

# **Campo magnetico disperso da elettrodotti ad alta tensione: validazione di una metodologia avanzata di valutazione basata su modelli 3D di linee elettriche e territorio**

Andreuccetti, D.<sup>(a)</sup>, Colonna, N.<sup>(b)</sup>, Fossi, R.<sup>(c)</sup> e Zoppetti, N.<sup>(a)</sup>

(a) IFAC-CNR (Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche),  
via Madonna del Piano, 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI),

D.Andreuccetti@ifac.cnr.it, N.Zoppetti@ifac.cnr.it

(b) ARPAT (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana), Dipartimento provinciale  
di Pisa, U.O. Infrastrutture di mobilità, reti elettriche e di comunicazione,  
via Vittorio Veneto, 27 - 56100 Pisa, N.Colonna@arpat.toscana.it

(c) ARPAT (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana), Dipartimento provinciale  
di Firenze, U.O. Infrastrutture di mobilità, reti elettriche e di comunicazione,  
via del Ponte alle Mosse, 211 - 50144 Firenze, R.Fossi@arpat.toscana.it

## **Riassunto**

*Tra ARPAT ed IFAC è attiva da oltre due anni una collaborazione finalizzata allo sviluppo del catasto regionale degli elettrodotti ed alla realizzazione di un'applicazione che ne utilizza i dati ai fini della determinazione della distribuzione del campo magnetico disperso nell'ambiente.*

*Recentemente, si è intrapresa un'estesa fase di validazione di questa applicazione, basata su una serie di confronti tra le previsioni teoriche ed i risultati di apposite misurazioni. Tali confronti hanno preso in considerazione alcune linee pilota adatte a mettere alla prova una o più caratteristiche innovative del modello adottato per il calcolo.*

*La varietà dei casi esaminati - di cui viene presentata una selezione - ha permesso di trarre alcune considerazioni generali sull'uso dei modelli numerici per la previsione dei campi degli elettrodotti. È stato anche possibile evidenziare vantaggi e limiti del particolare modello utilizzato ed apprezzare l'influenza di vari fattori sullo scostamento tra valori misurati e calcolati. Tra questi si distinguono l'accuratezza del posizionamento (ed in particolare dell'attribuzione della quota) tanto dei punti di valutazione quanto dei sostegni delle linee ed alcuni aspetti legati alla rappresentazione delle sorgenti. Si è visto, per esempio, quanto risulti importante identificare correttamente il parametro di tesatura meccanica dei conduttori e come questo si discosti spesso dal valore fornito dal gestore.*

## **A) INTRODUZIONE**

Dal 1° settembre 2003 è attiva tra ARPAT e IFAC una collaborazione finalizzata allo sviluppo di un sistema integrato di valutazione preventiva dell'inquinamento elettromagnetico ambientale a bassissima frequenza. Essa riguarda la realizzazione del Catasto degli Elettrodotti della Regione Toscana (CERT) e di un insieme di applicazioni per il suo utilizzo, tra le quali un programma di calcolo – denominato PLEIA (*Power Line Electromagnetic Impact Assessment*) – per la determinazione della distribuzione del campo magnetico disperso sul territorio da un insieme di linee elettriche [1]. Il programma, utilizzando come fonti di dati il catasto, la cartografia numerica regionale ed un modello digitale dell'altimetria del territorio della Toscana, permette di tenere conto:

- della posizione georeferenziata di tutti i sostegni e di tutti i punti dove si determina il campo, con riferimento ad un sistema coerente di coordinate cartografiche;
- della quota di tutti gli elementi georeferenziati (sostegni e punti di calcolo);
- della conformazione, dell'altezza e dell'orientazione di ogni sostegno;
- delle caratteristiche meccaniche ed elettriche di ciascun conduttore considerato singolarmente e, in particolare, della tensione meccanica ed elettrica, della corrente e della fase su di esso.

