

**POLITECNICO DI MILANO**  
Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea in  
Ingegneria Civile Idraulica

**BLESS: Bed LEvel Seeking System**  
Analisi dei dati di campo (Borgoforte, MN)



Relatore:  
Prof Francesco Ballio  
Co-Relatore:  
Ing. Gianluca Crotti

Tesi di Laurea di: Daniele Cattani  
Matricola: 841702

Anno Accademico 2016 – 2017

## **INDICE GENERALE**

<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUZIONE</b>	<b>4</b>
<b>1 STRUMENTI PER IL MONITORAGGIO DELLO SCAVO LOCALIZZATO: STATO DELL'ARTE</b>	<b>6</b>
<b>2 BLESS</b>	<b>11</b>
2.1 INTRODUZIONE	11
2.2 COMPONENTI	11
2.3 SETUP DI UTILIZZO	14
2.4 FUNZIONAMENTO QUALITATIVO DI CAMPO	15
2.5 VALUTAZIONE DELL'INTERFACCIA TRA I VARI AMBIENTI	16
<b>3 BORGOFORTE</b>	<b>22</b>
3.1 DAL CONSOLIDAMENTO AL MONITORAGGIO	22
3.2 BREVE INTRODUZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO	24
3.3 CONFIGURAZIONE E INSTALLAZIONE DI BLESS A BORGOFORTE	25
3.4 CARATTERISTICHE CIRCUITO SCALDANTE BLESS A BORGOFORTE	28
<b>4 DATI A DISPOSIZIONE E ANALISI PRELIMINARE</b>	<b>30</b>
4.1 ARCO TEMPORALE A DISPOSIZIONE	30
4.2 TIPOLOGIE DI DATI	30
4.3 FBG 6	32
4.4 METODI PER INDIVIDUARE L'INTERFACCIA	32
4.4.1 $\Delta T$	33
4.4.2 $\Delta\Delta T$	34
4.4.3 $\tau$	36
4.4.4 $\Delta\tau$	36
4.4.5 ANALISI CLUSTER (METODO DC)	37
4.4.6 RIEPILOGO	42
<b>5 2012</b>	<b>44</b>
5.1 $\Delta T$	44
5.2 $\Delta\Delta T$	45
5.3 $\tau$	46
5.4 $\Delta\tau$	47
5.5 DC	48
5.6 METODO GK	49
5.7 CONFRONTO TRA METODO GK E METODO DC	52

<b>6</b>	<b>CHECK 2013-2014</b>	<b>55</b>
<b>6.1</b>	<b>ANALISI DEL METODO GK</b>	<b>55</b>
<b>6.2</b>	<b>ANALISI DEL METODO DC</b>	<b>62</b>
<b>6.3</b>	<b>CONFRONTO METODO DC E METODO GK*</b>	<b>63</b>
<b>CONCLUSIONI</b>		<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>70</b>

## RINGRAZIAMENTI

---

*Volevo ringraziare il Prof. Francesco Ballio per aver assunto il ruolo di relatore. Un ringraziamento speciale va al co-relatore Ing. Gianluca Crotti che mi ha seguito costantemente in questo percorso di tesi sempre con grande disponibilità e professionalità, dedicandomi del tempo non solo durante la fase di stesura della tesi ma anche in corso d'opera, sostenendo più volte discussioni costruttive con me. Inoltre volevo ringraziare una persona speciale, che ha stravolto la mia vita universitaria e che mi ha sempre sostenuto in qualunque situazione e qualunque fosse il problema. Grazie Chantal per avermi fatto ridere anche quando ero triste e aver gioito con me nei momenti felici. Un ringraziamento è dovuto ai miei genitori, Claudio e Ornella, che mi hanno supportato (a volte sopportato) in momenti di crisi e che sono sempre stati fieri di me (io sarò sempre fiero di voi). Infine volevo ringraziare parenti e amici che in un modo o nell'altro mi hanno incoraggiato con un piccolo gesto o una parola di conforto.*

## INTRODUZIONE

---

Questo lavoro di tesi ha lo scopo di elaborare i dati di campo del sedimetro BLESS posizionato a valle della pila 30 (parzialmente immersa nel fiume Po) del ponte stradale di Borgoforte, Mantova.

BLESS (acronimo di Bed Level Seeking System) è stato brevettato dal Politecnico di Milano nel 2008 (prof. A. Cigada, F. Ballio e F. Inzoli) ed appartiene alla famiglia dei sedimetri, ovverosia quei dispositivi che sono a diretto contatto con gli ambienti di misura. Lo scopo di BLESS è la determinazione dell'interfaccia solido/liquida, nel caso specifico della posizione del fondo del fiume, quindi deve essere parzialmente infisso sia nel letto del fiume che nella corrente d'acqua. I sensori al suo interno riconoscono l'ambiente in cui sono situati, attraverso misure termiche.

Il principio di funzionamento di BLESS si basa sull'analisi dello scambio termico tra ambienti diversi, per questo motivo, al suo interno, è presente un circuito scaldante. Infatti attraverso la generazione di un impulso termico si osserva la differente risposta dei sensori nei due ambienti: il sensore in acqua percepisce un minor incremento di temperatura poiché l'acqua corrente dissipa facilmente il calore per convezione. Di contro, il sensore interrato, percepisce un aumento termico maggiore dato che la terra dissipa per conduzione (processo meno efficiente e più lento della convezione). Noto l'ambiente a cui i vari sensori sono immersi (e nota la posizione dei sensori) il fondo è situato tra l'ultimo sensore in acqua e il primo in terra.

Il sedimetro BLESS oggetto della tesi rientra negli strumenti che compongono l'impianto fisso di monitoraggio in tempo reale della vulnerabilità idraulica del ponte stradale sul fiume Po in località Borgoforte (Mantova). I dati analizzati coprono una finestra temporale di 3 anni: 2012 – 2014.

Il sistema di monitoraggio è stato realizzato per monitorare lo stato di salute della pila 30 del ponte stradale, immersa nel fiume Po, quella più vicina alla sponda idraulica destra. Il problema principale che affligge le strutture parzialmente immerse nei corsi d'acqua è il fenomeno dello "scavo localizzato". Per il corso d'acqua la generica pila di ponte è un ostacolo che deve aggirare per poter proseguire il suo corso. La variazione delle traiettorie per superare la pila crea un sistema tridimensionale di vortici capace di asportare i sedimenti attorno alla pila creando una buca (d'erosione). Durante eventi di piena ove la velocità della corrente aumenta l'erosione localizzata può asportare materiale fino a destabilizzare la struttura e, nei casi peggiori, portare al suo collasso. Attualmente nessuno strumento commerciale può definirsi standard per quota tipologia di misura.

L'analisi dati è stata suddivisa in tre parti principali: la definizione dei metodi per la determinazione della quota del fondo del fiume, una prima validazione utilizzando il primo anno di acquisizioni (2012) e una validazione successiva (2013-2014). Il primo metodo (denominato DC) è basato sull'analisi cluster. Definito il numero degli ambienti di misura (acqua e terra), l'analisi cluster individua, mediante un algoritmo, quali e quanti sensori si trovano nello stesso ambiente. Il principale vantaggio di questo metodo è la sua generalità di applicazione, ovverosia i dati sono considerati come un insieme di punti e l'algoritmo permette di suddividerli in sottoinsiemi, a prescindere dal significato e dalla provenienza dei dati stessi. Il secondo metodo (denominato GK) è concettualmente opposto, ovverosia si basa sull'analisi dati individuando i parametri che governano lo scambio termico cercando di determinare delle soglie di appartenenza ai due ambienti.

Entrando nello specifico, il capitolo 1 riguarda lo stato dell'arte degli strumenti atti al monitoraggio delle pile dei ponti soggette a scalzamento al piede. L'obiettivo è quello di fare un quadro generale sull'evoluzione nel tempo di tali dispositivi, riassumere le tecniche utilizzate e capire quante possano fornire registrazioni continue anche durante eventi di piena. Il capitolo 2 descrive le componenti di BLESS e il suo funzionamento, analizzando gli output forniti, ovverosia le curve scaldanti, e facendo una prima elaborazione della temperatura e della sua variazione. Il capitolo 3 è incentrato principalmente sulla configurazione dello strumento applicato a Borgoforte e sui lavori che hanno permesso la sua installazione. Il capitolo 4 spiega nel dettaglio i metodi (GK e DC) illustrando il loro principio di funzionamento con esempi specifici. Il capitolo 5 applica tali metodi al 2012, con lo scopo di tarare i sistemi per ottenere sempre la quota del fondo. Il capitolo 6 proietta le analisi fatte nel 2012 agli anni 2013-2014.

# 1 STRUMENTI PER IL MONITORAGGIO DELLO SCAVO LOCALIZZATO: STATO DELL'ARTE

---

BLESS (acronimo di Bed LLevel Seeking System), brevettato nel 2007/2008 dal Politecnico di Milano, è uno strumento che consente di determinare il fondo di un fiume in tempo reale vicino a strutture parzialmente immerse nella corrente, come ad esempio le pile di ponti. È stato pensato per funzionare in continuo anche durante eventi di piena ove il fenomeno denominato “scavo localizzato” [BW. Melville e al, 2000] è più intenso e quindi può creare buche di erosione tali da destabilizzare la struttura provocando, nei casi più estremi, il collasso della stessa [J.-L. Briaud, 2006].

Dopo una prima sperimentazione in laboratorio (i risultati principali sono in S. Manzoni et al, 2011) è stato applicato in campo (nel 2011) sul ponte stradale di Borgoforte che collega Mantova a Modena (grazie alla Provincia di Mantova) all'interno dei lavori di rinforzo delle pile del suddetto ponte [S. Franzetti et al, 2012]. Si rende quindi necessaria un'analisi bibliografica per capire da un lato la possibile evoluzione degli strumenti per la determinazione della quota del fondo del fiume e dall'altro cosa attualmente il panorama mondiale identifica come strumentazione per questa tipologia di applicazione. La ricerca bibliografica è stata orientata sull'individuazione degli strumenti per il monitoraggio dello scavo localizzato attorno alle pile di ponti, sia a livello di laboratorio che di campo.

