

### 5. Analisi dell'integrità del palo attraverso il profilo termico - TIP

#### 5.1 Premessa

La realizzazione di pali trivellati o di pali gettati in opera dipende fortemente dall'esperienza e dalle capacità del produttore, degli ingegneri e degli ispettori addetti alla direzione e controllo dell'opera. Molte delle fasi di installazione e realizzazione di questi elementi strutturali comportano dei processi non controllabili direttamente dall'operatore.

Risulta quindi difficile individuare eventuali anomalie dimensionali e qualitative del materiale.

Allo stato attuale i metodi per valutare l'integrità delle fondazioni non forniscono delle informazioni complete sul reale stato della fondazione sia come forma sia come materiale. Alcuni metodi sono orientati per indagare sulla parte centrale del palo come il Cross-Hole (Cap. 4), altri, come il SIT o PIT (Cap. 6) presentano delle difficoltà interpretative quando il palo presenta più anomalie.

Il metodo del rilievo del profilo termico supera gli ostacoli indicati raggiungendo una migliore interpretabilità delle caratteristiche e anomalie del palo lungo la sua lunghezza.

#### 5.2 Il metodo termico - Thermal Integrity Profiling

Il metodo TIP, dall'acronimo Thermal Integrity Profiling, è stato sviluppato inizialmente dalla University of South Florida. Si basa sulla rilevazione dell'andamento della diffusione del calore di idratazione durante la fase di presa del calcestruzzo.

La misura viene effettuata sia attraverso una apposita sonda termica inserita nei tubi preannegati nel getto come nel Cross-Hole o attraverso sensori collegati alla gabbia di armatura. I sensori della sonda rilevano il calore generato dall'idratazione del calcestruzzo e la relativa diffusione verso il terreno.

Questo rilievo viene definito come profilo termico del palo.

Vari principi chimici e fisici si combinano nel concetto di profilo termico: produzione del calore nel calcestruzzo, caratteristiche termiche del terreno, diffusione del calore nel terreno, caratteristiche che, come risultato, producono il profilo di un palo per l'effetto di una specifica distribuzione della temperatura.

La quantità di calore generato è direttamente collegata con il mix design del calcestruzzo e con la tipologia di costituenti chimici del cemento.

Qualsiasi materiale produce calore durante la fase di idratazione. L'ampiezza di questo valore dipende dalla quantità di cemento rispetto alla quantità totale di materiale. Il flusso di calore che si dissipa nel terreno coinvolge simultaneamente il meccanismo di conduzione, convezione ed irraggiamento, dove il fenomeno di conduzione svolge un ruolo dominante. Analizzando il modo con cui un palo assume le sue capacità portanti risulta che la parte interna del fusto riveste un ruolo di resistenza al carico sovrastante mentre quella esterna, a contatto col terreno, attraverso l'attrito, genera la reazione che si traduce nella capacità di carico.

Questo permette di comprendere come sia importante verificare le caratteristiche del palo tra i tubi, come appunto fa il Cross-Hole, ma è altrettanto importante verificare le caratteristiche del materiale esterno, a contatto col terreno, scopo principale della prova TIP.

La diffusione del calore dipende particolarmente dalla quantità del materiale che si trova tra tubo e terreno. Quantità che in termini di spessore dovrebbe essere costante.

Il principio del metodo TIP si basa sul fatto che a parità di distanza tra tubo e terreno ed a parità di caratteristiche del materiale la diffusione del calore si svolge con andamento uguale, mentre la presenza di inclusioni e/o restrizioni, sono individuate come regioni "fredde" e le espansioni come regioni più "calde".