L'adozione di un modello tridimensionale così dettagliato, tanto per le linee elettriche quanto per il territorio attraversato, consente di realizzare valutazioni molto realistiche e di affrontare problemi che non potrebbero essere trattati con sufficiente accuratezza per mezzo del tradizionale algoritmo bidimensionale codificato dalla norma CEI 211-4 [2]. È il caso, per esempio, dell'incrocio di linee diverse, delle campate fortemente arcuate o rampanti, dei cambi di direzione pronunciati. Condizione necessaria affinché tutto ciò sia possibile è ovviamente quella di disporre dei dati necessari con un sufficiente grado di affidabilità e precisione.

La fase di validazione del programma PLEIA, che ARPAT e IFAC hanno intrapreso insieme negli ultimi due anni e recentemente concluso, ha avuto lo scopo, da una parte, di evidenziare le maggiori potenzialità offerte dall'applicazione rispetto ai programmi esistenti e, dall'altra, di accertare il grado di criticità delle informazioni necessarie, in modo da aver presenti quali conseguenze ricadano sulle valutazioni effettuate in caso di indisponibilità di dati completi (e quindi di utilizzo di valori tipici) o di scarsa accuratezza degli stessi.

A questo fine, si è dato la precedenza, nel popolamento dell'archivio CERT, ad alcune linee pilota, situate nei bacini di Pisa e di Firenze, considerate di interesse prioritario perché adatte a mettere alla prova una o più caratteristiche innovative del modello adottato per il calcolo.

## B) MATERIALI E METODI

La validazione è stata condotta sulla base di una serie di confronti tra previsioni teoriche e risultati di misurazioni. Per entrambi gli aspetti, modellistico e misuristico, si è definita ed applicata una procedura il più possibile standardizzata, che prevede i passi sotto descritti.

### 1) SELEZIONE E MODELLAZIONE DELLE LINEE

Il primo passo è stato la selezione delle linee elettriche e dei siti di misura e valutazione teorica da coinvolgere nel processo. Le linee prescelte sono state modellate inserendo nel catasto i dati forniti dai rispettivi gestori; numerosi sopralluoghi di ricognizione preliminare sul territorio hanno permesso di evidenziare e correggere almeno le discrepanze più macroscopiche tra questi dati e la situazione reale, come l'esistenza di sostegni non documentati o le palesi incongruenze nelle tipologie dei sostegni o nelle modalità di cablaggio. Nel corso dei sopralluoghi si sono anche individuati i siti più idonei ad effettuare le misurazioni e le valutazioni teoriche.

Nel **bacino di Pisa** sono stati selezionati due elettrodotti e cinque siti.

Il primo elettrodotto è la linea 380 kV semplice terna n.314 La Spezia-Acciaio, limitatamente al breve tratto di 5 campate, per complessivi 3 chilometri circa, che scavalca le colline alla base del Monte Pisano. Questo tratto è interessante soprattutto per la conformazione del territorio attraversato: le campate considerate, infatti, oltre ad essere particolarmente lunghe, sono anche caratterizzate da forti dislivelli, una situazione che permette di valutare l'efficacia del modello tridimensionale delle catenarie. La ricognizione su questa linea ha avuto luogo il 16 marzo 2004; lungo il tratto considerato sono stati individuati due siti adatti alle misurazioni, denominati rispettivamente **Asciano** e **Agnano**. Inizialmente, non è stato possibile effettuare misure specifiche, poiché la linea era solo saltuariamente in esercizio. Per gli scopi della validazione, sono stati pertanto utilizzati i risultati di rilevazioni precedentemente effettuate dai tecnici della sezione ARPAT di Pisa, in prossimità di una abitazione nelle vicinanze di Asciano. Nel corso del 2005, la linea è tornata ad essere esercitata con continuità ed è stato quindi possibile considerare un secondo sito in località Agnano, presso il quale sono state eseguite nuove misurazioni in data 18 ottobre 2005. Sono stati considerati cinque punti di misura presso abitazioni della zona: due situati al secondo piano, i restanti tre al piano terreno. Tutti questi punti si trovano sotto i conduttori dell'elettrodotto. La campata che interessa questi punti ha una lunghezza in pianta di oltre 940 metri e presenta un dislivello di oltre 200 metri tra i punti di sospensione dei conduttori.