Il canale principale di ricerca utilizzato, al fine di ottenere il materiale necessario all'analisi, è il sito di carattere scientifico “Scopus” (www.scopus.com) supportato da altri canali quali “Science Direct”, “Springer Link”, “Web of Science” e “Google Scholar” nel caso in cui fossero nominati degli articoli assenti dal sito principale. Tra le parole chiave utilizzate per la ricerca si hanno: “Scour Measurement”, “Bridge Scour”, “Pier Scour”, “Local Scour” e “Scour Monitoring”, sfruttando la bibliografia degli articoli trovati per ampliare il repertorio di informazioni. L'arco temporale considerato non prevede alcun limite inferiore/superiore. Nello specifico gli articoli esaminati spaziano dal 1989 al 2017 come mostrato in **Tabella 1.1**:

CATEGORIA	1989	1992	1994	1995	1996	1998	2002	2003	2004	2005	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
SEDIMETRI				C			C	L		L				C	L	L	L	L	L	C	
INCLINOMETRI											L						L	L			L
AD USO SINGOLO		L	C									C						L			
ULTRASUONI	C	L		C	C		C							L		L	L	L			C
ONDE ELETTRO-MAGNETICHE	C					L+C		L	C				L	L			L	L			L
IMMAGINI																		L	L		

**Tabella 1.1: Tabella riassuntiva dell'analisi bibliografica.**

La **Tabella 1.1** presenta gli anni disposti lungo le colonne e le categorie di strumenti lungo le righe. Sono stati riportati solo gli anni in cui è presente almeno un articolo e sono stati colorati di nero quelli in cui è stato scritto un articolo riassuntivo (inteso come articolo che vuole fare il punto della situazione sulla strumentazione utile per il monitoraggio dello scavo localizzato). Le categorie colorate di grigio, sono quelle contenenti strumenti che devono essere immersi totalmente o parzialmente in acqua per misurare la posizione del fondo mentre i restanti hanno un'installazione più semplice dato che non devono essere a contatto con il fiume. Le sigle utilizzate sono:

- **C**: articoli riguardati applicazioni in campo;
- **L**: articoli riguardanti esperimenti in laboratorio;
- **L+C**: articoli che trattano sia di esperimenti in laboratorio che di applicazioni in campo.

Tra le macro categorie di strumenti prese in esame si hanno:

- **SEDIMETRI**

Strumenti a diretto contatto con l'ambiente di misura, in parte immersi nell'acqua corrente e in parte interrati nel fondo del fiume. Sono composti da più sensori che riescono, a prescindere dal metodo, a capire l'ambiente in cui sono immersi. Nota la loro posizione è possibile individuare l'interfaccia acqua/terra tra l'ultimo sensore in acqua corrente e il primo interrato (sensori piezoelettrici, sensori Bragg, dissolved oxygen probe).

- **INCLINOMETRI**

Strumenti che misurano gli spostamenti del ponte su cui sono installati. Attraverso l'utilizzo di modelli matematici (ad esempio ad elementi finiti) viene ricavata indirettamente l'entità



della buca di erosione che aumenta la lunghezza di libera inflessione della pila e quindi gli spostamenti del ponte stesso (inclinometri, accelerometri).

- **USO SINGOLO**

In questa categoria sono contenuti tutti quegli strumenti che, una volta misurata lo scavo localizzato, devono essere reinstallati manualmente dagli operatori (catene, sensori ad uso singolo, Magnetic Sliding Collar).

- **ULTRASUONI**

Sono tutti quei dispositivi posizionati sulle pile del ponte (o ad un supporto ad hoc) che emettono ultrasuoni e ne registrano la riflessione sul fondo. Nota la velocità dell'onda e il tempo impiegato dall'istante di immissione a quello di ricezione, è ricavabile la distanza strumento-fondo (sonar, sonar scanner).

- **ONDE ELETTROMAGNETICHE**

Questa categoria funziona come la precedente, l'unica differenza è il tipo di segnale emesso, ovverosia l'onda elettromagnetica. Il radar è il tipico strumento che opera con questo segnale e questa tipologia di dispositivi possono essere sia immersi (TDR=Time Domain Reflectometry) che posizionati sopra la superficie dell'acqua (GPR=Ground Penetrating Radar).

- **IMMAGINI**

L'ultimo gruppo contiene tutti quegli strumenti che acquisiscono immagini del letto del fiume come videocamere o fotocamere. Tali misure possono essere utilizzate direttamente, nota la posizione dell'apparecchio, o elaborate attraverso algoritmi di fotogrammetria.

La ricerca effettuata ha portato ad un totale di 41 articoli. Osservando la **Tabella 1.1** si nota che fino al 2002 sono state eseguite principalmente applicazioni di campo per tutte le categorie, a meno per quella delle immagini che risulta essere nata di recente. Dal 2002 al 2008, anno in cui è stato brevettato BLESS, si osserva una diminuzione di pubblicazioni in questo ambito, fino a giungere al 2010, in cui sono ripresi gli studi riguardanti la maggior parte di tecnologie seppur attraverso esperimenti in laboratorio. Una delle categorie di dispositivi più testate negli ultimi anni è sicuramente quella dei sedimenti, categoria in cui rientra anche lo strumento oggetto di questo lavoro di tesi, ovverosia BLESS.

Alcuni commenti possono essere fatti per le diverse categorie di strumenti:

- I sedimenti comprendono strumenti basati su diversi fenomeni. Ad esempio BLESS sfrutta il diverso comportamento termico degli ambienti di misura per distinguere l'interfaccia acqua/terra. Tale strumento acquisisce dati in ogni condizione idrodinamica però necessita di una validazione dei dati al fine di rendere l'analisi automatica [G. Crotti et al, 2016]. Oppure i sensori piezoelettrici registrano le deformazioni trasformandole in variazioni di potenziale. Le misure così effettuate sono influenzate dalle vibrazioni generate dalla corrente o dal traffico sul supporto a cui è ancorato lo strumento [L.J. Prendergast et al, 2014]. Infine ci sono sensori in grado di misurare l'ossigeno disciolto che sono influenzati dalla temperatura e da altri parametri su cui non è stata eseguita ancora alcuna analisi in laboratorio [F. Azhari et al, 2016];
- Gli strumenti che devono essere reinstallati manualmente (uso singolo) non forniscono misure continue del fondo e del parziale riempimento della buca durante la fase calante della piena, sebbene siano di facile utilizzo ed installazione [C. Wang et al, 2017];
- Gli strumenti che misurano il movimento del ponte al fine di ricavare l'entità della buca d'erosione (inclinometri), sono influenzati da fattori quali il traffico, il vento e la temperatura, tutte grandezze molto variabili durante eventi di piena [C. Wang et al, 2017];
- I dispositivi basati sugli ultrasuoni sono influenzati dalla corrente e da tutto ciò che è presente al suo interno (aria dovuta alla turbolenza, sedimenti sospesi, ecc...), i risultati possono essere di ardua interpretazione e analisi [C. Wang et al, 2017];
- La categoria di apparecchi che sfruttano le onde elettromagnetiche per determinare la quota del fondo comprende strumenti quali il TDR (Time Domain Reflectometry) e il GPR (Ground Penetrating Radar): il primo deve essere infisso nel terreno, ha un breve raggio d'azione e richiede personale qualificato per l'interpretazione dei suoi risultati [C. Wang et al, 2017], il secondo invece non è immerso in acqua, però richiede operazioni manuali escludendo così misurazioni durante eventi di piena [L.J. Prendergast et al, 2014];
- Sugli strumenti che acquisiscono immagini non si hanno molte informazioni e le uniche in possesso riguardano esperimenti in laboratorio. Le videocamere sono precise ma molto delicate, infatti potrebbero essere danneggiate dalla corrente. Inoltre necessitano di regolare manutenzione per la pulizia dell'obiettivo affinché possano funzionare al meglio [W.-Y. Chang et al, 2014]. Le fotocamere forniscono informazioni molto precise ma anch'esse sono soggette alla corrente e non possono entrare a diretto contatto con il fondo. In più, il proiettore di luce deve essere posizionato nel modo corretto al fine di permettere analisi fotogrammetriche [K. Porter et al, 2014];

Anche se la ricerca bibliografica può essere raffinata ulteriormente, a Novembre 2017 emerge che non esiste nessuna strumentazione che possa definirsi standard per il monitoraggio continuo della quota del fondo del fiume vicino alle pile di ponti (o in generale vicino alle strutture parzialmente immerse nella corrente).

## 2 BLESS

---

### 2.1 INTRODUZIONE

BLESS (acronimo di Bed LEvel Seeking System) è uno sedimetro atto al monitoraggio dello scavo localizzato in prossimità delle pile dei ponti ed è stato brevettato dal Politecnico di Milano [A. Cigada et al., 2008], i cui inventori sono: prof. Francesco Ballio (Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, sezione Idraulica), prof. Alfredo Cigada (Dipartimento di Meccanica, sezione Misure) e prof. Fabio Inzoli (Dipartimento di Energia).

### 2.2 COMPONENTI

**FIBRA OTTICA**: Può condurre al suo interno luce e il comportamento è influenzato da molti fattori (temperatura, pressioni, sforzi tensionali o più in generale stress meccanici). In ambito sensoristico viene realizzata in modo da amplificare la risposta degli impulsi esterni al fine di identificarli. L'assenza di corrente elettrica fa sì che la fibra ottica non sia influenzata in alcun modo da interferenze elettromagnetiche che potrebbero inficiare i dati campionati. Inoltre attenua debolmente il segnale trasmesso, consentendo di avere il sistema di interrogazione lontano anche svariati chilometri dai sensori [B. Griffoni et al, 2010]. Per informazioni più dettagliate riguardanti la fibra ottica, la sua composizione e il suo funzionamento si rimanda al Cap. 2.1.1 della tesi di laurea magistrale di M. Peduzzi (2016).

**SENSORI**: sono realizzati illuminando lateralmente il nucleo della fibra tramite una radiazione localizzata nel campo dell'UV [K.O. Hill et al, 1997]. Questa radiazione permette di alterare permanentemente l'indice di rifrazione del nucleo della fibra in una determinata posizione (i punti 1,2 e 3 in **Figura 2.1 C**). La parte di fibra alterata prende il nome di sensore a reticolo di Bragg (FBG ovvero Fiber Bragg Grating). Una volta illuminata la fibra ottica (**Figura 2.1 A**), il sensore di Bragg riflette una particolare lunghezza d'onda ( $\lambda_B$ , definita durante la sua realizzazione) come mostrato in **Figura 2.1 D** ed è trasparente a tutte le altre (**Figura 2.1 B**). Tale lunghezza d'onda cambia a seconda dello stress a cui viene sottoposta (la variazione di lunghezza d'onda  $\Delta\lambda$  può

essere positiva o negativa rispetto alla  $\lambda_B$  come mostra la **Figura 2.1 E**). La  $\lambda_B$  è definita durante la creazione fisica dell'FBG ed è caratterizzata da una temperatura di riferimento (solitamente 20°C) in condizioni di riposo (specifiche certificate dal fornitore).