### 5.3 La procedura di prova

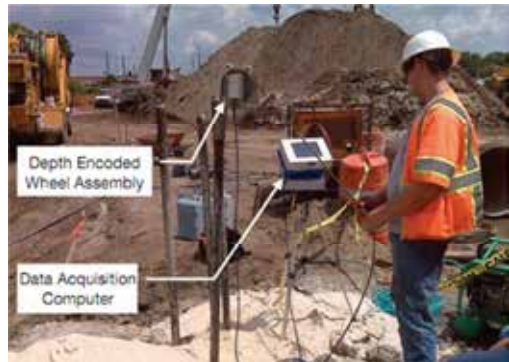
I valori di temperatura vengono acquisiti calando la sonda alla velocità di circa 02-04 m/s su ognuno dei tubi di ispezione a disposizione. La sonda di temperatura è dotata di 4 sensori ad infrarossi disposti ortogonalmente tra loro (0 - 90 - 180 - 270 gradi). La sonda è calata all'interno dei tubi in PVC, o plastica, preannegati, e misurando i valori di temperatura per l'intera lunghezza della fondazione in ogni direzione.

I tubi devono essere vuoti (senza acqua).

La rilevazione può essere effettuata nell'arco dal 1° al 8° giorno dal getto in funzione del diametro del palo. Più il diametro è grande e più si estende nel tempo il fenomeno esotermico.

La figura mostra la strumentazione TIP nella fase di misura.

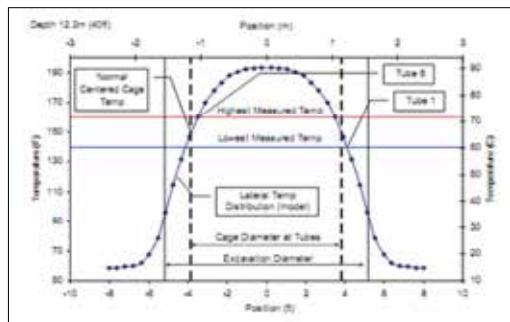
La sonda termica, calata lentamente lungo il tubo, trasmette i dati all'unità di acquisizione e registrando la posizione attraverso l'encoder.



La figura a fianco mostra la distribuzione della temperatura all'interno di una fondazione cilindrica. L'andamento assume la forma di una campana dove le estremità si estendono sino al terreno circostante, assumendo la stessa temperatura (nel grafico la temperatura è espressa in gradi Fahrenheit).

La misura della temperatura attraverso i tubi è determinata dalla posizione ed eccentricità della gabbia di armatura che influenzano allo stesso modo la dispersione del calore verso il terreno.

La temperatura in ogni tubo dovrebbe essere la stessa quando la gabbia di armatura è centrata. Una eccentricità della gabbia verso un lato dello scavo, comporta un riduzione del valore di temperatura nel lato vicino al terreno (minore spessore) ed un valore di temperatura maggiore (caldo) nel lato opposto con il tubo spostato verso il centro della fondazione.



Distribuzione della temperatura sul diametro

I tempi d'esecuzione sono comparabili a quelli della prova Cross Hole se eseguita su pali di modeste dimensioni (diametri da 600 – 800 cm) generalmente con 3 tubi di ispezione. Per i pali di maggiore dimensioni, che presentano un numero elevato di tubi di ispezione, il tempo per la prova Cross-Hole aumenta in quanto è necessario eseguire tutte le combinazioni ed incroci, mentre col TIP si esegue una singola scansione a tubo.

## 5.4 Esempi interpretativi

Solitamente le gabbie d'armatura non sono al centro della fondazione a causa della dimensione maggiore dello scavo, gabbia leggermente piegata, distanziali rotti o assenti, etc.. Pertanto i valori di temperatura acquisiti su tubi opposti avranno valori non uniformi, ossia più alti e più bassi quando la gabbia risulterà non centrata.

Comparando i valori di temperatura provenienti dai tubi opposti e confrontandoli con la media è possibile distinguere le anomalie dalla eccentricità della gabbia.

Inoltre attraverso il valore della differenza di temperatura (rispetto alla media) ed utilizzando la curva della distribuzione della temperatura, nella porzione lineare, è possibile determinare l'ampiezza dello spostamento e misurare lo spessore della parte corticale del palo (copriferro).

