



## **PROVA DI INTEGRITÀ DEL PALO COL METODO DEL PROFILO TERMICO - THERMAL INTEGRITY PROFILING (TIP)**

**Nevenka Martinello**

4 EMME Service S.p.A.

### **Sommario**

*Il Thermal Integrity Profiling (TIP) sfrutta la temperatura generata dal calcestruzzo in fase di presa (energia di idratazione) per valutare la qualità e l'integrità dei pali di fondazione. E' in grado di superare i limiti delle metodologie fino ad oggi impiegate (es. Cross-hole, PIT); in particolare, offre il vantaggio di permettere l'analisi dell'intera sezione trasversale del palo e la conoscenza della forma e delle caratteristiche meccaniche della parte corticale, quella più importante a contatto col terreno. In aggiunta, il TIP permette un rapido proseguimento dei lavori di costruzione concludendosi nelle ore successive alla realizzazione del palo, e offre una raccolta e valutazione dei dati veloce e oggettiva, lasciando poco spazio alle interpretazioni.*

*Il metodo TIP è basato sulla misurazione dell'andamento della temperatura lungo il fusto del palo, rilevata durante la fase di maturazione del getto quando si attiva il fenomeno esotermico il cui calore viene disperso nel terreno circostante. Durante questa fase, la presenza di inclusioni, riduzioni di diametro, vespai, basso contenuto di cemento è registrata da relative regioni fredde; invece la presenza di calcestruzzo in eccesso, come nel caso di aumenti di diametro, è registrata da relative regioni calde. Un apposito software, partendo dal profilo termico registrato in campo, costruisce un modello 3-D della forma del palo e ne evidenzia i difetti, quali ingrossamenti, restringimenti, cavità, interruzioni di profilo, e valuta inoltre la posizione esatta della gabbia d'armatura.*

*La strumentazione impiegata prevede due alternative. La Sonda Termica, sonda che viene calata in appositi tubi di ispezione; e i Cavi Termici, cavi strumentati con sensori termici posizionati ogni 30 cm e fissati alla gabbia di armatura prima del getto. Questi Cavi Termici registrano automaticamente dati in continuo, permettendo di monitorare la temperatura del calcestruzzo per l'intera durata di presa. Il metodo TIP è stato sviluppato inizialmente dalla University of South Florida a partire dagli anni '90 e rappresenta oggi il metodo di indagine di integrità più impiegato negli Stati Uniti.*



## 1 INTRODUZIONE

I pali trivellati possono essere soggetti a difetti strutturali e imperfezioni che mettono a rischio l'integrità strutturale del palo pregiudicandone la capacità portante. Queste anomalie si vengono a costituire durante le fasi di realizzazione del palo, fasi delicate il cui risultato dipende dall'esperienza e dalle capacità del produttore.

Va considerato che per le difficoltà connesse alle fasi di getto in profondità è facile che al calcestruzzo si mescoli materiale incoerente proveniente dal terreno, in particolare a fondo palo. In altri casi, dove si deve procedere ad una ripresa di getto, si possono creare dei veri e propri distacchi che costituiscono delle discontinuità strutturali lungo l'asse. Un ulteriore fenomeno che rappresenta un serio rischio all'integrità del palo, in particolare nella sua parte corticale, è dovuto alla presenza di una fitta concentrazione di armatura che rende difficoltoso il passaggio del calcestruzzo dalla zona interna della gabbia, dove viene immesso, alla zona esterna. Questa difficoltà comporta il crearsi di aree di "vespaio" dove il materiale non è sufficientemente costipato e l'aggregato rimane facilmente sprovvisto della parte cementizia di legame perdendo la capacità resistente.

Per definizione un elemento di fondazione è infisso nel terreno e pertanto non permette un'ispezione visiva diretta della qualità del prodotto finale. Per questo motivo la prova di integrità diventa una componente fondamentale del programma di verifica della qualità del manufatto.



Fig. 1: Esempi di difetti tipici dei pali di fondazione riscontrabili col metodo TIP

Attualmente i metodi di integrità più comunemente impiegati sono il Cross-hole e il Pile Integrity Test (PIT) <sup>[1]</sup>, le cui limitazioni saranno analizzate nei paragrafi successivi.

Il TIP presenta proprietà diagnostiche che lo rendono alternativo e certamente più efficace delle attuali metodologie. Tra le sue peculiarità si annoverano alcuni aspetti:

- non presenta limitazioni rispetto al rapporto lunghezza-diametro, quindi è applicabile a qualsiasi dimensione di palo;

- si conclude nelle ore successive alla realizzazione del palo, permettendo così un rapido proseguimento dei lavori di costruzione;
- offre una raccolta e valutazione dei dati veloce e oggettiva, lasciando poco spazio alle interpretazioni.

## 2 LA METODOLOGIA

La fase di maturazione del calcestruzzo è un processo chimico esotermico che genera calore. Questo calore di idratazione porta ad aumentare la temperatura all'interno del palo per poi disperdersi nel terreno circostante. La misura della temperatura ci fornisce informazioni sull'integrità del palo <sup>[2]</sup>, in quanto la velocità di dissipazione del calore dipende dalla consistenza e dal volume del materiale che si interpone tra gabbia e terreno. Una volta rilevato l'andamento della temperatura lungo l'asse, il software interpretativo del metodo TIP è in grado di costruire un modello 3D in cui vengono evidenziati i difetti: restringimenti o aumenti di sezione, inclusioni o vespai, oltre a definire con precisione l'eventuale eccentricità della gabbia d'armatura e lo spessore del copriferro.

Il metodo si basa sul concetto secondo il quale la quantità totale di calore prodotta, misurata lungo l'intera lunghezza del palo, è proporzionale al volume di calcestruzzo e al contenuto specifico di cemento presente, fornendo quindi informazioni su variazioni locali di volume e di forma.

Per comprendere la relazione esistente tra temperatura e forma del palo, è necessario analizzare in che modo la temperatura è funzione del diametro. In Fig. 2 è rappresentata la distribuzione della temperatura in una data sezione, la quale segue una forma a campana, con un picco al centro.

La temperatura viene registrata nelle ore successive al getto del calcestruzzo, quando il gradiente di temperatura è ancora evidente. La misura viene attuata lungo l'intera lunghezza, in diversi punti della sezione. Si viene in questo modo a tracciare il profilo termico del palo, che rappresenta il grafico della temperatura in funzione della lunghezza (Fig. 2, destra).

Un palo ideale, senza anomalie, con una sezione trasversale uniforme e con una gabbia d'armatura perfettamente centrata, produrrà un profilo termico uniforme lungo la lunghezza; mentre la presenza di difetti, come ad esempio i vespai o una potenziale eccentricità della gabbia, interromperà l'uniformità di tale profilo<sup>[3]</sup>. Più specificatamente, un aumento o una diminuzione della temperatura di tutti i profili termici ad una certa profondità indica un allargamento o un restringimento della sezione, rispettivamente; invece, l'eccentricità della gabbia di armatura si individua guardando i singoli profili termici misurati in punti diametralmente opposti del palo, come sarà spiegato nel paragrafo sull'interpretazione dei dati.