Figura 1: conformazione della testa del sostegno presso il sito **Ammazzettamento**



In ambito più urbanizzato, è stato considerato l'elettrodotto a 132 kV doppia e semplice terna n.521 Porta a mare-Filettole, del quale è stato modellato un tratto di 12 campate lungo poco più di 2 chilometri, a partire dalla stazione di Pisa Porta a mare e fino alla località Barbaricina; anche qui, la ricognizione preliminare ha avuto luogo il 16 marzo 2004. Di particolare interesse è risultato il tratto iniziale della linea, lungo il quale sono stati individuati tre siti di misura, che si differenziano per le caratteristiche dei sostegni o del cablaggio. Il primo sito, denominato **Argine**, è interessante in relazione al cablaggio dei conduttori della terza campata della linea, realizzato con tecnologia a doppia terna *split-phases*. Il secondo sito, denominato **Ammazzettamento**, è posto nelle vicinanze di un sostegno (raffigurato in Figura 1) dove il tracciato della linea forma un angolo pronunciato (49°) e presso il quale si passa dalla modalità di cablaggio doppia terna a quella a semplice terna. Infine, il terzo sito, denominato **Scuola**, è caratterizzato dalla presenza di un angolo ancora più pronunciato del precedente (circa 65°); in questo caso il tratto di linea è a semplice terna sia a monte sia a valle del sostegno. I rilievi strumentali di induzione magnetica in questi siti sono stati eseguiti il 18 maggio 2004 ed integrati con nuove misurazioni il 18 ottobre 2005.

Nel **bacino di Firenze** sono stati selezionati due elettrodotti e due siti.

Gli elettrodotti in questione sono le linee a 132 kV n.407 S.Lorenzo a Greve-Rifredi (41 campate per una lunghezza complessiva di circa 8 km) e n.409 Casellina-Rifredi (43 campate per complessivi 9 km circa). Le due linee originano presso stazioni piuttosto distanti e quindi seguono inizialmente percorsi indipendenti; poi, per un tratto intermedio, pur restando separate, seguono percorsi vicini, si

intersecano o corrono parallele; infine, nell'ultimo tratto, esse si ricongiungono a formare un unico elettrodotto a doppia terna. Le ricognizioni lungo tali linee hanno avuto luogo nei giorni 13 e 19 novembre 2003 e 2 marzo 2004. Il primo dei siti selezionati, denominato **Argingrosso**, si trova nella zona intermedia, in un punto dove le due linee si incrociano approssimativamente ad angolo retto. Il secondo sito, denominato **Ponte di Mezzo**, si trova invece nel tratto finale a doppia terna, lungo l'argine di un torrente che corre quasi esattamente sotto i conduttori, cosicché il sito è particolarmente indicato per evidenziare l'effetto dovuto alla variazione del franco delle catenarie. Tutti i rilievi di induzione magnetica in questi siti sono stati effettuati il 30 marzo 2004.

## 2) MISURAZIONI

Come secondo passo nel processo di validazione, si sono eseguite le campagne di misura dell'induzione magnetica a 50 Hz nei siti selezionati, avvalendosi di sonde Emdex II della Enertech Consultants, le cui principali caratteristiche sono riportate in Tabella 1.

Salvo eccezioni, per ciascuna campagna si sono utilizzate due sonde Emdex II, di cui una lasciata ferma in un punto prefissato e l'altra utilizzata per i rilevamenti nei vari punti del sito. Lo strumento fisso ci ha permesso di avere indicazioni in merito alla stabilità delle correnti sulle linee coinvolte e, in alcuni casi, di correggere i valori rilevati per tenere conto delle variazioni. I rilevamenti sono stati acquisiti ad una altezza di un metro da terra, registrando la risultante del vettore induzione magnetica in modalità "larga banda".