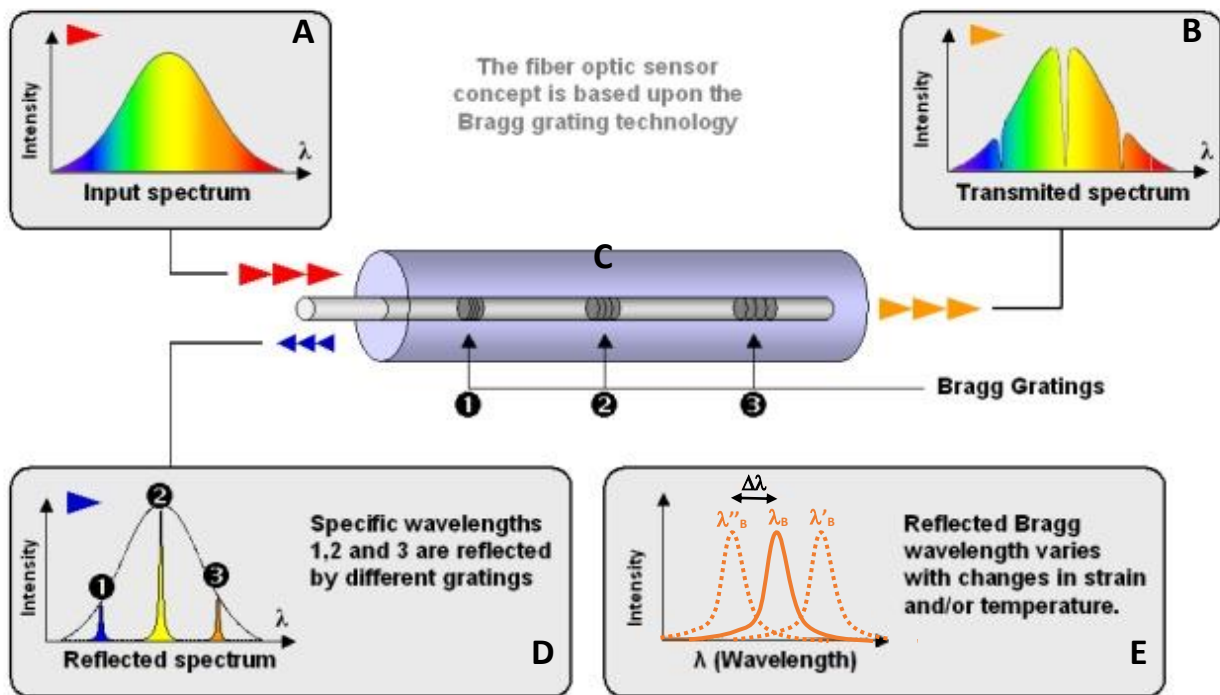


Figura 2.1: Funzionamento dei sensori a reticolo di Bragg (trovata in internet).

Come in precedenza affermato, l'FBG è adatto sia per misure meccaniche che per misure termiche e l'equazione generale che tiene conto di entrambi questi fattori è la seguente:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T \quad (Eq. 1.1)$$

Dove  $(1 - p_e)$  è un coefficiente di taratura,  $\varepsilon$  è la deformazione meccanica,  $\Delta T$  è la variazione di temperatura percepita,  $\alpha_A$  è il coefficiente di dilatazione termica del vetro (principale componente della fibra ottica) per unità di temperatura, mentre  $\alpha_n$  è la variazione dell'indice di rifrazione sempre per unità di temperatura.

BLESS, per come è stato concepito, deve registrare solo misure di temperatura, perciò i sensori sono resi insensibili a stress meccanici attraverso l'aggiunta di un tubo rigido in acciaio, all'interno

del quale la fibra è lasciata volutamente lasca, come mostrato nella configurazione commerciale di **Figura 2.2**.



**Figura 2.2:** Configurazione commerciale di un FBG (posto a metà della lunghezza del tubo rigido) per le misure di temperatura.

In questo caso l'*equazione 1.1* si semplifica, ottenendo così:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (\text{Eq. 1.2})$$

Questo tipo di sensori ha diversi vantaggi tra cui il fatto che si possano realizzare più reticoli di Bragg, caratterizzati ciascuno da una diversa lunghezza d'onda di riferimento, all'interno della stessa fibra ottica. Ciò consente di monitorare più punti della stessa struttura e di contenere i costi e il grado d'ingombro del dispositivo [F. Ballio et al, 2016]. Infine si fa notare che la precisione della misura coincide con l'interasse tra i sensori FBG (più i sensori sono vicini e maggiore sarà la precisione).

**CIRCUITO SCALDANTE** è composto da una resistenza che al passare della corrente elettrica produce calore attraverso l'effetto Joule. Il circuito scaldante permette a BLESS non solo di misurare la temperatura dell'ambiente in cui è situato un certo sensore (non attivando il riscaldamento), ma anche lo scambio termico degli ambienti stessi. Per questo motivo tale componente è considerato l'aspetto innovativo di questo strumento. Si vuole precisare che il circuito scaldante non deve per forza essere di carattere elettrico.

Le tre componenti principali di BLESS sono poi rivestite da una protezione finale che ha un duplice scopo: da un lato impermeabilizza BLESS, in modo che il circuito scaldante non sia a diretto contatto con l'acqua e dall'altro consente la dissipazione del calore prodotto.

## 2.3 SETUP DI UTILIZZO

Le componenti del sistema che permettono il funzionamento di BLESS sono:

- *l'interrogatore di fibre ottiche (Figura 2.3 A)* che consente di emettere luce all'interno della fibra (e di BLESS) e di ricevere le lunghezze d'onda che si riflettono dai vari FBG presenti;
- *l'alimentatore (Figura 2.3 B)* che permette di gestire il sistema scaldante e settare la potenza dissipata dal circuito elettrico;
- *il computer (Figura 2.3 C)* che elabora i dati acquisiti e può comandare l'alimentatore (accensione e spegnimento) e l'interrogatore;
- *BLESS (Figura 2.3 D)* che è posizionato verticalmente a contatto con gli ambienti di misura, ovvero avrà "M" sensori interrati nel letto del fiume e "N" sensori in acqua corrente.

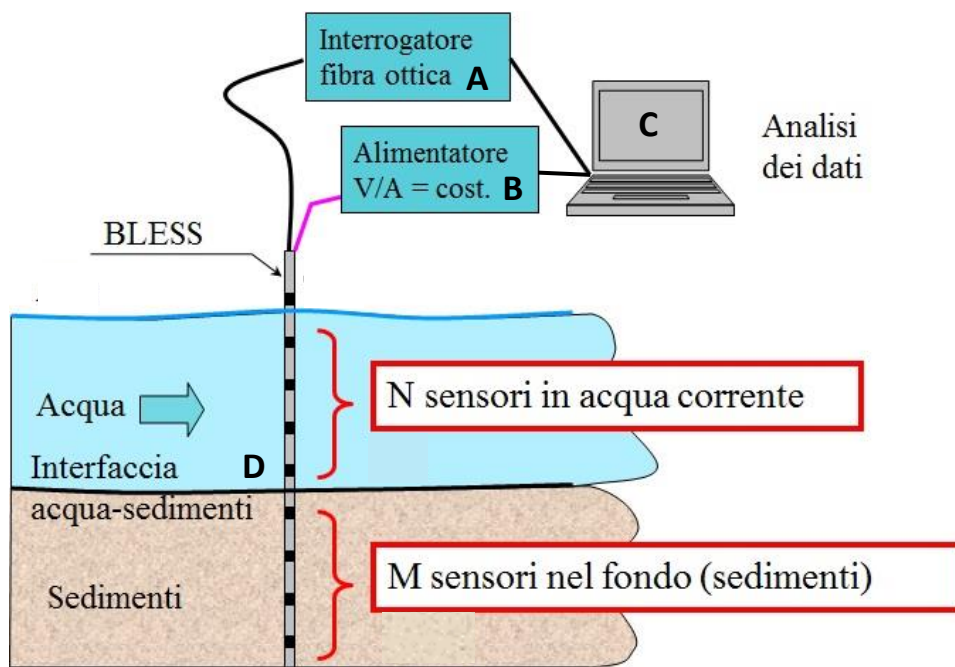
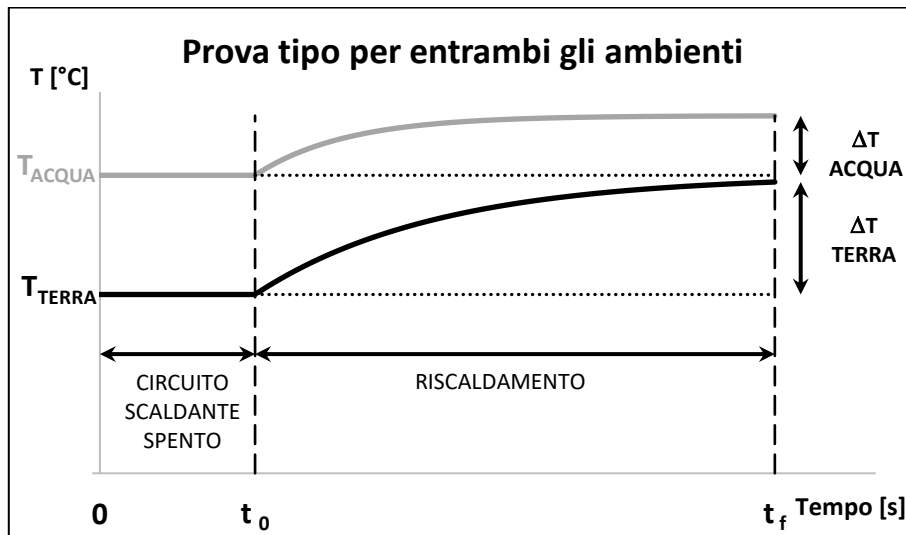


Figura 2.3: Configurazione del sistema che permette il funzionamento di BLESS.

La prova tipo consiste nell'accendere l'interrogatore di fibra ottica e iniziare a emettere luce attraverso la fibra (Figura 2.4 da 0 a  $t_0$ ), dopodiché si accende anche il circuito scaldante, (Figura 2.4 da  $t_0$  a  $t_f$ ). Il computer registra le onde riflesse e le trasforma in temperatura (attraverso parametri di conversione forniti dal produttore di fibra ottica). Ciò che si ottiene è la temperatura ambiente nella prima parte di acquisizione ( $0-t_0$ ) e una curva scaldante nella seconda ( $t_0-t_f$ ). Tale

curva ha specifiche caratteristiche in base all'ambiente in cui è immerso il sensore come mostrato nello schema qualitativo di **Figura 2.4**.



**Figura 2.4:** Risposta dell'acqua e del terreno al riscaldamento.

Una caratteristica della curva è la variazione di temperatura  $\Delta T$ , ovverosia la differenza tra la temperatura percepita dal generico FBG a fine riscaldamento ( $t_f$ ) e la temperatura ambiente ( $t_0$ ).