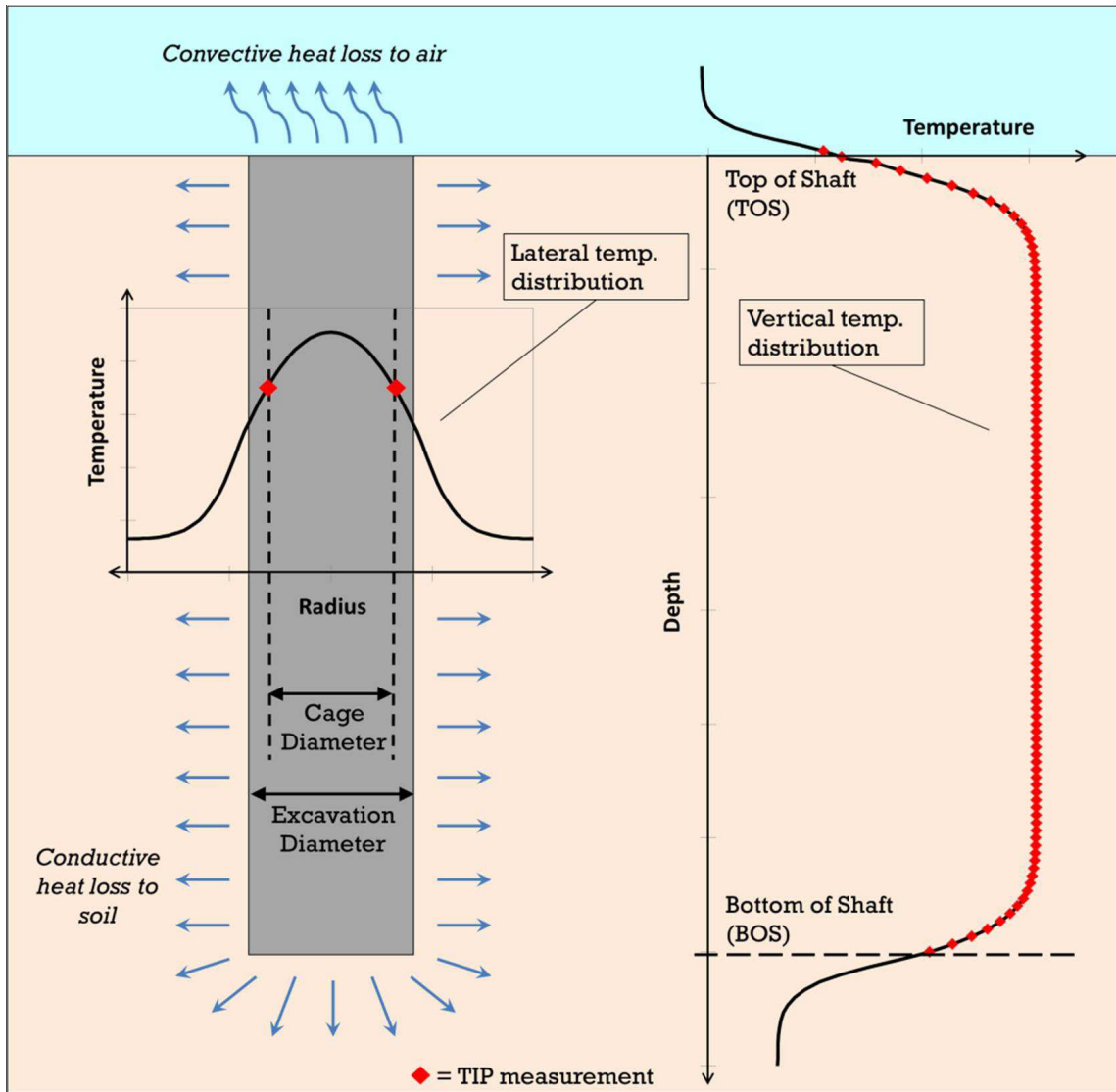


Fig. 2: Distribuzione della temperatura in un palo ideale. Distribuzione della temperatura radiale di una sezione trasversale di palo (sinistra); distribuzione della temperatura teorica verticale (destra)

La Figura 3 mostra la distribuzione della temperatura radiale in pali con diversi diametri. Il punto di flesso di ciascuna curva, dove la pendenza è la più ripida e la più lineare, si trova vicino alla posizione della gabbia. Questo rende le misure di temperatura altamente sensibili sia alla forma del palo che all'eccentricità della gabbia. Le linee tratteggiate rappresentano la posizione della gabbia, in corrispondenza della quale vengono prese le misure, mentre le linee colorate rappresentano la distribuzione della temperatura per diversi diametri e l'intersezione delle linee rivela la temperatura che verrebbe registrata. Si noti che per pali di diametri maggiori, le temperature al centro non sono influenzate dalle dimensioni, contrariamente di quanto accade nei pali più piccoli. Per una data posizione radiale, le linee tratteggiate rivelano la correlazione unica che esiste tra la dimensione del palo e la temperatura.

La misura della temperatura avviene lungo tutta la lunghezza del palo in prossimità della gabbia d'armatura con due possibili strumentazioni alternative che rappresentano due metodi gemelli che sfruttano la stessa filosofia interpretativa.

- Sonda Termica

Uso di una sonda termica, con quattro sensori infrarossi, calata in appositi tubi di ispezione, quelli della prova Cross-hole; metodo definito con l'acronimo TPM da Thermal Probe Method.

- Cavi Termici

Messa in opera di cavi strumentati con sensori termici posizionati ogni 30 cm e fissati alla gabbia di armatura prima del getto; metodo definito con l'acronimo TWM da Thermal Wire Method.

Con entrambe le strumentazioni, la prova va eseguita alla temperatura di picco che si raggiunge nelle prime 36 ore successive al getto del palo. Nel caso dei cavi termici la misura avviene in continuo, eliminando la preoccupazione della scelta del momento di esecuzione del test ed assicurando di avere a disposizione i dati ottimali per la successiva interpretazione<sup>[4]</sup>.

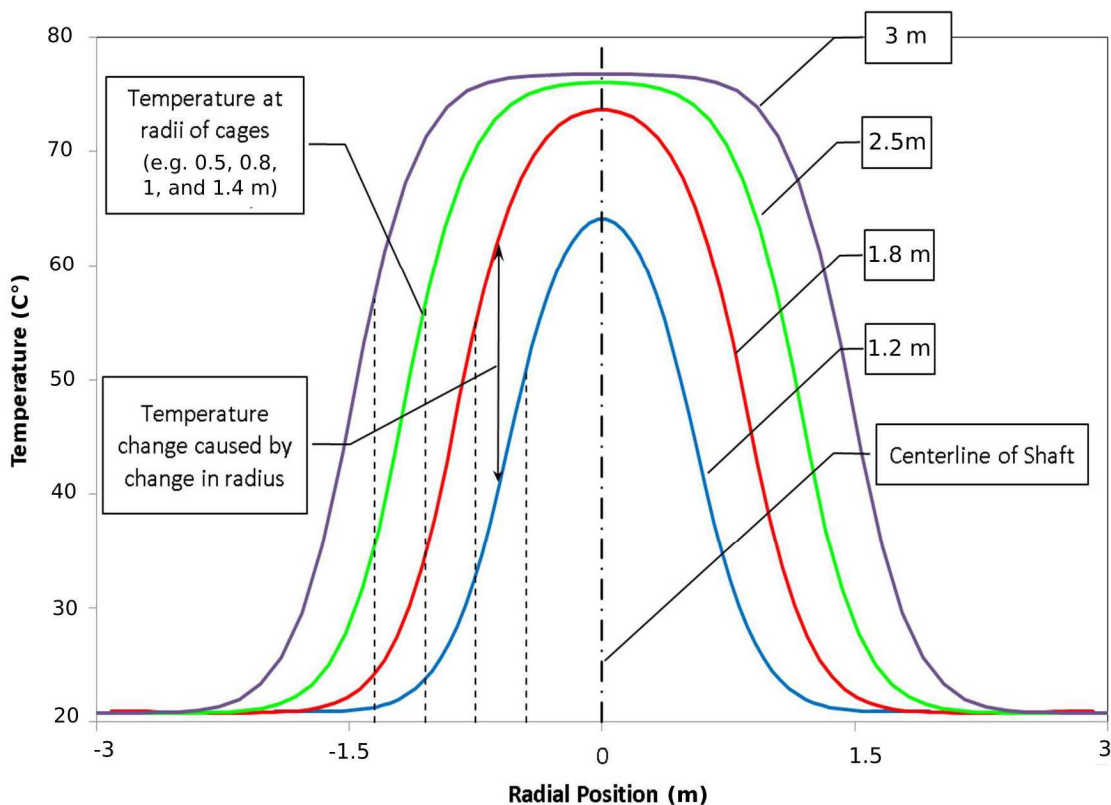


Fig. 3: Distribuzione della temperature radiale su pali di diverso raggio<sup>[10]</sup>

### 3 STRUMENTAZIONE E RACCOLTA IN SITU

Il numero raccomandato di tubi di ispezione per il TPM o di cavi strumentati per il TWM è di uno per ogni 25 cm di diametro (così come il numero di tubi nella prova Cross-hole), distribuiti uniformemente lungo la circonferenza della gabbia di armatura. In questo modo il TIP è in grado di valutare l'intera sezione trasversale del palo e di identificare ogni anomalia maggiore del 10% della sezione<sup>[5]</sup>.