Tabella 1: caratteristiche della sonda Emdex II

Campo di misura	Da 0.01 a 300 $\mu$ T
Risoluzione	0.01 $\mu$ T
Precisione tipica	$\pm 1$ %
Massima frequenza di campionamento	40 misure al minuto
Metodo di misura	3 sensori vero valore efficace
Banda di frequenza	Larga banda: 40-800 Hz
	Armoniche: 100-800 Hz

## 3) VALUTAZIONI TEORICHE E CONFRONTO

Acquisiti dal gestore i valori delle correnti sulle linee nei periodi delle misure, sono state effettuate le valutazioni teoriche nei siti prescelti, impiegando il programma PLEIA e modellando le linee sulla base dei dati inseriti nel catasto. È stato quindi redatto un primo confronto tra misure e calcoli. Per i dettagli sul modello e sull'algoritmo di calcolo utilizzati da PLEIA si rimanda al già citato riferimento [1].

## 4) ULTERIORI VERIFICHE

Laddove il primo confronto ha fornito risultati non completamente soddisfacenti, si è tornati sul territorio, sia per eseguire nuove misure di induzione magnetica, sia - soprattutto - per verificare meglio i dati topografici e strutturali delle linee coinvolte, avvalendosi anche di un telemetro laser adatto ad effettuare rilievi di franco da terra dei conduttori. Per tutti i siti presi in considerazione è stato possibile confrontare il franco misurato con quello ricavato utilizzando i dati documentali.

## C) RISULTATI E DISCUSSIONE

Per esigenze di spazio, ci limitiamo a presentare e commentare i risultati delle misurazioni e delle valutazioni teoriche solo per un sottoinsieme dei siti esaminati, includendo i casi che presentano un interesse più evidente e generale. Per tutti i risultati presentati valgono le seguenti considerazioni.

- I valori di corrente di linea forniti dal gestore ed utilizzati per i calcoli, i valori di induzione magnetica misurati e quelli calcolati sono da intendersi come **valori efficaci**.
- Le barre di errore corrispondenti alla precisione tipica dello strumento utilizzato ( $\pm 1\%$ ) non sono apprezzabili con la scala utilizzata nei grafici, anche perché coperte dal simbolo che rappresenta il valore misurato.

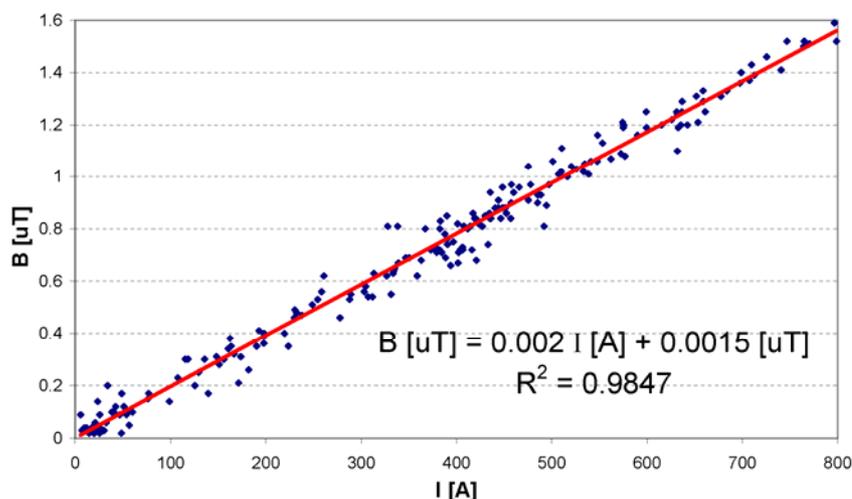
### 1) BACINO DI PISA – SITO AGNANO

Nel sito di validazione denominato **Agnano** sono stati individuati, come si è detto, cinque punti di misura, che indicheremo convenzionalmente con le diciture "punto 1"... "punto 5". In essi sono stati eseguiti rilevamenti dell'induzione magnetica in diverse occasioni e con varie modalità.