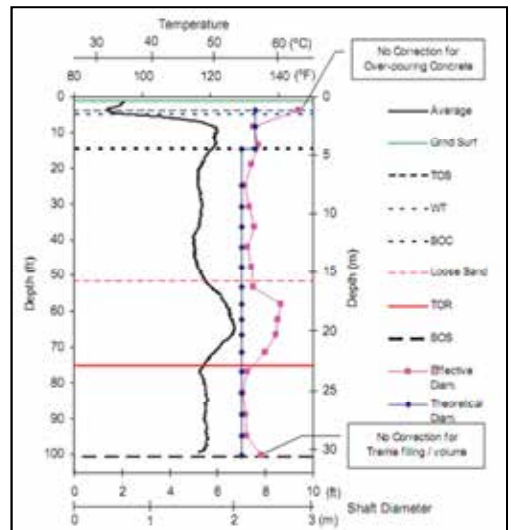
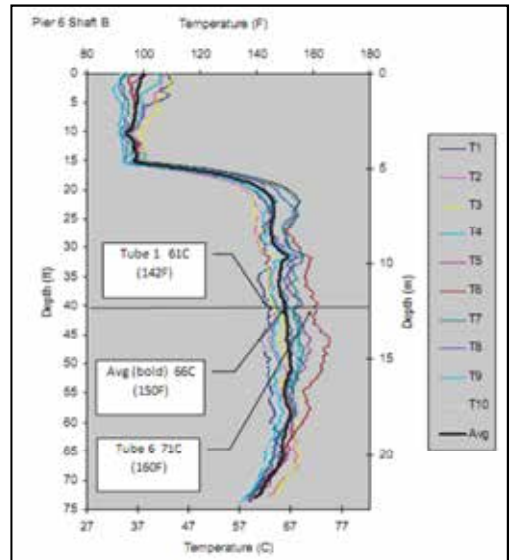
La figura a fianco mostra il risultato di una scansione mediante TIP, dalla quale è stata ricavato il grafico termico che mostra due tubi opposti con differenti valori di temperatura rispetto alla media. Questo fatto segnala lo spostamento della gabbia rispetto all'asse del palo.

I dati sono stati ottenuti da una indagine eseguita su una fondazione di dimensione 3,3 m di diametro strumentata con n. 10 tubi di ispezione.

Alla profondità di 9.8 m (32 ft) si evidenzia un leggero allargamento dello scavo. Tale anomalia è visibile in tutti i tubi ispezione con un aumento della temperatura.

La figura a fianco mostra i dati raccolti analizzando una fondazione di 2,1 m di diametro strumentata con n. 7 tubi di ispezione. L'immagine mostra come la curva di profilo ottenuta mediante l'analisi media delle temperature acquisite su tutti i tubi e quella ottenuta convertendo il volume di calcestruzzo giunto con i mezzi e convertito in diametro siano praticamente simili.

La correlazione tra la distribuzione radiale della temperatura in prossimità della gabbia d'armatura, insieme alla correlazione tra la media delle temperature acquisite su ogni singolo tubo per tutta la lunghezza, fornisce prove convincenti sull'affidabilità del metodo termico per la ricostruzione del profilo del palo e la diretta correlazione con la sua integrità.