Per individuare con precisione un'eventuale eccentricità della gabbia d'armatura è consigliato di porre un numero pari di tubi d'ispezione o di cavi termici<sup>[6]</sup>.

#### 3.1 Metodo della sonda termica TPM (Thermal Probe Method)

Il Thermal Probe Method<sup>[7] [8]</sup> prevede l'uso di una sonda termica composta da quattro sensori ad infrarossi disposti ortogonalmente tra loro. La sonda è collegata ad una Unità di Acquisizione chiamata TAPP (Thermal Acquisition Port for Probe) e a una Unità di Elaborazione (Main Unit). I dati di temperatura sono raccolti calando la sonda in tubi di ispezione standard da 40-50 mm, pre-annegati nel calcestruzzo, ad una velocità compresa tra 0,2-0,4 m/s. I tubi possono essere in plastica o in acciaio. Possono anche venire impiegati i tubi usati per la prova Cross-hole, assicurandosi di svuotarli prima di eseguire il TIP, per eliminare problemi di distorsione del segnale infrarosso. Il profilo termico può essere osservato in tempo reale dall'operatore attraverso l'Unità di Elaborazione, man mano che la sonda cala nel tubo e un encoder registra con precisione la sua posizione.

Il TIP test, eseguito con la sonda termica, è influenzato dal momento in cui si esegue la prova; infatti, una volta raggiunta la temperatura di picco, il processo di idratazione rallenta, la temperatura e la variazione di temperatura nel palo diminuiscono e può diventare più difficile interpretare i dati registrati. Solitamente, pertanto, il momento ideale per eseguire la prova è tra le 12 e le 36 ore successive alla realizzazione del palo. Più in generale il periodo migliore è compreso tra il momento in cui si raggiunge la metà della temperatura di picco ed il picco. Per questa ragione è bene ripetere la prova almeno due volte, nell'arco del tempo indicato, in modo da garantirsi la migliore definizione del profilo termico.

I dati acquisiti vengono elaborati con un software specifico che permette un'analisi attenta, sezione per sezione, con l'individuazione di eventuali difetti.



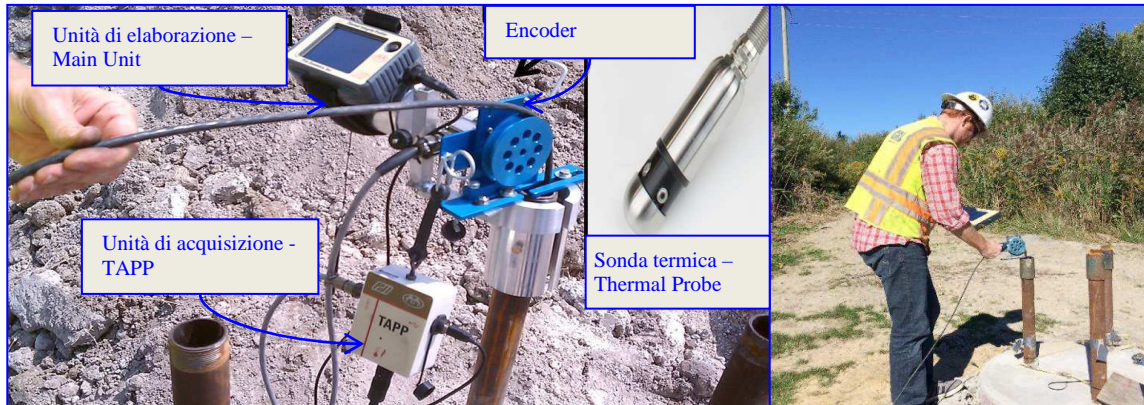


Fig. 4: Metodo della sonda termica

### 3.2 Metodo del cavo termico TWM (Thermal Wire Method)

Il Thermal Wire Method <sup>[6]</sup> <sup>[9]</sup> prevede l'uso di cavi strumentati con una serie di sensori termici posti ogni 30,5 cm (1 feet) e da una stessa quantità di Unità di Acquisizione chiamate TAP (Thermal Acquisition Port), i quali permettono la memorizzazione dei dati derivanti dai sensori posti lungo il cavo. I cavi termici vengono fissati alla gabbia d'armatura, affianco o al posto dei tubi di ispezione per il Cross-hole. Ogni cavo termico viene collegato ad una Unità di Acquisizione posta sulla testa del palo, la quale memorizza i dati di temperatura ad intervalli regolari (solitamente 15 minuti), almeno fino a quando non si raggiunge la temperatura di picco.

Nel TIP test eseguito con i cavi termici non c'è bisogno di stimare il momento in cui la temperatura raggiunge il picco, come invece è necessario utilizzando la sonda TPM, perché basterà scegliere il momento ottimale per l'interpretazione dei dati dalla libreria dei profili termici registrati. I dati acquisiti possono venire raccolti in qualsiasi momento dopo la fine della prova, sconnettendo le Unità di Acquisizione dai cavi e connettendole all'Unità di Elaborazione che permette una prima valutazione del profilo termico.

Successivamente i dati vengono rielaborati con un software specifico che permette un'analisi attenta, sezione per sezione, e l'individuazione di eventuali difetti. La precisione di queste elaborazioni è maggiore con l'uso dei cavi termici, rispetto alla sonda termica, in quanto è possibile scegliere il profilo termico migliore tra tutti quelli acquisiti nella fase di presa. estione automatizzata, senza la quale nessun amministratore potrà impostare un piano sistematico di ispezione, manutenzione e collaudo.



