

POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Schermatura e valutazione di campi elettromagnetici di
condutture elettriche

Candidato:

Erik Bono

Relatore:

Prof. Aldo Canova

Indice

Sommario

Indice.....	4
Elenco immagini.....	5
Elenco tabelle.....	6
Elenco costanti fisiche e simboli usati	7
Introduzione.....	8
1.1 Introduzione ai campi elettrici e magnetici	8
1.2 Interazione tra campi e oggetti	9
1.3 Effetti dei campi elettrici e magnetici sul corpo umano	10
1.4 Regolamentazione	11
1.5 Cenni sulla schermatura in bassa frequenza	13
Misura delle grandezze del sistema	14
2.1 Elenco del materiale utilizzato	14
2.2 Installazione dell'area di misura	15
2.3 Sistemi di riferimento e misure geometriche dell'installazione	18
2.4 Esecuzione delle misure	19
2.5 Raccolta dati ed elaborazione	25
Canale non schermato	26
Canale schermato SENDZIMIR-zincatura a caldo	33
Canale schermato a vecchia geometria	40
Confronto canali schermanti	47
Simulazione	52
4.1 Analisi dei condotti mediante elaborazione FEMM	52
4.2 Confronto dei risultati ottenuti risultati	59
Canale non schermato	59
Canale SENDZIMIR	60
Canale zincatura a caldo	60
Canale a vecchia geometria.....	61
4.3 Valutazione del fattore di schermatura	63
Conclusioni	66

Elenco immagini

Figura 1 La propagazione è imposta dalla reciproca posizione dei due campi.	9
Figura 2 L'effetto dei campi è di generare correnti indotte in base alla direzione e al tipo di campo.	10
Figura 3 Andamento della temperatura corporea per diversi tipi di tessuti.....	11
Figura 4 Struttura della sorgente per l'emissione di campo magnetico: sono state realizzate sul terreno delle linee di riferimento per il posizionamento della sonda nelle successive misure effettuate.	16
Figura 5 Sorgente di campo magnetico inglobata nel canale schermante. Si può notare il collegamento ai terminali dei conduttori che li pone in condizione di corto circuito. Si nota inoltre che il canale termina in corrispondenza del giunti in corto circuito e no.....	16
Figura 6 Collegamento tra i due canali schermanti.....	17
Figura 7 Da sinistra a destra: Dimensioni geometriche dell'installazione. 1)Sistemi di riferimento di Destra e Sinistra. 2) Sistema di riferimento Superiore. 3) Sistema di riferimento Inferiore.....	18
Figura 8 Posizionamento sonda all'interfaccia dei giunti alla prima impostazione delle misure del canale.	21
Figura 9 Particolare del posizionamento della sonda durante la misurazione delle grandezze sulla superficie superiore mediante supporto ausiliario sagomato.	21
Figura 10 Posizionamento della sonda in corrispondenza del canale a 0.5 m dalla superficie. Particolare in riferimento alla sezione di giunto.	22
Figura 11 Esempio di posizionamento sulle diverse altezze dei cavalletti ausiliari al fine delle misure sulla superficie inferiore del canale.....	22
Figura 12 Dettaglio sul posizionamento della sonda per misurazione sul fondo del canale	23
Figura 13 differenza del modulo dell'induzione a seconda del posizionamento della sonda.	23
Figura 14 differenza del modulo dell'induzione a seconda del posizionamento della sonda.	24

Elenco tabelle

Tabella 1 Canale non schermato, lato destro.....	26
Tabella 2 Canale non schermato, lato sinistro	27
Tabella 3 Canale non schermato, lato inferiore	28
Tabella 4 Canale non schermato, lato superiore.....	29
Tabella 5 Canale DENDZIMIR-termico, lato destro	33
Tabella 6 Canale SENDZIMIR-termico, lato sinistro.....	34
Tabella 7 Canale SENDZIMIR-termico, lato inferiore	35
Tabella 8 Canale SENDZIMIR-termico, lato superiore	36
Tabella 9 Valori di corrente misure lato destro.....	37
Tabella 10 Valori di corrente, misure lato sinistro	37
Tabella 11 Valori di corrente, misure lato inferiore	37
Tabella 12 Valori di corrente, misure lato superiore	37
Tabella 13 Canale a vecchia geometria, lato destro.....	40
Tabella 14 Canale a vecchia geometria, lato sinistro	41
Tabella 15 Canale a vecchia geometria, lato inferiore	42
Tabella 16 Canale a vecchia geometria, lato superiore	43
Tabella 17 Canale non schermato: confronto simulazione e misura	59
Tabella 18 Canale SENDZIMIR: confronto simulazione e misura	60
Tabella 19 Canale zincatura termica: confronto simulazione e misura	60
Tabella 20 Canale a vecchia geometria: confronto simulazione e misura	61
Tabella 21 Fattore di schermatura per canale SENDZIMIR	63
Tabella 22 Fattore di schermatura per canale con zincatura termica	64
Tabella 23 Fattore di schermatura per canale a vecchia geometria	64

Elenco costanti fisiche e simboli usati

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] Permeabilità magnetica del vuoto

$\epsilon_0 = 8,8541 \cdot 10^{-12}$ [F/m] Costante dielettrica del vuoto

B_x	Componente dell'induzione magnetica lungo l'asse X [μT]
B_y	Componente dell'induzione magnetica lungo l'asse Y [μT]
B_z	Componente dell'induzione magnetica lungo l'asse Z [μT]
B_{eff}	Modulo dell'induzione magnetica [μT]
B_{500}	Induzione magnetica alla corrente di riferimento [μT]
FS	Fattore di Schermatura
H	Campo magnetico [A/m]
I_{rms}	Corrente efficace [A]
μ_r	Permeabilità magnetica relativa
σ	Conducibilità elettrica [MS/m]
J	Densità di corrente [A/m ²]
S	Densità di potenza [W/m ²]
SA	Assorbimento specifico di energia [J/Kg]
SAR	Tasso di assorbimento specifico di energia [W/Kg]

Capitolo 1

Introduzione

L'obiettivo della tesi consiste nel confrontare le proprietà schermanti di alcuni canali per il trasporto di conduttori industriali, i quali saranno costruiti con diverse combinazioni di materiale ferromagnetico e materiale ad alta conducibilità elettrica. Mediante la misura dei valori di induzione emessi dalla sorgente di campo a differenti distanze dal canale verrà valutato l'andamento dei valori di campo nello spazio circostante il canale.

Successivamente si elaborerà anche una simulazione mediante FEMM per la rappresentazione dei risultati ottenuti tramite un tool utilizzabile anche sul programma di calcolo MATLAB, OctaveFEMM. Si sceglie di appoggiarsi a questo tool per permettere la simulazione FEMM in modo parametrico di alcune grandezze caratteristiche dei materiali usati per la schermatura del canale.

Saranno infine calcolati i fattori di schermatura delle diverse tipologie costruttive analizzate e messe a disposizione dalla ditta BeShielding, utilizzando sia i dati ricavati dalla misurazione, infine si procederà al confronto dei valori del fattore di schermatura ottenuto dai dati della simulazione.

1.1 Introduzione ai campi elettrici e magnetici

Le cariche elettriche presenti in una determinata regione di spazio tridimensionale vanno ad interagire con altre cariche andando a generare delle forze di attrazione o repulsione, siano esse in moto o in quiete. Definiamo campo elettrico la relazione che riesce a descrivere il valore dell'interazione tra cariche in funzione delle coordinate relative dello spazio considerato.

Per quanto riguarda il campo magnetico le particelle che vanno ad interagire nel campo sono i dipoli magnetici, i quali subiscono l'effetto di coppie di forze e di conseguenza una rotazione, mentre la generazione di campo è dovuta a dipoli magnetici oppure a correnti elettriche. Se la corrente responsabile della generazione del campo ha dipendenza temporale, allora anche quest'ultimo seguirà tale dipendenza (es. corrente periodica). Associata alla frequenza della sorgente è presente l'irradiazione della sorgente del campo correlata alla lunghezza d'onda secondo la relazione

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

dove v rappresenta la velocità dell'onda e f rappresenta la frequenza.

1.2 Interazione tra campi e oggetti

Per la natura dei campi bisogna considerare gli effetti di interazione con elementi dello spazio circostante a seconda che gli oggetti in questione abbiano un comportamento da cariche o da dipoli. Ipotizzando la presenza di un elemento interagente con una delle due tipologie di campi c'è la possibilità che l'interazione tra elemento e campo generi disturbi sotto forma di correnti o tensioni, le quali vanno ad interferire con l'oggetto in questione. Anche il corpo umano rientra in questo ambito, in quanto permeato da cariche libere che regolano le naturali funzioni fisiologiche.

Nel caso in cui la lunghezza d'onda del campo sia dello stesso ordine di grandezza con un oggetto, la componente elettrica e la componente magnetica non possono essere considerate singolarmente e non interagenti tra loro. In questo caso bisogna definire il campo elettromagnetico, con componenti di campo elettrico e magnetico tra loro ortogonali. Se la sorgente di campo si trova ad una distanza sufficientemente remota rispetto all'oggetto, si può ipotizzare il modello dell'onda piana.

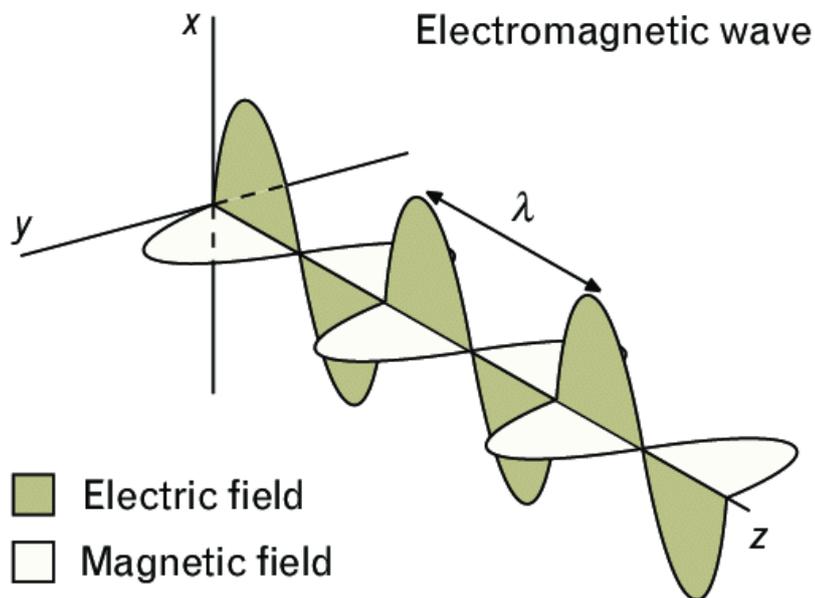


Figura 1 La propagazione è imposta dalla reciproca posizione dei due campi.

1.3 Effetti dei campi elettrici e magnetici sul corpo umano

È necessario distinguere due tipologie di esposizione a seconda della frequenza: per un valore inferiore a 100kHz (in riferimento al valore di soglia fissato dal DM 10/9/98) si può parlare di esposizione a basse frequenze, mentre per valori superiori si rientra nel campo delle alte frequenze. La differenza sostanziale riguarda il disaccoppiamento tra campo magnetico ed elettrico. A irradiazione per campi a basse frequenze gli effetti nel corpo umano dipendono dal valore dell'intensità del campo e possono essere rischiosi per la salute se i fenomeni indotti diventano di ordini di grandezza tali da essere confrontabili con gli stimoli nervosi necessari al funzionamento biologico normale.

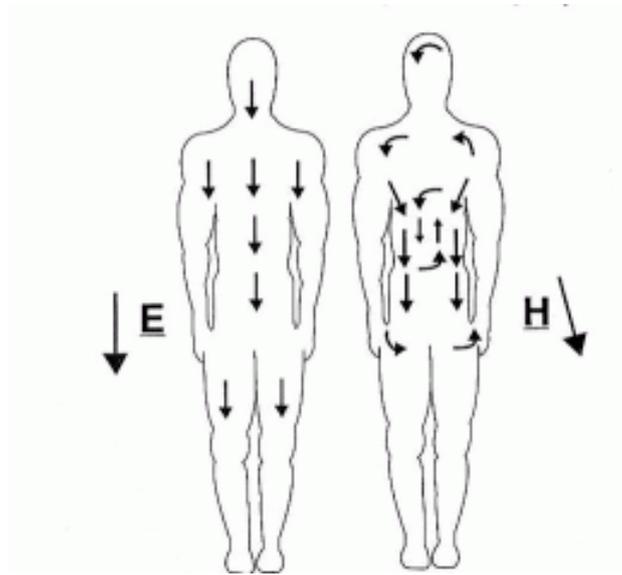


Figura 2 L'effetto dei campi è di generare correnti indotte in base alla direzione e al tipo di campo.

I campi ad alte frequenze hanno l'effetto di generare un riscaldamento del corpo, a causa dell'oscillazione delle molecole d'acqua, di conseguenza l'effetto dannoso per la salute è il riscaldamento di organi non vascolarizzati del corpo a temperature troppo elevate. Il fenomeno si presenta in zone del corpo come il cristallino o le gonadi, dal momento in cui queste ultime sono incapaci di effettuare una termo regolazione naturale tramite vasodilatazione.

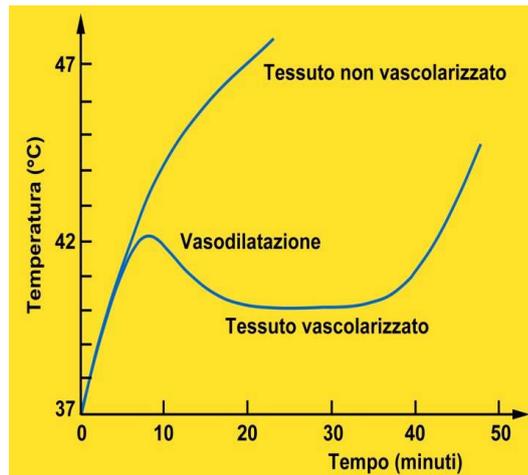


Figura 3 Andamento della temperatura corporea per diversi tipi di tessuti

1.4 Regolamentazione

Per quantificare le correnti indotte circolanti in un corpo in modo non invasivo sono prese in considerazione alcune grandezze dosimetriche, necessarie per esprimere dei limiti di esposizione a queste tipologie di fenomeni, in funzione di grandezze ausiliarie correlate.

- “Densità di corrente J : è un rapporto che indica quanta corrente attraversa una superficie posta perpendicolarmente alla direzione della direzione del flusso di elettroni. Superato il valore di 100mA/m^2 sono accertati effetti sul corpo umano.”¹
- “Densità di potenza superficiale S : è un rapporto che indica quanta potenza irradiata incide perpendicolarmente su una superficie.”²
- “Assorbimento specifico SA : indica quanta energia è assorbita da un chilogrammo di massa biologica.”³
- “Tasso di assorbimento SAR : è il valore di energia assorbita da un corpo specifico o parte di esso. La sperimentazione indica come soglia di danno alla salute un innalzamento costante della temperatura di 1°C ”⁴

A determinati valori di queste grandezze sono associati degli effetti detti acuti, osservabili solo quando i valori di campo superano una specifica soglia. Questi parametri vengono fissati a seconda della frequenza di emissione della tipologia di ambiente e sono specificati dalla normativa, la quale tiene conto di eventuali fattori di riduzione (Legge quadro 36/2001-DPCM8/7/2003), in particolare il decreto stabilisce i limiti di “esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione alle esposizioni a campi

elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodi.” L’Articolo 3 stabilisce i limiti di esposizione e i valori di attenzione per elettrodi alla frequenza industriale: il valore efficace di B è limitato a 100 μT e il valore efficace del campo elettrico è limitato a 5kV/m. Le nuove installazioni in ambienti con la presenza di sorgenti preesistenti e con tempi di permanenza oltre le quattro ore devono rispettare il valore e di 3 μT della mediana di 24 ore.

Da questa norma si capisce che al fine di garantire il corretto funzionamento delle apparecchiature elettriche e la salute delle persone che vivono in ambienti nei quali sono presenti sorgenti irradianti, è necessario fissare dei valori massimi di campo elettrico e induzione magnetica, inferiori alle soglie di osservabilità degli effetti acuti, emessi da un determinato dispositivo.

Per esposizioni alle frequenze comprese tra 0 e 100 kHz si fa riferimento alle linee guida ICNIRP 2010, le quali fissano determinati livelli di azione per campo elettrico (E), induzione magnetica (B), intensità del campo magnetico (H) e densità superficiale di potenza (S). L’introduzione di questi livelli di azione permette di valutare parametri misurabili direttamente e il loro rispetto garantisce valori di esposizione soddisfatti dalla normativa, inoltre il superamento di questi parametri non implica automaticamente il superamento dei valori di esposizione, i quali vengono marginati da fattori di riduzione.

Al fine di andare a rendere i valori conformi alle normative vigenti è necessario sviluppare un sistema di schermatura della sorgente.

1.5 Cenni sulla schermatura in bassa frequenza

Valutando gli effetti del corpo umano sottoposto alle due tipologie di campo a bassa frequenza è necessario caratterizzarne il comportamento all'esposizione dei differenti fenomeni studiati. In relazione alla permeabilità magnetica relativa il corpo umano ha lo stesso valore relativo dell'aria. Per quanto riguarda il valore della costante dielettrica il corpo umano riesce fisiologicamente a variare questo valore con l'aumentare della frequenza⁵. Ne consegue che il fenomeno di schermatura dal campo elettrico risulta meno rilevante ai fini della protezione rispetto all'effetto dovuto al campo magnetico.

L'effetto schermante viene effettuato mediante l'applicazione delle leggi di Faraday e sfruttando le caratteristiche fisiche dei materiali, in particolare la permeabilità relativa e l'anisotropia. Mediante l'utilizzo di un materiale ferromagnetico si riescono a convogliare le linee di flusso in zone preferenziali, andando ad abbattere il valore del campo magnetico nello spazio circostante. L'effetto attenuante è sicuramente migliore se la posizione del canale ferromagnetico è parallela alle linee di flusso. A causa di questa semplice considerazione viene automatico sfruttare materiali ad alta permeabilità anisotropi orientati a seconda della geometria prevista.

Utilizzando un materiale ad elevata conducibilità elettrica si generano delle correnti indotte, all'interno del materiale stesso, che circoleranno nella direzione che produrrà delle linee di campo magnetico che tenderanno ad opporsi al campo principale. Analizzando la legge di Faraday, si capisce che l'effetto schermante della zona ad alta conducibilità sarà migliore in prossimità della sorgente, dove le linee di flusso saranno naturalmente più concentrate e subiranno una minore attenuazione dovuta alla distanza.

Allo stato dell'arte per effettuare schermature di campo magnetico in bassa frequenza si prediligono combinazioni di materiali ad alta conducibilità elettrica e ad alta permeabilità magnetica per ottenere due effetti fisicamente differenti che, usati in combinazione, riescono ad ottenere effetti schermanti migliori. Al fine di valutare l'effetto schermante di un materiale si valuta il suo effetto attenuante o fattore di schermatura definito come il rapporto tra il modulo dell'induzione nel punto P precedentemente all'interposizione del mezzo e il valore dell'induzione nello stesso punto dopo l'interposizione del mezzo schermante

$$Sf = \frac{|B_0|}{|B_s|}$$

Capitolo 2

Misura delle grandezze del sistema

2.1 Elenco del materiale utilizzato

Autotrasformatore trifase ITALTEC IT.0551.406D-01E connesso alla rete (400V, 50Hz) tramite il quadro elettrico in grado di generare una terna equilibrata di correnti (Corrente massima in uscita 60A). Sono presenti tre display che indicano il valore di corrente di ciascuna fase della linea principale.

Tre trasformatori monofase elevatori di corrente in grado di moltiplicare il valore delle correnti in uscita dal VARIAC di un fattore 100. Permette all'impianto di funzionare in bassissima tensione ma di produrre correnti significative per il calcolo dell'induzione nel circuito di prova.

Conduttori di sezione 240 mm² e lunghezza 11 m utilizzati come sorgente di campo magnetico. La lunghezza utile al fine della misurazione è di 9 m. Si rimanda al paragrafo inerente alle geometrie per le distanze specifiche di ogni elemento del sistema.

Sonda triassiale prodotta dalla NARDA EHP50 per la misura delle componenti sugli assi x , y , z e del modulo dell'induzione magnetica. La sonda è in grado di rilevare solamente le componenti alternate dell'induzione, con fondo scala impostato a 200 Hz.

Oltre alla sonda si sono utilizzati un palmare NARDA PMM8053B per visualizzare i dati ricevuti, mediante un collegamento in fibra ottica e dei sostegni per posizionare la sonda nelle diverse posizioni interessate.

Canaline multistrato in diverse composizioni: le misure sono effettuate su tre diverse tipologie di canale

- Canale non schermato: canale di sostegno composto da ferro a bassa permeabilità magnetica. Generalmente usato per il supporto di conduttori.
- Canale schermato a grani orientati: di questa tipologia verranno analizzate due tipologie di conduttura, la cui differenza risiederà nello spessore dei materiali schermanti (materiale conduttore e grani orientati) e la tipologia di zincatura chimica. In un primo canale sarà effettuata la zincatura chimica (SENDZIMIR) e nella seconda una zincatura termica.

- Canale a zincatura termica con una differente geometria in corrispondenza della giunzione tra coperchio e fondo, sulla quale sono già state effettuati precedenti prove di valutazione di fattori di schermatura, al fine di avere dati aggiuntivi per l'analisi.

I canali sono prodotti in moduli di lunghezza 3 m, inclusi i bordi di connessione maschio-femmina, e verranno vincolati tra di loro durante le fasi di misura. La geometria di questi elementi non potrà essere rivelata per segreto di produzione.

Pinza amperometrica (modello HT 7019) verrà utilizzata per valutare le correnti di linea in valore efficace che circoleranno nella sorgente di campo magnetico. Si sceglie di misurare la corrente in ingresso al sistema su ogni fase perché a causa degli squilibri dovuti alla posizione reciproca dei conduttori del sistema i valori delle correnti misurate in ogni fase non saranno coincidenti.

Cavalletti e supporti in materiale amagnetico per poter sostenere gli elementi senza introdurre errori influenti nella zona di misura.

Metro a nastro per poter misurare le distanze nella sonda dal canale.