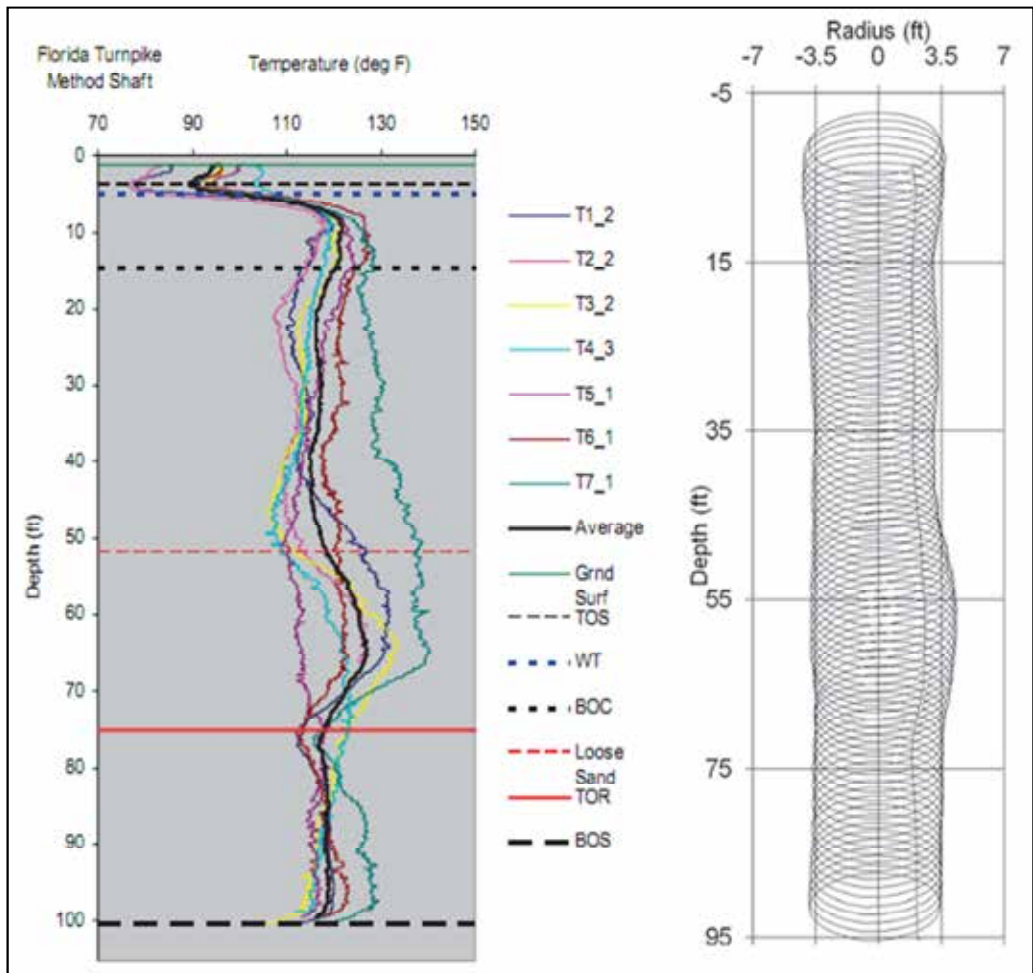


Così come la presenza di cemento in eccesso (zone calde) o la maggiore vicinanza del tubo alla parete dello scavo (minore cemento - zona fredda) influenzano la misurazione della temperatura, anche la presenza di cemento di scarsa qualità causa variazioni di temperatura riscontrabili.

La misura della temperatura in funzione della profondità per ogni singolo tubo di ispezione può essere analizzata per modellare il fusto in 3D.

Il palo della prova riportato a seguito, costruito appositamente per verificare i fenomeni termici che si producono alla presenza di determinati difetti, ha dimensioni di 1,2 m di diametro e di 7,6 m di lunghezza. Alla distanza di circa 1/3 dalla testa ed dal piede del palo sono state disposte delle "sacche" di tela agganciate alla parte esterna della gabbia, in modo da simulare le anomalie.

I difetti artificiali nella parte superiore sono divisi in due parti, mentre le sacche nella parte inferiore sono raggruppate insieme. La figura a seguito mostra i risultati dell'analisi termica eseguita 15 ore dopo la fase di getto.



Anche la presenza di cemento in accesso (zone calde) o la maggiore vicinanza della tubo alla parete dello scavo (minore cemento – zona fredda) influenzano la misurazione della temperatura.

In questo palo prova ci sono 3 tubi di ispezione in acciaio (numero 2 - 4 - 6) e 3 in PVC (numero 1 - 3 - 5).

I tubi in acciaio sono stati lasciati pieni di acqua per la prova Cross-Hole, mentre i tubi in PVC sono vuoti per permettere l'esecuzione della prova con la sonda termica.