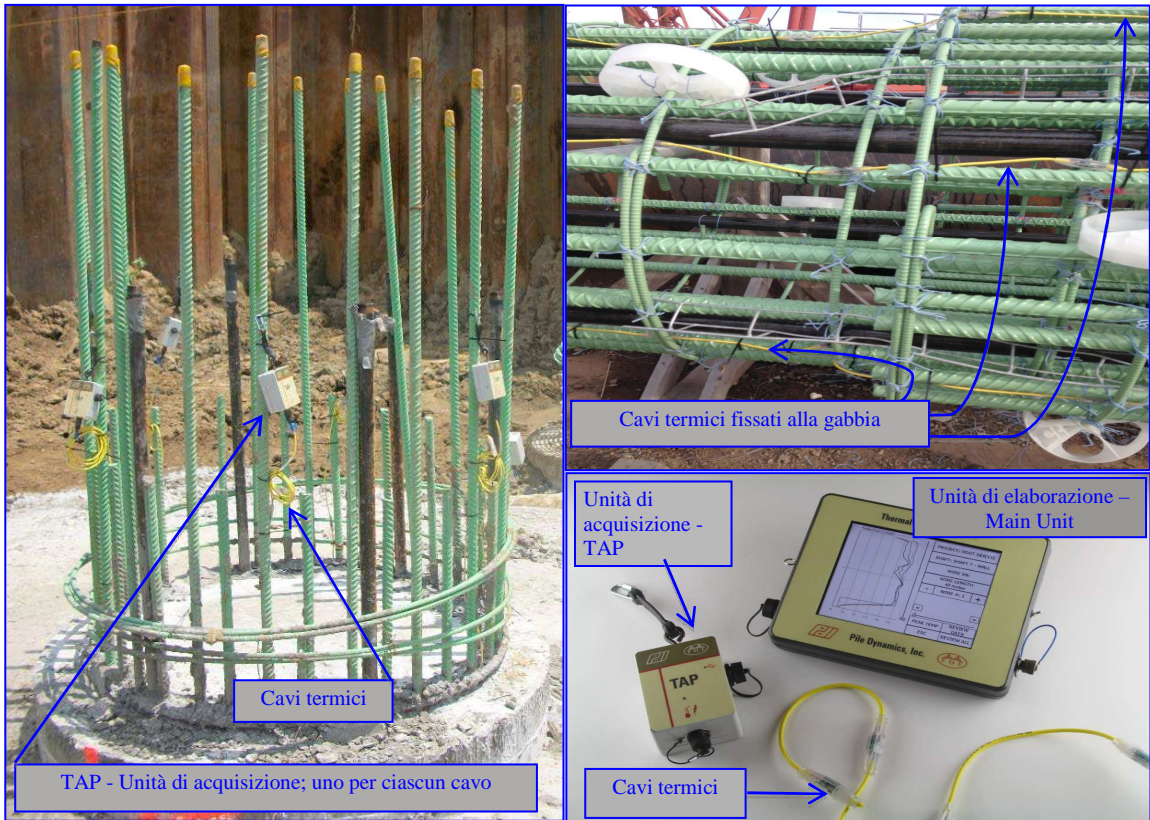


Fig. 5: Metodo del cavo termico TWM

#### 4 ANALISI E INTERPRETAZIONE DEI DATI

Analizzando e interpretando i profili termici misurati, si possono individuare le anomalie strutturali del palo, come restrizioni o allargamenti, intrusioni o vespai, casi di discostamento della gabbia di armatura dall'asse del palo e conseguentemente lo spessore del copriferro lungo l'intera periferia.

La presenza di un'inclusione di terreno o un restringimento del diametro indurrà un improvviso calo di temperatura a quella profondità, come conseguenza dell'assenza di contenuto cementizio produttore calore. Questo comporterà un profilo termico medio caratterizzato da un abbassamento della temperatura con un evidente discostamento dalla temperatura media. La Fig. 6 illustra un esempio di restringimento del diametro. Nel grafico a sinistra, si può vedere che alla profondità di 27 metri (89 feet) tutti i profili termici (e quindi anche la media, indicata col tratto nero) subiscono una diminuzione, sintomo di riduzione di diametro. Nell'immagine centrale questa restrizione è mostrata in un formato 3D, in cui si evince che lo spessore del copriferro all'altezza dell'anomalia non è adeguato. Nell'immagine di destra, è mostrato il carotaggio eseguito proprio nel punto in discussione per confermare il risultato del modello.

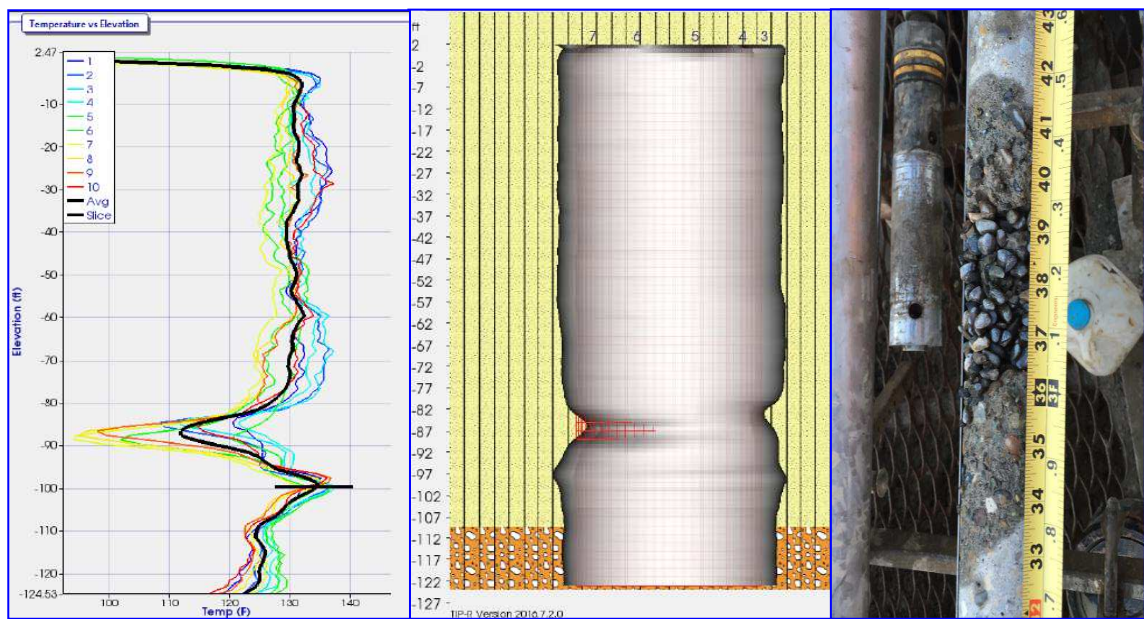


Fig. 6: Esempio di riduzione del diametro del palo. Profilo termico misurato (sinistra); output del modello (centro); carotaggio nei pressi dell'anomalia riscontrata (destra)

La presenza di un allargamento di diametro comporta invece un aumento della temperatura dovuto alla presenza di un contenuto aggiuntivo di cemento che produce calore. Il profilo termico medio segnerà quindi un aumento della temperatura, come si può vedere nell'esempio di Fig. 7.

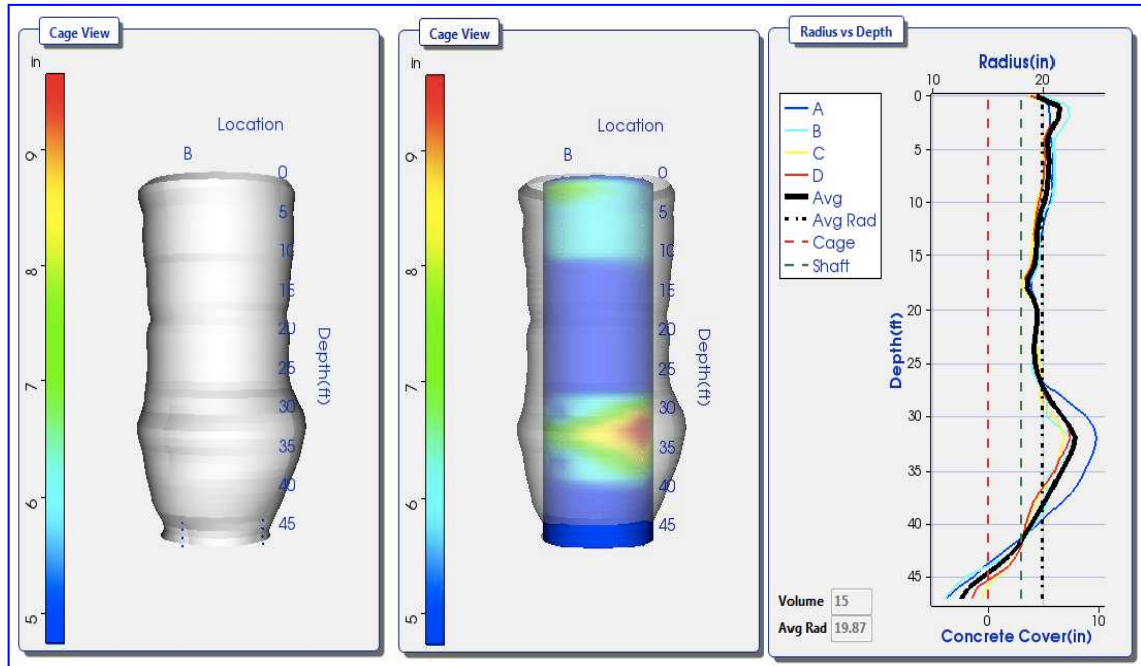


Fig. 7: Esempio di allargamento del diametro del palo

La presenza di un'eccentricità della gabbia d'armatura sarà identificata dall'analisi dei profili termici misurati nei punti diametralmente opposti. Infatti quando la gabbia d'armatura è centrata, i profili termici indicano tutti la stessa temperatura. Invece, nel caso di eccentricità della gabbia verso un lato dello scavo, il lato della gabbia più vicino al terreno circostante esibirà una temperatura minore rispetto alla media, mentre il lato diametralmente opposto, e quindi più vicino al centro del palo, esibirà una temperatura maggiore rispetto alla media.