2.2 Installazione dell'area di misura

Le misure delle distanze geometriche sono state effettuate mediante un metro a nastro, così come la suddivisione dei punti di riferimento delle misure nel verso della lunghezza. Durante questa fase sono state misurate le distanze geometriche dei conduttori e il loro posizionamento all'interno della canalina schermata. Per i valori degli spessori del materiale costituente le canaline si è utilizzato un calibro digitale.

Il circuito sorgente di campo elettromagnetico è posizionato su delle strutture di supporto formate da assi in legno vincolate tra di loro in modo meccanico per mezzo di colla e sorrette da cavalletti al fine di ottenere uno spazio di manovra per le misurazioni lungo tutte le posizioni del canale. Nella fase del bloccaggio e del supporto delle diverse componenti del sistema si dovranno utilizzare materiali non ferromagnetici per non influenzare le misurazioni.

I collegamenti tra gli elementi del circuito di alimentazione e del circuito di prova verranno inizialmente effettuati mediante un giunto bloccato meccanicamente, inoltre all'uscita del secondario dei trasformatori monofase si è utilizzato, nelle prime fasi del montaggio un segmento di conduttore lungo 1.50 m. In seguito alle prime misurazioni il collegamento verrà rimosso: l'effetto di tale collegamento supplementare causava in ingresso al sistema uno squilibrio sulle fasi della sorgente di campo. Lo squilibrio è probabilmente causato al sistema da valori di mutuo accoppiamento tra i conduttori. Successivamente a questa rimozione si è scelto di porre i conduttori in uscita dal secondario dei trasformatori in configurazione a trifoglio mediante una fascetta bloccante per cercare di limitare il valore di squilibrio generato dalle componenti di mutua induttanza.

La sorgente di campo è stata inclusa in un canale schermante formato da tre moduli di

lunghezza di 3 m, innesti maschio-femmina inclusi. La lunghezza massima utile al fine della misura sarà di 8.86 m e al fondo della linea la linea verrà cortocircuitata con una piastra conduttrice di dimensioni 20x16x4 millimetri fuoriuscente dalla canalina stessa. Questa configurazione è stata scelta dal momento in cui si considera il giunto come l'ultimo elemento della sorgente incluso nel canale schermante. Per cercare di ridurre al minimo i disturbi generati dalla sorgente di alimentazione verrà schermato il punto di collegamento tra l'autotrasformatore e i conduttori mediante un pannello posizionato in prossimità della giunzione.



Figura 4 Struttura della sorgente per l'emissione di campo magnetico: sono state realizzate sul terreno delle linee di riferimento per il posizionamento della sonda nelle successive misure effettuate.



Figura 5 Sorgente di campo magnetico inglobata nel canale schermante. Si può notare il collegamento ai terminali dei conduttori che li pone in condizione di corto circuito. Si nota inoltre che il canale termina in corrispondenza dei giunti in corto circuito e no

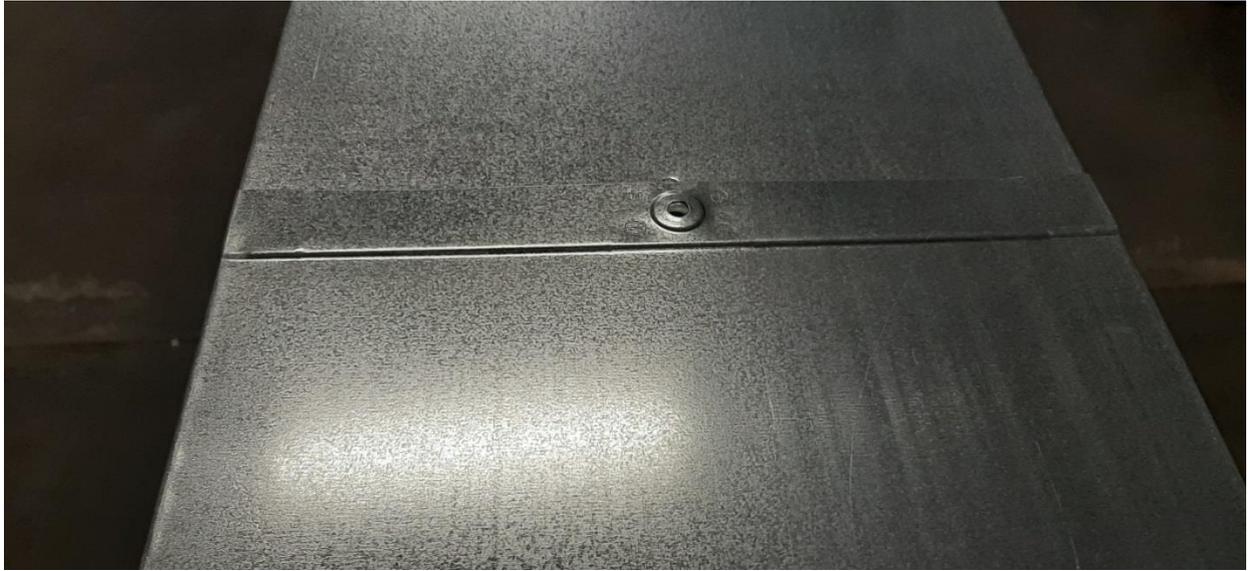


Figura 6 Collegamento tra i due canali schermanti

2.3 Sistemi di riferimento e misure geometriche dell'installazione

Di seguito verrà illustrato uno schema editato con il software AUTOCAD dove verranno identificate le distanze geometriche utilizzate per le misurazioni effettuate.

La posizione dell'origine degli assi di riferimento che verranno utilizzati in ogni misura sarà definita riferendo le distanze alla posizione relativa di questo sistema di riferimento. La posizione del sistema di riferimento del lato superiore è stata adottata secondo l'orientazione in figura per mantenere uno standard delle misurazioni effettuate precedentemente in sede.

Per quanto riguarda il posizionamento dell'origine degli assi e la posizione relativa della sonda, si è riscontrato in fase di misura un marcato aumento del modulo dell'induzione a seconda dell'orientamento della sonda a parità di posizionamento dell'origine di quest'ultima. Il fenomeno che influenza questo evento è da ricercarsi nell'effetto ai bordi. Le correnti indotte circolanti all'interno delle diverse superfici del canale tendono a richiudersi seguendo delle geometrie il più possibilmente circolari, sia sul coperchio, sia sul fondo del canale. La presenza di queste correnti è visibile soprattutto in prossimità delle estremità delle sezioni dell'installazione dove si sono registrati valori del modulo dell'induzione dell'ordine del centinaio di μT .

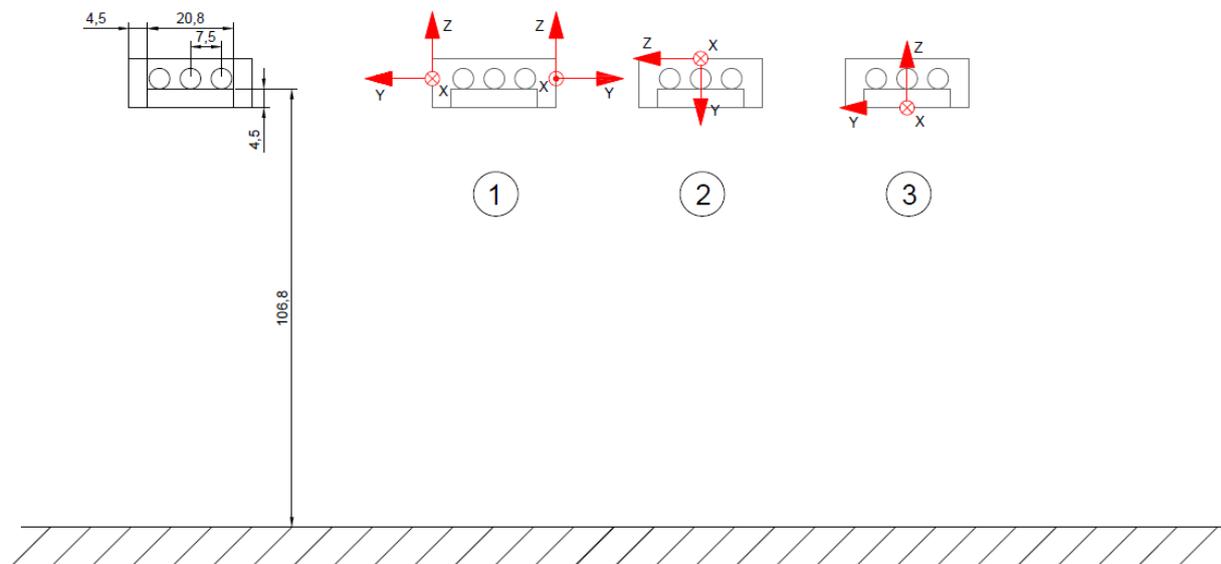


Figura 7 Da sinistra a destra: Dimensioni geometriche dell'installazione. 1) Sistemi di riferimento di Destra e Sinistra. 2) Sistema di riferimento Superiore. 3) Sistema di riferimento Inferiore.

2.4 Esecuzione delle misure

Una volta preparata la zona di lavoro e dopo aver alimentato il canale si è atteso un tempo sufficientemente lungo affinché il sistema si porti a regime termico ond'evitare la variazione delle correnti circolanti nelle fasi durante la misurazione dei valori da esaminare, inoltre le correnti vengono misurate in ognuna delle tre fasi all'inizio di ogni misurazione al fine di poter confrontare i valori di induzione ottenuti con un valore di riferimento normativo fissato a monte mediante un processo di linearizzazione.

Le misure sono effettuate posizionando a due distanze specifiche la sonda lungo tutta la lunghezza assiale del canale, e questa operazione verrà ripetuta ogni lato della schermatura. A partire dall'origine del sistema di riferimento si misureranno nelle due posizioni, la prima a 0.1 m e la seconda a 0.5 m dalla superficie esterna del canale schermante: le misure registreranno i valori delle componenti x,y,z dell'induzione magnetica, le cui componenti saranno identificate secondo il sistema di riferimento utilizzato in base al lato del canale in cui viene posizionata la sonda. La misura verrà reiterata ogni 0.5 m lungo la direzione assiale del canale riproponendo le distanze prefissate dal canale schermante.

Per mantenere la sonda in posizione fissa si utilizzeranno dei supporti di sostegno bloccati all'altezza desiderata durante le fasi della misurazione. È necessario, come già accennato precedentemente, che i supporti utilizzati nell'area di misura siano per quanto più possibile di materiale amagnetico al fine di non andare a introdurre dei disturbi rilevanti nell'area di misurazione. Purtroppo durante le prove di misura quest'ultimo punto non poteva essere totalmente rispettato dal momento in cui i bracci della struttura stessa fossero in acciaio: nonostante ciò si sono prediletti dei posizionamenti che non impattassero in modo rilevante durante la misura.

L'ordine delle misurazioni segue il seguente criterio: prima sono state effettuate tutte le misurazioni ad una specifica distanza dal canale lungo un lato e incrementando la coordinata legata alla direzione. Una volta terminate le distanze lungo l'asse di sviluppo si ripeteva il procedimento per il posizionamento rimanente, valutando nuovamente il valore delle correnti circolanti all'interno dei conduttori.

In fase di rilevamento si è prestata particolare attenzione alla zona del giunto: in questa zona la continuità del materiale del canale è interrotta per ragioni di costruzione. Al fronte di questa discontinuità ne consegue la generazione di una zona non schermata nella quale le linee di flusso tendono ad uscire dalla zona di contenimento creata dal canale schermante. Nonostante si cerchi di mantenere la massima omogeneità magnetica e conduttiva, rispettivamente posizionando i differenti strati di materiale uguale a stretto contatto gli uni con gli altri, nella zona di interfacciamento è impossibile garantire l'omogenea continuità dei mezzi. Conseguentemente a questa disomogeneità si creano anche delle zone nelle quali le correnti indotte sono libere di circolare.

In ogni misurazione sulle diverse superfici del canale si è scelto un sistema di riferimento nel quale la lunghezza del canale fosse sempre posizionata parallela all'asse x , mentre i versori y e z potessero essere orientati in modo differente. Questa scelta è stata

effettuata successivamente ad un'analisi condotta sulla sonda di misura: inizialmente si era scelto un sistema di riferimento per ogni lato del canale con i versori concordi su ognuno di essi ma si è notato che, durante la fase di misura del canale schermato, lungo il lato destro della struttura i moduli dei valori delle misure di induzione ad una distanza di 0.1 m da entrambi i lati del canale si differenziano circa $10 \mu T$. Questo fenomeno non dovrebbe essere possibile a causa della geometria del sistema e soprattutto dell'effetto schermante teorico combinato dai diversi spessori di materiale interni alla struttura. Si è inoltre notato che orientando la sonda mantenendo la stessa posizione del versore z e posizionando il versore x e y affinché il sistema di riferimento sia quello espresso in figura 2.3 il valore del modulo dell'induzione diminuiva drasticamente. Il fenomeno è stato giustificato secondo la seguente ipotesi: le bobine utilizzate nella sonda per la rilevazione dell'induzione sono posizionate in corrispondenza delle facce indicate dai versori su quest'ultima e il sistema di riferimento da prendere in considerazione non è il centro geometrico indicato sulla faccia superiore del dispositivo. La differenza di induzione generata dal posizionamento è stata giustificata dalla discontinuità del mezzo in prossimità dei giunti del canale e dall'effetto indotto dalle correnti circolanti nel coperchio e nella porzione laterale di canale. Purtroppo quest'ipotesi non è stata possibile da verificare e si rimanda l'analisi accurata di questo fenomeno a studi futuri.

Il posizionamento della sonda in riferimento al lato superiore è stato scelto per motivi di natura strettamente esecutiva in riferimento a precedenti misurazioni effettuate. Tenendo conto di questo posizionamento si considera la posizione dell'asse -y orientato concorde all'asse z. Inoltre nei rilevamenti delle grandezze nella posizione verticale, si è utilizzato un supporto esterno pre sagomato con lo scopo di evitare oscillazioni dei bracci sui quali si innesta la sonda. In figura 11 si può osservare il cavalletto posto in modo tale da mantenere la sonda a 0.5 m dalla superficie inferiore del canale mentre a destra la posizione è a 0.1 m dal canale schermante

Di seguito vengono riportate alcune immagini della fase di rilevazione delle grandezze.



Figura 8 Posizionamento sonda all'interfaccia dei giunti alla prima impostazione delle misure del canale.



Figura 9 Particolare del posizionamento della sonda durante la misurazione delle grandezze sulla superficie superiore mediante supporto ausiliario sagomato.



Figura 10 Posizionamento della sonda in corrispondenza del canale a 0.5 m dalla superficie. Particolare in riferimento alla sezione di giunto.



Figura 11 Esempio di posizionamento sulle diverse altezze dei cavalletti ausiliari al fine delle misure sulla superficie inferiore del canale.



Figura 12 Dettaglio sul posizionamento della sonda per misurazione sul fondo del canale

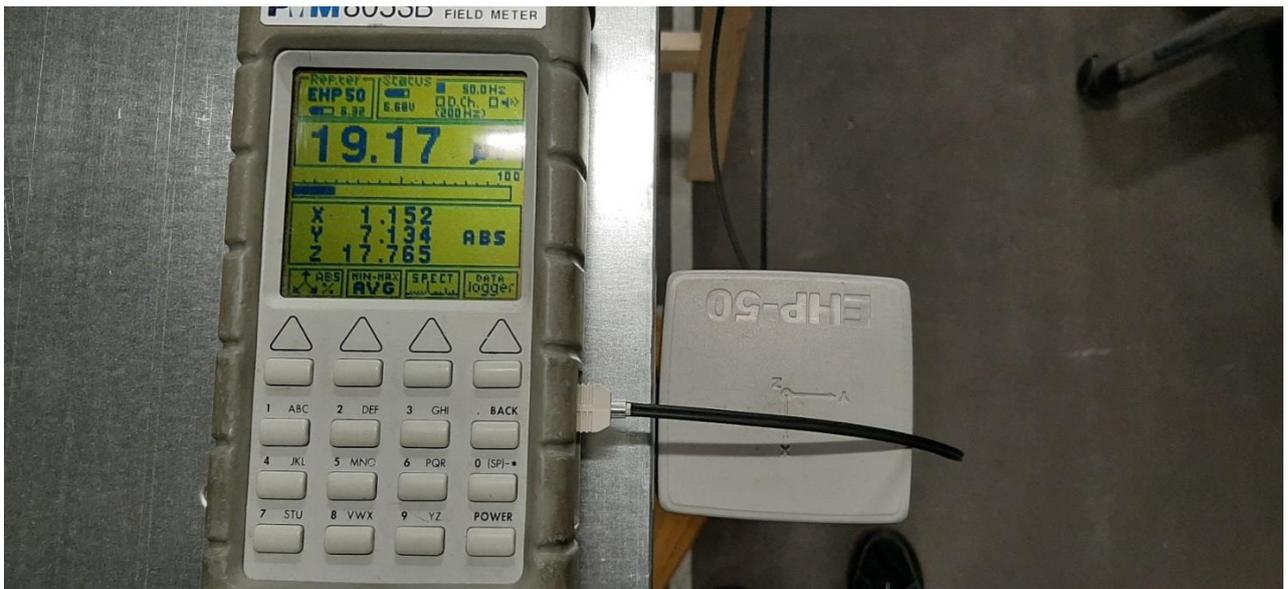


Figura 13 differenza del modulo dell'induzione a seconda del posizionamento della sonda.

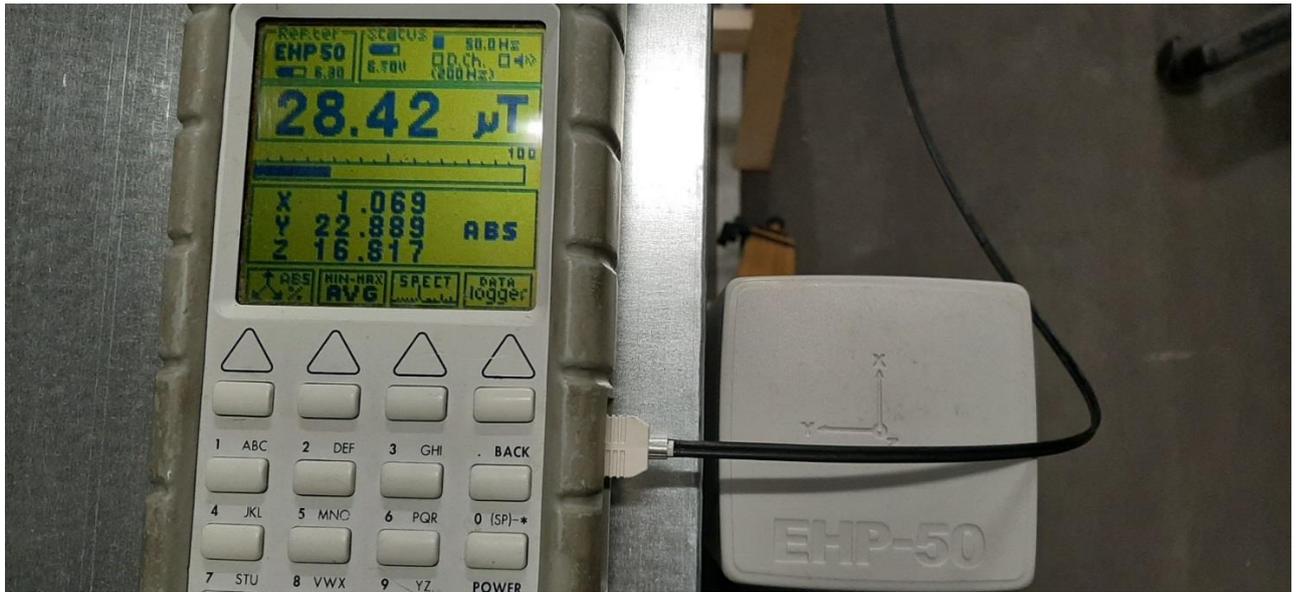


Figura 14 differenza del modulo dell'induzione a seconda del posizionamento della sonda.

2.5 Raccolta dati ed elaborazione

Di seguito vengono presentati i valori trovati in fase di rilievo in riferimento alla posizione della sonda e la loro elaborazione mediante foglio di calcolo. I grafici presenteranno gli andamenti dell'induzione misurata in relazione alla posizione della sonda. Per ogni canale schermante analizzato verrà presentata una tabella dove saranno identificati i valori di induzione magnetica misurata secondo le tre componenti in riferimento ad una data posizione della sonda rispetto alla superficie del canale presa in considerazione. La sonda stessa permetteva la visualizzazione del valore efficace dell'induzione secondo la relazione

$$B_{eff} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

I valori di corrente misurati all'inizio della fase di raccolta dati saranno riportati a fianco dei valori registrati.

Il valore I_{med} è ottenuto dalla media delle correnti nelle tre fasi.

$$I_{med} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

Il valore B_{500} si riferisce al valore dell'induzione magnetica nello stesso punto, utilizzando una corrente di riferimento a 500 A. Questo passaggio è giustificato a causa della caratteristica del mezzo in cui stiamo valutando l'induzione, ovvero l'aria. L'utilizzo di un valore di induzione di riferimento permetterà il confronto tra le diverse strutture di schermatura per valutare il fattore di schermatura secondo la formula vista nell'introduzione

Si ricorda che le configurazioni dei canali sono suddivise in tre categorie: canale non schermato, canale schermato a nuova geometria con zincatura chimica, canale con zincatura termica e canale a vecchia geometria.

Per quanto riguarda i dati raccolti con il canale SENDZIMIR a diverse metodologie di zincatura, bisogna tenere conto che solamente il tratto finale, ovvero quello da 6 m a 8.86 m, è effettuato mediante zincatura termica. Questo è dovuto alla disponibilità fisica del canale schermante. Il precedente tratto di canale 0-6 m è schermato e ha subito un trattamento di zincatura chimica. Verranno indicati nelle tabelle i dati relativi al tratto con zincatura termica con un diverso colore di sfondo.

Il confronto delle diverse tipologie di schermatura sarà effettuato in due fasi: si presenterà l'andamento schermante delle combinazioni utilizzate in fase di misura e successivamente si valuterà l'effetto schermante solo nella metà relativa al tratto di canale considerato. Nello specifico si valuteranno i valori ottenuti nelle porzioni centrali del canale in tutte le sue superfici. Si predilige il tratto centrale a causa delle correnti indotte circolanti nella struttura: in questa posizione l'effetto dovuto alle discontinuità e all'effetto ai bordi delle correnti circolanti verrà mitigato.