## 2.4 FUNZIONAMENTO QUALITATIVO DI CAMPO

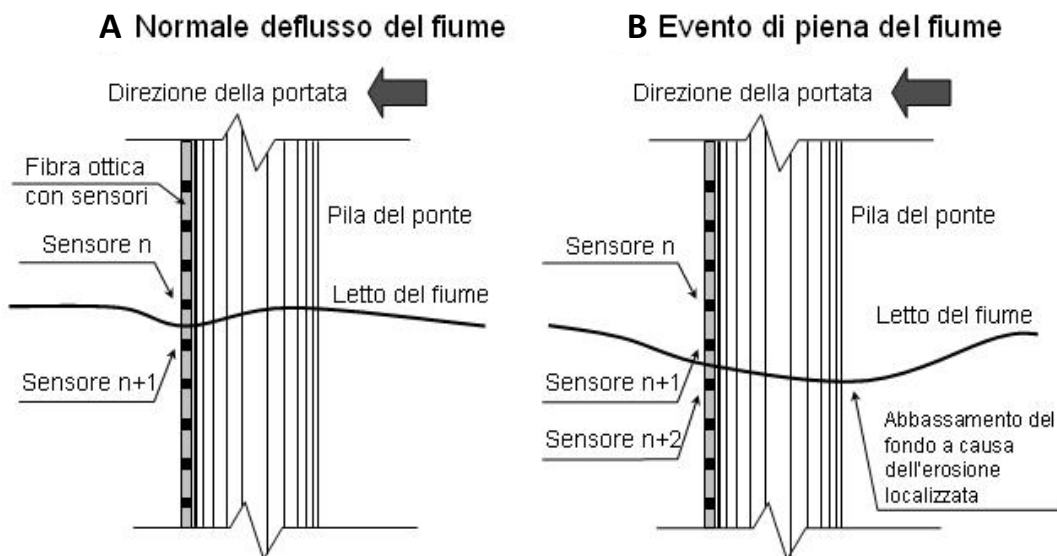
*Questo paragrafo è stato estratto da Crotti G., Ballio F., Manzoni S., Cigada A., Inzoli F., Someda C., Griffoni B. (2010), "Strumento per il monitoraggio in tempo reale dello scavo localizzato attorno alle pile di ponte", 12° Convegno Nazionale delle Tecnologie Fotoniche, Pisa, 25-27 Maggio 2010.*

BLESS è posizionato verticalmente vicino alla generica pila di ponte, **Figura 2.5 A**. Come mostra la **Figura 2.5 A** i sensori possono trovarsi in due ambienti differenti: in acqua corrente oppure interrati nel sottosuolo. A seconda dell'ambiente circostante parte del calore prodotto dal circuito elettrico verrà dissipato per conduzione (nel sottosuolo) o per convezione (in acqua corrente); dunque un certo numero di sensori si troverà esposto alla corrente, mentre altri si troveranno al di sotto del fondo, immersi nel terreno. A fine riscaldamento la temperatura misurata dai sensori esposti alla corrente sarà inferiore rispetto alla temperatura misurata sul fondo. Tra tutti i sensori presenti all'interno della fibra ci saranno due sensori adiacenti che restituiscono due temperature notevolmente differenti, una più bassa, per l'ultimo sensore esposto all'acqua corrente ed una più



alta, per il primo sensore interrato. Questi due sensori definiscono l'intervallo di quota entro il quale si trova il fondo del fiume. La risoluzione della misura dipende dell'interasse tra i sensori stessi. Si nota come non sia necessario riconoscere l'esatto valore di temperatura fornita dai due sensori: è sufficiente che sia apprezzabile il salto conseguente alle due diverse condizioni.

Durante un evento di piena si crea una buca d'erosione attorno alla pila, **Figura 2.5 B**. Il generico sensore n+1 che in condizioni normali è interrato, durante un evento di piena, a causa dell'erosione localizzata intorno alla pila, viene scoperto e rimane esposto alla corrente; la temperatura rilevata da questo sensore si modifica radicalmente in quanto, il nuovo scambio termico per convezione, aumenta il calore asportato diminuendo la temperatura percepita dal sensore stesso. L'evolversi della morfologia del fondo può essere monitorata individuando in ogni istante temporale i due sensori che definiscono il limite dei due ambienti: acqua corrente e fondo del fiume.



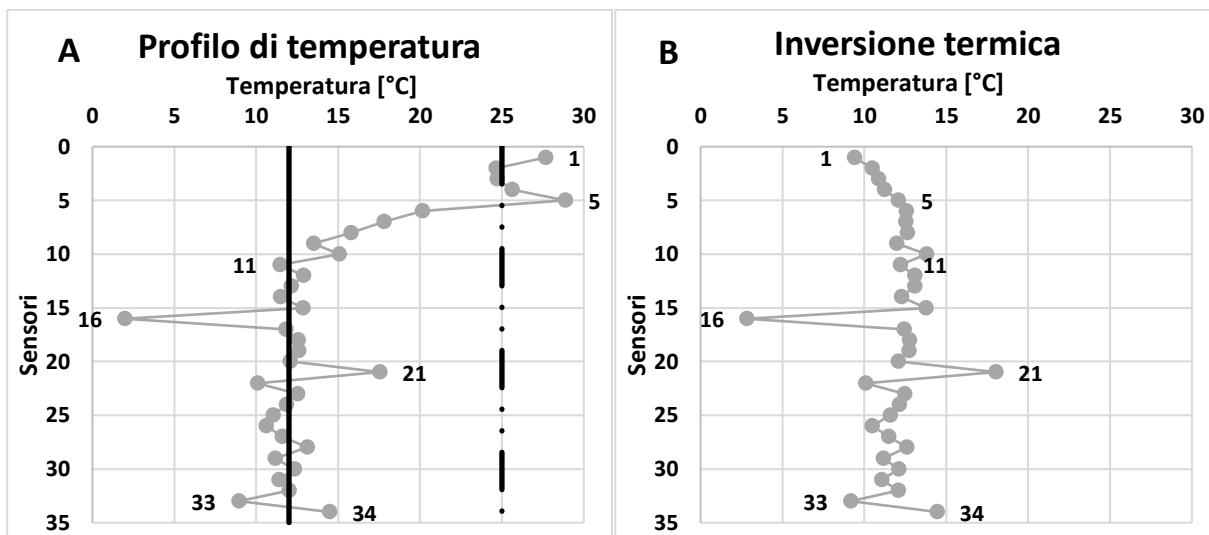
**Figura 2.5:** Schematizzazione dello strumento e dell'ambiente in cui è immerso; **A) fondale in condizioni di normale deflusso; B) buca di erosione in condizione di piena.**

## 2.5 VALUTAZIONE DELL'INTERFACCIA TRA I VARI AMBIENTI

Dato che BLESS può funzionare sia a circuito scaldante spento che acceso, si vuole mostrare come sia possibile definire l'ambiente di misura (acqua corrente o sedimenti) analizzando le temperature (T) o i salti termici ( $\Delta T$ ). Si vuole precisare che l'analisi della temperatura non rientra in questo lavoro di tesi ma per completezza espositiva si vogliono fornire comunque alcune informazioni riguardo a tale parametro.

## Temperatura

Nel caso in cui non venga acceso il sistema scaldante (*Figura 2.4* da 0 a  $t_0$ ), BLESS funziona come un termometro. Questo permette di distinguere i due ambienti acqua e terra che sono caratterizzati da un range di temperature diversi come mostrato in *Figura 2.5* (Figura da Cap. 3.1 della tesi di primo livello di F. Landro e R. Scansani 2013) in cui si mostrano due profili di temperatura registrati da BLESS posizionato a Borgoforte (34 sensori FBG)



*Figura 2.5: A) generico profilo di temperatura (29/7/12, B) un profilo di temperatura affetto da inversione termica (5/11/12).*

La temperatura ambientale, e quindi questo tipo di profilo, è fortemente influenzata dalle condizioni climatiche (pioggia/sole/nuvoloso), dall'andamento della temperatura all'interno della singola giornata (giorno/notte) e dall'andamento della T a livello stagionale (caldo in estate, freddo in inverno). La *Figura 2.5* riporta due esempi che consentono di apprezzare la non robustezza di questa tipologia di analisi. Durante il periodo estivo, *Figura 2.5 A*, è possibile distinguere due gruppi di risposte: i sensori da 1 a 5 sono in acqua (in quanto registrano temperature elevate) e i sensori dall'11 al 34 (temperatura minore) sono in terra (per i comportamenti anomali dei sensori 16, 21, 33 e 34 si rimanda alla tesi di primo livello di F. Landro e R. Scansani 2013). Dal sensore 5 al sensore 11 si ha una graduale diminuzione di T che non consente di posizionare questi sensori (dal 6 al 10) in nessuno dei due ambienti. Si può concludere che il fondo del fiume si trova tra il sensore 5 (ultimo sensore in acqua corrente) e l'FBG 11 (primo sensore in terra). L'incertezza di questa misura è data dalla distanza tra questi due sensori, che nel caso di Borgoforte è di 3 metri (ogni sensore è distante 50 cm dal successivo). Un comportamento simile si riscontra in inverno

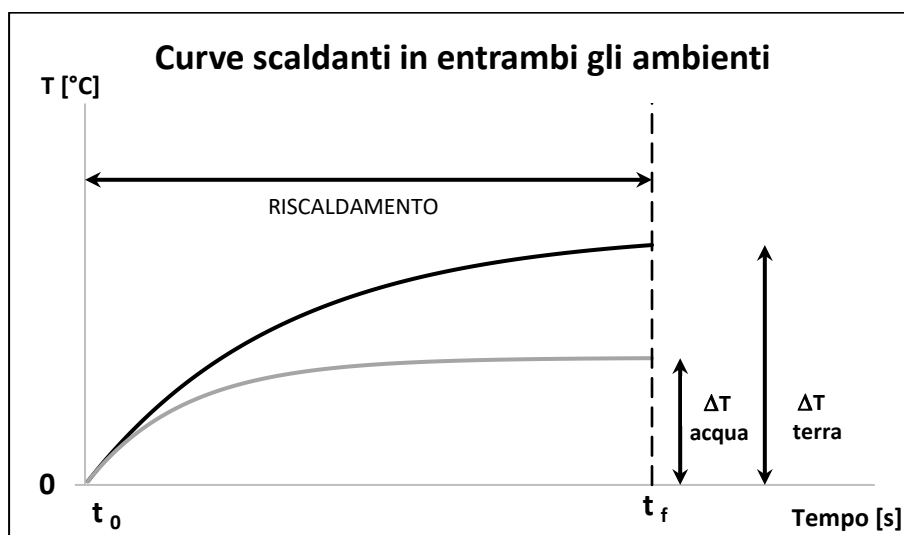
(grafico non riportato) ove le temperature sono molto diverse tra i due ambienti (in inverno la  $T_{\text{acqua}} < T_{\text{terra}}$  mentre in estate  $T_{\text{acqua}} > T_{\text{terra}}$ ).

Ciò non avviene invece in primavera o in autunno in cui si presenta un'inversione termica, la quale comporta periodi in cui non si hanno due range ben distinti di temperatura, bensì una nuvola di punti abbastanza allineati (**Figura 2.5 B**). in questi casi è molto complicato, se non impossibile, determinare la posizione del fondo.

Oltre all'analisi del singolo profilo (analisi in real-time), sono state provate strade alternative: analisi dei profili giornalieri e analisi di lungo periodo (settimanali, mensili). Entrambi questi metodi necessitano di una serie storica di dati, ciò comporta l'impossibilità di valutare il fondo del fiume in tempo reale. Ulteriori informazioni in F. Landro e R. Scansani 2013.

### Variatione di temperatura $\Delta T$

Affinché si possa apprezzare meglio la variazione di temperatura, alle curve scaldanti viene sottratta la propria temperatura iniziale (**Figura 2.4**  $T_{\text{ACQUA}}$  e  $T_{\text{TERRA}}$ ). Il risultato viene proposto in **Figura 2.6**.