Questo concetto viene spiegato in Fig. 9, dove i due profili termici viola e verde sono misurati in due punti diametralmente opposti, e la linea nera ne è la media. Il profilo verde mostra una temperatura superiore rispetto alla media, implicando una posizione più vicina al centro del palo, mentre il profilo viola mostra una temperatura minore rispetto alla media, implicando una posizione più vicina al terreno. La gabbia d'armatura è quindi spostata nella direzione del cavo che misura il profilo viola, nell'area con temperatura minore alla media. Conoscendo il valore dello scostamento della temperatura rispetto alla media e utilizzando la curva della distribuzione della temperatura in funzione del diametro, nella porzione lineare, è possibile determinare l'ampiezza di tale eccentricità e calcolare lo spessore del copriferro<sup>[10]</sup>.

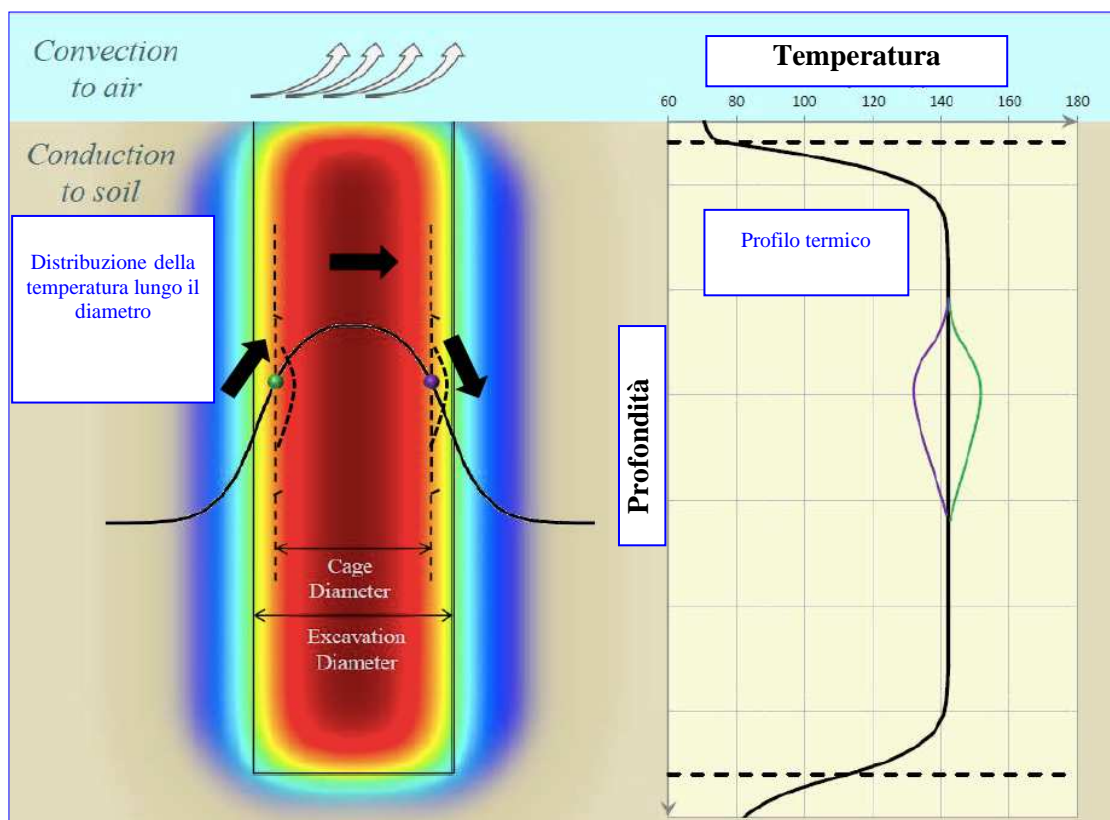


Fig. 8: Identificazione di un caso di eccentricità di una gabbia di armatura

In corrispondenza degli estremi del palo (testa e punta), il profilo termico assume una drastica curva con una forma iperbolica (come si può vedere in Fig.8). Questo fenomeno è conseguenza naturale della dispersione longitudinale che si aggiunge a quella radiale incidente sul resto del palo. Attraverso l'uso del software interpretativo, si può accertare se questa riduzione sia dovuta solamente all'effetto della naturale dispersione longitudinale del calore o nasconda invece una riduzione di sezione o di qualità del materiale derivante dal mescolamento col terreno di fondo palo.

La tabella a seguito riassume i diversi fenomeni che vengono individuati col TIP, affiancati dal criterio di analisi impiegato.

Anomalia riscontrata	Criterio di analisi
Forma del palo	Media dei profili di temperatura
Allargamento	Aumento localizzato della temperatura ed espresso da tutti i profili termici
Restrizione	Diminuzione localizzata della temperatura ed espressa da tutti i profili termici
Bassa qualità di calcestruzzo	Diminuzione localizzata della temperatura ed



	espressa da tutti i profili termici
Eccentricità della gabbia di armatura	Confronto tra profili termici diametralmente opposti che esibiscono discostamenti di temperatura opposti rispetto alla media
<b>Anomalia riscontrata</b>	<b>Criterio di analisi</b>
Spessore del copriferro inadeguato	Confronto tra ciascun profilo termico e la media dei profili, congiunto con il volume di calcestruzzo impiegato
Fondo morbido	Confronto tra la parte terminale del profilo termico e la forma teorica a tangente iperbolica
Gabbia termina prima della punta del palo	Assenza di curvatura della parte terminale del profilo termico
Raggio del palo in ogni direzione e profondità	Confronto tra ciascun profilo termico e la media dei profili, congiunto con il volume di calcestruzzo impiegato

Tab.1: Anomalie riscontrabili col TIP e criterio di analisi

Prima di usare il modello matematico con l'analisi attenta dei profili termici, è possibile ottenere, già in campo, una prima valutazione della presenza o assenza di gravi irregolarità. Questo permette di comprendere l'urgenza della elaborazione precisa dei dati e, in caso di assenza di difetti gravi, consente il proseguo consapevole della attività edificatoria.

Per l'impiego del software interpretativo risulta necessaria la conoscenza del volume di calcestruzzo versato. Questa informazione è importante sia per effettuare una calibrazione del modello, che per convertire i dati termici registrati in volume e di conseguenza determinare i raggi del palo lungo il suo asse. Il volume di calcestruzzo impiegato viene solitamente registrato durante la costruzione di un palo trivellato. Pertanto, una volta che si è stabilita la relazione tra la media della temperatura (dei diversi profili termici) e il raggio medio (determinato dal dato di volume di calcestruzzo impiegato e dalla lunghezza del palo conosciuta), il software è in grado di valutare il raggio del palo in tutte le direzioni e profondità, l'ampiezza dei restringimenti o degli allargamenti, la posizione della gabbia di armatura, e lo spessore del copriferro in qualsiasi punto. Il software include un modello termico per simulare il palo, il terreno circostante e l'energia generata dal mix di calcestruzzo. Le temperature misurate convertite in raggio possono essere usate per realizzare il modello 3D del palo, come anche un disegno 2D delle sezioni trasversali a qualsiasi profondità e sezione verticale.

## 5 CONFRONTO CON ALTRI METODI DI PROVA DI INTEGRITA'

I due metodi non distruttivi più comunemente impiegati per studiare l'integrità del palo sono il Cross-hole e il Pile Integrity Test (PIT). Ne riportiamo una breve descrizione per indicarne le peculiarità ed i limiti.