Canale non schermato

Tabella 1 Canale non schermato, lato destro

DESTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	5,235	24,177	179,91	181,6027	173,6163
	0,5	1,773	1,886	9,537	9,882049	9,64416
0,5	0,1	5,808	12,793	134,57	135,3014	129,3513
	0,5	0,406	1,45	9,419	9,5386	9,308979
1	0,1	3,731	15,774	126,43	127,4648	121,8593
	0,5	0,384	0,898	8,803	8,857012	8,643799
1,5	0,1	3,345	9,951	114,42	114,9006	109,8476
	0,5	0,367	0,727	8,712	8,749981	8,539344
2	0,1	3,508	12,974	124,69	125,4122	119,897
	0,5	0,178	0,746	8,892	8,925013	8,710163
2,5	0,1	4,502	14,087	126,7	127,5602	121,9505
	0,5	0,142	0,893	8,705	8,751836	8,541154
3	0,1	7,83	18,741	128,43	130,0261	124,308
	0,5	0,279	1,231	8,956	9,044509	8,826781
3,5	0,1	7,9	19,448	132	133,6586	127,7807
	0,5	0,424	1,105	8,847	8,925817	8,710947
4	0,1	1,412	10,379	130,35	130,7702	125,0193
	0,5	0,327	0,696	8,633	8,667181	8,458538
4,5	0,1	3,489	13,912	123,66	124,489	119,0143
	0,5	0,294	0,721	8,414	8,449951	8,246536
5	0,1	5,434	15,879	137,03	138,0539	131,9827
	0,5	0,267	0,567	8,478	8,501133	8,296486
5,5	0,1	4,878	7,076	117,08	117,395	112,2323
	0,5	0,117	0,624	8,8	8,822872	8,61048
6	0,1	8,316	21,404	143,85	145,6712	139,265
	0,5	0,118	0,929	8,923	8,972006	8,756024
6,5	0,1	3,116	19,938	159,5	160,7715	153,7013
	0,5	0,173	0,702	8,705	8,734973	8,524697
7	0,1	1,677	8,824	109,56	109,9276	105,0933
	0,5	0,184	0,325	9,367	9,374442	9,148773
7,5	0,1	5,065	13,051	127,13	127,8985	122,2739
	0,5	0,121	0,603	8,371	8,393562	8,191505
8	0,1	1,344	14,092	133,77	134,5169	128,6013
	0,5	0,041	0,51	8,203	8,218941	8,021087
8,5	0,1	8,935	5,711	127,41	127,8505	122,228
	0,5	0,465	0,765	7,254	7,309033	7,133084
8,86	0,1	16,686	28,426	151,14	154,6925	147,8895
	0,5	0,158	1,151	6,595	6,696551	6,535345

Tabella 2 Canale non schermato, lato sinistro

SINISTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	37,002	20,808	198,24	202,7344	200,7271
	0,5	2,332	2,837	12,397	12,92952	12,8015
0,5	0,1	0,762	3,702	129,63	129,6851	128,4011
	0,5	1,59	0,859	10,064	10,22497	10,12374
1	0,1	3,969	8,101	142,12	142,406	140,9961
	0,5	0,852	0,405	9,353	9,400454	9,30738
1,5	0,1	2,832	7,506	131,82	132,0639	130,7563
	0,5	0,538	0,264	8,883	8,903192	8,815042
2	0,1	3,819	6,811	129,93	130,1644	128,8757
	0,5	0,462	0,237	8,937	8,952071	8,863437
2,5	0,1	1,596	6,853	143,65	143,8222	142,3982
	0,5	0,305	0,181	9,062	9,068938	8,979146
3	0,1	9,584	17,802	144,72	146,1254	144,6786
	0,5	0,146	0,236	9,082	9,086239	8,996276
3,5	0,1	2,065	8,416	127,8	128,0935	126,8252
	0,5	0,301	0,215	8,861	8,868717	8,780908
4	0,1	2,367	1,963	129	129,0366	127,7591
	0,5	0,176	0,222	9,074	9,078421	8,988536
4,5	0,1	2,966	10,797	126,91	127,403	126,1416
	0,5	0,078	0,458	8,694	8,706405	8,620203
5	0,1	9,804	6,537	129,1	129,6366	128,3531
	0,5	0,407	0,272	8,724	8,737723	8,651211
5,5	0,1	4,114	8,062	133,17	133,4772	132,1557
	0,5	0,146	0,249	8,963	8,967647	8,878858
6	0,1	5,489	15,371	156,4	157,2493	155,6924
	0,5	0,223	0,364	9,286	9,295807	9,203769
6,5	0,1	3,592	7,564	131,69	131,9559	130,6495
	0,5	0,29	0,208	8,861	8,868184	8,78038
7	0,1	2,065	5,23	136,32	136,4359	135,0851
	0,5	0,126	0,209	8,73	8,73341	8,646941
7,5	0,1	4,64	8,106	122,13	122,4866	121,2739
	0,5	0,183	0,205	8,51	8,514436	8,430134
8	0,1	2,337	3,089	133,72	133,7761	132,4516
	0,5	0,235	0,446	8,209	8,224465	8,143035
8,5	0,1	2,784	3,5	127,21	127,2886	126,0283
	0,5	0,137	0,596	7,7	7,724247	7,647769
8,86	0,1	22,759	12,431	161,18	163,2529	161,6365
	0,5	0,619	0,213	5,689	5,726539	5,669841

Tabella 3 Canale non schermato, lato inferiore

BASSO		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	70,606	38,806	191,21	207,4907	199,5103
	0,5	7,86	3,896	19,573	21,44903	20,00842
0,5	0,1	9,829	16,602	92,172	94,1696	90,54769
	0,5	2,014	2,526	11,024	11,48762	10,71606
1	0,1	2,787	20,533	95,112	97,34302	93,59906
	0,5	0,586	1,775	11,127	11,28291	10,52511
1,5	0,1	1,822	15,841	93,322	94,67446	91,03313
	0,5	0,062	1,653	11,18	11,30171	10,54264
2	0,1	2,714	21,246	96,578	98,92456	95,11977
	0,5	0,38	1,126	11,186	11,24895	10,49342
2,5	0,1	2,494	16,185	94,828	96,23162	92,5304
	0,5	0,408	1,331	11,489	11,57304	10,79574
3	0,1	3,508	18,432	92,881	94,75719	91,11268
	0,5	0,176	2,09	12,096	12,27649	11,45195
3,5	0,1	1,188	23,42	96,815	99,61452	95,78319
	0,5	0,486	1,903	11,324	11,49307	10,72114
4	0,1	3,805	39,935	96,385	104,4	100,3846
	0,5	0,3	2,389	11,058	11,3171	10,55699
4,5	0,1	2,851	17,71	94,165	95,85833	92,17147
	0,5	0,1	3,317	10,663	11,16746	10,4174
5	0,1	60,6	19,335	97,786	116,6546	112,1679
	0,5	0,236	0,924	11,045	11,08609	10,34151
5,5	0,1	7,373	29,431	98,23	102,8089	98,85475
	0,5	1,436	1,962	11,059	11,32312	10,56261
6	0,1	2,847	25,029	108,91	111,7853	107,4858
	0,5	0,872	1,756	11,936	12,09595	11,28354
6,5	0,1	2,508	20,127	94,626	96,77534	93,05321
	0,5	0,386	1,294	11,494	11,57305	10,79575
7	0,1	2,844	28,023	100,04	103,9297	99,93238
	0,5	0,095	1,894	11,168	11,32786	10,56704
7,5	0,1	2,181	22,092	96,874	99,38503	95,56253
	0,5	0,12	1,298	11,099	11,17529	10,42471
8	0,1	1,044	21,995	95,938	98,43256	94,6467
	0,5	0,24	1,167	11,112	11,17569	10,42508
8,5	0,1	5,712	20,199	94,048	96,36209	92,65586
	0,5	1,656	1,101	11,914	12,07882	11,26756
8,86	0,1	12,476	37,992	163,4	168,2219	161,7518
	0,5	3,195	1,222	11,834	12,31848	11,49112

Tabella 4 Canale non schermato, lato superiore

ALTO		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	97,397	191,97	65,663	225,0562	227,0237
	0,5	0,302	16,58	2,148	16,72129	16,87882
0,5	0,1	12,69	180,42	56,439	189,4671	191,1235
	0,5	1,699	12,192	1,162	12,36453	12,48102
1	0,1	2,77	139,83	33,028	143,7044	144,9607
	0,5	0,68	11,152	0,738	11,19706	11,30255
1,5	0,1	4,624	144,38	38,343	149,4562	150,7628
	0,5	0,428	11,779	1,095	11,83753	11,94905
2	0,1	3,791	130,06	47,58	138,5418	139,753
	0,5	0,589	12,074	1,102	12,13848	12,25284
2,5	0,1	3,703	175,52	44,799	181,1848	182,7688
	0,5	0,68	12,399	1,121	12,46813	12,58559
3	0,1	7,773	191,72	53,697	199,2495	200,9914
	0,5	0,33	12,582	0,914	12,61947	12,73836
3,5	0,1	6,135	154,5	34,57	158,4392	159,8243
	0,5	0,655	12,195	0,87	12,24353	12,35888
4	0,1	8,892	180,11	67,677	192,6106	194,2945
	0,5	0,458	12,541	1,008	12,58978	12,70839
4,5	0,1	7,685	176,77	55,403	185,4082	187,0291
	0,5	0,505	11,575	1,191	11,64707	11,7568
5	0,1	10,182	167	47,896	174,0307	175,5522
	0,5	0,794	12,348	1,05	12,41797	12,53497
5,5	0,1	8,099	171,19	50,347	178,6237	180,1853
	0,5	0,682	12,714	1,063	12,77658	12,89695
6	0,1	5,608	196,4	63,481	206,4806	208,2858
	0,5	0,283	12,875	0,891	12,9089	13,03051
6,5	0,1	2,12	152,72	31,078	155,8645	157,2271
	0,5	0,464	12,622	0,802	12,65596	12,7752
7	0,1	3,592	154,1	34,478	157,9508	159,3316
	0,5	0,366	12,21	0,565	12,22854	12,34375
7,5	0,1	1,374	147,36	30,802	150,5511	151,8672
	0,5	0,378	12,202	0,723	12,22924	12,34446
8	0,1	1,373	154,52	43,89	160,6383	162,0426
	0,5	0,464	13,104	0,755	13,13393	13,25767
8,5	0,1	8,329	188,79	46,599	194,6343	196,3359
	0,5	1,71	13,799	0,941	13,93635	14,06765
8,86	0,1	18,789	192,77	50,533	200,1671	201,9171
	0,5	5,475	10,495	0,526	11,84894	11,96057

Di seguito sono elencati i valori delle correnti all'interno dei conduttori per le differenti misure effettuate.

DESTRA 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
442	638	489	523
DESTRA 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
427	622	488	512,3333

SINISTRA 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
420	610	485	505
SINISTRA 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
420	610	485	505

INFERIORE 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
437	629	494	520
INFERIORE 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
450	650	508	536

SUPERIORE 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
411	599	477	495,6667
SUPERIORE 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
413	598	475	495,3333