In due dei cinque punti (ed esattamente nel punto 2 e nel punto 3), posti entrambi al secondo piano di edifici adibiti ad abitazione, sono stati eseguiti dei monitoraggi in continua, rispettivamente a gennaio 2005 e a novembre dello stesso anno. In base a questi monitoraggi, sono state costruite le rette di regressione che mettono in relazione i valori di induzione magnetica misurati con quelli della corrente circolante sulla linea, rilevata dal gestore ad intervalli di 15 minuti: in Figura 2, riportiamo a titolo di esempio i valori misurati e la retta di regressione relativi al punto 2. La pendenza della retta costituisce, per ogni punto, un parametro che caratterizza il rapporto tra campo misurato e corrente sulla linea, in modo depurato dagli errori accidentali, dalle fluttuazioni dell'intensità della corrente e dalle conseguenze della non perfetta coincidenza degli istanti di rilevamento dell'induzione magnetica e della corrente. In ultima analisi, è il valore di questo parametro che viene confrontato con i risultati

delle simulazioni numeriche, che sono state tutte eseguite utilizzando un valore di corrente nominale di 1000 A.

Figura 2: valori di induzione magnetica rilevati durante il monitoraggio in continua nel punto di misura 2 del sito **Agnano** in funzione della corrente sulla linea e relativa retta di regressione lineare



Nei restanti tre punti sono state eseguite invece solo delle misure “spot” e la validazione si è riferita al valore di corrente cronologicamente più vicino. Il valore di induzione magnetica misurato è stato poi scalato per riportarsi alla corrente di 1000 A e poter quindi effettuare il confronto con le valutazioni teoriche.

In Tabella 2 sono riportati i risultati delle misure e dei calcoli del campo magnetico e del franco da terra effettuati presso ogni punto.

Le misure di franco sono state effettuate con un telemetro laser, allontanandosi in direzione trasversale all’asse della linea, partendo dal punto di misura del campo magnetico e rilevando la distanza tra il conduttore e la sua proiezione sul terreno. Il franco calcolato si riferisce al punto del conduttore posto sulla verticale del punto di misura, le cui coordinate planimetriche sono state desunte dalla cartografia. La quota assoluta di tale punto è stata calcolata utilizzando l’espressione della catenaria e tiene quindi conto della posizione e della struttura dei sostegni e del parametro di tesatura meccanica del conduttore più basso. La quota a terra è stata ricavata dal modello digitale del terreno.

Come è possibile vedere, la valutazione teorica è in buon accordo con le misure e questo accordo – in linea di massima – è tanto migliore quanto più accuratamente i dati disponibili permettono di ricostruire la corretta geometria dei conduttori.

Tabella 2: misure e valutazioni teoriche del franco da terra e dell’induzione magnetica (normalizzata ad una corrente di 1000 A) nei cinque punti del sito **Agnano**

Punto	Franco da terra misurato [m]	Franco da terra calcolato [m]	Errore relativo sul franco	Induzione magnetica misurata [ $\mu$ T]	Induzione magnetica calcolata [ $\mu$ T]	Errore relativo sull’induzione magnetica
1	42.6	43.1	1.2 %	1.11	1.10	1.3 %
2				2.00	2.00	0.20 %
3				1.31	1.33	1.2 %
4	40.9	38.9	4.9 %	1.21	1.14	5.7 %
5	29.2	29.4	0.68 %	1.98	2.04	2.9 %