### 5.1 Cross-hole

Il test prevede l'installazione di tubi d'ispezione in acciaio fissati alla gabbia d'armatura. Il principio di indagine si basa sulla misura all'interno del calcestruzzo del tempo di viaggio e dell'intensità del segnale ultrasonico tra due sonde, una trasmittente e l'altra ricevente. Le due sonde vengono inserite in due tubi d'ispezione paralleli riempiti d'acqua. Risalendo dal fondo del palo, mantenendo le sonde costantemente allineate, le onde ultrasoniche emesse dalla sonda trasmittente passano attraverso il calcestruzzo e vengono rilevate dalla sonda ricevente. La stessa operazione si esegue tra i diversi tubi fino a che ogni possibile combinazione è stata testata. Il tempo di arrivo e l'intensità del segnale ultrasonico dipendono dalla distanza tra i tubi e dalla qualità del calcestruzzo, mentre la presenza di un difetto, localizzato nell'area di passaggio delle onde ultrasoniche, ritarderà il tempo di trasmissione del segnale e ne ridurrà l'intensità (ampiezza).

Il limite principale di questo metodo è che non può analizzare l'integrità sull'intera sezione trasversale, ma solo nella parte interna alla gabbia di armatura (Fig. 9, destra). Infatti, la trasmissione delle onde è influenzata solo da anomalie localizzate nei percorsi tra i tubi di ispezione testati, mentre i difetti al di fuori di tali percorsi non riescono a essere individuati<sup>[11]</sup>.

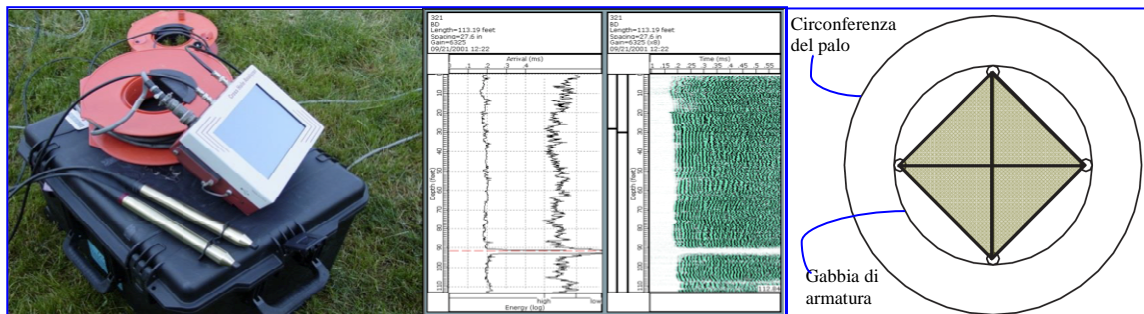


Fig. 9: Strumentazione CSL; esempio di rilievo; area analizzata

### 5.2 Pile Integrity Test (PIT)

Il Pile Integrity Test (chiamato anche Prova di Integrità del palo a bassa energia di impatto, SIT, Echo Test, Sonic Test), a differenza del Cross-hole, non richiede una pianificazione della prova precedentemente alla realizzazione del palo (non sono necessari i tubi d'ispezione).

La strumentazione consiste in un martello e un accelerometro a contatto con la testa del palo. L'accelerometro permette di rilevare l'onda di compressione indotta da un impulso prodotto dal martello attraverso una Unità di Acquisizione ed elaborazione che mostra e registra i segnali prodotti.

Il PIT è un test di integrità a bassa deformazione in quanto si produce un piccolo impulso di compressione. Se il palo non presenta difetti importanti, l'onda di compressione creata dal colpo del martello verrà riflessa dalla punta e tornerà alla testa senza nessuna distorsione intermedia. I difetti all'integrità del palo, come restrizioni o allargamenti, vengono individuati perché la loro presenza induce riflessioni dell'onda di compressione aggiuntive ma che raggiungono l'accelerometro prima di quella riflessa dalla punta.

Questo metodo è di rapida e semplice esecuzione ma presenta diversi limiti. Il primo è che per assicurarne l'efficacia, è necessario che il palo abbia un rapporto tra lunghezza e diametro uguale o minore a 30 per essere certi che il segnale riesca a tornare alla testa del palo, dove viene registrato<sup>[12]</sup>. Inoltre va sottolineato che con questo metodo si è in grado di individuare solo difetti di una dimensione rilevante e che allargamenti o restrizioni di diametro localizzati vicino alla testa del palo possono creare riflessioni multiple che rendono difficile l'analisi dell'integrità nella parte inferiore.

Per fare un esempio dell'interpretazione dei dati registrati col PIT, la Fig. 10 mostra la velocità misurata in funzione del tempo in due pali distinti. Il grafico superiore, relativo al primo palo, non mostra alcun difetto, mentre il secondo grafico evidenzia una chiara riflessione prima della punta del palo, che è un'indicazione di una diminuzione di impedenza (reciproco della resistenza).

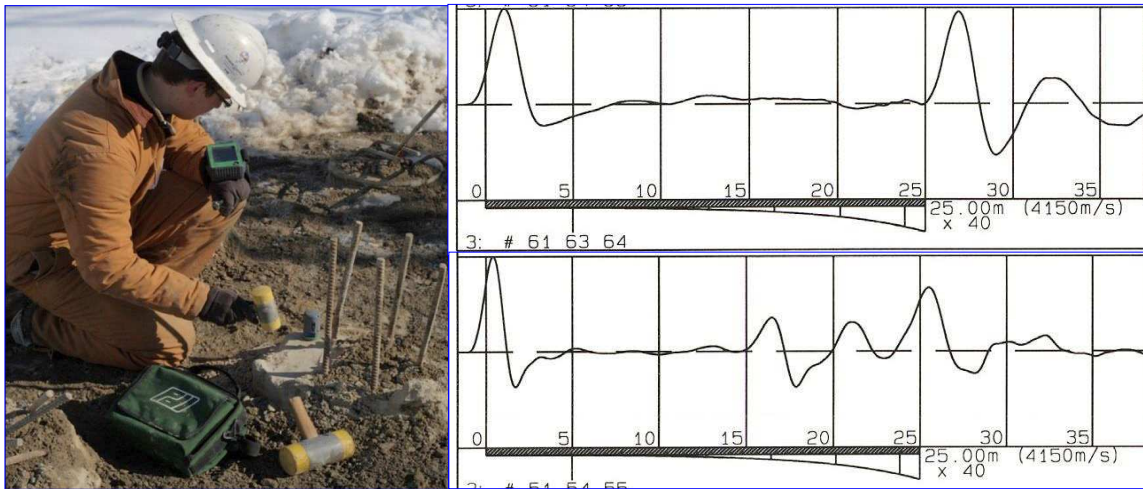


Fig. 10: Prova PIT. Esecuzione di una prova (sinistra); risultati di due prove (destra); assenza di difetti (sopra) e diminuzione di impedenza (sotto)

### 5.3 Vantaggi del metodo TIP

Entrambi i metodi esposti possono venire impiegati con successo per aiutare a determinare l'integrità di un palo, ma ciascuno presenta specifiche limitazioni, in particolare quando il palo ha diversi difetti i cui segnali identificativi ricavati dagli strumenti si sovrappongono.

Il TIP presenta delle peculiarità che superano questi limiti trasformando il metodo in uno strumento più affidabile e completo per una valutazione certa delle caratteristiche geometriche del palo.



I tre metodi sono stati messi a confronto in alcuni studi <sup>[4]</sup> <sup>[13]</sup> <sup>[14]</sup>. In questi articoli si presentano casi dove allargamenti, restrizioni, o bassa qualità del calcestruzzo sono stati correttamente identificati e localizzati dal TIP mentre non erano stati individuati dal Cross-hole o dal PIT.