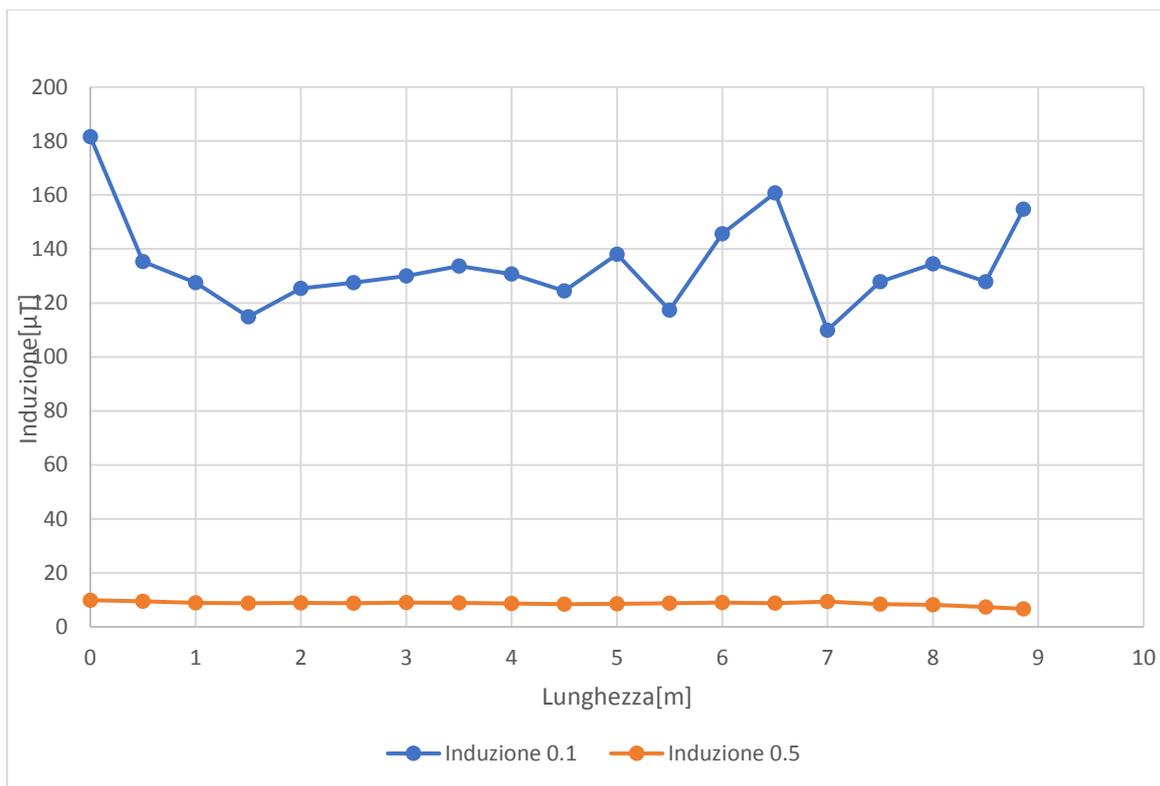


Grafico 2.1: Induzione canale non schermato, lato destro

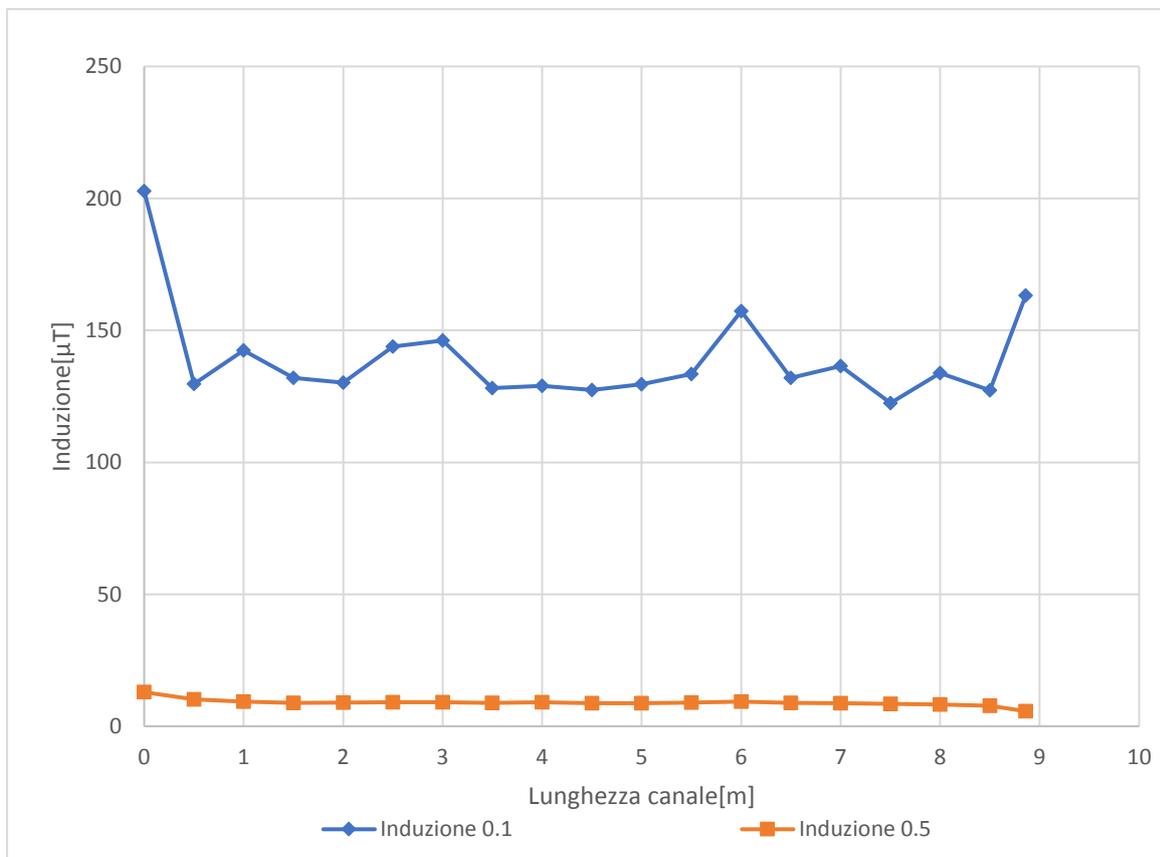


Grafico 2.2: Induzione canale non schermato, lato sinistro

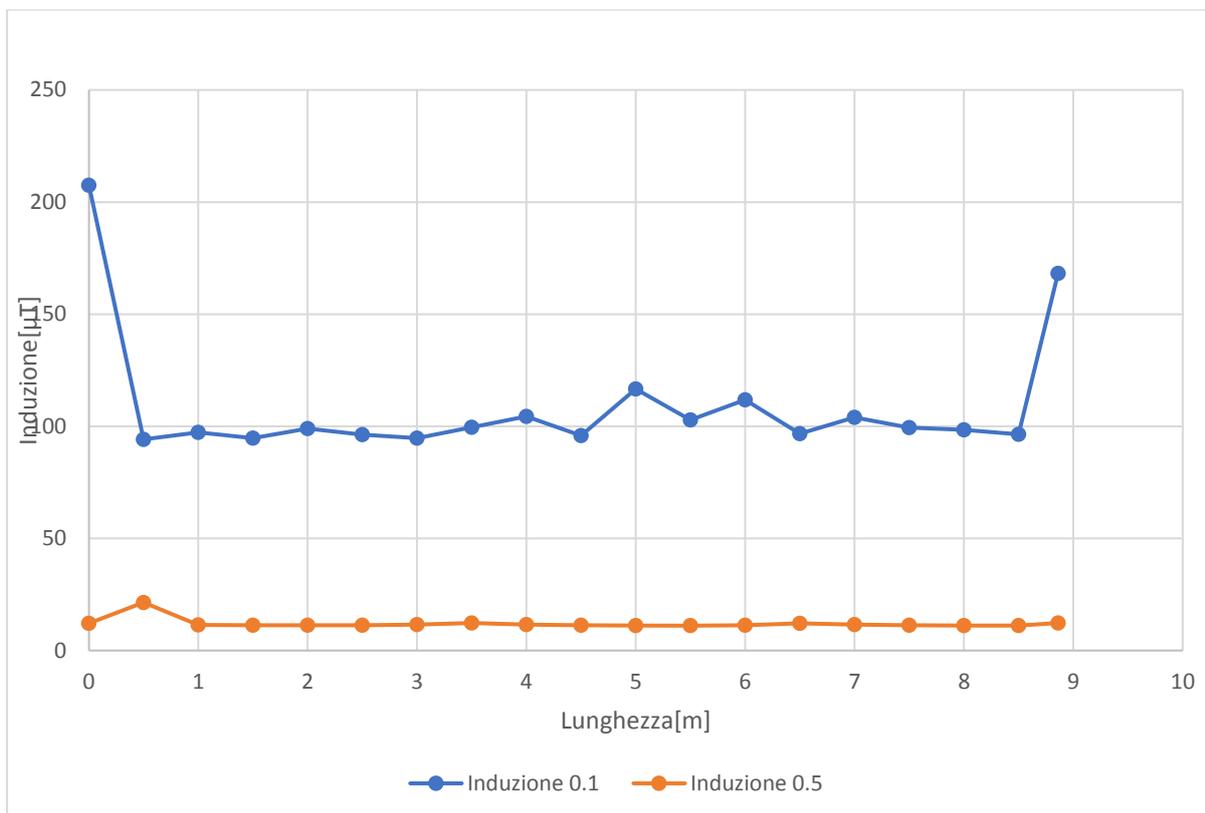


Grafico 2.3: Induzione canale non schermato, lato inferiore

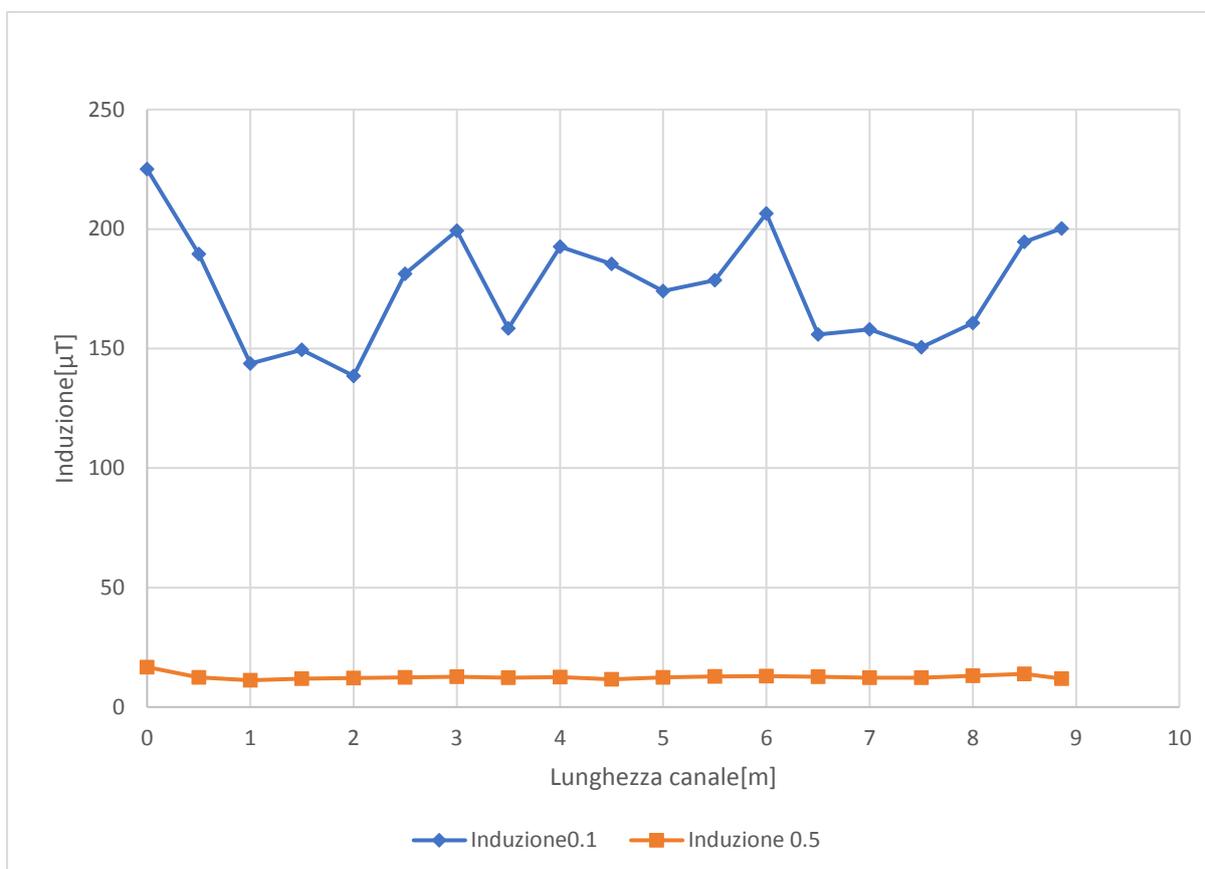


Grafico 2.4: Induzione canale non schermato, lato superiore

Canale schermato SENDZIMIR-zincatura a caldo

Tabella 5 Canale DENDZIMIR-termico, lato destro

DESTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	29,42	38,003	145,39	153,1275	153,6396
	0,5	1,819	1,9	5,477	6,075878	6,096198
0,5	0,1	0,432	12,573	26,794	29,60043	29,69943
	0,5	0,422	1,305	2,796	3,114278	3,124693
1	0,1	0,572	11,616	29,106	31,34355	31,44837
	0,5	0,273	0,957	1,364	1,688453	1,6941
1,5	0,1	0,695	10,397	26,134	28,13479	28,22889
	0,5	0,257	0,68	1,052	1,278731	1,283008
2	0,1	0,039	7,449	26,113	27,1547	27,24552
	0,5	0,195	0,426	1,053	1,152523	1,156378
2,5	0,1	3,461	9,096	26,089	27,84514	27,93826
	0,5	0,084	0,426	1,146	1,225499	1,229598
3	0,1	7,473	16,364	54,715	57,59651	57,78914
	0,5	0,23	0,562	1,289	1,424874	1,429639
3,5	0,1	0,935	5,536	15,802	16,76976	16,82584
	0,5	0,106	0,64	0,949	1,149538	1,153382
4	0,1	1,622	8,913	17,288	19,51787	19,58315
	0,5	0,15	0,59	0,823	1,023684	1,027108
4,5	0,1	1,167	5,474	17,145	18,03545	18,09577
	0,5	0,154	0,416	0,832	0,942866	0,946019
5	0,1	1,875	7,949	17,342	19,16891	19,23302
	0,5	0,049	0,224	0,795	0,827407	0,830174
5,5	0,1	2,34	5,541	19,11	20,03423	20,10123
	0,5	0,145	0,334	0,934	1,002465	1,005818
6	0,1	6,103	18,229	47,902	51,61535	51,78798
	0,5	0,242	0,796	1,18	1,443807	1,448636
6,5	0,1	0,46	8,09	20,668	22,19968	22,27393
	0,5	0,017	0,681	0,947	1,166559	1,17046
7	0,1	1,167	8,095	20,107	21,70674	21,77933
	0,5	0,051	0,616	0,859	1,058271	1,061811
7,5	0,1	2,596	9,034	19,097	21,28492	21,35611
	0,5	0,119	0,5	0,801	0,951715	0,954898
8	0,1	1,829	7,025	19,338	20,65561	20,72469
	0,5	0,124	0,327	0,753	0,830249	0,833026
8,5	0,1	4,261	6,769	17,056	18,83833	18,90133
	0,5	0,168	0,157	0,884	0,913416	0,916471
8,86	0,1	11,67	14,287	55,097	58,10324	58,29757
	0,5	0,148	0,455	1,067	1,169366	1,173277

Tabella 6 Canale SENDZIMIR-termico, lato sinistro

SINISTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	26,504	36,982	141,45	148,5875	151,0035
	0,5	1,103	2,462	7,262	7,746915	7,872881
0,5	0,1	2,922	7,391	23,414	24,72611	25,12816
	0,5	0,826	0,52	2,607	2,783725	2,828989
1	0,1	1,786	6,673	27,629	28,47947	28,94255
	0,5	0,515	0,094	1,187	1,297316	1,318411
1,5	0,1	1,678	8,327	27,066	28,36764	28,8289
	0,5	0,224	0,293	0,991	1,057405	1,074599
2	0,1	0,833	8,26	28,142	29,34099	29,81808
	0,5	0,182	0,411	1,092	1,180893	1,200095
2,5	0,1	1,359	12,142	31,608	33,88718	34,43819
	0,5	0,078	0,489	1,116	1,220926	1,240779
3	0,1	21,217	27,109	57,107	66,68035	67,76458
	0,5	0,267	0,319	1,219	1,288026	1,30897
3,5	0,1	0,408	4,14	22,189	22,5756	22,94268
	0,5	0,152	0,081	0,9	0,916332	0,931232
4	0,1	0,991	5,682	20,654	21,44423	21,79291
	0,5	0,157	0,197	0,821	0,858778	0,872741
4,5	0,1	1,084	6,784	19,218	20,40905	20,7409
	0,5	0,114	0,311	0,836	0,899229	0,913851
5	0,1	3,95	6,706	24,637	25,83708	26,2572
	0,5	0,052	0,386	0,844	0,929535	0,94465
5,5	0,1	4,097	5,192	22,062	23,03202	23,40653
	0,5	0,334	0,213	0,923	1,004417	1,020749
6	0,1	18,715	28,056	61,461	70,10595	71,24589
	0,5	0,192	0,374	1,051	1,131963	1,150369
6,5	0,1	2,372	6,058	21,028	22,01142	22,36933
	0,5	0,18	0,161	0,889	0,921218	0,936197
7	0,1	2,702	5,999	23,155	24,07162	24,46303
	0,5	0,07	0,323	0,906	0,964399	0,98008
7,5	0,1	1,216	6,237	20,597	21,55494	21,90542
	0,5	0,03	0,314	0,838	0,895399	0,909959
8	0,1	1,993	7,215	22,07	23,30479	23,68373
	0,5	0,072	0,346	0,821	0,893835	0,908369
8,5	0,1	1,243	9,054	20,945	22,85198	23,22356
	0,5	0,096	0,482	0,829	0,963733	0,979403
8,86	0,1	16,612	18,201	70,203	74,40226	75,61205
	0,5	0,435	0,253	1,072	1,184237	1,203493

Tabella 7 Canale SENDZIMIR-termico, lato inferiore

INFERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	102,94	17,824	26,626	107,8113	102,2231
	0,5	9,875	1,296	13,41	16,70399	16,11318
0,5	0,1	8,942	3,035	9,894	13,67705	12,96813
	0,5	4,8	0,091	0,587	4,836616	4,665546
1	0,1	1,719	3,548	7,14	8,156155	7,733396
	0,5	1,611	0,398	1,438	2,195807	2,118142
1,5	0,1	0,341	3,62	7,321	8,174211	7,750516
	0,5	0,687	0,422	1,449	1,658208	1,599558
2	0,1	0,483	3,014	7,39	7,995598	7,581161
	0,5	0,257	0,414	1,434	1,51453	1,460961
2,5	0,1	2,293	2,745	7,384	8,204653	7,77938
	0,5	0,206	0,411	1,498	1,566959	1,511536
3	0,1	0,935	2,364	20,152	20,31172	19,2589
	0,5	0,249	0,362	1,941	1,990107	1,919717
3,5	0,1	0,946	2,599	3,192	4,223574	4,004653
	0,5	0,473	0,375	0,81	1,010175	0,974446
4	0,1	0,724	2,485	5,68	6,241939	5,9184
	0,5	0,245	0,357	0,947	1,041289	1,004459
4,5	0,1	0,094	2,294	5,013	5,51375	5,227955
	0,5	0,078	0,348	1,013	1,073945	1,035959
5	0,1	0,219	2,315	4,983	5,498861	5,213838
	0,5	0,167	0,355	0,951	1,028744	0,992358
5,5	0,1	2,604	2,302	4,808	5,932696	5,625186
	0,5	0,636	0,405	0,983	1,238874	1,195056
6	0,1	4,959	3,514	22,963	23,75372	22,52249
	0,5	0,29	0,292	1,939	1,982192	1,912082
6,5	0,1	0,891	3,601	3,695	5,235848	4,964458
	0,5	0,445	0,455	0,957	1,149304	1,108653
7	0,1	0,295	3,669	4,789	6,040125	5,727046
	0,5	0,096	0,545	0,918	1,071898	1,033985
7,5	0,1	0,32	3,638	5,333	6,463616	6,128587
	0,5	0,144	0,491	0,969	1,0958	1,057042
8	0,1	0,167	3,102	5,217	6,071852	5,757129
	0,5	0,478	0,447	0,958	1,160197	1,119161
8,5	0,1	4,748	3,127	6,614	8,721618	8,26955
	0,5	1,792	0,363	0,873	2,02612	1,954457
8,86	0,1	39,86	25,379	83,571	96,00534	91,02908
	0,5	1,47	0,581	4,88	5,129606	4,948173

Tabella 8 Canale SENDZIMIR-termico, lato superiore

SUPERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	105,69	82,215	22,999	135,8626	143,6179
	0,5	6,814	10,473	1,644	12,60226	13,33103
0,5	0,1	5,224	16,134	1,961	17,07166	18,04615
	0,5	2,987	1,718	0,346	3,46315	3,663417
1	0,1	0,385	12,194	0,995	12,24058	12,93931
	0,5	0,821	1,804	0,308	2,005822	2,121814
1,5	0,1	0,708	12,171	0,851	12,22124	12,91886
	0,5	0,231	1,784	0,373	1,837157	1,943396
2	0,1	0,28	14,5	0,749	14,52203	15,35098
	0,5	0,245	1,842	0,296	1,88165	1,990461
2,5	0,1	1,925	13,531	1,069	13,70899	14,49153
	0,5	0,528	1,837	0,236	1,925889	2,037259
3	0,1	4,023	38,218	6,11	38,91185	41,13303
	0,5	0,271	2,359	0,244	2,387019	2,525055
3,5	0,1	2,775	12,759	1,959	13,20342	13,95711
	0,5	0,515	1,824	0,322	1,922468	2,033641
4	0,1	0,29	7,728	2,376	8,090208	8,552017
	0,5	0,106	1,388	0,333	1,431317	1,514087
4,5	0,1	1,138	10,307	1,695	10,50725	11,10703
	0,5	0,216	1,306	0,303	1,357977	1,436506
5	0,1	1,476	10,66	2,88	11,1404	11,77632
	0,5	0,379	1,685	0,221	1,74118	1,841869
5,5	0,1	4,16	17,329	4,327	18,3391	19,38595
	0,5	0,611	1,856	0,119	1,957605	2,070809
6	0,1	3,933	38,699	5,771	39,32411	41,56883
	0,5	0,127	2,328	0,093	2,333316	2,468246
6,5	0,1	2,124	14,352	1,374	14,57323	15,40511
	0,5	0,393	1,713	0,351	1,792211	1,89585
7	0,1	0,553	10,327	1,824	10,50141	11,10086
	0,5	0,052	1,478	0,374	1,525472	1,613687
7,5	0,1	0,953	11,531	1,148	11,62713	12,29083
	0,5	0,204	1,442	0,32	1,4911	1,577328
8	0,1	1,208	10,881	0,454	10,95726	11,58273
	0,5	0,475	1,654	0,234	1,736691	1,837121
8,5	0,1	6,354	18,9	3,617	20,2649	21,42167
	0,5	1,035	2,294	0,017	2,516734	2,662272
8,86	0,1	15,912	63,003	3,57	65,0793	68,79418
	0,5	0,956	3,023	0,079	3,171546	3,35495

Di seguito sono elencati i valori delle correnti all'interno dei conduttori per le differenti misure effettuate.

Tabella 9 Valori di corrente misure lato destro

DESTRA 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
477	549	469	498,3333
DESTRA 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
477	549	469	498,3333

Tabella 10 Valori di corrente, misure lato sinistro

SINISTRA 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
466	542	468	492
SINISTRA 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
466	542	468	492

Tabella 11 Valori di corrente, misure lato inferiore

INFERIORE 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
501	580	501	527,3333
INFERIORE 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
496	569	490	518,3333

Tabella 12 Valori di corrente, misure lato superiore

SUOERIORE 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
449	518	452	473
SUPERIORE 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
449	518	451	472,6667

