18).
- [25] Kangkang Tang. «Stray alternating current (AC) induced corrosion of steel fibre reinforced concrete». In: *Corrosion Science* 152 (2019), pp. 153–171 (cit. a p. 19).

- [26] Georgios C Christoforidis, Dimitris P Labridis e Petros S Dokopoulos. «Inductive interference on pipelines buried in multilayer soil due to magnetic fields from nearby faulted power lines». In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 47.2 (2005), pp. 254–262 (cit. a p. 19).
- [27] «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding». In: *IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)* (2015), pp. 1–226. DOI: 10.1109/IEEESTD.2015.7109078 (cit. alle pp. 21, 73, 95, 96, 108).
- [28] Erling Ditlef Sunde. «Earth conduction effects in transmission systems». In: (*No Title*) (1949) (cit. a p. 21).
- [29] Hailiang Lu, Yuanjie Li, Zhizhong Li, Wei Li, Huiwu Wang, Chao Bian, Bo Tan e Xishan Wen. «Method for Calculating the Galvanic Corrosion Rate of Copper-steel Connected Ground Grids». In: *IEEE Transactions on Power Delivery* (2023) (cit. alle pp. 26, 27, 29).
- [30] Robert Heidersbach. *Metallurgy and corrosion control in oil and gas production*. John Wiley & Sons, 2018 (cit. alle pp. 28, 67).
- [31] Cheng Zhang, Yuxiang Liao, Xue Gao, Jing Zhao, Yuan Yuan e Ruijin Liao. «Research advances of soil corrosion of grounding grids». In: *Micromachines* 12.5 (2021), p. 513 (cit. a p. 30).
- [32] K Zakowski e K Darowicki. «Methods of evaluation of the corrosion hazard caused by stray currents to metal structures containing aggressive media». In: *Polish Journal of Environmental Studies* 9.4 (2000), pp. 237–242 (cit. alle pp. 30, 57).
- [33] Norberto Piccinini, Riccardo Tommasini e Enrico Pons. «Large NG explosion and fire involving several buried utility networks». In: *Process Safety and Environmental Protection* 87.2 (2009), pp. 73–80 (cit. a p. 35).
- [34] Chengtao Wang, Wei Li, Yuqiao Wang, Shaoyi Xu e Mengbao Fan. «Stray current distributing model in the subway system: A review and outlook». In: *International Journal of Electrochemical Science* 13.2 (2018), pp. 1700–1727 (cit. alle pp. 36, 39–41, 44, 46–49).
- [35] Zhichao Cai, Xianwei Zhang e Hao Cheng. «Evaluation of DC-subway stray current corrosion with integrated multi-physical modeling and electrochemical analysis». In: *IEEE Access* 7 (2019), pp. 168404–168411 (cit. a p. 37).
- [36] Jan Szymenderski, Wojciech Machczyński e Krzysztof Budnik. «Modeling effects of stochastic stray currents from DC traction on corrosion hazard of buried pipelines». In: *Energies* 12.23 (2019), p. 4570 (cit. a p. 39).
- [37] E. Pons R. Rizzoli. *2.6 Aspetti di sicurezza*. Slide presentate al corso "Impianti elettrici e sicurezza", Politecnico di Torino, Luogo. 2023. 2023 (cit. a p. 42).



- [38] Katarina Vranešić, Sahil Bhagat, Andrea Mariscotti e Robert Vail. «Measures and Prescriptions to Reduce Stray Current in the Design of New Track Corridors». In: *Energies* 16.17 (2023), p. 6252 (cit. alle pp. 42, 44, 46, 50, 51, 53).
- [39] Wei Li. «Stray current corrosion monitoring and protection technology in DC mass transit systems». In: *Xuzhou: China Univ Mining & Technol Press, Xuzhou* (2004), p. 26 (cit. a p. 46).
- [40] S Case. «So what's the problem?» In: *IEE Seminar on IET* (1999) (cit. a p. 46).
- [41] RJ Hill, S Brillante e PJ Leonard. «Modelling Electromagnetic Fields In DC Traction Systems Using Three-dimensional Finite-element Analysis». In: *WIT Transactions on The Built Environment* 21 (1970) (cit. a p. 47).
- [42] Wei Liu, Linjie Zhou, Zhe Pan, Ashfaque Ahmed Bhatti, Xiaopeng Huang e Jian Zhang. «Dynamic diffusion model of stray current in DC traction power supply system». In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 38.3 (2023), pp. 2170–2182 (cit. a p. 47).
- [43] HWM Smulders e MFP Janssen. «Modeling dc stray currents using a multi-layer model». In: *World Conference on Railway Research*. 2006, pp. 4–8 (cit. a p. 47).
- [44] S Jabbehdari e A Mariscotti. «Distribution of stray current based on 3-Dimensional earth model». In: *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*. IEEE. 2015, pp. 1–6 (cit. a p. 47).
- [45] Kinh D Pham, Ralph S Thomas e Walter E Stinger. «Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system». In: *Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint Railroad Conference (Cat. No. 01CH37235)*. IEEE. 2001, pp. 141–160 (cit. a p. 48).
- [46] Kinh D Pham, Ralph S Thomas e Walter E Stinger. «Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system». In: *Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint Railroad Conference (Cat. No. 01CH37235)*. IEEE. 2001, pp. 141–160 (cit. a p. 49).
- [47] Andrea Mariscotti. «Stray current protection and monitoring systems: Characteristic quantities, assessment of performance and verification». In: *Sensors* 20.22 (2020), p. 6610 (cit. alle pp. 50, 52–54).