I tempi di esecuzione del TIP sono comparabili a quelli della prova Cross-hole se eseguita su pali di modeste dimensioni (diametri da 60 – 80 cm) con 3 tubi di ispezione. Per i pali di maggiore dimensione, con un numero elevato di tubi di ispezione, il tempo per la prova Cross-hole aumenta in quanto è necessario eseguire tutte le combinazioni, mentre col TIP si esegue una singola scansione a tubo nel caso di uso della sonda termica e non è necessaria la presenza del personale tecnico se si utilizzano i cavi termici .

Il TIP pertanto offre numerosi vantaggi rispetto ai test di integrità comunemente impiegati; di seguito se ne riportano le peculiarità principali:

- valuta l'intera area della sezione trasversale del palo, sia all'interno che all'esterno della gabbia d'armatura;
- fornisce informazioni supplementari, come problemi di eccentricità della gabbia d'armatura e inadeguati spessori di copriferro; questo è importante perché nonostante possano non essere presenti difetti nella parte interna alla gabbia, il copriferro può comunque essere ridotto ad un livello non accettabile;
- non è limitato a nessun rapporto di lunghezza su diametro, quindi ogni palo può essere testato;
- la prova è condotta entro alcune ore successive al getto del palo, tipicamente entro le 36 ore; questo è particolarmente gradito quando è necessario velocizzare i tempi di costruzione;
- la raccolta dei dati è veloce, specialmente quando viene usato il metodo del cavo termico (Thermal Wire);
- l'analisi dei dati non soffre di soggettività.

## 6 ESEMPI

Si presentano di seguito alcuni esempi interessanti.

### 6.1 Prova TIP, Milano

La prova è stata eseguita su quattro pali trivellati. L'analisi di uno di questi è mostrata in Fig. 11. E' lungo 35 m, diametro del palo 120 cm e della gabbia 100 cm, costruito con tre spezzoni di gabbia. Il volume di calcestruzzo gettato è pari a 40 m<sup>3</sup>. Sono stati installati 3 cavi termici ciascuno collegato con un'Unità di Acquisizione TAP.

Analizzando la Figura 11, si può notare come gli ultimi 15 metri del palo presentano una riduzione di sezione calcolata pari al 18% che comporta un insufficiente spessore corticale. Non sono stati riscontrati distacchi o inclusioni.

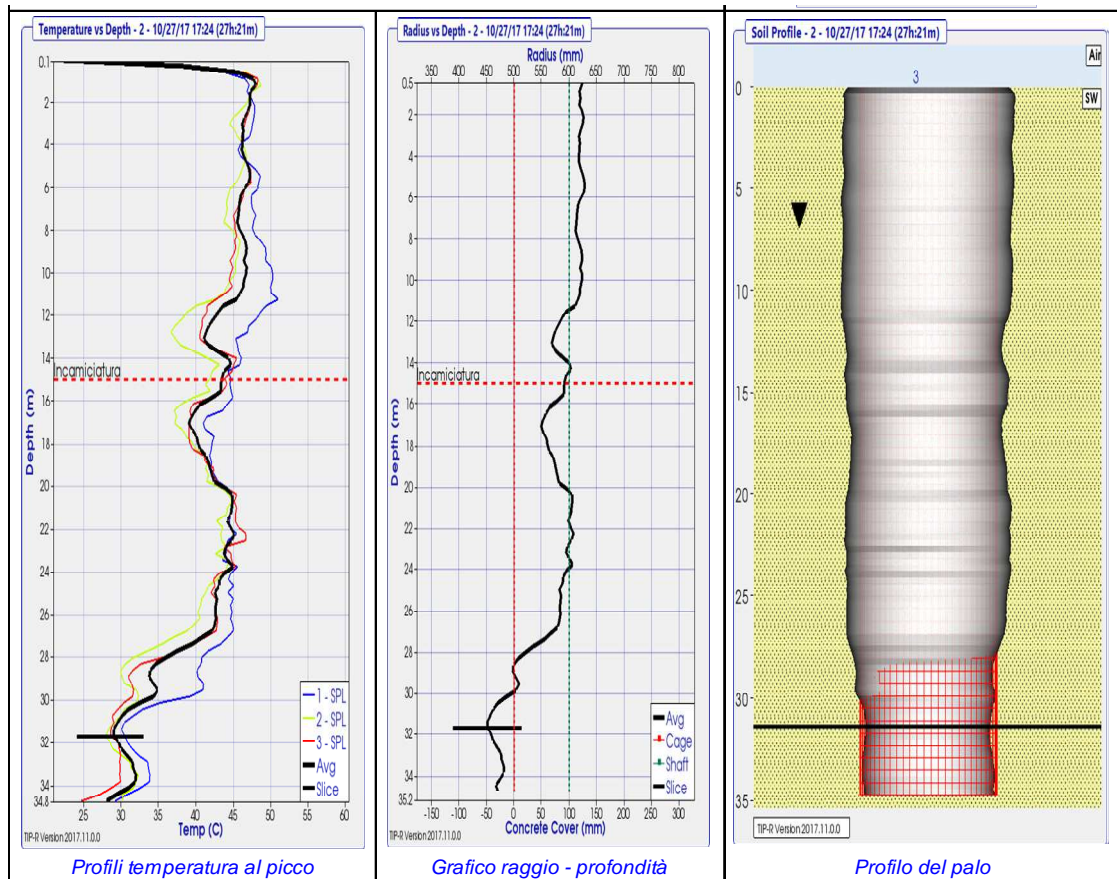


Fig.11: Prova TIP. Profili termici misurati (sinistra); raggio in funzione della profondità come calcolato dal modello (centro); forma del palo output del modello (destra)

### 6.2 Prova TIP, Cleveland, Ohio [4]

La prova è stata eseguita su un palo trivellato di diametro 170 cm e lunghezza 55 m, incamicciato nei primi 8 m. Il volume di calcestruzzo gettato è pari 120 m<sup>3</sup>. Sono stati installati 8 cavi termici collegati a 8 Unità di Acquisizione TAP. La Fig. 12 mostra, nell'immagine a sinistra, i profili termici misurati (all'istante coincidente con la temperatura di picco) che vengono forniti come input al software interpretativo. Le altre

due immagini rappresentano la forma del palo quale output del modello; il modello infatti associa i dati termici al volume di calcestruzzo impiegato e determina il reale raggio del palo.

Analizzando la Figura 12, si nota che nei primi 8 m di profondità il diametro è di circa 2 metri, corrispondenti al diametro della temporanea incamiciatura in acciaio. Dagli 8 ai 39 m di profondità, guardando la media dei profili termici si evince che il palo mantiene un diametro costante uguale a 1,8 m. Tra i 39 m e i 41 m, si osserva un leggero allargamento del diametro. Tra i 41 m e i 49 m, il diametro torna a quello osservato al di sopra dell'allargamento. Per quanto riguarda la centralità della gabbia di armatura, guardando i profili termici tra gli 8 e 40 m si può osservare che tendono a sovrapporsi, indice di una buona centralità. Mentre nei tratti superiori e inferiori, appare una lieve eccentricità della gabbia: i cavi 6 e 8 misurano una temperatura maggiore rispetto alla media indicando che quel lato della gabbia è più vicino al centro del palo, mentre i cavi diametralmente opposti, 2 e 3, registrano una temperatura inferiore rispetto alla media, essendo quel lato della gabbia più vicino al terreno.

Il modello permette anche di calcolare lo spessore del copriferro e in questo esempio risulta che nonostante l'eccentricità della gabbia il copriferro si può considerare accettabile per l'intera lunghezza del palo.