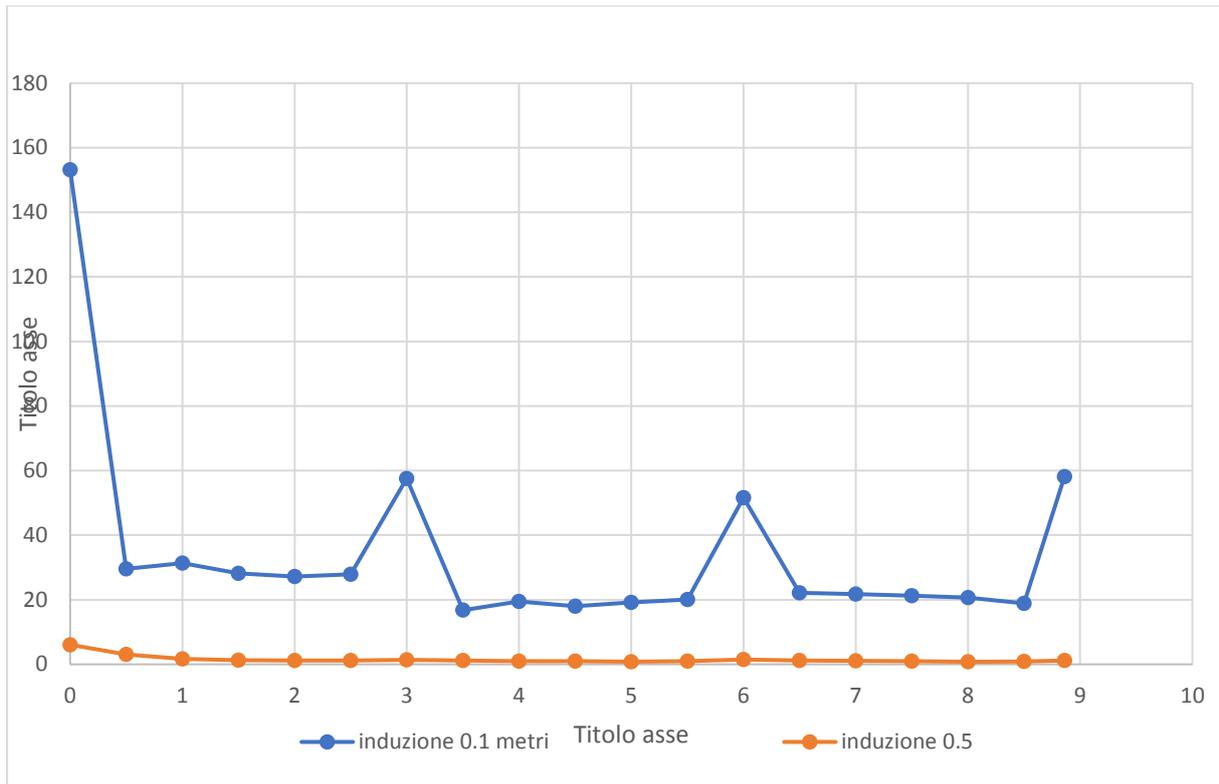


Grafico 2.5: Canale SENDZIMIR e canale termico, lato destro

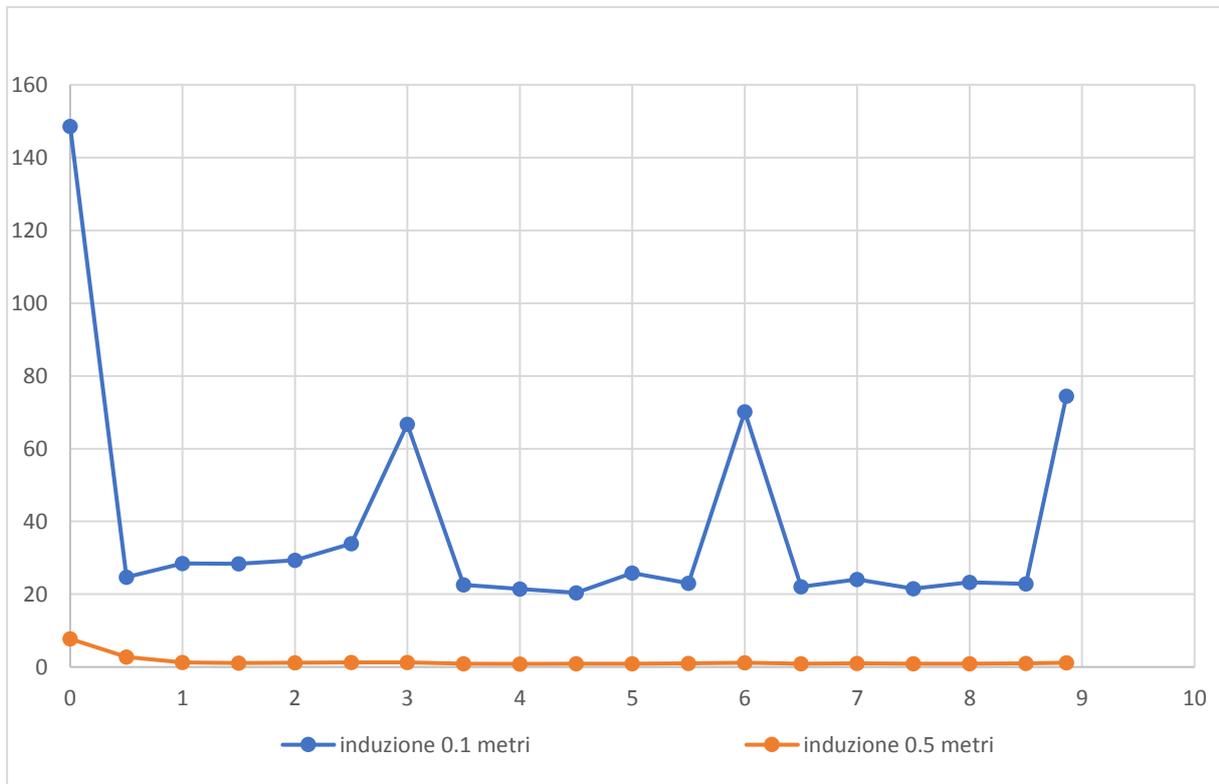


Grafico 2.6: Canale SENDZIMIR e canale termico, lato sinistro

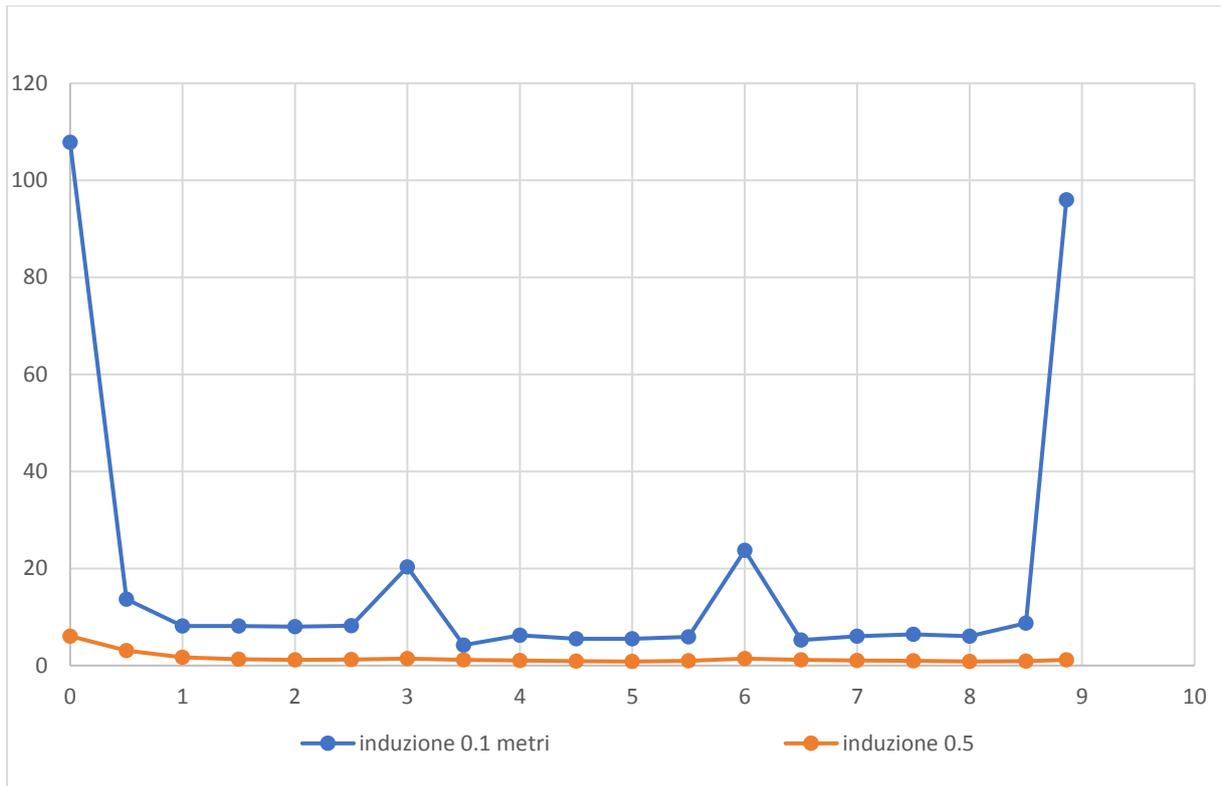


Grafico 2.7: Canale SENDZIMIR e canale termico, lato inferiore

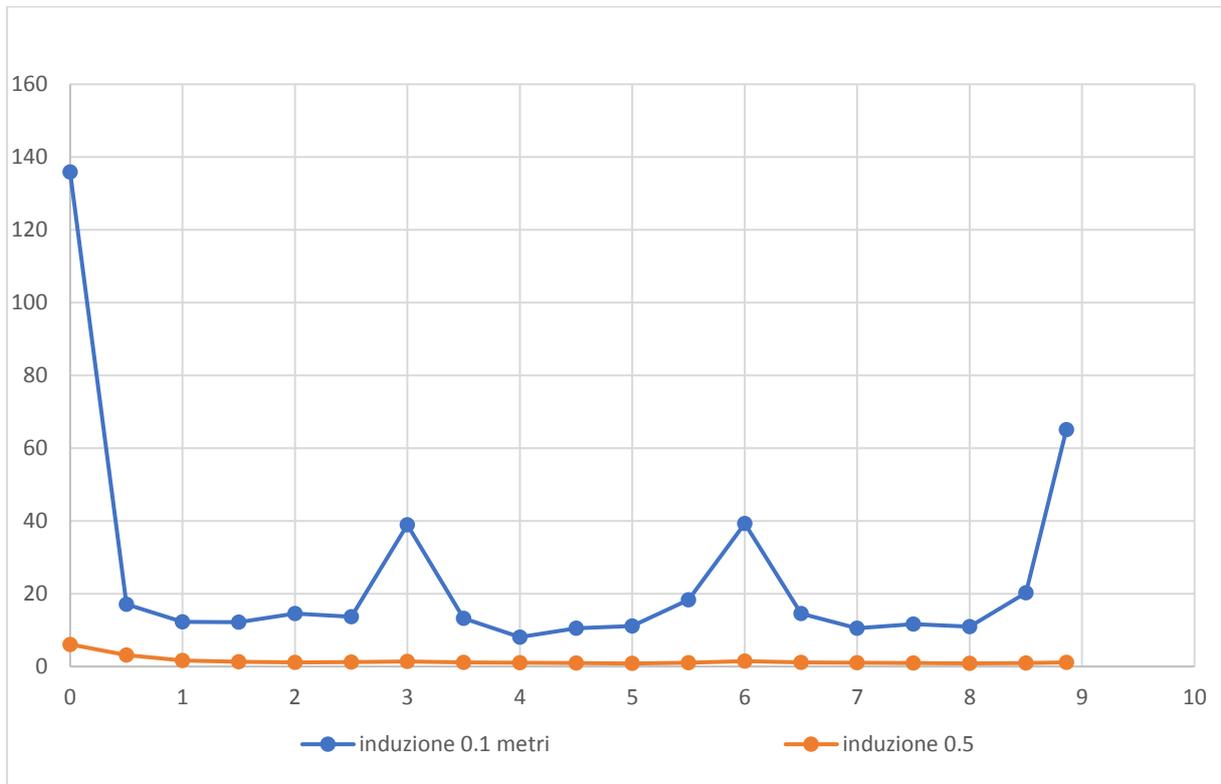


Grafico 2.8: Canale SENDZIMIR e canale termico, lato superiore

Canale schermato a vecchia geometria

Tabella 13 Canale a vecchia geometria, lato destro

DESTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	21,49	17,307	128,11	131,0478	131,3104
	0,5	1,132	1,28	6,026	6,263585	6,276138
0,5	0,1	0,099	2,096	9,421	9,651853	9,671195
	0,5	0,314	0,585	2,513	2,599229	2,604438
1	0,1	2,494	1,132	10,547	10,89682	10,91866
	0,5	0,182	0,263	1,058	1,105286	1,107501
1,5	0,1	0,903	2,437	11,977	12,25573	12,28029
	0,5	0,08	0,187	0,674	0,704021	0,705431
2	0,1	0,658	1,685	13,071	13,19558	13,22202
	0,5	0,07	0,12	0,639	0,653927	0,655238
2,5	0,1	1,611	1,951	10,674	10,96978	10,99176
	0,5	0,218	0,171	0,731	0,781745	0,783312
3	0,1	7,132	8,831	27,818	30,04485	30,10506
	0,5	0,202	0,462	0,838	0,978004	0,979964
3,5	0,1	1,925	5,914	5,456	8,273388	8,289968
	0,5	0,25	0,346	0,663	0,788533	0,790114
4	0,1	1,583	2,462	15,982	16,24782	16,28038
	0,5	0,12	0,028	0,624	0,63605	0,637325
4,5	0,1	0,576	2,814	15,882	16,13965	16,17199
	0,5	0,055	0,098	0,595	0,60552	0,606733
5	0,1	3,061	3,124	4,749	6,456167	6,469106
	0,5	0,112	0,092	0,579	0,596866	0,598062
5,5	0,1	2,103	1,854	13,082	13,37904	13,40585
	0,5	0,125	0,193	0,629	0,669713	0,671055
6	0,1	6,936	7,928	31,499	33,21368	33,28024
	0,5	0,139	0,34	0,846	0,9223	0,924148
6,5	0,1	2,603	1,974	17,035	17,34542	17,38018
	0,5	0,145	0,081	0,753	0,7711	0,772645
7	0,1	1,547	1,842	16,91	17,08023	17,11446
	0,5	0,041	0,062	0,712	0,715869	0,717304
7,5	0,1	0,647	1,888	18,9	19,00508	19,04317
	0,5	0,06	0,025	0,689	0,692059	0,693446
8	0,1	2,586	1,87	10,174	10,66277	10,68413
	0,5	0,093	0,172	0,638	0,667291	0,668628
8,5	0,1	3,861	3,206	9,523	10,76445	10,78602
	0,5	0,194	0,391	0,616	0,754966	0,756479
8,86	0,1	28,615	2,353	28,76	40,63856	40,72
	0,5	0,604	0,105	0,758	0,974887	0,976841

Tabella 14 Canale a vecchia geometria, lato sinistro

SINISTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	46,74	6,675	98,891	109,5838	110,0976
	0,5	1,248	1,721	7,326	7,628212	7,663977
0,5	0,1	1,092	5,362	6,06	8,164993	8,203275
	0,5	0,83	0,103	2,584	2,715983	2,728717
1	0,1	1,244	1,748	10,497	10,71401	10,76424
	0,5	0,349	0,109	1,02	1,083551	1,088631
1,5	0,1	1,939	0,779	9,15	9,385577	9,429582
	0,5	0,187	0,102	0,644	0,678313	0,681494
2	0,1	2,809	3,431	13,17	13,89644	13,9616
	0,5	0,195	0,205	0,607	0,669701	0,672841
2,5	0,1	2,445	6,444	14,287	15,86258	15,93696
	0,5	0,042	0,304	0,702	0,766149	0,769741
3	0,1	18,731	9,857	31,844	38,23678	38,41605
	0,5	0,145	0,134	0,845	0,867759	0,871828
3,5	0,1	2,69	3,203	10,52	11,32103	11,37411
	0,5	0,197	0,649	0,656	0,943581	0,948006
4	0,1	2,808	3,906	13,745	14,56251	14,63079
	0,5	0,082	0,223	0,605	0,649983	0,653031
4,5	0,1	1,516	2,151	11,896	12,18359	12,24071
	0,5	0,034	0,105	0,596	0,606133	0,608975
5	0,1	6,093	4,807	11,923	14,22638	14,29308
	0,5	0,143	0,249	0,554	0,623992	0,626918
5,5	0,1	2,293	3,513	11,308	12,06109	12,11764
	0,5	0,249	0,214	0,634	0,71397	0,717317
6	0,1	11,463	12,456	44,67	47,76988	47,99385
	0,5	0,122	0,209	0,862	0,895326	0,899524
6,5	0,1	1,43	5,154	17,494	18,2934	18,37917
	0,5	0,222	0,206	0,737	0,796799	0,800535
7	0,1	1,664	2,615	14,091	14,42787	14,49551
	0,5	0,072	0,243	0,676	0,721948	0,725333
7,5	0,1	0,756	2,202	12,338	12,55574	12,61461
	0,5	0,076	0,237	0,65	0,696021	0,699284
8	0,1	1,682	3,718	11,837	12,52067	12,57938
	0,5	0,092	0,391	0,58	0,70551	0,708818
8,5	0,1	4,073	7,591	13,902	16,35476	16,43144
	0,5	0,223	0,601	0,561	0,851852	0,855845
8,86	0,1	36,619	12,116	48,113	61,6653	61,95442
	0,5	0,789	0,15	0,762	1,107098	1,112288

Tabella 15 Canale a vecchia geometria, lato inferiore

INFERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	115,07	32,341	46,865	128,3876	129,6844
	0,5	10,808	0,489	18,466	21,40199	21,69121
0,5	0,1	7,754	1,469	9,341	12,22852	12,35204
	0,5	5,323	0,374	0,257	5,342308	5,414501
1	0,1	1,061	1,276	5,645	5,88387	5,943303
	0,5	1,583	0,088	1,234	2,009077	2,036226
1,5	0,1	0,288	2,008	4,72	5,137452	5,189345
	0,5	0,581	0,082	0,995	1,155123	1,170733
2	0,1	0,483	2,093	5,163	5,592004	5,648489
	0,5	0,189	0,221	0,977	1,019358	1,033133
2,5	0,1	0,511	2,449	4,132	4,830336	4,879127
	0,5	0,275	0,364	0,859	0,972626	0,98577
3	0,1	2,951	4,281	23,175	23,75113	23,99104
	0,5	0,105	0,392	1,621	1,671027	1,693608
3,5	0,1	0,801	1,865	3,021	3,639542	3,676305
	0,5	0,498	0,304	0,667	0,886177	0,898152
4	0,1	0,731	2,126	6,286	6,675929	6,743363
	0,5	0,138	0,227	0,83	0,871477	0,883254
4,5	0,1	0,799	1,887	5,307	5,688886	5,746349
	0,5	0,088	0,202	0,821	0,850052	0,86154
5	0,1	1,387	1,671	3,445	4,07235	4,113485
	0,5	0,671	0,209	0,527	0,878437	0,890307
5,5	0,1	2,057	2,305	4,526	5,479868	5,53522
	0,5	0,7	0,298	0,57	0,950633	0,96348
6	0,1	5,109	4,233	32,21	32,88623	33,21842
	0,5	0,243	0,326	2,031	2,071301	2,099291
6,5	0,1	1,653	2,632	5,427	6,253972	6,317143
	0,5	0,608	0,289	1,074	1,267541	1,28467
7	0,1	0,392	2,362	6,994	7,392479	7,46715
	0,5	0,135	0,243	1,059	1,094877	1,109672
7,5	0,1	0,052	2,586	5,986	6,520912	6,58678
	0,5	0,123	0,25	0,947	0,987136	1,000476
8	0,1	0,383	2,432	5,182	5,737111	5,795061
	0,5	0,132	0,219	0,967	1,000237	1,013754
8,5	0,1	0,121	2,008	6,826	7,116248	7,188129
	0,5	0,889	0,197	0,826	1,229393	1,246006
8,86	0,1	24,783	6,938	29,314	39,00825	39,40227
	0,5	1,27	0,393	2,071	2,460973	2,49423

Tabella 16 Canale a vecchia geometria, lato superiore

SUPERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
0	0,1	106,82	55,534	23,895	122,7416	123,6484
	0,5	6,375	11,566	1,449	13,2858	13,44717
0,5	0,1	6,151	4,178	0,899	7,489906	7,545237
	0,5	3,9	0,037	0,286	3,910648	3,958145
1	0,1	1,291	3,551	0,472	3,807764	3,835894
	0,5	1,111	0,969	0,085	1,476654	1,494589
1,5	0,1	0,138	2,124	0,29	2,148143	2,164013
	0,5	0,287	0,785	0,054	0,837562	0,847735
2	0,1	0,6	3,724	0,401	3,793281	3,821303
	0,5	0,137	0,65	0,103	0,672219	0,680383
2,5	0,1	1,234	2,042	0,253	2,399277	2,417001
	0,5	0,247	0,648	0,16	0,711697	0,720341
3	0,1	1,639	14,339	0,572	14,4437	14,5504
	0,5	0,214	1,066	0,182	1,102396	1,115785
3,5	0,1	0,896	4,089	0,306	4,197186	4,228193
	0,5	0,148	0,932	0,201	0,964847	0,976565
4	0,1	0,363	4,135	1,162	4,31048	4,342324
	0,5	0,066	0,791	0,131	0,804486	0,814257
4,5	0,1	0,237	2,646	0,484	2,700322	2,720271
	0,5	0,029	0,617	0,116	0,628479	0,636112
5	0,1	1,175	2,827	0,622	3,12401	3,147089
	0,5	0,137	0,791	0,134	0,813883	0,823769
5,5	0,1	1,324	3,051	0,31	3,340311	3,364987
	0,5	0,351	0,734	0,16	0,829191	0,839262
6	0,1	6,7	29,255	2,342	30,10365	30,32605
	0,5	0,233	1,183	0,13	1,212715	1,227444
6,5	0,1	0,627	4,084	0,488	4,160568	4,191305
	0,5	0,15	0,844	0,12	0,865584	0,876097
7	0,1	0,411	3,331	0,698	3,428073	3,453398
	0,5	0,052	0,774	0,136	0,787576	0,797142
7,5	0,1	0,116	3,41	0,922	3,534351	3,560461
	0,5	0,094	0,775	0,117	0,789399	0,798986
8	0,1	0,813	3,086	0,86	3,305142	3,329559
	0,5	0,301	0,683	0,092	0,752033	0,761167
8,5	0,1	2,789	2,047	0,81	3,553144	3,579393
	0,5	0,465	1,222	0,053	1,308556	1,324449
8,86	0,1	4,186	46,792	6,581	47,43757	47,78802
	0,5	0,39	1,845	0,075	1,88726	1,910182

Di seguito sono elencati i valori delle correnti all'interno dei conduttori per le differenti misure effettuate.

DESTRA 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
478	567	452	499
DESTRA 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
478	567	452	499

SINISTRA 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
478	562	453	497,6667
SINISTRA 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
478	562	453	497,6667

INFERIORE 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
450	560	475	495
INFERIORE 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
450	555	475	493,3333