Nella parte superiore del palo il "difetto" è stato posizionato in prossimità del tubo 3 ed un altro in prossimità del tubo 5, lasciando il tubo 1 libero da anomalie.

Eseguita la scansione è emersa una evidente riduzione della temperatura per i tubi 3 e 5, mentre per il tubo 1 una riduzione dovuta all'influenza della variazione di sezione generale.

Analizzando le scansioni è invece evidente la variazione nella parte bassa della fondazione in prossimità del tubo 1 simile a quella presente nel tubo 3.

Il difetto artificiale nella zona inferiore della fondazione era stato posizionato solo in prossimità del tubo 1.

Le variazioni di temperatura tra i differenti tubi indica anche un'eccentricità della gabbia di armatura. I profili relativi al tubo 1 e 3 mostrano differenti temperature dalla parte superiore a quella inferiore, mentre il profilo del tubo 5 rispecchia l'andamento del profilo ottenuto dalla media.

La linee tratteggiate si riferiscono all'allineamento della gabbia e servono come riferimento per individuare i difetti. La deviazione dalla linea indica la presenza di una restrizione o allargamento. Se è presente una restrizione in un tubo e nella parte opposta è presente un allargamento, ci troviamo nella situazione di uno spostamento della gabbia d'armatura ed in assenza di qualsiasi variazione della sezione.

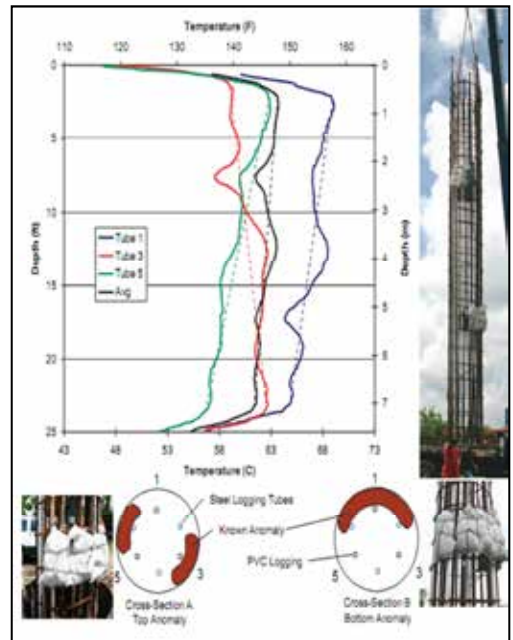
E' interessante osservare, che per questa condizione, eseguita l'indagine mediante Cross-Hole, nella stessa fondazione, non si è evidenziato nessun difetto.

### 5.5 Considerazioni finali

L'approccio termico fornisce una risposta globale della qualità di una fondazione, particolarmente nella parte corticale, oltre all'analisi del profilo, allineamento della gabbia, dimensione e qualità del copriferro e qualità del calcestruzzo su tutta la sezione.

La maggior parte dei dati acquisiti con la prova TIP non necessitano di modellazioni complesse, ma una semplice comprensione dei profili di temperatura legati alle caratteristiche del materiale ed alla forma della fondazione.

Comunque una modellazione eseguita in fase progettuale può essere comparata con i dati rilevati in sito attraverso le recenti tecniche di previsione sul comportamento "termico" durante la fase di idratazione per i componenti del calcestruzzo.



Il metodo TIP fornisce una nuova possibilità al settore delle indagini delle fondazioni profonde e offre la possibilità di analizzare quelle parti della fondazione difficilmente indagabili con i precedenti metodi.

La metodologia di prova TIP è conforme alla norma ASTM D7949 – Standard test methods for Thermal Integrity Profiling of concrete deep foundation.

### **5.6 Bibliografia**

- DFI Journal – Deep Foundation Institute Vol.4, N. 2 Dicembre 2010
- Thermal Integrity Profiling of drilled Shaft – Gray Mullins, Ph.D, P.E., Professor, Department of Civil Environmental Engineering, University of South Florida, Tampa, Florida, USA