- [48] Ian Cotton, Charalambos Charalambous, Pete Aylott e Petra Ernst. «Stray current control in DC mass transit systems». In: *IEEE Transactions on vehicular technology* 54.2 (2005), pp. 722–730 (cit. alle pp. 50, 54).
- [49] Fabio Banfi. «Sicurezza elettrica negli impianti elettro-ferroviari in corrente continua». In: (2016) (cit. a p. 56).
- [50] Mu Longhua et al. «A novel on-line monitoring device of stray current in DC rail transit systems». In: *2006 International Conference on Power System Technology*. IEEE. 2006, pp. 1–4 (cit. a p. 58).
- [51] R Winston Revie. *Oil and gas pipelines: Integrity and safety handbook*. John Wiley & Sons, 2015 (cit. a p. 62).
- [52] B Mazza. «Protezione attiva dalla corrosione». In: () (cit. a p. 63).
- [53] R Winston Revie. *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons, 2008 (cit. a p. 65).
- [54] M Büchler, D Joos e HG Schöneich. «Assessing the risk of stray current induced corrosion: Protection criteria developed based on the present understanding of the involved processes». In: *CEOCOR international Congress*. 2018 (cit. a p. 66).
- [55] Volkan Cicek. *Corrosion engineering and cathodic protection handbook: with extensive question and answer section*. John Wiley & Sons, 2017 (cit. alle pp. 66, 67).
- [56] Hayder Majeed Oleiwi. *Using cathodic protection to control corrosion of reinforced concrete structures*. University of Salford (United Kingdom), 2018 (cit. a p. 67).
- [57] FreeFem. *software di simulazione*. <https://freefem.org/>. 2024 (cit. a p. 69).
- [58] Biodeg. *software di simulazione*. <http://www.biomech.ulg.ac.be/biodeg/>. 2024 (cit. a p. 69).
- [59] CDEGS. *software di simulazione*. <https://www.sestech.com/Product/Package/CDEGS>. 2024 (cit. a p. 69).
- [60] Ansys. *software di simulazione*. <https://www.ansys.com/it-it>. 2024 (cit. a p. 70).
- [61] COMSOL MULTIPHYSICS. *6.2*. <https://www.comsol.it/>. 2024 (cit. a p. 70).
- [62] Jinliang He, Rong Zeng, Yanqing Gao, Youping Tu, Weimin Sun, Jun Zou e Zhicheng Guan. «Seasonal influences on safety of substation grounding system». In: *IEEE transactions on power delivery* 18.3 (2003), pp. 788–795 (cit. a p. 72).

- [63] Andrew Ackerman, PK Sen e Clifton Oertli. «Designing safe and reliable grounding in AC substations with poor soil resistivity: An interpretation of IEEE Std. 80». In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 49.4 (2013), pp. 1883–1889 (cit. a p. 72).
- [64] S Feliu, C Andrade, JA González e C Alonso. «A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete». In: *Materials and structures* 29 (1996), pp. 362–365 (cit. a p. 72).
- [65] Ljubivoje M Popovic. *Practical methods for analysis and design of HV installation grounding systems*. Academic Press, 2018 (cit. a p. 107).
- [66] Marie Antoinette Alhaji, Sérgio Palma-Lopes e Géraldine Villain. «Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey». In: *Construction and Building Materials* 223 (2019), pp. 898–909 (cit. a p. 107).
- [67] Fabio Freschi, Massimo Mitolo e Riccardo Tommasini. «Electrical model of building structures under ground-fault conditions. Part I». In: *2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*. IEEE. 2015, pp. 1–8 (cit. a p. 107).