## 2) BACINO DI PISA – SITO AMMAZZETTAMENTO

Le misure in questo sito hanno riguardato un insieme di 14 punti allineati lungo una direzione approssimativamente bisettrice dell’angolo che l’elettrodotto descrive in corrispondenza del sostegno di Figura 1. Modellando la linea con i dati forniti dal gestore (altezza da terra del conduttore più basso pari a 23 m, parametro della catenaria pari a 1050 m), si possono osservare sensibili scostamenti fra misure e simulazioni. Ci si è quindi chiesti quali potessero essere le cause delle differenze riscontrate. Vista la particolare struttura del sostegno presso cui si trova il sito, si è provato ad inserire nel modello di calcolo anche i vari spezzoni di conduttore usati per il cambio di tipologia di cablaggio da doppia a semplice terna, utilizzando per i loro parametri meccanici dei valori ritenuti plausibili. Si è anche provato a ridurre, portandola a 20 m, l’altezza da terra del conduttore più basso e ad utilizzare un diverso valore (pari a 300 m) del parametro di tesatura dei conduttori.

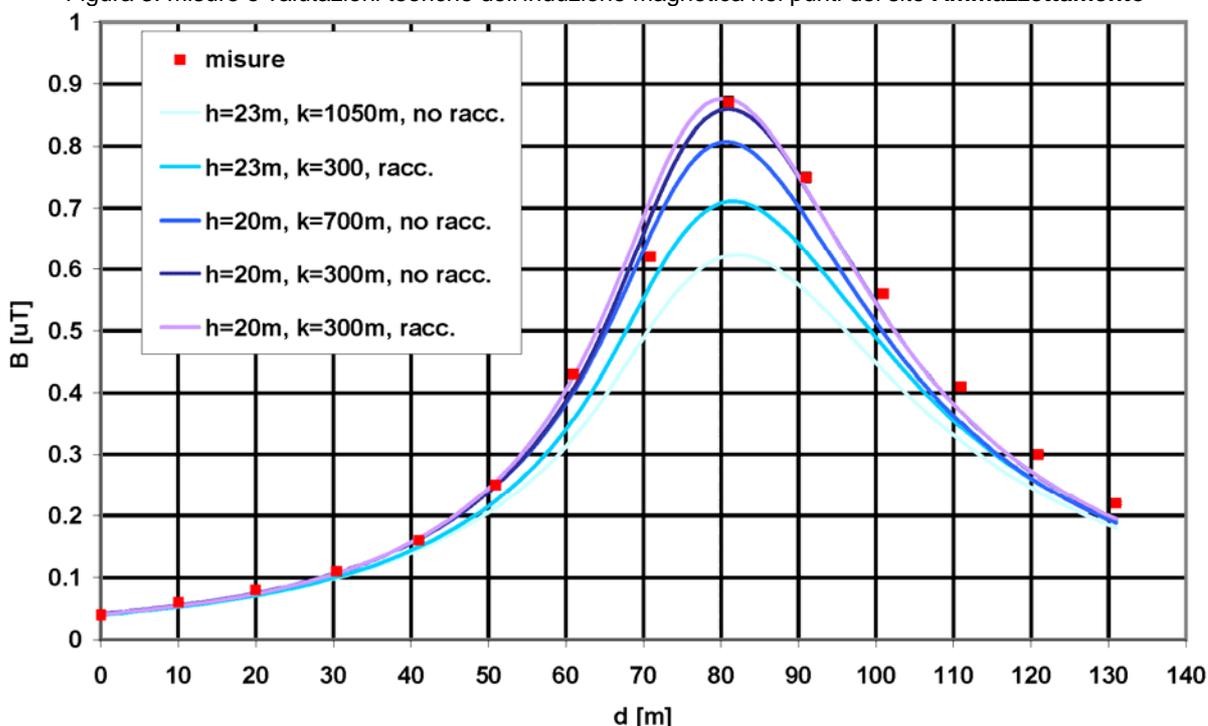
La Figura 3 mostra i risultati ottenuti. In ascissa viene riportata la distanza di ciascun punto di misura dal primo punto della serie, calcolata procedendo lungo la spezzata che unisce tutti i punti,

nella sequenza in cui sono stati visitati. Le curve in cui si tiene conto dei raccordi per il cambio di cablaggio sono indicate in legenda dalla scritta "racc.".