SUPERIORE 0,1			
I1	I2	I3	I _{med}
452	561	476	496,3333
SUPERIORE 0,5			
I1	I2	I3	I _{med}
449	561	472	494

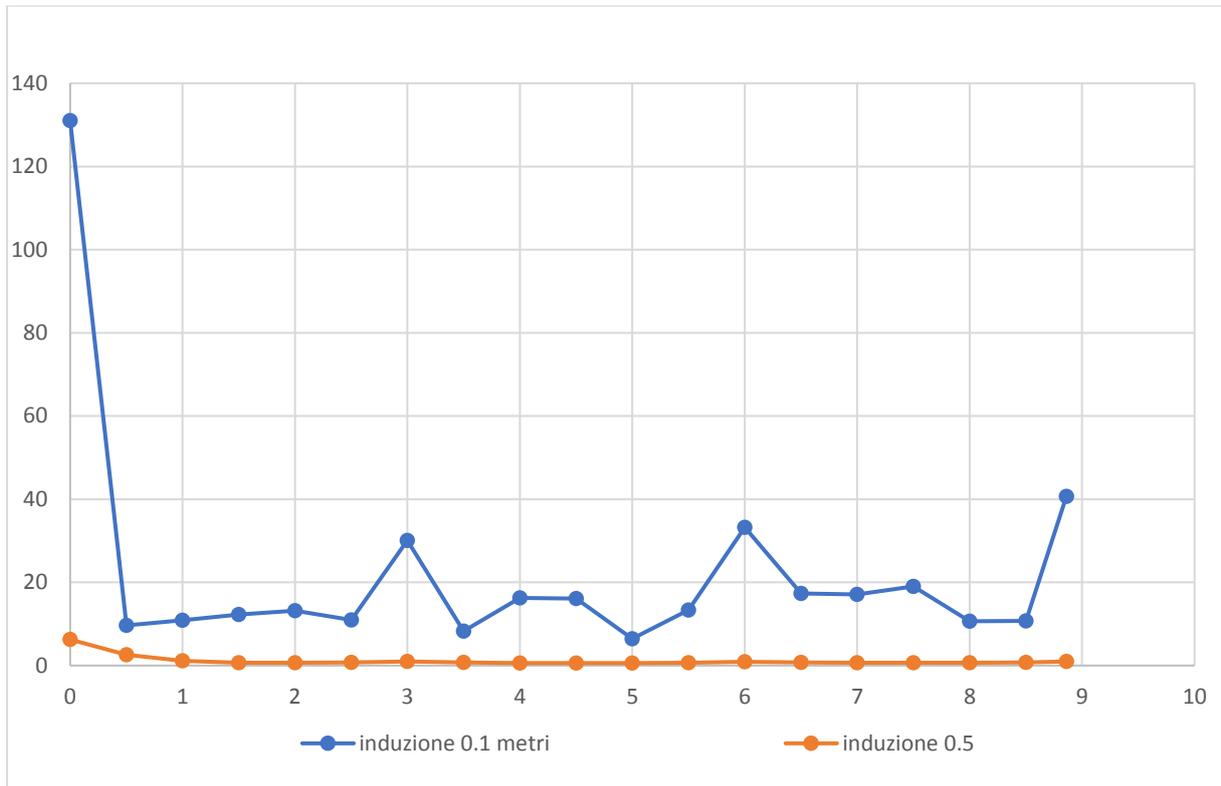


Grafico 2.9: Canale a vecchia geometria, lato destro

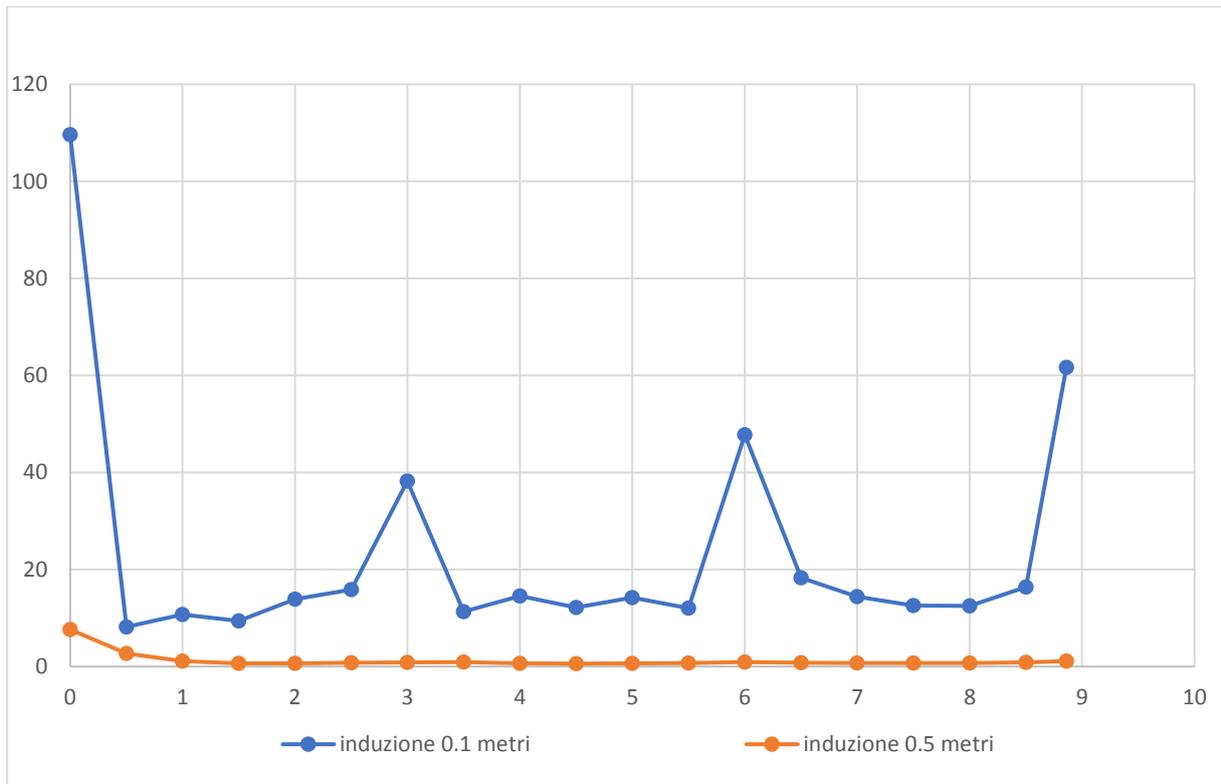


Grafico 2.10: Canale a vecchia geometria, lato sinistro

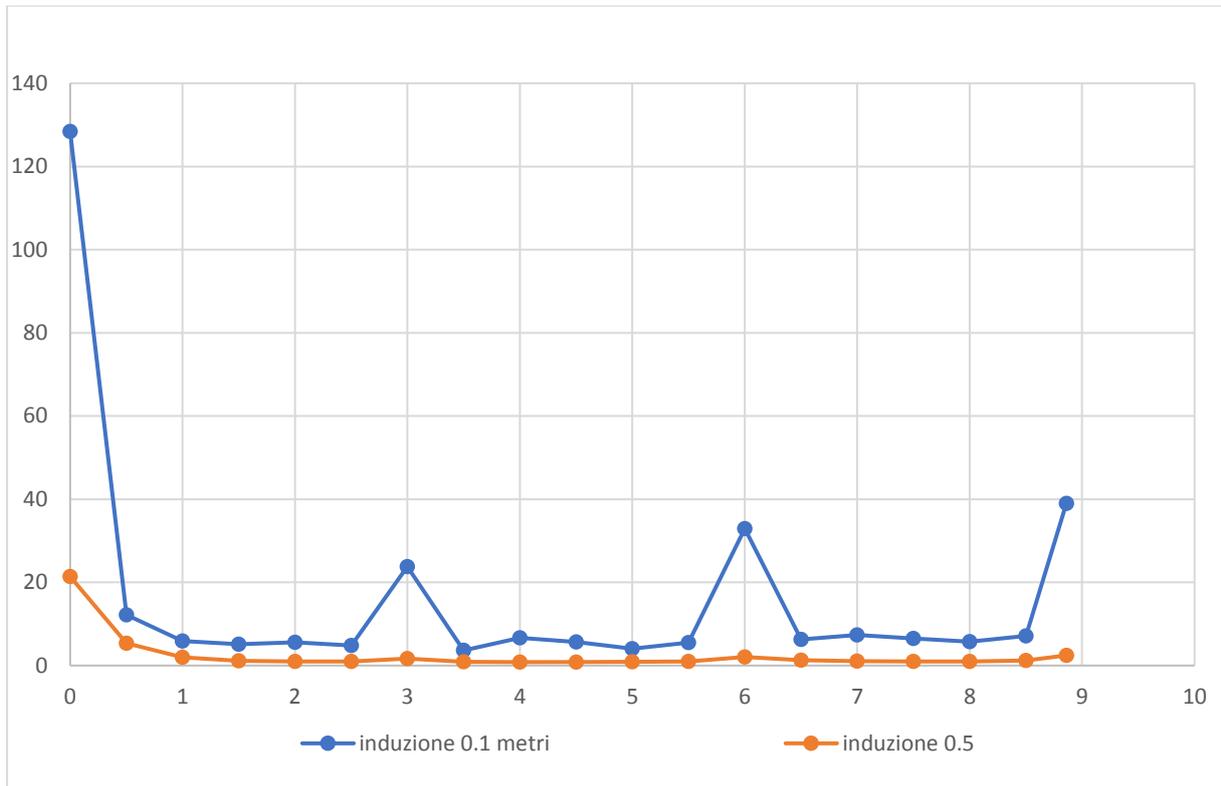


Grafico 2.11: Canale a vecchia geometria, lato inferiore

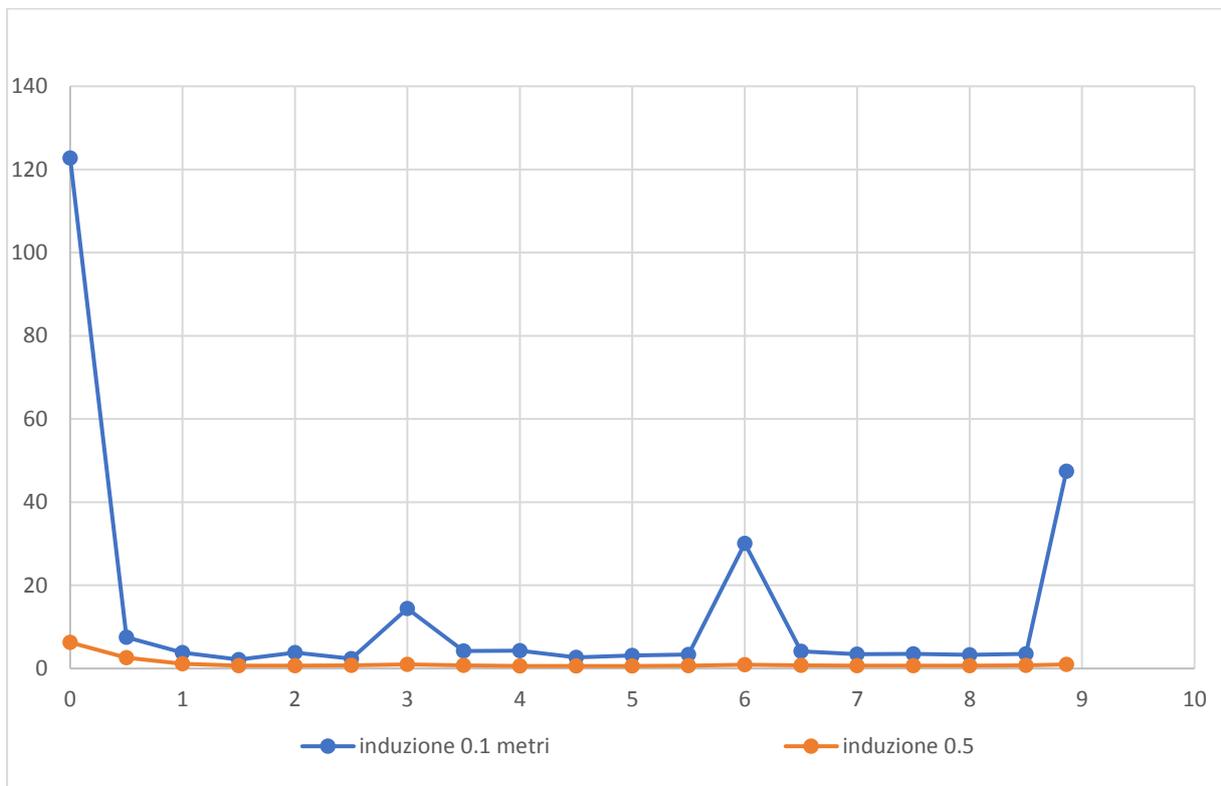


Grafico 2.12: Canale a vecchia geometria, lato superiore

Capitolo 3

Confronto canali schermanti

Mediante il riporto della corrente al valore di riferimento di 500 A, siamo in grado di valutare gli andamenti delle diverse tipologie di canale schermante: i grafici illustreranno i diversi andamenti del valore dell'induzione emessa dalla sorgente di campo dei differenti segmenti schermanti.

Una prima nota da tenere a mente è che rispetto al progetto iniziale, i prototipi dei canali con la struttura a nuova geometria e zincatura a caldo e SENDZIMIR non sono stati effettuati con una continuità di materiale magnetico e conduttivo omogeneo rispetto al progetto originale in prossimità del coperchio. Questa caratteristica potrebbe aver influito sui valori esaminati in sede di misura.

È necessario identificare un ulteriore fenomeno, il quale potrebbe aver influito sui risultati ottenuti prima di trarre conclusioni da questi andamenti: l'effetto ai bordi delle sezioni di materiale costituente il canale. È stato verificato che la presenza delle correnti parassite può essere decisamente rilevante ai fini della valutazione dell'induzione magnetica nelle fasi di misura vicino al canale schermato a causa dei campi magnetici che sono generati dalla presenza di queste ultime, che circolano in prossimità dei perimetri dei materiali conduttori. Considerando l'effetto delle correnti parassite e la geometria del tratto schermante, possiamo già intuire che nelle zone centrali del canale il valore di induzione per la posizione valutata è leggermente inferiore risentendo in maniera minore dell'effetto ai bordi grazie alla distanza dalle intersezioni del canale.

In conclusione per le misure nei pressi di una discontinuità del materiale, sia essa di natura magnetica sia di natura conduttiva, si denota un andamento molto più elevato delle grandezze in esame. Questi picchi di induzione sono causati proprio dalla non omogeneità del materiale schermante del canale il quale influisce in due modalità.

La prima è relativa ad una schermatura non omogenea la quale permette il passaggio di campo generato attraverso alcune zone non completamente schermate del canale, come possono essere le giunture tra i diversi segmenti del canale mentre il secondo effetto è all'effetto ai bordi generato dal circolo della corrente nel canale. Verranno perciò valutati i valori del fattore di schermatura in prossimità del tratto centrale dei canali.

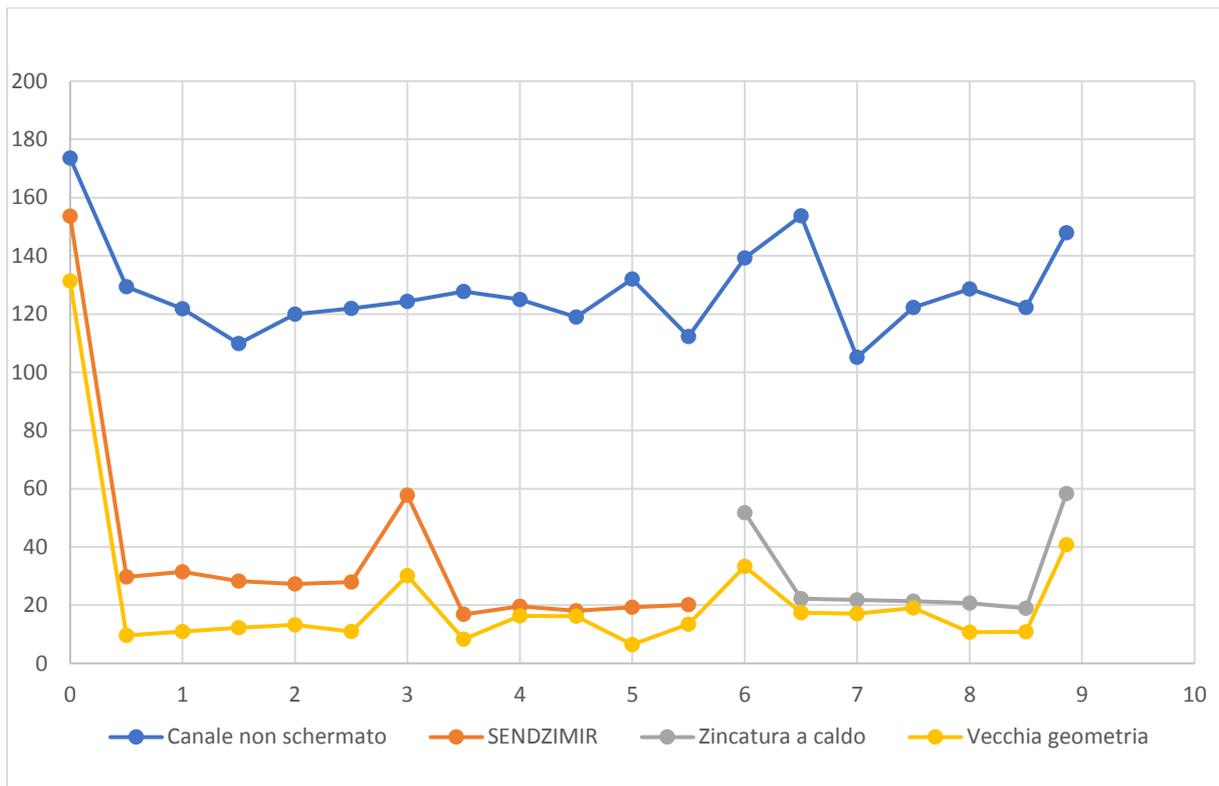


Grafico 2.13: Confronto canali, lato destro a distanza 0.1 m. I riferimento 500 A

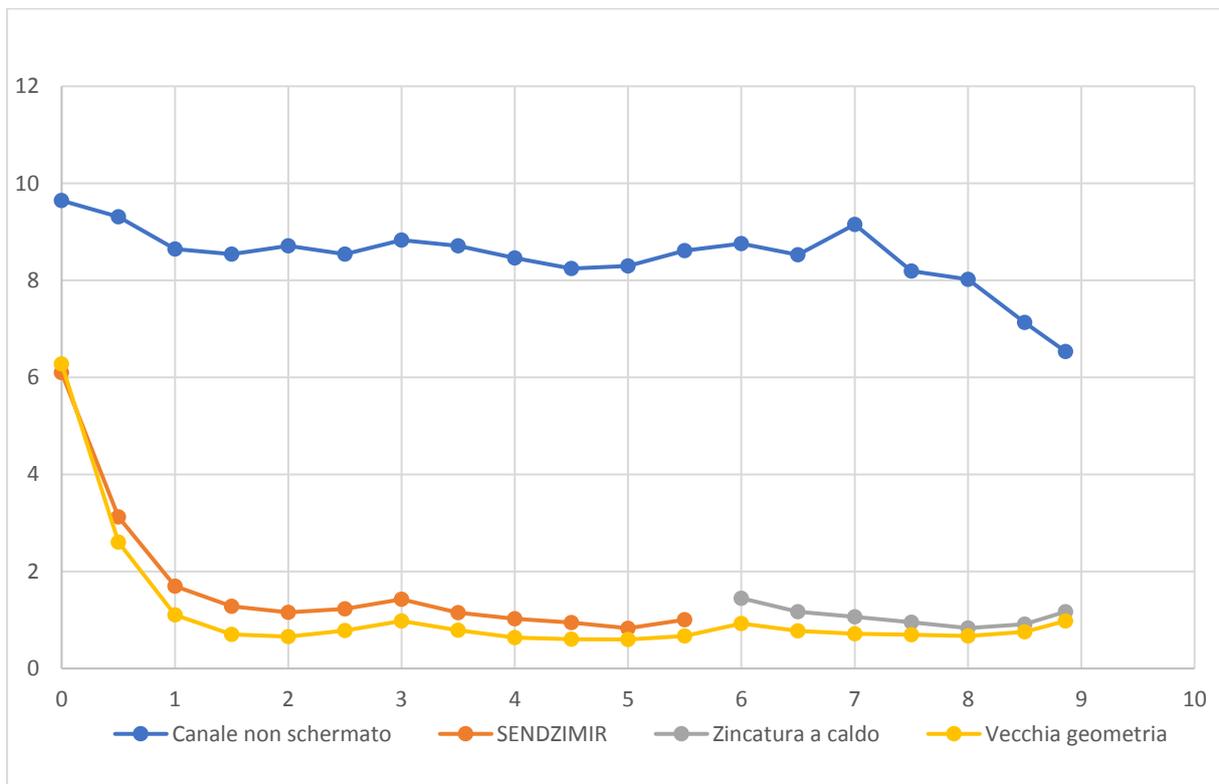


Grafico 2.14: Confronto canali, lato destro a distanza 0.5 m. I riferimento 500 A

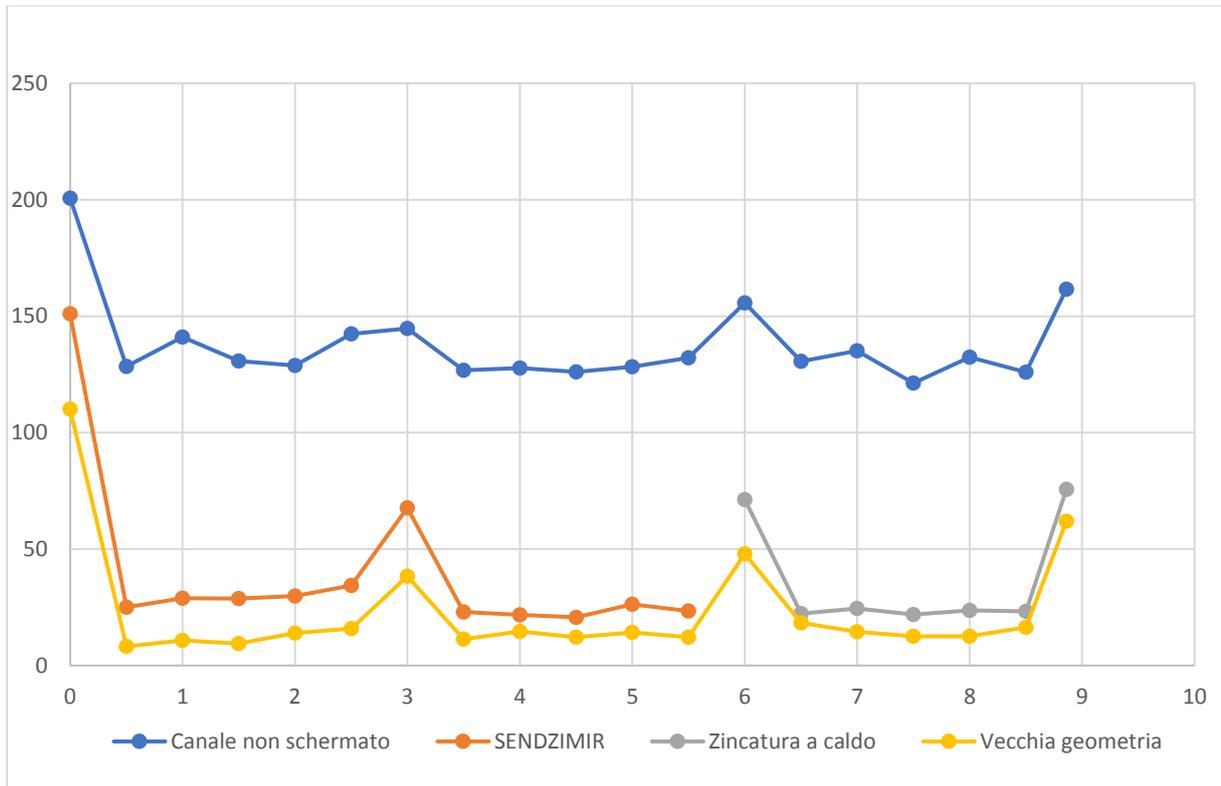


Grafico 2.15: Confronto canali, lato sinistro a distanza 0.1 m. I riferimento 500 A

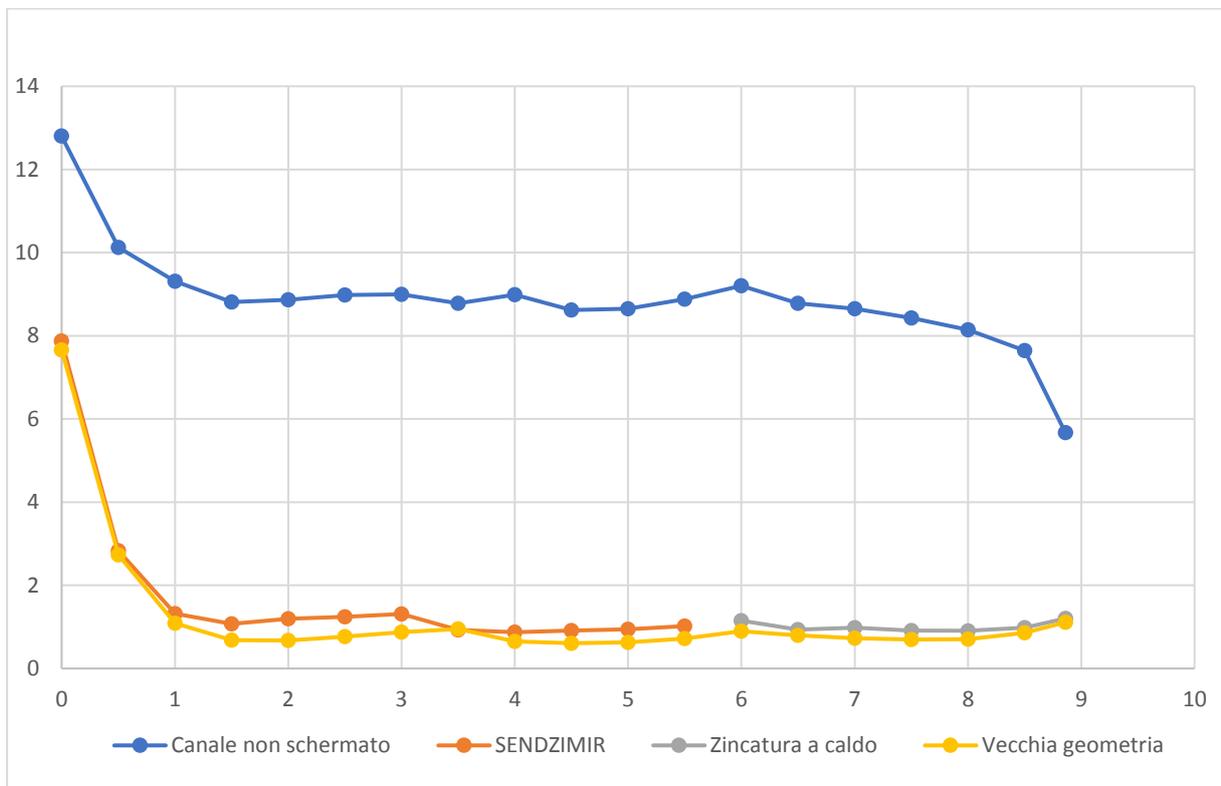


Grafico 2.16: Confronto canali, lato sinistro a distanza 0.5 m. I riferimento 500 A

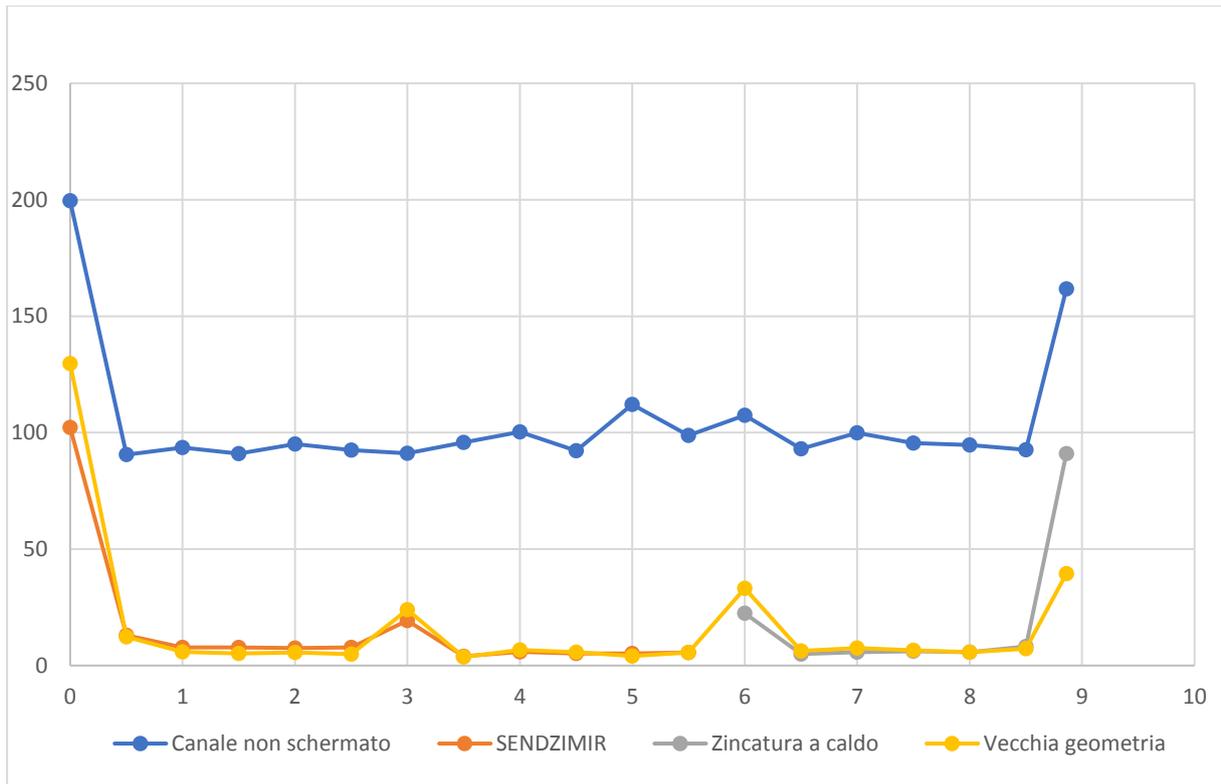


Grafico 2.17: Confronto canali, lato inferiore a distanza 0.1 m. I riferimento 500 A