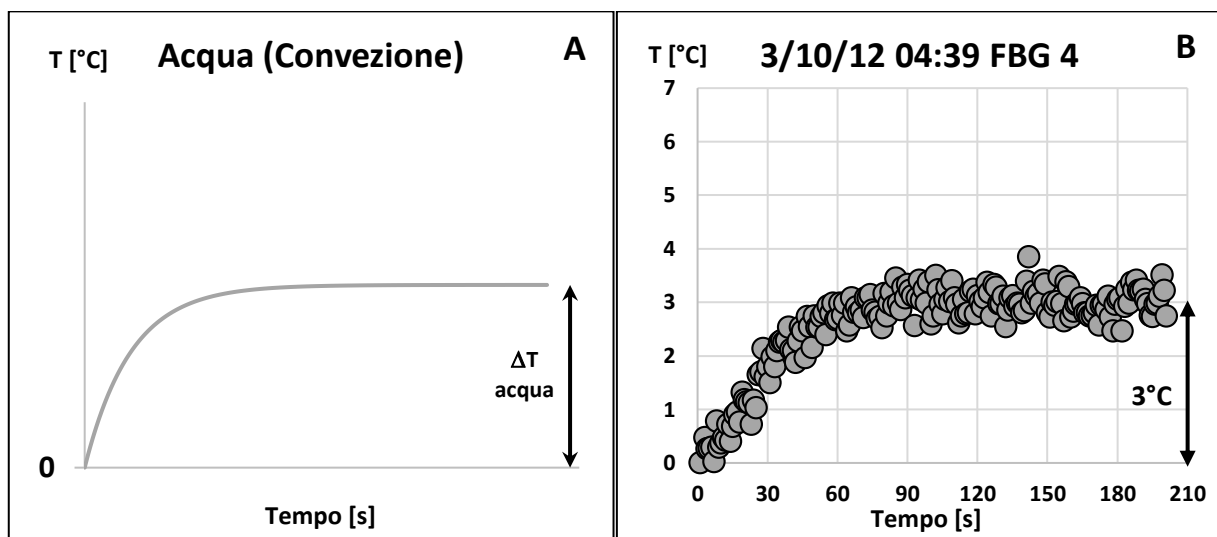


**Figura 2.6:** Curve scaldanti depurate dalla temperatura iniziale.

La **Figura 2.6** mostra l'andamento qualitativo dell'incremento della temperatura nel tempo ed enfatizza la diversa risposta dei due ambienti (acqua e terra) all'impulso di calore. La principale differenza è il diverso scambio termico, per conduzione (in terra) e per convezione (in acqua

corrente). Per maggiori informazioni sulla trattazione teorica dello scambio termico nei due ambienti si rimanda al Cap. 2.2 della tesi di laurea di M. Peduzzi (2016).

Sensore in acqua (curva grigia): l'acqua dissipa il calore per convezione in modo efficiente e veloce. La **Figura 2.7 A**, infatti, mostra che dopo un breve transitorio la temperatura percepita dal sensore raggiunge una condizione di equilibrio stabilizzandosi nel tempo. In **Figura 2.7 B** si mostra una acquisizione reale del sensore 4 del BLESS di Borgoforte a conferma della curva qualitativa.



**Figura 2.7:** A) Curva qualitativa di riscaldamento per un sensore in acqua; B) Curva acquisita a Borgoforte dall'FBG 4.

Sensore in terra (curva nera): In questo caso la dissipazione di calore avviene per conduzione, ovvero tramite un processo più lento e meno efficiente come mostrato in **Figura 2.8 A**. Il comportamento del generico sensore interrato presenta un incremento della temperatura superiore al caso "acqua" e l'andamento della curva, durante la fase di riscaldamento, non tende mai ad una condizione di regime come mostra l'acquisizione in **Figura 2.8 B** del sensore 31 del BLESS di Borgoforte nella stessa acquisizione della **Figura 2.7 B** (maggiori informazioni nel Cap. 2.3 della tesi di laurea di M. Peduzzi 2016)

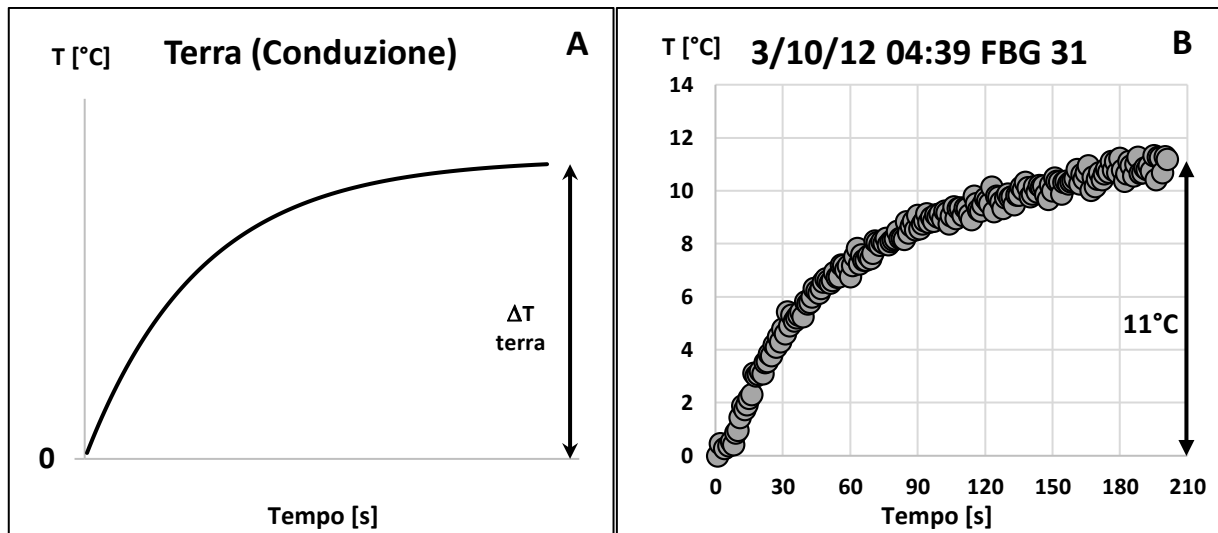


Figura 2.8: A) Curva qualitativa di riscaldamento per un sensore in terra; B) Curva acquisita a Borgoforte dall'FBG 31.

Riassumendo il comportamento dei sensori nei due ambienti si può affermare che:

- La variazione di temperatura percepita dal sensore, a parità di potenza dissipata, dipende dal tipo di ambiente in cui è immerso ( $\Delta T_{\text{terra}} > \Delta T_{\text{acqua}}$ );
- L'ambiente acqua è caratterizzato da un transitorio molto breve e un successivo equilibrio.
- L'ambiente terra è caratterizzato da un transitorio maggiore seguito da un intervallo temporale dipendente dalla durata del riscaldamento, in cui la temperatura percepita dal sensore continua ad aumentare nel tempo (no equilibrio).

Al fine di poter analizzare la  $\Delta T$  (incremento termico a fine riscaldamento di **Figura 2.6**), essa viene plottata per tutti i sensori ottenendo un profilo simile a quello riportato in **Figura 2.9** rappresentante la misurazione effettuata il 05/11/12 alle 17.32.

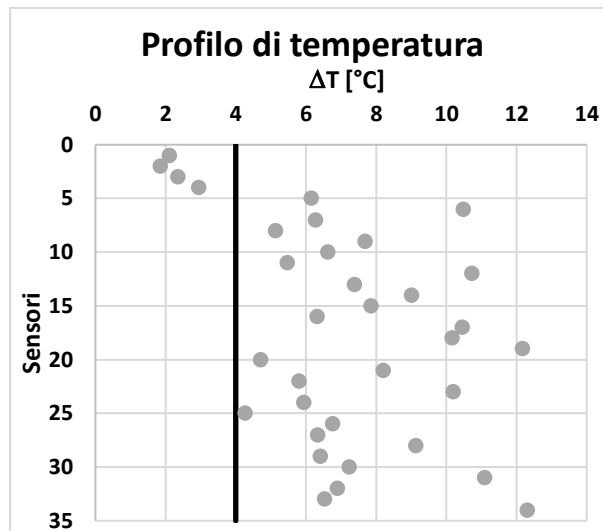


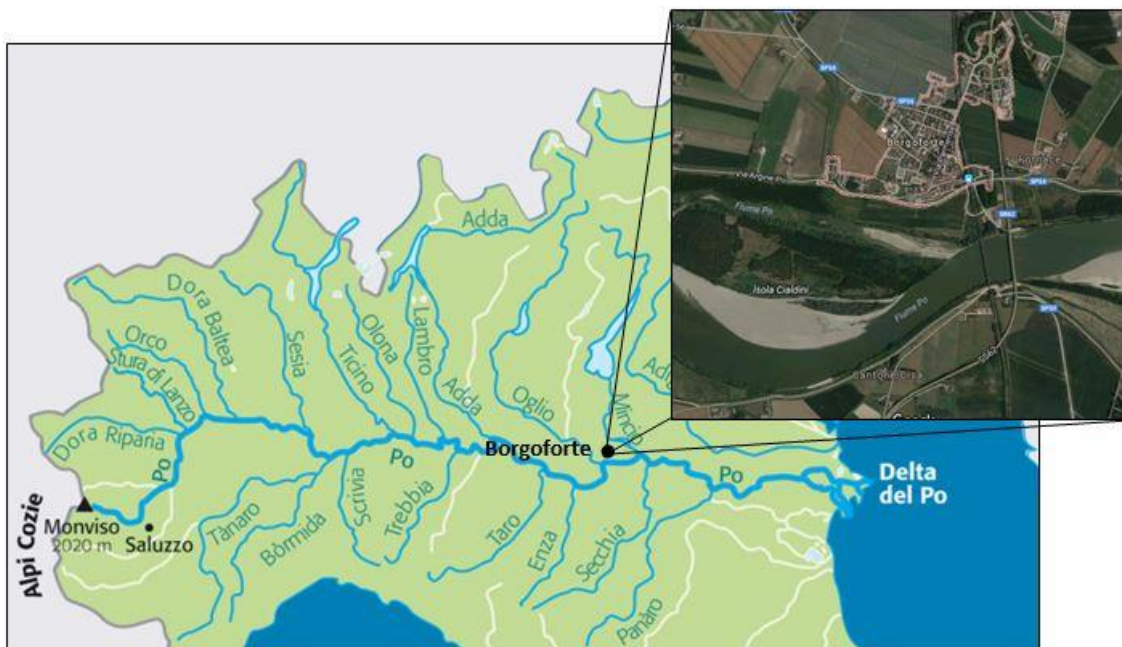
Figura 2.9: Profilo generico di  $\Delta T$ .

Come nella temperatura, anche in questo caso si distinguono due regioni di punti: i primi 4 posizionati in acqua corrente (minor  $\Delta T$ , come mostrato in *Figura 2.7*) e i restanti 30 interrati (maggior  $\Delta T$ , come mostrato in *Figura 2.8*). Queste due classi sono separate da una fascia entro la quale può essere definita una soglia per discriminare la posizione del generico sensore. Ovviamente tale fascia e tale soglia possono cambiare da profilo a profilo ma l'idea è quella di riuscire a trovare una banda che sia indipendente dal generico profilo temporale. Da precisare che anche se la dispersione dei punti nell'ambiente terra è elevata (probabilmente dovuta alla disomogeneità dei sedimenti del letto del fiume) essa non compromette la determinazione dell'interfaccia ricercata. Maggiori dettagli su questa tipologia di analisi sono presentati nel Capitolo 4 di questo elaborato.