Come si può notare, in questo caso la grandezza che più influisce sui risultati è l'altezza da terra del conduttore più basso, mentre il valore del parametro di tesatura e soprattutto la modellazione dei raccordi sembrano meno rilevanti. C'è da dire che il modello utilizzato per questi ultimi non rappresenta la differenza di quota tra il punto in cui l'isolatore è vincolato alla struttura del sostegno e l'effettivo punto di sospensione del conduttore, cosicché utilizzare un sostegno più basso potrebbe essere equivalente a modellare i raccordi con maggiore accuratezza.

Come si è detto, in occasione di un secondo sopralluogo in questo sito sono stati eseguiti ulteriori rilevamenti, relativi sia all'altezza da terra del conduttore più basso, che è effettivamente risultata pari a circa 20 m, sia alla stima – attraverso il rilievo del franco minimo – del valore del parametro di tesatura dei conduttori, che è risultato dell'ordine di 700 m: inferiore quindi al valore documentato, ma non abbastanza – come si vede in Figura 3 – da ottimizzare l'accordo tra misure e calcoli. Questo accordo resta dunque parzialmente insoddisfacente in questo sito (specie nella parte dopo il punto di massimo), facendo nascere il sospetto di un possibile disallineamento della posizione reale dei punti di misura rispetto alla linea ideale individuata sulla cartografia dei luoghi.

Figura 3: misure e valutazioni teoriche dell'induzione magnetica nei punti del sito **Ammazzettamento**



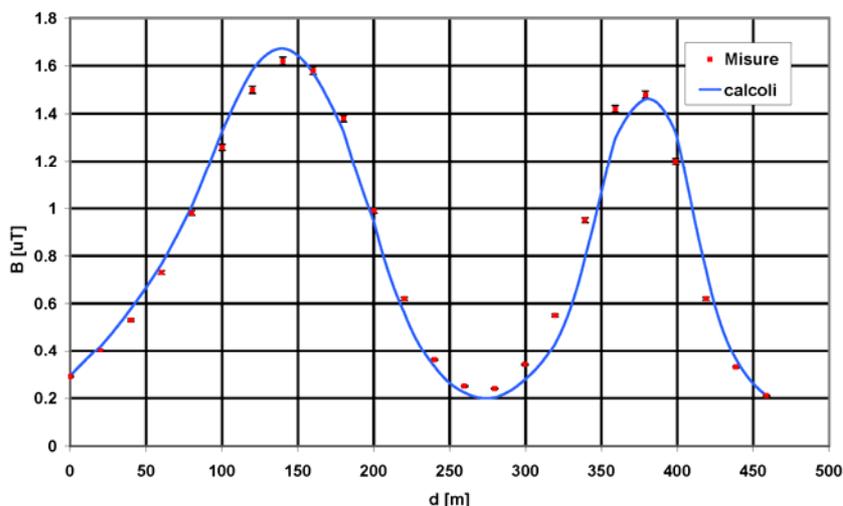
### 3) BACINO DI FIRENZE – SITO PONTE DI MEZZO

In questo sito le misure hanno interessato una successione regolare di 24 punti disposti lungo l'argine di un torrente che corre approssimativamente sotto due campate dell'elettrodotto doppia terna costituito dall'appaiamento delle linee n.407 e n.409. Per queste linee non erano disponibili in documentazione i valori dei parametri di tesatura dei conduttori. Le caratteristiche del sito hanno però permesso di stimare, attraverso un rilievo fotografico, il franco minimo da terra dei conduttori della prima delle due campate, attraverso il quale si è risaliti alla freccia e quindi al parametro di tesatura, il cui valore è stato assegnato anche ai conduttori delle campate vicine.