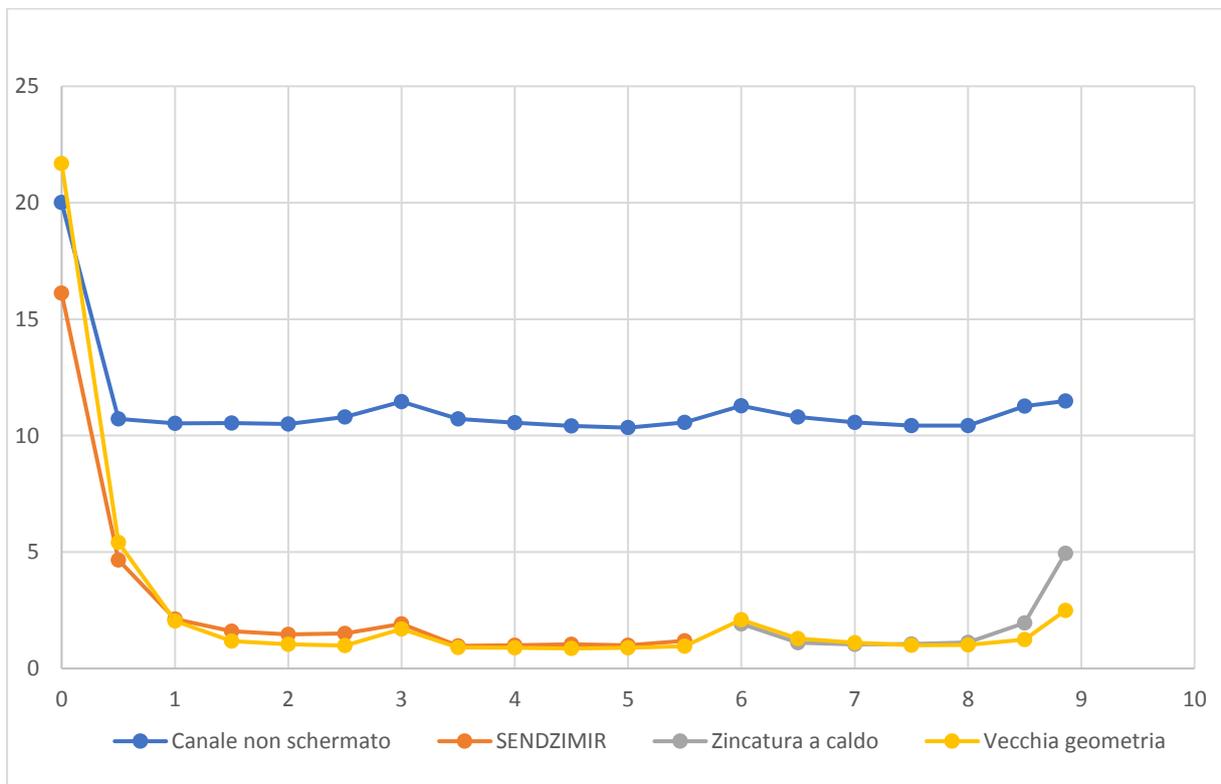


Grafico 2.18: Confronto canali, lato inferiore a 0.5 m. I riferimento 500 A

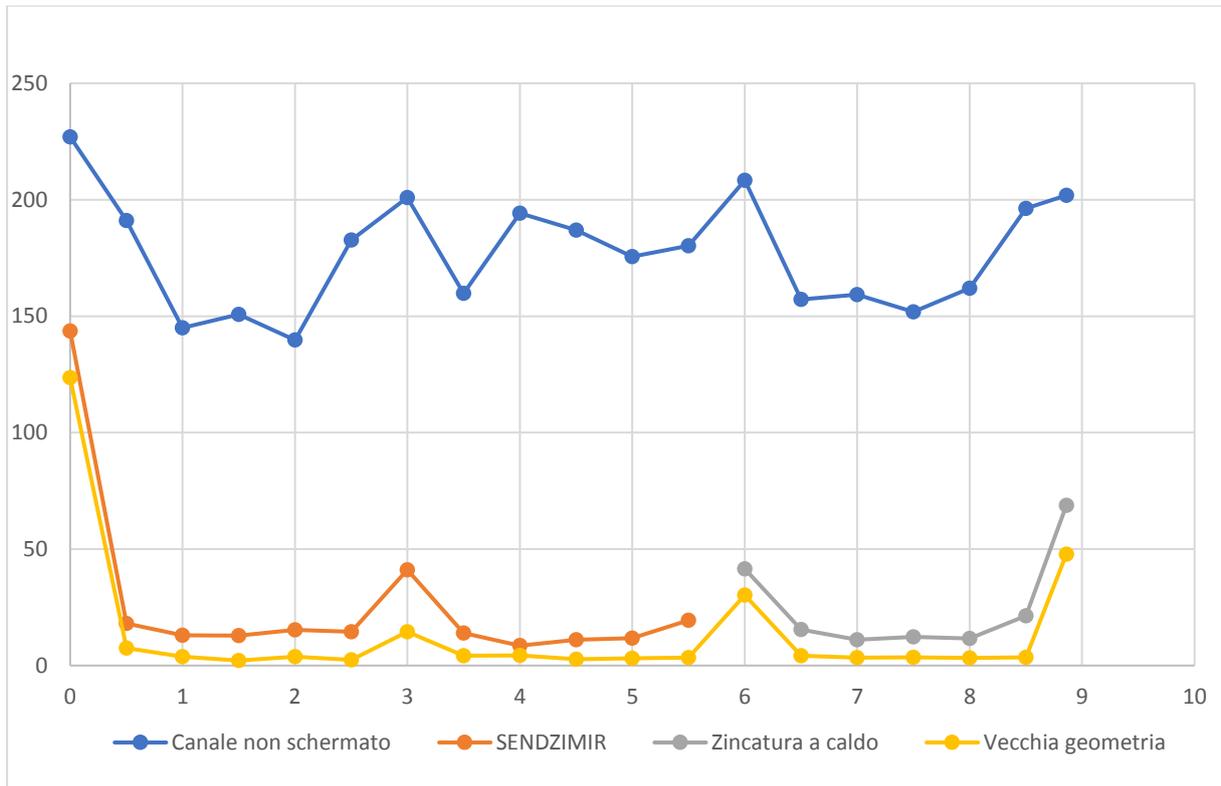


Grafico 2.19: Confronto canali, lato superiore a distanza 0.1 m. I riferimento 500 A

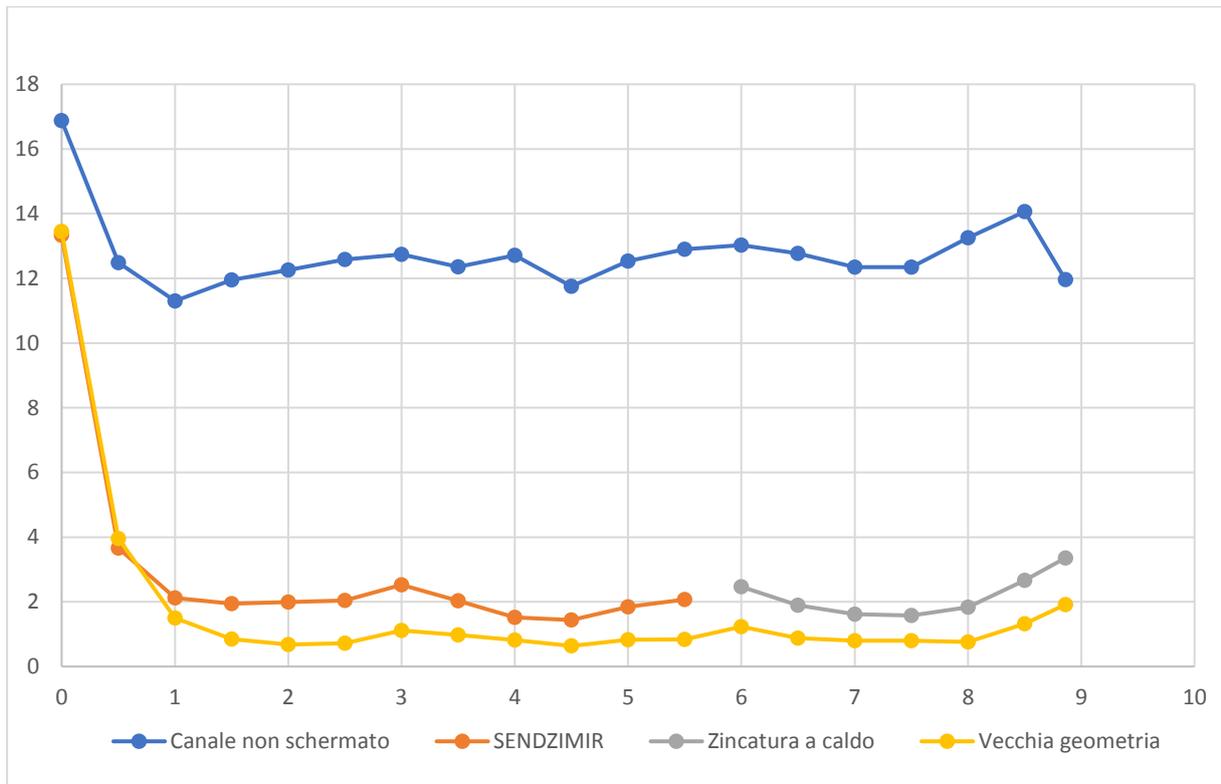


Grafico 2.20: Confronto canali, lato superiore a distanza 0.1 m. I riferimento 500 A

Capitolo 4

Simulazione

4.1 Analisi dei condotti mediante elaborazione FEMM

Al fine di valutare la bontà delle misure e dei valori del fattore di schermatura ricavati si è scelto di utilizzare il programma per il calcolo degli elementi finiti di problemi di natura magnetica FEMM. Il software di simulazione sarà supportato da uno script di Matlab utilizzando OctaveFEMM un toolbox che permette di sfruttare funzioni scritte in linguaggio di programmazione al fine di creare e impostare le caratteristiche del modello e infine simulare il problema. L'introduzione delle funzioni in Matlab utilizzerà una struttura simile a LUA, un linguaggio associato a FEMM. Il vantaggio nell'utilizzo di OctaveFEMM risiede nell'impostare i parametri del problema siano di natura geometrica, in riferimento alle dimensioni, o di natura fisica, come le caratteristiche magnetiche e conduttive dei materiali usati, attraverso dei parametri forniti da programma. Utilizzando infatti lo stesso script ma variando le dimensioni geometriche degli spessori delle differenti grandezze del canale, si sono potute valutare le quattro tipologie di canale schermante.

Lo script in Matlab verrà suddiviso in

- Definizione delle grandezze geometriche: all'interno di questa sezione saranno impostati i valori delle dimensioni del canale sia la base che il coperchio, e i parametri dimensionali dell'incastro meccanico tra coperchio e fondo del canale. Queste dimensioni saranno da valutarsi in riferimento ad una sezione ortogonale all'asse x.

```
addpath('c:\\femm42\\mfiles');  
savepath;
```

```
clear
```

```
%INTRODUZIONE VALORI SIMULAZIONE
```

```
d=0.075; %distanza tra i conduttori[m]  
L_base=0.30; %larghezza esterna canale inferiore[m]  
h_base=0.08361; %altezza ferro canale [m]  
w_fe=0.0011; %spessore canale ferro [m]  
L_top=L_base;  
h_top=0.0066;% altezza ferro canale [m]  
w_fe_top=0.00085; %Spessore ferro coperchio [m]
```

- Definizione delle grandezze del circuito: si definiranno le grandezze elettriche generanti campo magnetico, dalla sezione dei conduttori alla corrente circolante in essi. I conduttori sono considerati solamente in base al loro valore di sezione del rame e non dell'isolante in quanto quest'ultimo presenta una permeabilità magnetica simile a quella dell'aria e non andrebbe ad influire i valori di campo ottenuti. Il valore della corrente sarà il valore linearizzato al fine di ottenere il confronto diretto tra le differenti geometrie del canale.

```
f=50;%frequenza di alimentazione [Hz]
Irms= 500; %valore efficace della corrente di linea [A]
Sez_Cu=240; %sezione dei conduttori [mm^2]
r=(sqrt(Sez_Cu/pi))*0.001; %raggio dei conduttori [m]
```

- Introduzione dei parametri modificabili: si è scelto di parametrizzare la struttura del canale in funzione degli spessori costituente il canale dividendoli tra spessori costituenti il coperchio e spessori costituenti la base. In queste due suddivisioni i valori di interesse saranno riferiti allo strato esterno di ferro, allo spessore dello strato conduttore e allo spessore del materiale ferromagnetico anisotropo. In questa fase verrà eseguita la funzione di apertura del programma di simulazione nella quale creare il modello.

```
%DICHIARAZIONE DEI PARAMETRI DELLA SCHERMATURA
```

```
w_all=###; %spessore del rivestimento di alluminio [m]
w_gran=###; %spessore del rivestimento a grani orientati [m]
```

```
w_all_top=###;% spessore del rivestimento di alluminio del coperchio [m]
w_gran_top=###;% spessore del rivestimento a grani orientati [m]
```

- Definizione del problema magnetico: si è impostato tramite codice il comando che individua la tipologia del problema in FEMM, nello specifico si è utilizzata una descrizione del problema planare. Successivamente a questa funzione bisognerà richiamare dalla libreria dei materiali, nella quale si specificheranno il nome del materiale utilizzato e le sue caratteristiche fisiche utili alla simulazione del problema. I materiali potranno sia creati dall'utente, sia selezionati dalla libreria presente nel programma. Al fine della simulazione sono stati selezionati dalla libreria il materiale 'Aria' e 'Rame', mentre sono stati generati tramite parametri i materiali costituenti il

canale schermante sia quello conduttore sia quello a grani orientati.

```
openfemm;
newdocument(0);

%DICHIARAZIONE DEL PROBLEMA DI SIMULAZIONE

mi_probdef(f, 'meters', 'planar', 1.E-8, 0, 30);
mi_smartmesh(0);

%DICHIARAZIONE MATERIALI

mi_addmaterial('Ferro', 400, 400, 0, 0, 5);
mi_addmaterial('Alluminio', 1.000022, 1.000022, 0, 0, 37.7);
mi_addmaterial('Grani orientati', 10000, 10000, 0, 0, 4);
mi_getmaterial('Air');
mi_getmaterial('Copper');

%DICHIARAZIONE SORGENTI DI CAMPO

mi_addcircprop('L1', Irms, 0);
mi_addcircprop('L2', Irms*(-0.5 -i*sqrt(3/2)), 0);
mi_addcircprop('L3', Irms*(-0.5 +i*sqrt(3/2)), 0);
```

- Costruzione geometrica della sezione: mediante istruzioni si è costruita la sezione del canale chiuso con all'interno i conduttori. È stato necessario andare a imporre anche i limiti della sezione di calcolo del problema magnetico, ipotizzando un valore sufficientemente distante dalla sorgente dove non si risentisse l'effetto del campo magnetico. Questo valore è stato parametrizzato generando una circonferenza di raggio proporzionale alla dimensione di base del canale. I comandi utilizzati per generare la sezione del canale sono sostanzialmente comandi di polilinee: entrambe le funzioni lavorano per punti. Bisognerà quindi specificare le coordinate all'interno del programma di simulazione.

```
mi_drawpolyline([x1, y1; x2, y2; x3, y3; ...]);
mi_drawline(x1, x2);
```

Per disegnare le sezioni dei conduttori e i limiti della simulazione si è sfruttata la funzione

```
mi_drawarc(x1, y1, x2, y2, Alpha, maxseg)
```

L'ultimo parametro da inserire nella funzione rappresenta il numero di divisioni che il software di simulazione suddividerà l'arco creato. Per disegnare in modo più semplice la struttura di base si è scelto di mantenere in memoria il valore delle coordinate dei punti finali di ogni funzione e utilizzandoli come punti iniziali per la funzione successiva.

- Assegnazione dei materiali e elaborazione: per poter elaborare il problema è necessario associare ad ogni sezione chiusa la tipologia di materiale che costituirà quella porzione di spazio. Dalla geometria del canale si ricavano i punti nei quali andare a posizionare un marcatore di proprietà, il quale verrà utilizzato come punto di riferimento per inizializzare le proprietà del materiale nella specifica sezione chiusa. Una volta conclusa l'assegnazione si dovrà passare alla porzione di spazio successiva seguendo lo stesso algoritmo

```
mi_addblocklabel(x,y); %crea un punto di riferimento per la
sezione
mi_selectlabel(x,y); %selezione del punto di riferimento
mi_setblockprop('Ferro',0,0.15,'',0,0,0); %associazione
punto a proprietà
mi_clearselected; %deselezione del punto
```

La funzione dell'assegnazione delle proprietà del materiale è strutturata nel seguente modo: il primo input si riferisce al nome del materiale creato, i numeri successivi prima dell'assegnazione carattere rappresentano la suddivisione della griglia di simulazione all'interno del materiale. Il successivo carattere è necessario nel caso in cui il materiale fosse associato ad un circuito all'interno della simulazione, mentre le ultime due variabili riguardano l'assegnazione di proprietà di gruppi.

- Definizione di condizioni al contorno e elaborazione dei dati: è necessario definire le condizioni al contorno e lo spazio di simulazione, prima di avviare il programma. La definizione delle condizioni al contorno seguirà la stessa logica di selezione e assegnazione delle proprietà dei materiali citata precedentemente, con la differenza che si è scelto di creare in questo momento il segmento limite della simulazione.

```
mi_addboundprop('Boundary',0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0); %Genera
le condizioni al contorno del problema
mi_drawarc(3*L_base+xc,yc,-3*L_base+xc,yc,180,1); %Disegno
il limite superiore della simulazione
mi_selectarcsegment(yc,3*L_base+xc); %Selezione segmento
superiore
mi_setarcsegmentprop(1,'Boundary',0,0); %Assegnazione pro
prietà del segmento
mi_clearselected; %Deselezione del segmento
```

```

mi_analyze(1); %Esegue l'analisi del problema FEMM Magnetico
mi_loadsolution; %Visualizza la soluzione del problema
mo_showdensityplot(1,0,0.001,0,'real'); %Definisce la scala di valori visualizzati
mo_showvectorplot(1,2); %Visualizza le linee di campo e la loro direzione

```

- Raccolta dei dati: per avere una valutazione qualitativa dei punti della simulazione effettuata mediante FEMM si sceglie di utilizzare una funzione di OctavFEMM per salvare in un vettore il valore dell'induzione in uno specifico punto dello spazio di calcolo. Per l'esigenza del confronto si sono scelte le posizioni dei punti equivalenti alle distanze di misura sul canale reale.

```
%Raccolta dati
```

```

[Dx_01]=mo_getb(L_base+0.1,h1*0.5);
[Dx_05]=mo_getb(L_base+0.5,h1*0.5);
.
.
.
[Sup_05]=mo_getb(L_base*0.5,h1+0.5);

[ANS]=[ [Dx_01]; [Dx_05]; [Sx_01]; [Sx_05]; [Inf_01]; [Inf_05];
[Sup_01]; [Sup_05] ];

for r=1:1:8

    for c=1:1:2

        [Ans(r,c)]=abs(ANS(r,c));

    end

end

for r=1:1:8

    Answer(r)=sqrt(abs(Ans(r,1))^2+abs(Ans(r,2))^2);

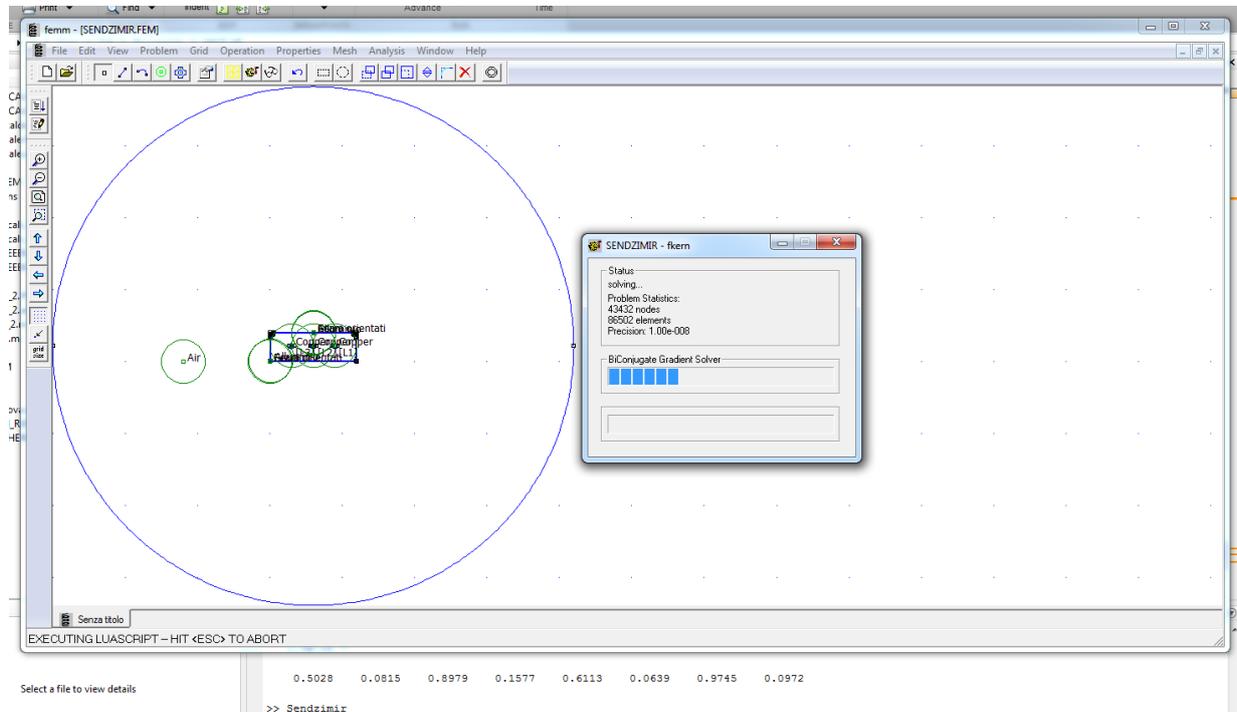
end

```

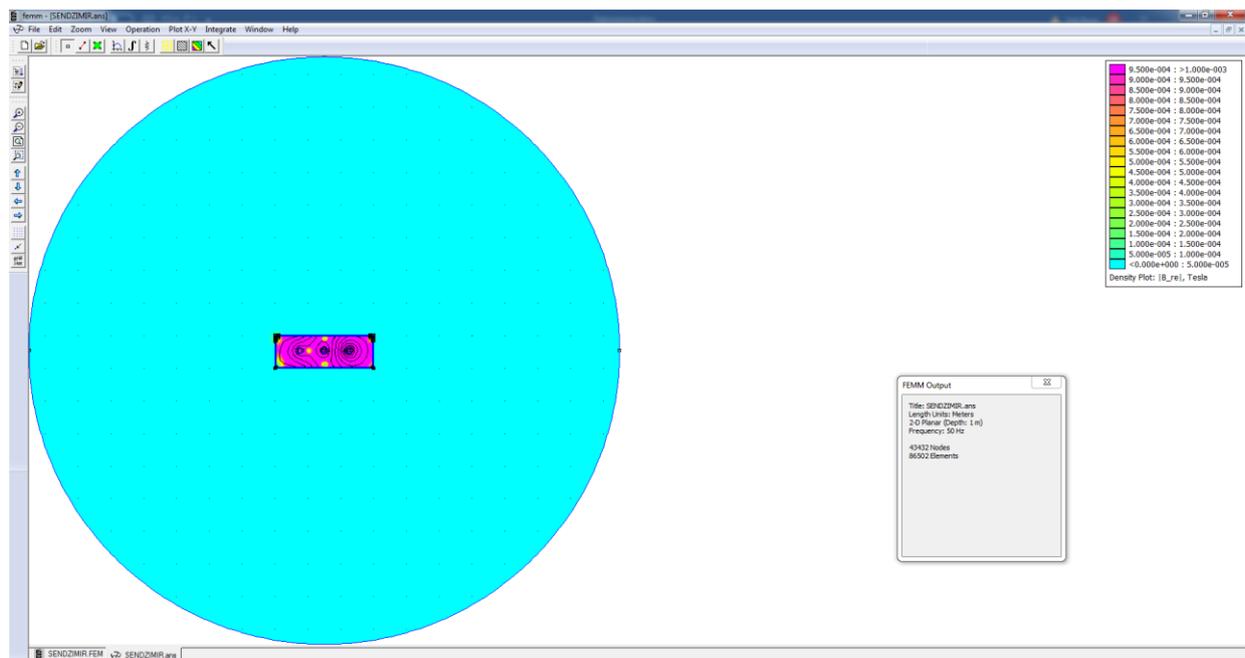
Dopo la selezione dei punti di valutazione dei valori di induzione e il loro inserimento all'interno di un vettore ausiliario, si è scelto di convertire i valori fasoriali ottenuti

dall'istruzione getb() nel corrispettivo valore del modulo dell'induzione mediante l'utilizzo di due cicli for.