### 3 BORGOFORTE

---

Il ponte stradale oggetto del monitoraggio si trova a Borgoforte, frazione del comune di Borgo Virgilio in provincia di Mantova. Tale infrastruttura (realizzata nel 1961) collega Mantova a Modena attraversando il fiume Po, come mostra la **Figura 3.1**.

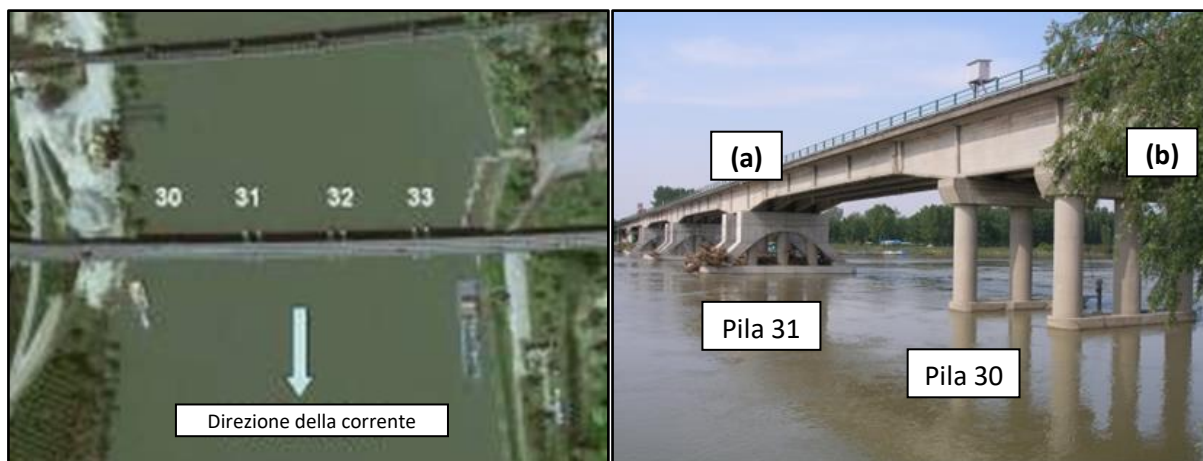


**Figura 3.1:** Inquadramento territoriale del ponte di Borgoforte.

#### 3.1 DAL CONSOLIDAMENTO AL MONITORAGGIO

Questo paragrafo è stato estratto da: Crotti G., Ballio F., Franzetti S., Rossi G. (2012), “Analisi in tempo reale della vulnerabilità dei ponti”, Convegno nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Brescia, 10-15 settembre 2012.

Come mostra la **Figura 3.2 A**, solo 4 pile sono sempre parzialmente sommerse; le rimanenti sono situate nelle golene. La generica pila è composta da due file indipendenti di 3 pali collegati mediante traversi (pila 30, **Figura 3.2 B**).



**Figura 3.2:** A) Ponte di Borgoforte con la numerazione delle pile in alveo. B) Particolare delle suddette pile, vista da monte.

Il rilievo batimetrico nei pressi del ponte, successivo all'evento di piena dell'autunno 2000 (ove la portata transitante a Borgoforte è stata di circa  $12000 \text{ m}^3/\text{s}$ , pari a circa la portata centennale), ha riscontrato una buca di erosione tra le due pile centrali, 31 e 32. Nello specifico la buca si estendeva per circa 70-90 m verso valle e verso monte, raggiungendo una profondità massima di circa 10-15 metri al di sotto della quota rappresentativa del fondo in corrispondenza delle pile. Data l'entità della buca e considerando che durante l'evento di piena lo scavo era probabilmente superiore, si è reso necessario un rinforzo strutturale per le pile 31, 32 e 33 (periodo 2005-2008). Sono stati aggiunti 2 pali per ogni fila che compone la pila, più un traverso di ripartizione degli sforzi (es. pila 31 **Figura 3.2 a**). Inoltre alla base della pila 32 è stato previsto il posizionamento di una protezione contro lo scavo localizzato, ovverosia rip-rap. La pila 30, posizionata in sponda idrografica destra, non è stata interessata dai lavori in quanto la Provincia di Mantova ha deciso di controllarla mediante un sistema di monitoraggio in tempo reale, a seguito di un'analisi idraulica. Anche se questa pila è molto vicina all'argine di magra, la modellazione bidimensionale del tratto di Po nei pressi del ponte, ha mostrato come la direzione della corrente tenda a spostarsi dal centro dell'alveo, per portate regolari, verso la sponda idrografica destra per portate molto alte (con tempi di ritorno superiori ai 100 anni), esponendo anche la pila 30 a fenomeni di erosione localizzata. Nel 2011 è stato ultimato e messo in funzione il sistema di monitoraggio.



### 3.2 BREVE INTRODUZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

Questo paragrafo è stato estratto da: Crotti G., Ballio F., Franzetti S., Rossi G. (2012), "Analisi in tempo reale della vulnerabilità dei ponti", Convegno nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Brescia, 10-15 settembre 2012.

Il sistema di monitoraggio di Borgoforte è composto da vari sensori atti alla registrazione in tempo reale delle variabili principali per la determinazione del livello di rischio della struttura. Gli strumenti sono disposti in varie posizioni lungo il ponte (**Figura 3.3**); tutti i segnali sono gestiti all'interno della centrale di controllo situata sotto le travi del ponte, in corrispondenza della pila 34. Una piattaforma programmabile per sistemi di misura e automazione gestisce e acquisisce i dati dalle varie stazioni, la generazione degli allarmi e la connessione con l'esterno, ovverosia con la stazione remota (Politecnico di Milano).

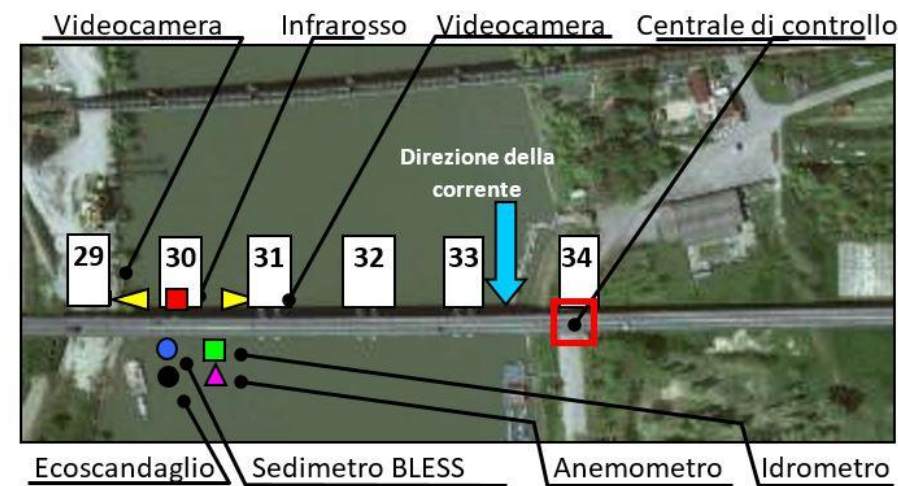


Figura 3.3: Disposizione planimetrica degli strumenti del sistema di monitoraggio.

Di seguito sono brevemente descritti gli strumenti che compongono il sistema di monitoraggio:

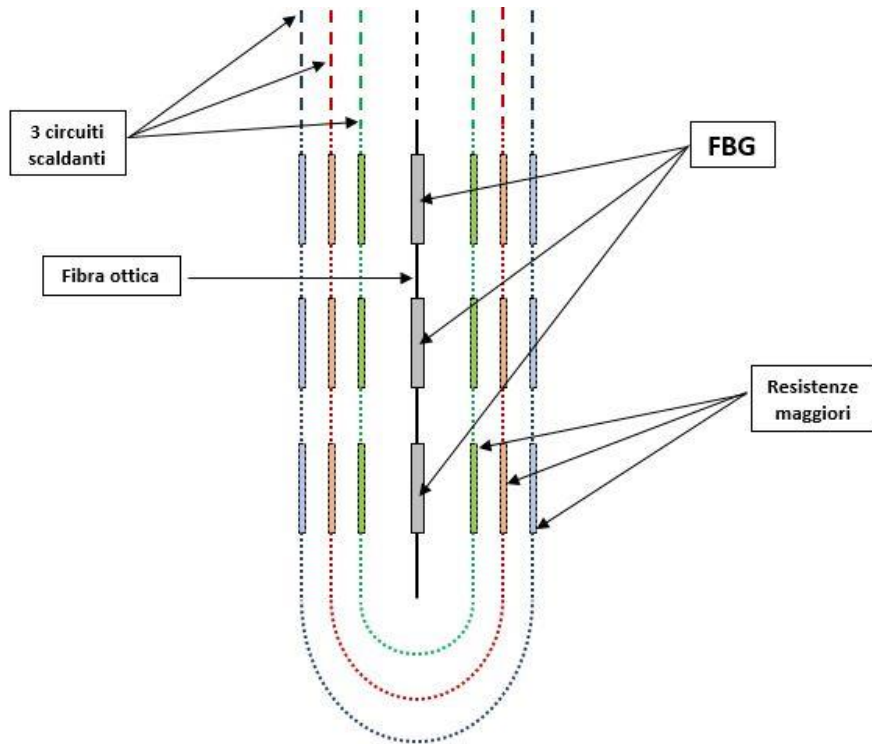
- **Anemometro**: consente di determinare la velocità e la direzione del vento. I dati, come il valore di folata (massimo), sono registrati e mediati ogni 10 minuti, in accordo con lo standard di analisi del vento (ESDU 82026).
- **Idrometro**: rileva la distanza tra lo strumento e il pelo libero della corrente. Note le quote di riferimento si ricava l'altezza dell'acqua.

- Telecamere: sono state posizionate sul lato di monte del ponte (**Figura 3.3**) per inquadrare la zona della pila 30. In base alle immagini fornite, è possibile valutare l'eventuale deposito di materiale.
- Ecoscandaglio: posizionato a valle della pila 30 consente di determinare la distanza tra lo strumento e il letto del fiume. Nota la quota di posa dell'ecoscandaglio è possibile determinare la posizione del fondo. Come discusso nel Cap. 1 questo strumento può essere inaffidabile soprattutto durante eventi di piena.
- BLESS: sedimetro ottico, ampiamente discusso nel Cap. 2, per la misura della quota del fondo del fiume.

Il presente lavoro di tesi si concentra sull'analisi dei dati di campo di BLESS quindi nel proseguo del capitolo verrà approfondita solo la parte del monitoraggio legata strettamente al sedimetro innovativo.