I risultati sono mostrati in Figura 4, con la convenzione per le ascisse già descritta per il sito Ammazzettamento.

Come si vede, l'accordo tra misure e calcoli riproduce con buona accuratezza la variazione del livello di induzione magnetica dovuta all'abbassamento dei conduttori al centro della campata ed al loro successivo innalzamento presso i sostegni.

Figura 4: misure e valutazioni teoriche dell'induzione magnetica nei punti del sito **Ponte di Mezzo**



#### D) CONCLUSIONI

Il programma PLEIA ha dimostrato di poter prevedere in modo accurato la distribuzione di induzione magnetica in situazioni non trattabili con i modelli 2D conformi alle specifiche CEI 211-4 [2], traendo grande vantaggio anche dalla disponibilità di un catasto elettromagnetico da cui attingere i dati necessari. Questa caratteristica e la possibilità di lavorare in stretta connessione con la cartografia numerica, ne fanno uno strumento potente e flessibile, di grande aiuto per le attività istituzionali delle agenzie di controllo e per ogni esigenza di valutazione di impatto ambientale dei campi degli elettrodotti.

La validazione del programma ha messo in evidenza, come era prevedibile, il legame tra qualità del modello delle sorgenti ed accuratezza delle valutazioni. In molti casi, i dati forniti dal gestore sono risultati sufficienti per ottenere buoni accordi tra misure e calcoli; solo in situazioni particolarmente complesse, come quella del sito *Ammazzettamento*, è emersa la necessità di procedere ad una modellazione più dettagliata delle sorgenti, per la quale è stato necessario acquisire ulteriori dati con sopralluoghi sul territorio e rilievi di distanze e dimensioni. Si è evidenziato, in particolare, l'importanza del parametro di tesatura dei conduttori, non sempre incluso tra i dati forniti dal gestore, ma che può essere stimato attraverso una misura del franco da terra dei conduttori. A questo proposito, l'esempio del sito *Ponte di Mezzo* mostra come la stima del parametro possa portare ad buoni risultati in termini di calcolo dell'induzione magnetica.

Un altro problema emerso nel corso della validazione, su cui sarà necessario indagare ulteriormente in futuro, riguarda le imperfezioni della cartografia numerica e la propagazione del relativo errore di posizione e di quota alla valutazione dell'induzione magnetica.

Come considerazione generale, nello svolgere la validazione si è potuto constatare come esistano alcune limitazioni alla possibilità di utilizzare misure in ambiente urbano per validare un modello di calcolo dell'induzione magnetica dispersa da un elettrodotto. Infatti, il campo magnetico (spesso relativamente debole) da esso generato viene perturbato e mascherato da numerosi fattori confondenti (linee elettriche interrate, impianti di illuminazione e segnalazione pubblica etc.) per cui diviene impossibile correlare ciò che si misura con i risultati del modello, né è pensabile di poter inserire in una simulazione tutti i dati delle sorgenti che contribuiscono al campo totale.

Sebbene la situazione sia nettamente migliore in ambiente extraurbano, tuttavia occorre riconoscere che qualunque modello previsionale di campi elettromagnetici di tipo deterministico è adatto alla caratterizzazione dell'*emissione* di un insieme predefinito di sorgenti, piuttosto che alla previsione del valore di *immissione*, riscontrabile in un punto scelto casualmente in un determinato ambiente.

#### E) BIBLIOGRAFIA

- [1] D.Andreuccetti e N.Zoppetti: "Campo magnetico disperso da elettrodotti ad alta tensione: una metodologia avanzata di valutazione basata su modelli 3D di linee elettriche e territorio", Atti del convegno "Dal monitoraggio degli agenti fisici sul territorio alla valutazione dell'esposizione ambientale", Torino, 29-31 ottobre 2003, pp.17-20.
- [2] Comitato Elettrotecnico Italiano, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche", Norma CEI 211-4, ottobre 1996.