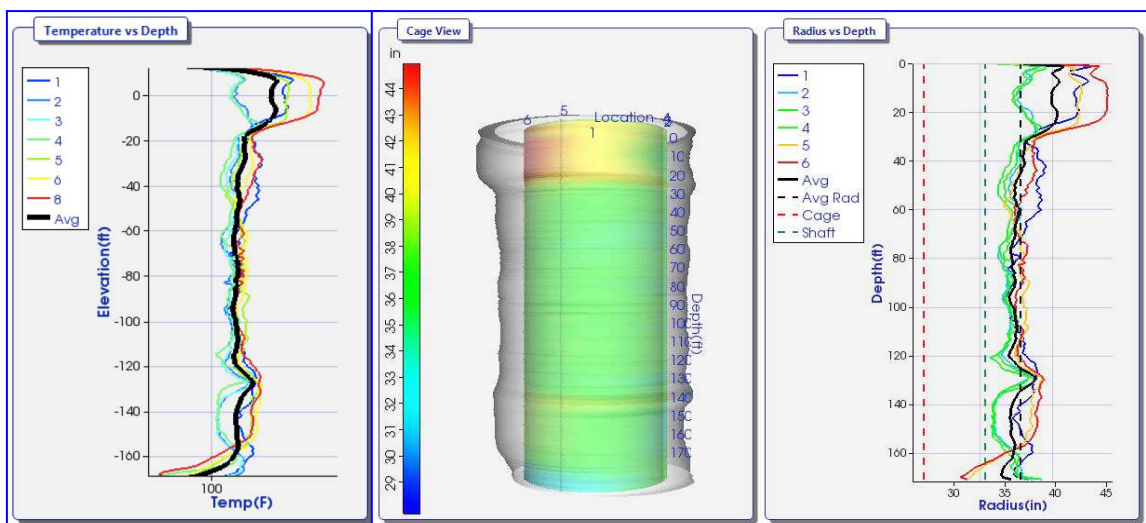


Fig. 12: Prova TIP. Profili termici misurati (sinistra); forma del palo output del modello (centro); raggio in funzione della profondità come calcolato dal modello (destra)

### 6.3 Prova TIP, Jakarta, Indonesia [3]

La prova è stata eseguita su un palo trivellato di diametro 150 cm e lunghezza 30 m. Sono stati installati 4 cavi termici collegati a 4 Unità di Acquisizione TAP. L'analisi dei dati rilevati porta ad individuare una riduzione di diametro a meno di un metro dalla testa del palo, Fig. 11 (zona cerchiata in rosso).

Dopo 6 giorni dalla realizzazione del palo, sono stati eseguiti anche i test PIT e i Cross-hole. Entrambi non individuavano alcun difetto a quella profondità. Visto che l'anomalia segnalata dal TIP era a meno di un metro di profondità, è stato scavato il terreno attorno al palo (Fig. 12) confermando i risultati del TIP.

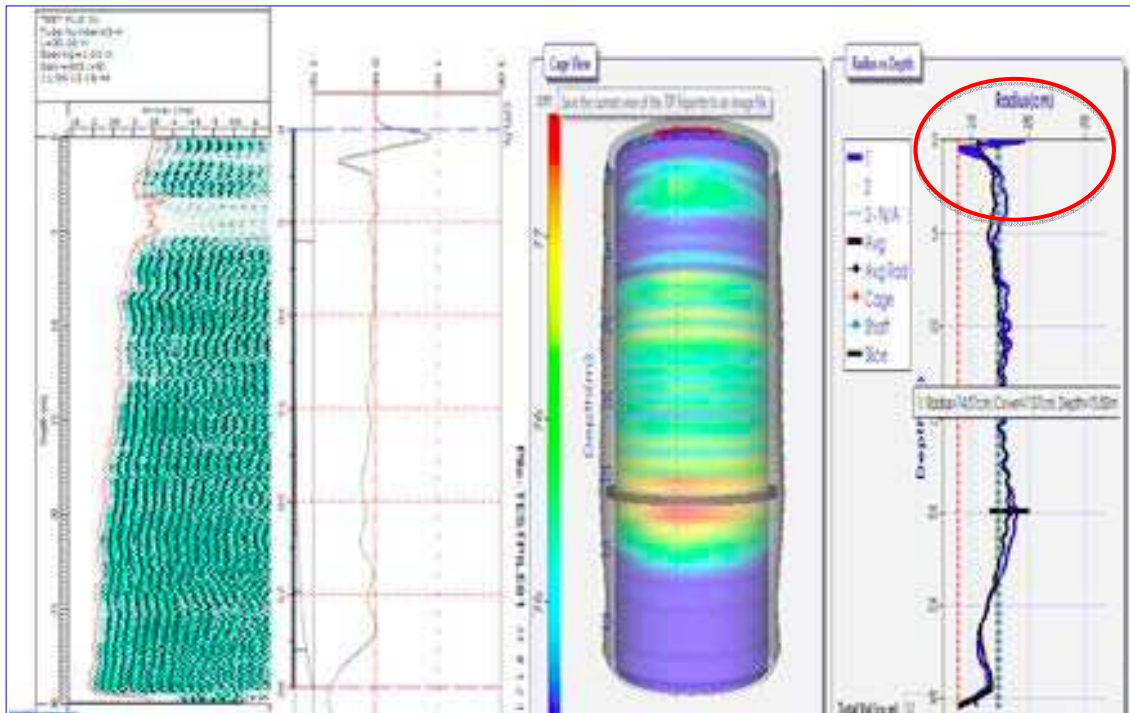


Fig. 12: Risultati delle tre prove: Cross-hole (sinistra), PIT (centro), TIP (destra)



Fig. 13: Palo scavato per mettere in luce il difetto



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Quaderno 2 – *Metodi di controllo dei pali di fondazione* – Edizione Cias
- [2] Mullins, G., Kranc, S., May 2007. *Thermal Integrity Testing of Drilled Shafts. Final Report Submitted to Florida Department of Transportation*, Tampa, FL.
- [3] Piscsalko, G., Cotton, D., Belardo, D., Likins, G.E., March 2015. *Using Thermal Integrity Profiling to Confirm the Structural Integrity of foundation applications*. Proceedings of The International Foundations Congress and Equipment Expo 2015:
- [4] Sellountou, E.A., Alvarez, C., Rausche, F., April 2013. *Thermal Integrity Profiling: from the First International Conference, Seminar on Deep Foundations*: Santa Cruz.
- [5] Piscsalko, G., 2014. *Non-Destructive Testing Of Drilled Shafts and CFA Piles - Current Practice and New Method*. Proceedings of the DFI/ EFFC 2014 International Conference on Piling and Deep Foundations: Stockholm, Sweden.
- [6] Piscsalko, G., October 2016. *Drilled Shaft Acceptance Criteria Based Upon Thermal Integrity Powerpoint*. DFI 41st Annual Conference on Deep Foundations: New York, NY; 1-30. Deep Foundations Institute.
- [7] Mullins, G., Kranc, S.C., 2004. *Method for testing the integrity of concrete shafts*. US Patent 6783273.
- [8] Mullins, G., Piscsalko, G., May 2012. *Thermal Integrity Profiling: An Innovative Technique for Drilled Shafts*. Deep Foundations Magazine; 51-54.
- [9] Cotton, D., Ference, M., Piscsalko, G., and Rausche, F., 2010. *Pile Sensing Device and Method of Making and Using the Same*. US Patent 8,382,369.
- [10] Mullins, G., December 2010. *Thermal Integrity Profiler of Drilled Shafts*. DFI Journal Vol 4. No. 2 December 2010: Hawthorne, NJ; 54-64.
- [11] Becker, M.L., Coleman, T.L., Belardo, D.S., March 2015. *Thermal Integrity Profiling of ACIP Piles*. Proceedings of The International Foundations Congress and Equipment Expo 2015: San Antonio, TX.
- [12] Piscsalko, G., Cotton, D., October 2011. *Non-Destructive Testing Methods for Drilled Shaft and ACIP Piles*. Proceedings from Deep Foundations Institute 36th Annual Conference on Deep Foundations: Boston, MA; 252-532.
- [13] Mullins, G., Winters, D., June 2011. *Infrared Thermal Integrity Testing, Quality Assurance Test Method To Detect Drilled Shaft Defects*. WSDOT Project WA-RD.
- [14] Piscsalko, G., Likins, G.E., White, B., June 2013. *Non-Destructive Testing of Drilled Shafts – Current Practice and New Method*. Proceedings from the International Bridge Conference: Pittsburg, PA.