### **3.3 CONFIGURAZIONE E INSTALLAZIONE DI BLESS A BORGOFORTE**

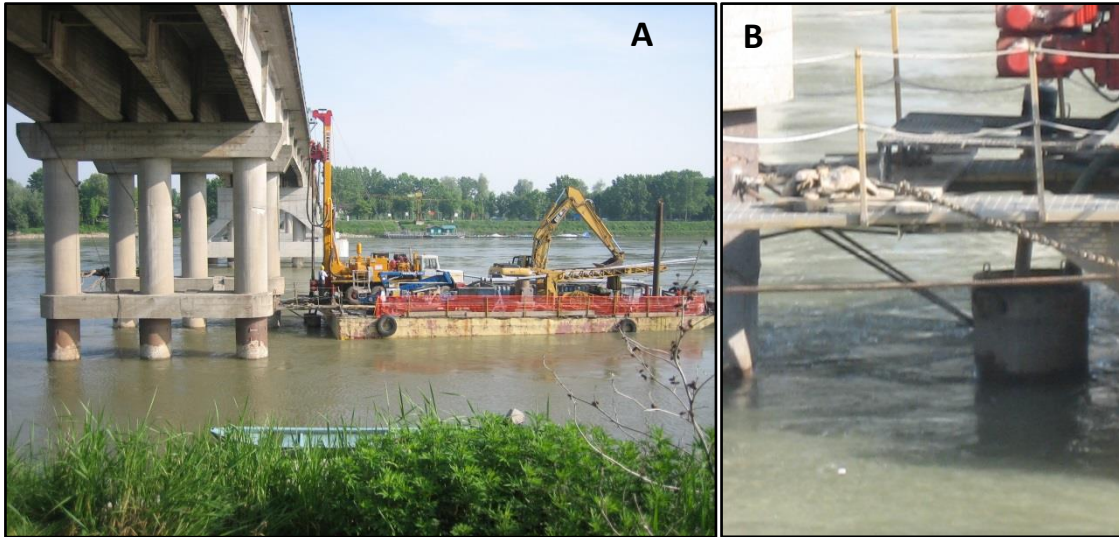
Il primo layout per un'applicazione di campo è stato assemblato dal personale del Politecnico di Milano nel 2010 [A. Cigada et al, 2012]. La lunghezza del sensore BLESS è di circa 20 metri con 34 sensori FBG al suo interno. La fibra ottica è protetta da un cavo armato in acciaio inox (spirale flessibile) ove non è presente un sensore di Bragg (cavo nero di **Figura 2.2**) e da un tubo in acciaio inox non flessibile ove è collocato il reticolo (per renderlo insensibile alle deformazioni meccaniche, **Figura 2.2**). Tale configurazione è stata acquistata da un fornitore di fibre ottiche (FOS&S). La parte innovativa, ovverosia il circuito scaldante, è stato creato e applicato esternamente lungo tutto BLESS, utilizzando tre cavi elettrici aventi un aumento di resistenza in prossimità dei sensori, al fine di aumentare il calore generato (in **Figura 3.4** è mostrata una configurazione qualitativa). Il tutto è stato poi inguainato con un termo-restringente avente la funzione di rendere impermeabile lo strumento, resistere agli agenti esterni (ad esempio quelli di natura chimica) e allo stesso tempo garantire una buona conduzione del calore.



**Figura 3.4: Configurazione qualitativa di BLESS installato a Borgoforte.**

Non potendo ancorare lo strumento direttamente alla pila si è scelto di creare un supporto verticale (tubo inox diametro 200 mm) su cui fissare BLESS a valle della pila 30. Le operazioni che hanno portato alla posa della fibra sono state:

- Trivellare il terreno per la creazione del foro di alloggio del tubo inox (**Figura 3.5 A**) e posizionamento del tubo camicia per superare il tirante idrico e collegare quindi il foro sul fondo con il pontone (nome tecnico della chiatta) ove si svolgevano le operazioni (**Figura 3.5 B**). Il foro è stato riempito di bentonite al fine di evitare il crollo delle pareti.



*Figura 3.5: A) Foto della trivellazione, B) foto del tubo camicia.*

- Il tubo in inox è stato preventivamente preparato (modificato) per poter alloggiare BLESS. Nella foto si nota la realizzazione di una “canalina” esternamente al tubo composta da due pareti di acciaio inox saldate al tubo stesso e una base di PVC (su cui BLESS appoggia) per evitare scambio termico con il metallo della struttura (*Figura 3.6 A*). Dato che il tubo è lungo complessivamente 30 metri si è dovuto realizzarlo a pezzi e unirli mediante flangiatura, la quale è stata modificata per far “passare” lo strumento BLESS (*Figura 3.6 B*). Infine si sono realizzate delle coperture per proteggere BLESS nei tratti non sensorizzati, lasciando esposto all’ambiente solo il tratto del sedimetro contenente il generico FBG (*Figura 3.6 C*).



*Figura 3.6: Foto della modifica al tubo su cui è installato BLESS, A) canalina, B) Flangiatura e C) Foro contenente il generico FBG.*

- Il posizionamento di BLESS lungo il tubo di supporto è stato realizzato in campo mentre il tubo veniva progressivamente infisso nel terreno (*Figura 3.7*). Per tutta l’installazione è

stato collegato all'interrogatore per verificare che la posa non ne danneggiasse il funzionamento.



*Figura 3.7: Foto riguardanti l'installazione di BLESS.*

### **3.4 CARATTERISTICHE CIRCUITO SCALDANTE BLESS A BORGOFORTE**

Dovendo inserire un circuito scaldante in acqua si è dovuto lavorare in bassa tensione (max 48 Volt) e quindi, per capire la configurazione del circuito elettrico, si sono dovuti utilizzare i dati e le esperienze di laboratorio. Evidenze sperimentali mostrano come l'incertezza di misura sia pari a  $\pm 1.72^\circ \text{C}$  [S. Manzoni et. Al, 2011]. Quindi alla fine del riscaldamento le due curve di riscaldamento (del generico sensore in acqua e di quello in terra) devono avere una differenza maggiore di  $3.34^\circ \text{C}$ .

Utilizzando i grafici riportati in **Figura 3.8** [S. Manzoni et al, 2011] si nota come con una potenza dissipata pari ad almeno  $24 \text{ W/m}$  dopo 80 secondi il  $\Delta T$  in terra ( $7.5^\circ \text{C}$ ) sia circa il doppio del  $\Delta T$  in acqua ( $3.5^\circ \text{C}$ ) con differenza di circa  $4^\circ \text{C}$ . Anche se le condizioni di laboratorio non possono essere paragonabili a quelle di Borgoforte questa strada era l'unica percorribile per avere un ordine di grandezza della potenza dissipata da garantire al fine di soddisfare, almeno teoricamente, le evidenze di laboratorio. Il valore di  $24 \text{ W/m}$  corrisponde a  $1.2 \text{ W/FBG}$ . Questa conversione è più utile in quanto, a seconda della lunghezza di BLESS, il circuito scaldante potrebbe essere composto da un cavo a resistenza variabile o da un circuito scaldante diverso da quello elettrico, quindi si preferisce riferirsi alla potenza da erogare ad ogni FBG.

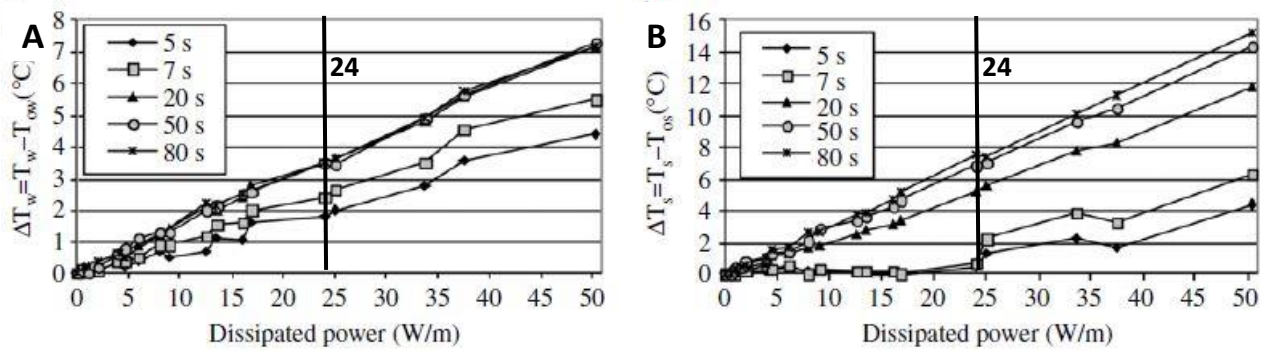


Figura 3.8: A) grafico  $\Delta T$ -potenza per l'acqua, B) stesso grafico per i sedimenti.

Inoltre questo grafico fornisce anche un'ulteriore informazione: il generico sensore in acqua non può raggiungere salti termici superiori a  $3.5 \text{ °C} + 1.72 \text{ °C} = 5.2 \text{ °C}$  (si osserva che le curve a 50 e 80 secondi sono sovrapposte quindi lo scambio termico ha raggiunto un equilibrio). Ovviamente anche questa è una evidenza sperimentale di laboratorio che potrebbe non essere rispettata in campo.

Calcoli preliminari e vincoli di realizzazione del generico cavo scaldante sommati a esigenze di costruzione e montaggio di BLESS hanno portato alla seguente configurazione elettrica:

- 3 circuiti elettrici in parallelo a resistenza variabile pari a circa  $125 \text{ } \Omega$  l'uno;
- Considerando una tensione massima di  $48 \text{ V}$  la corrente che circola in ogni circuito è pari a  $0.438 \text{ A}$ .
- Sapendo la resistenza del cavo elettrico nell'intorno del generico FBG ( $26.4 \text{ } \Omega/\text{m}$ ) e considerando una influenza termica di  $5 \text{ cm}$  si ottiene una potenza dissipata di  $0,195 \text{ W/FBG}$ .
- Il cavo scaldante per come è configurato (*Figura 3.4*) scalda due volte il generico FBG e la presenza di 3 circuiti scaldanti portano un fattore moltiplicativo pari a 6, quindi  $0,195 \times 6 = 1,18 \text{ W/FBG}$ , valore molto vicino alla soglia di laboratorio di  $1,2 \text{ W/FBG}$ .

## 4 DATI A DISPOSIZIONE E ANALISI PRELIMINARE

---

### 4.1 ARCO TEMPORALE A DISPOSIZIONE

I dati analizzati, ove per dato si intende una singola acquisizione di BLESS a Borgoforte, ricoprono un arco temporale di circa 4 anni, dal 29/7/11 al 31/7/15 per un totale di 4204 misurazioni. All'interno di questo range sono presenti periodi in cui lo strumento e/o l'intero sistema di monitoraggio non ha funzionato a causa di interruzioni di corrente e/o malfunzionamenti [F. Ballio et al, 2014]. Eliminati questi periodi di black-out si identificano due finestre temporali in cui BLESS ha lavorato con continuità: dal 26/07/12 al 25/5/13 e dal 4/6/13 al 12/10/14. Ogni singola prova ha la durata di 200 secondi circa e le prove si ripetono ogni 4/5 ore.