Di seguito verranno presentate alcune schermate del programma utilizzato per la simulazione del canale, in riferimento allo script del canale schermato con zincatura chimica SENDZIMIR.



4.1: Videata al lancio dell'elaborazione durante la risoluzione della simulazione.



4.2: Risultato finale della simulazione FEMM

4.2 Confronto dei risultati ottenuti risultati

Il confronto dei dati ottenuti dalla simulazione e i dati misurati all'interno del canale avverrà nel tratto di canale meno soggetto alle correnti circolanti nella superficie esterna dello stesso. La scelta di questo confronto è dovuta alle operazioni compiute da FEMM e dall'impostazione del problema. Essendo quest'ultimo di natura planare, il confronto tra canale e simulazione verrà effettuato nella zona intermedia del segmento preso in considerazione.

Canale non schermato

Tabella 17 Canale non schermato: confronto simulazione e misura

DESTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	3,489	13,912	123,66	124,489	119,0143
	0,5	0,294	0,721	8,414	8,449951	8,246536
SIMULAZIONE	0,1	-	5,1	152,4	-	152,51
	0,5	-	0,2	27,4	-	27,38
SINISTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	2,966	10,797	126,91	127,403	126,1416
	0,5	0,078	0,458	8,694	8,706405	8,620203
SIMULAZIONE	0,1	-	4,3	166,6	-	166,68
	0,5	-	0,8	28,9	-	28,883
INFERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	2,851	17,71	94,165	95,85833	92,17147
	0,5	0,1	3,317	10,663	11,16746	10,4174
SIMULAZIONE	0,1	-	45,4	220	-	224,65
	0,5	-	1,5	15,2	-	15,324
SUPERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	7,685	176,77	55,403	185,4082	187,0291
	0,5	0,505	11,575	1,191	11,64707	11,7568
SIMULAZIONE	0,1	-	221,1	46,2	-	225,91
	0,5	-	15,2	1,6	-	15,287

Canale SENDZIMIR

Tabella 18 Canale SENDZIMIR: confronto simulazione e misurati

DESTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	1,167	5,474	17,145	18,03545	18,09577
	0,5	0,154	0,416	0,832	0,942866	0,946019
SIMULA- ZIONE	0,1	-	1,949	4,635	-	5,028
	0,5	-	0,066	0,812	-	0,814
SINISTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	1,084	6,784	19,218	20,40905	20,7409
	0,5	0,114	0,311	0,836	0,899229	0,913851
SIMULA- ZIONE	0,1	-	3,482	8,276	-	8,978
	0,5	-	0,093	1,575	-	1,577
INFERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	0,094	2,294	5,013	5,51375	5,227955
	0,5	0,078	0,348	1,013	1,073945	1,035959
SIMULA- ZIONE	0,1	-	1,384	5,954	-	6,113
	0,5	-	0,431	0,472	-	0,639
SUPERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	1,138	10,307	1,695	10,50725	11,10703
	0,5	0,216	1,306	0,303	1,357977	1,436506
SIMULA- ZIONE	0,1	-	9,674	1,170	-	9,744
	0,5	-	0,656	0,717	-	0,971

Canale zincatura a caldo

Tabella 19 Canale zincatura termica: confronto simulazione e misura

DESTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	2,596	9,034	19,097	21,28492	21,35611
	0,5	0,119	0,5	0,801	0,951715	0,954898
SIMULA- ZIONE	0,1	-	2,17	5,66	-	6,064
	0,5	-	0,08	1,00	-	1,000
SINISTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	1,216	6,237	20,597	21,55494	21,90542
	0,5	0,03	0,314	0,838	0,895399	0,909959
SIMULA- ZIONE	0,1	-	3,63	10,08	-	10,710
	0,5	-	0,10	1,89	-	1,890

INFERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	0,32	3,638	5,333	6,463616	6,128587
	0,5	0,144	0,491	0,969	1,0958	1,057042
SIMULA- ZIONE	0,1	-	2,32	7,55	-	7,897
	0,5	-	0,47	0,54	-	0,716
SUPERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	0,953	11,531	1,148	11,62713	12,29083
	0,5	0,204	1,442	0,32	1,4911	1,577328
SIMULA- ZIONE	0,1	-	10,59	0,51	-	10,610
	0,5	-	0,72	0,88	-	1,136

Canale a vecchia geometria

Tabella 20 Canale a vecchia geometria: confronto simulazione e misura

DESTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	0,576	2,814	15,882	16,13965	16,17199
	0,5	0,055	0,098	0,595	0,60552	0,606733
SIMULA- ZIONE	0,1	-	0,595	2,660	-	2,725
	0,5	-	0,021	0,539	-	0,539
SINISTRA		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	1,516	2,151	11,896	12,18359	12,24071
	0,5	0,034	0,105	0,596	0,606133	0,608975
SIMULA- ZIONE	0,1	-	0,595	3,109	-	3,164
	0,5	-	0,016	0,482	-	0,482
INFERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	0,799	1,887	5,307	5,688886	5,746349
	0,5	0,088	0,202	0,821	0,850052	0,86154
SIMULA- ZIONE	0,1	-	2,468	4,921	-	5,505
	0,5	-	0,172	0,29	-	0,337
SUPERIORE		X	Y	Z	B _{eff}	B ₅₀₀
4,5	0,1	0,237	2,646	0,484	2,700322	2,720271
	0,5	0,029	0,617	0,116	0,628479	0,636112
SIMULA- ZIONE	0,1	-	4,015	1,894	-	4,439
	0,5	-	0,243	0,097	-	0,261

Osservando i risultati ottenuti, dalle simulazioni si denota immediatamente che il modello utilizzato si discosta dalla realtà delle misure. Al fine di valutare meglio la differenza dei due metodi, si è scelto di rappresentare i valori di scostamento percentuale della misura rispetto al valore ottenuto dalla simulazione: il totale dei valori sul sistema reale è di 32 valori. La

suddivisione di questi ultimi è effettuata a seconda della tipologia di canale utilizzato e della posizione nella quale sono stati rilevati.

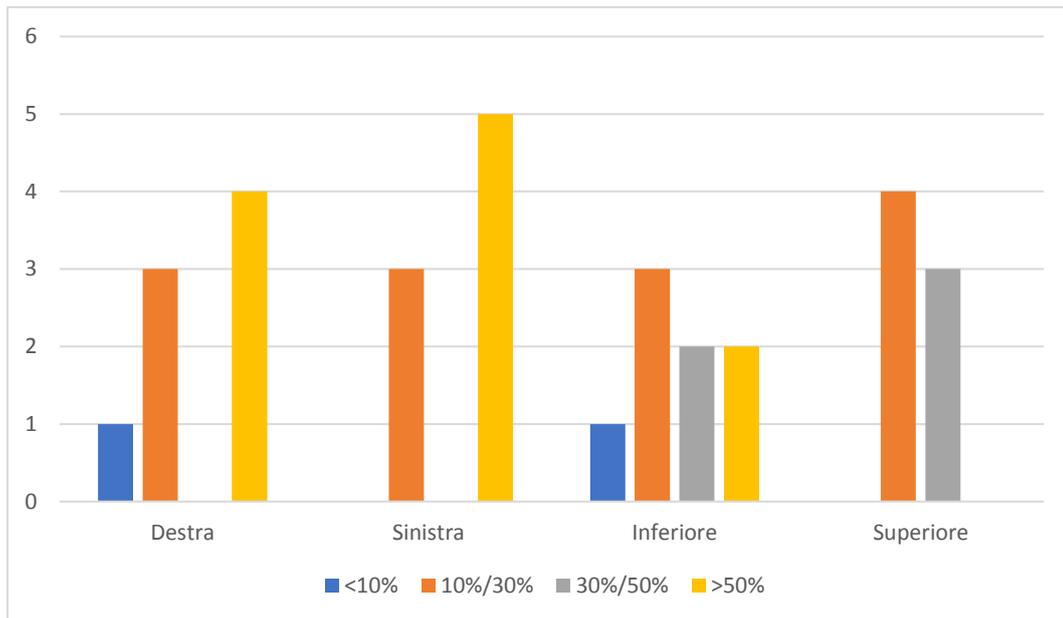


Grafico 4.1: scostamento percentuale tra valori simulati e valori misurati

Dalla suddivisione dei dati ottenuti si può osservare che i valori di induzione misurati in loco rispetto alle simulazioni effettuate mediante FEMM sono, in percentuale, maggiormente discostate sui lati perpendicolari all'asse orizzontale del canale rispetto alle misure effettuate sui i lati perpendicolari all'asse verticale.

Valutando lo scostamento rispetto alla posizione assunta dalla sonda rispetto al canale si denota il seguente andamento degli scostamenti percentuali:

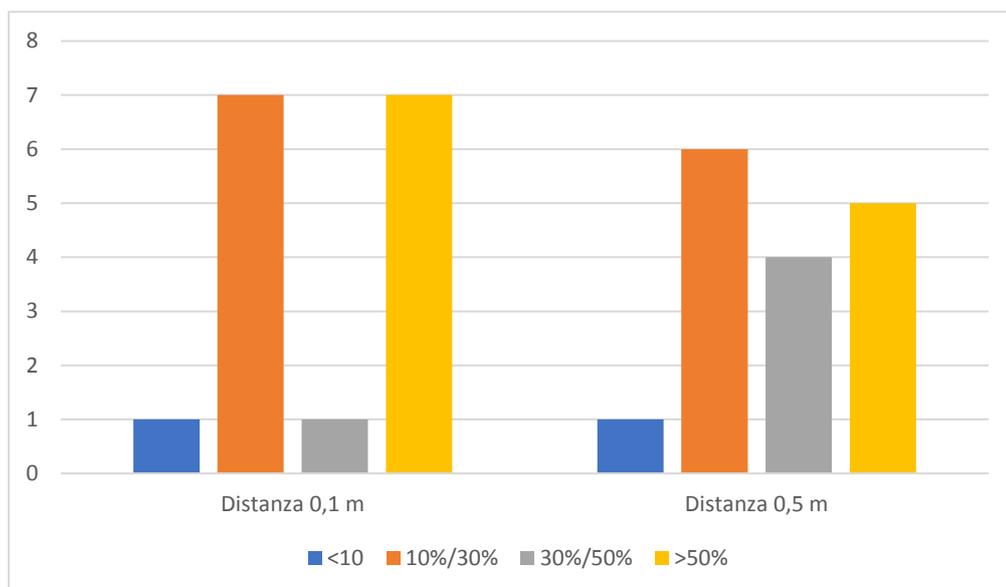


Grafico 4.2: Scostamenti percentuali in riferimento alla distanza della misura

4.3 Valutazione del fattore di schermatura

La valutazione del fattore di schermatura dei canali analizzati è effettuata seguendo la (X.X). Il valore di induzione preso in esame al fine di rappresentare il caso di sorgente non schermata è il canale privo di schermatura e costituito da ferro. Al fine di questa valutazione esplicherà il valore di schermatura per ogni posizione del canale schermante si è scelto di valutare come punto di riferimento la metà della lunghezza del singolo segmento, a causa delle considerazioni precedenti.

Tabella 21 Fattore di schermatura per canale SENDZIMIR

DESTRA	B _{500, Ferro}	B _{500, SENDZIMIR}	FS
4,5	190,143	18,09577	10,50759
	8,246536	0,946019	8,717091
SIMULAZIONE	152,51	5,028	30,33214
	23,38	0,814	28,72236
SINISTRA	B _{500, Ferro}	B _{500, SENDZIMIR}	FS
4,5	126,1414	20,7409	6,08177
	8,620203	0,913851	9,432835
SIMULAZIONE	166,68	8,978	18,56538
	28,883	1,577	18,31516
INFERIORE	B _{500, Ferro}	B _{500, SENDZIMIR}	FS
4,5	92,17147	5,227955	17,6305
	10,4174	1,035959	10,0558
SIMULAZIONE	224,65	6,1131	36,74895
	15,324	0,639	23,98122
SUPERIORE	B _{500, Ferro}	B _{500, SENDZIMIR}	FS
4,5	187,0291	11,10703	16,8388
	11,7568	1,436506	8,184304
SIMULAZIONE	225,91	9,744	23,18452
	15,287	0,971	15,74356

Tabella 22 Fattore di schermatura per canale con zincatura termica

DESTRA	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Caldo	FS
4,5	190,143	21,35611	8,903449
	8,246536	0,954898	8,636036
SIMULAZIONE	152,51	6,064	25,15007
	23,38	1	23,38
SINISTRA	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Caldo	FS
4,5	126,1414	21,90542	5,758456
	8,620203	0,909959	9,473181
SIMULAZIONE	166,68	10,71	15,56303
	28,883	1,89	15,28201
INFERIORE	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Caldo	FS
4,5	92,17147	6,128587	15,0396
	10,4174	1,057042	9,855238
SIMULAZIONE	224,65	7,897	28,44751
	15,324	0,716	21,40223
SUPERIORE	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Caldo	FS
4,5	187,0291	12,29083	15,21696
	11,7568	1,577328	7,45362
SIMULAZIONE	225,91	10,61	21,29218
	15,287	1,136	13,45687

Tabella 23 Fattore di schermatura per canale a vecchia geometria

DESTRA	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Vecchia	FS
4,5	190,143	16,17199	11,75755
	8,246536	0,606733	13,5917
SIMULAZIONE	152,51	2,725	55,96697
	23,38	0,539	43,37662
SINISTRA	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Vecchia	FS
4,5	126,1414	12,24071	10,30507
	8,620203	0,608975	14,15527
SIMULAZIONE	166,68	3,164	52,68015
	28,883	0,482	59,92324
INFERIORE	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Vecchia	FS
4,5	92,17147	5,746349	16,04001
	10,4174	0,86154	12,09161
SIMULAZIONE	224,65	5,505	40,80836
	15,324	0,337	45,47181
SUPERIORE	B ₅₀₀ , Ferro	B ₅₀₀ , Vecchia	FS

4,5	187,0291	2,720271	68,75385
	11,7568	0,636112	18,48227
SIMULAZIONE	225,91	4,439	50,89209
	15,287	0,261	58,57088

Capitolo 5

Conclusioni

Valutando i dati inerenti alla misura dei valori di induzione nello spazio circostante al canale si denota come l'andamento delle grandezze misurate rispetta i valori attesi secondo la sola conoscenza del fenomeno, ovvero un tratto per lo più costante durante la lunghezza della sezione di 3 m , con un minimo in prossimità della metà, e un picco più elevato in corrispondenza della giunzione meccanica delle due porzioni schermanti.

Prendendo in esame il grafico degli andamenti dei valori di induzione messi a confronto si evidenzia come per i casi di canale schermati, i valori misurati sono stati nettamente inferiori e molto più regolari rispetto agli stessi nella condizione di canale non schermato per l'analisi condotta a 0.1 m : nel grafico 2.13 e nel grafico 2.19 in particolare si denotano andamenti irregolari e inattesi nella terza porzione del segmento costituente il canale. Soffermandosi sugli esiti della misurazione e sulla loro rappresentazione grafica, la differenziazione dei valori si può racchiudere in due casi: il primo inerente alla porzione di canale utilizzato e il secondo inerente al termine della continuità del materiale.

Analizzando gli andamenti delle porzioni misurate si denota come nel tratto $6-8.89\text{ m}$ l'irregolarità evidenziata nel lato destro non si presenta nel lato speculare, dove l'irregolarità è decisamente più limitata. Un discorso analogo si può effettuare confrontando tra di loro la porzione di canale superiore e la porzione di canale inferiore nello stesso tratto: le differenze di andamenti non si ripresentano speculari tra di loro. Questo andamento potrebbe essere dovuto in prima valutazione, ad un errato posizionamento della sonda: dal momento in cui le misure sono state effettuate spostando fisicamente la sonda e successivamente riposizionandola con l'aiuto di un metro a nastro in corrispondenza delle diverse lunghezze. Nonostante l'accuratezza utilizzata durante le misurazioni non è improbabile che un'errata e non voluta inclinazione della sonda abbia prodotto valori differenti alla realtà. Per quanto riguarda l'andamento superiore è da evidenziare che la rilevazione dei valori misurati è stata effettuata con l'aiuto di un materiale di supporto per evitare oscillazioni dovute alla struttura di misurazione, di conseguenza si può escludere l'errato posizionamento della sonda durante le rilevazioni in questo frangente. Il secondo punto di interesse che emerge è la valutazione

del valore di induzione in prossimità della fine del segmento schermante, la cui presenza è evidente in ogni tipologia di canale. Il picco presente in prossimità della distanza 8.89 m è dovuto alla condizione di non continuità dovuta alla fine del canale. Il risultato di induzione minore è causato dalla condizione di corto circuito fornita dalla piastra e all'effetto ai bordi causato dalla geometria stessa del canale.

Analizzando ora la simulazione effettuata, la differenza consistente tra i valori misurati e quelli simulati è attribuibile al modello utilizzato durante la simulazione in FEMM, la quale operando in un contesto planare non riesce a simulare completamente il fenomeno in una situazione dove le interazioni sono dipendenti dalla geometria in un intorno del punto considerato. Un'affinazione successiva del modello, vista anche la geometria particolareggiata in prossimità dell'aggancio tra il coperchio e il fondo del canale, potrebbe sicuramente diminuire il divario tra le misurazioni effettuate e il valore rilevato dalla sonda.

L'analisi del fattore di schermatura viene effettuata solamente in due posizioni e non in modo continuo tra il punto a distanza 0.1 m e 0.5 m pertanto la valutazione potrà essere solo di riferimento puntuale e non di natura continua. La raccolta delle valutazioni dei dati raccolti mostra due comportamenti molto differenti tra loro: i fattori di schermatura ottenuti in via sperimentale, salvo per il caso di analisi della schermatura superiore del canale a vecchia geometria, sono nettamente inferiori rispetto ai valori ottenuti mediante simulazione, oscillando intorno ad un fattore di schermatura di 10. Il secondo gruppo di dati, ottenuti dalla simulazione, indica invece valori molto più elevati di questo rapporto., soprattutto per la condizione di schermatura a vecchia geometria.

Questa differenziazione così marcata nei risultati è sicuramente dovuta alle differenze dello scostamento tra i valori effettivamente rilevati sul sistema e i risultati ottenuti mediante simulazione. Essendo il fattore di schermatura ottenuto da un rapporto di grandezze, si ha che lo scostamento totale del valore del rapporto dipenderà dallo scostamento dei singoli fattori valutati.

In conclusione, valutando le misurazioni effettuate in sede aziendale, si denota come il canale a vecchia geometria presenti un fattore schermante superiore al canale in tipologia SENDZIMIR e al canale con zincatura termica per quanto riguarda le sezioni laterali e la sezione superiore, mentre i fattori di schermatura sono confrontabili tra tutte e tre le configurazioni per quanto riguarda la sezione inferiore. Per quanto riguarda il modello della simulazione, quest'ultimo dovrà essere implementato se si volesse utilizzare come unico metodo di

valutazione del fattore di schermatura la simulazione FEMM del canale con la parametrizzazione degli spessori.

Citazioni e sitigrafia

Figura 1:

https://www.researchgate.net/profile/Gerald_Dionne/publication/250183127/figure/fig2/AS:669584906539020@1536652890560/Instantaneous-t-0-sinusoidal-trace-of-an-electromagnetic-signal-of-wavelength-l.png

Figura 2:

Ahmed Hossam-Eldin, Wael Mokhtar , Ehab Mohamed Ali , "Effect of Electromagnetic Fields from Power Lines on Metallic Objects and Human Bodies", *International Journal of Electromagnetics and Applications*, Vol. 2 No. 6, 2012, pp. 151-158. doi: 10.5923/j.ijea.20120206.03.

Figura 3:

A. Canova, I campi elettromagnetici: richiami e definizioni generali

1: A. Canova, Legislazione in tema di campi elettromagnetici

2: A. Canova, Legislazione in tema di campi elettromagnetici

3: A. Canova, Legislazione in tema di campi elettromagnetici

4: A. Canova, Legislazione in tema di campi elettromagnetici

5: Sati Shelding, Prodotti e servizi per la schermatura elettromagnetica