### 4.2 TIPOLOGIE DI DATI

Ogni prova prevede una curva scaldante costituita da 201 valori, uno al secondo, per ognuno dei 34 sensori (per un totale di 6834 dati complessivi). Al fine di una miglior gestione del campione si è deciso di interpolare le curve con un'equazione a due parametri:

$$T(t) = \Delta T \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (Eq. 4.1)$$

L'*equazione 4.1* rappresenta la risposta di un termometro (nel caso in esame BLESS) ad un incremento istantaneo di temperatura  $\Delta T$ . Il coefficiente  $\tau$  è la costante di tempo che rappresenta, per definizione, il tempo dopo il quale lo strumento registra un incremento di temperatura pari al 67% del valore imposto  $\Delta T$ . Per chiarire il concetto appena introdotto si fa riferimento al grafico qualitativo di *Figura 4.1*.

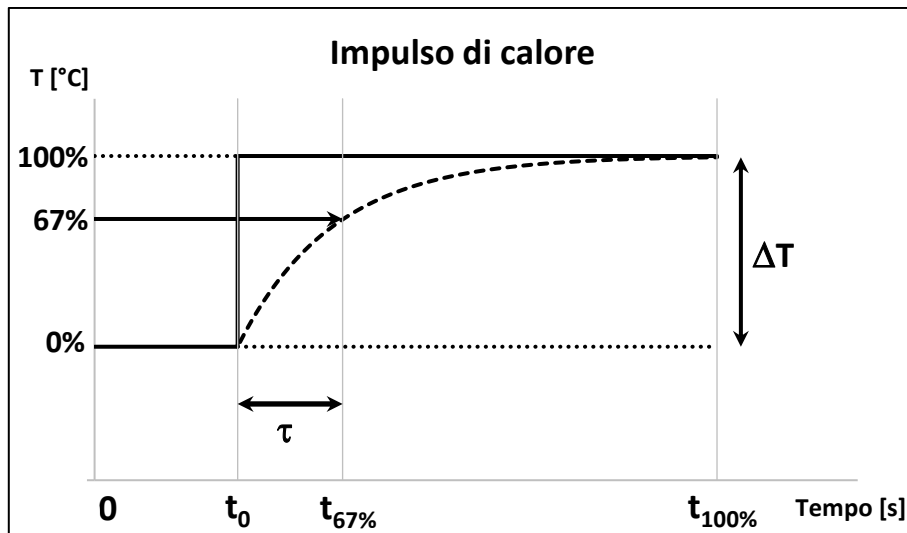


Figura 4.1: Grafico qualitativo di uno stimolo termico e della risposta da parte dell'ambiente.

La linea spezzata nera indica l'impulso istantaneo di calore applicato e la curva tratteggiata, descritta dall'equazione 4.1, rappresenta la risposta dell'ambiente a tale stimolo.

Così facendo si passa da 201 valori a prova per sensore a 2 soli parametri per FBG. In Figura 4.2 viene proposto un esempio di interpolazione:

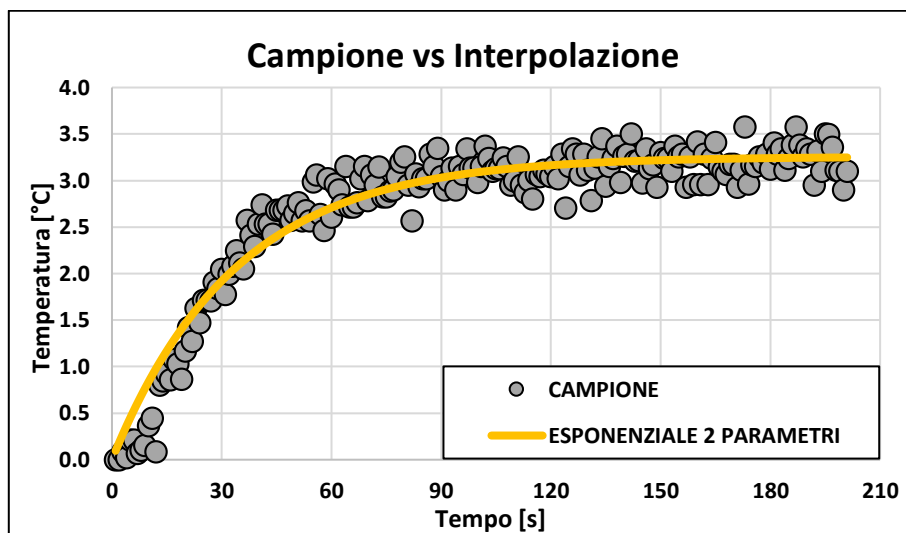


Figura 4.2: Esempio di interpolazione a 2 parametri della nuvola di punti registrata.

Per ridurre ulteriormente i dati è stata applicata una selezione ai 34 FBG. Tale operazione è possibile poiché, da studi effettuati in precedenza (si veda la tesi di primo livello di F. Landro e R. Scansani 2013), la maggior parte dei sensori risulta essere interrata per l'intera durata dell'arco



temporale analizzato, di conseguenza non portano alcun contributo alla procedura di identificazione del fondo. Per questo motivo, tutta l'analisi a seguire sarà concentrata sui primi 9 sensori.

### 4.3 FBG 6

Durante l'analisi preliminare dei dati si è notata un'anomalia nell'incremento di temperatura  $\Delta T$  del sensore 6, come mostra la **Figura 4.3 A**. In questa immagine sono riportati i valori di  $\Delta T$  dei sensori 5, 6, 7, 8 e 9 per l'intero anno 2012: si nota come l'incremento sia costante nel tempo e i valori dei vari FBG siano sovrapposti a meno del sensore 6 che ha un valore di  $\Delta T$  più grande di circa  $4^\circ\text{C}$ . Dato che le analisi che seguiranno si basano anche sui valori di variazione termica, è stato introdotto un coefficiente correttivo pari a  $4^\circ\text{C}$  da sottrarre a tutti i valori di  $\Delta T$  dell'FBG 6, in modo da equilibrare e allineare tali valori con i sensori limitrofi (**Figura 4.3 B**).

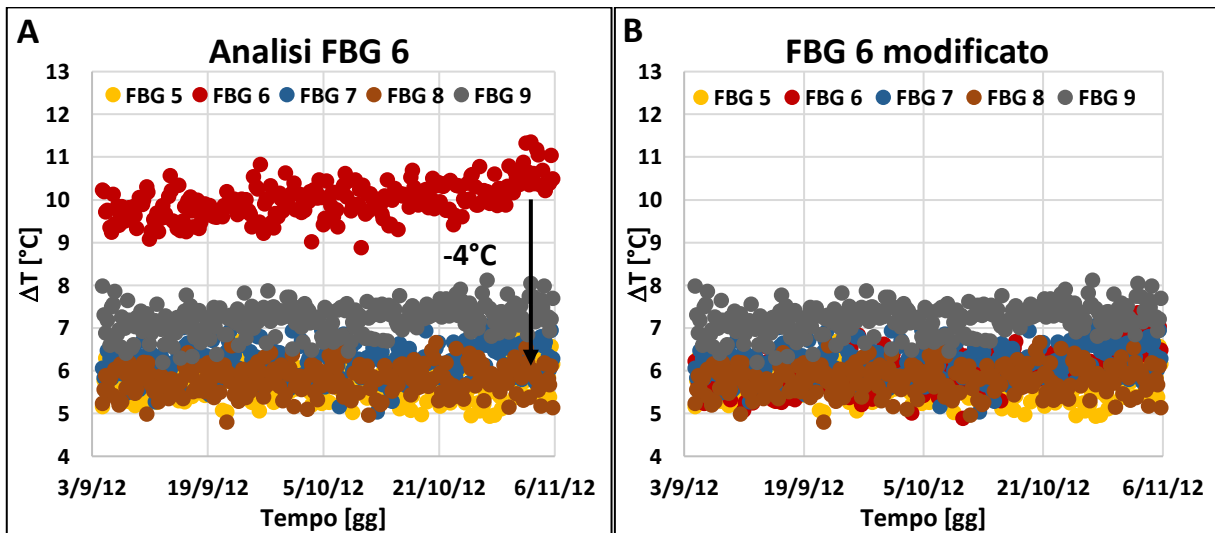


Figura 4.3: Rappresentazione degli FBG 5, 6, 7, 8 e 9 nel 2012 prima (A) e dopo (B) la modifica all'FBG 6.

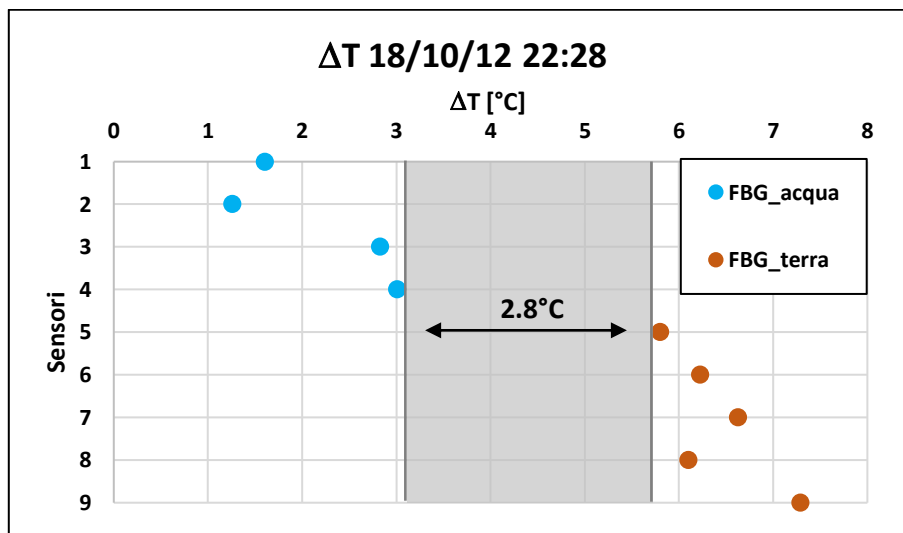
### 4.4 METODI PER INDIVIDUARE L'INTERFACCIA

Al fine di determinare la posizione del fondo verranno utilizzate le nozioni espone nel Cap. 2. In particolare si utilizzeranno i diversi comportamenti termici nei due ambienti, ovverosia il fatto che l'acqua attraverso la convezione asporti calore in modo più efficiente e il sensore si riscaldi meno

rispetto alla terra. Inoltre si farà uso anche della costante di tempo  $\tau$ , la quale assume valori minori in acqua rispetto alla terra, in quanto lo scambio termico per convezione è più efficiente e quindi la risposta del sistema è più veloce.

#### 4.4.1 $\Delta T$

Questo metodo di analisi è stato già utilizzato in precedenza (tesi di primo livello di F. Landro e R. Scansani 2013) e si basa sull'elaborazione di un campione di dati per la determinazione di un valore di soglia di  $\Delta T$  che separa gli FBG in acqua (che hanno un incremento di temperatura inferiore alla soglia) dai sensori in terra (che hanno un incremento di temperatura superiore alla soglia). La **Figura 4.4** mostra un profilo di variazione di  $\Delta T$  per i primi 9 sensori di una generica prova. Si nota che tra i sensori in acqua (primi quattro punti in alto a destra) e quelli in terra (restanti cinque punti in basso a destra) intercorre una fascia (in grigio) che per questo caso specifico è di  $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

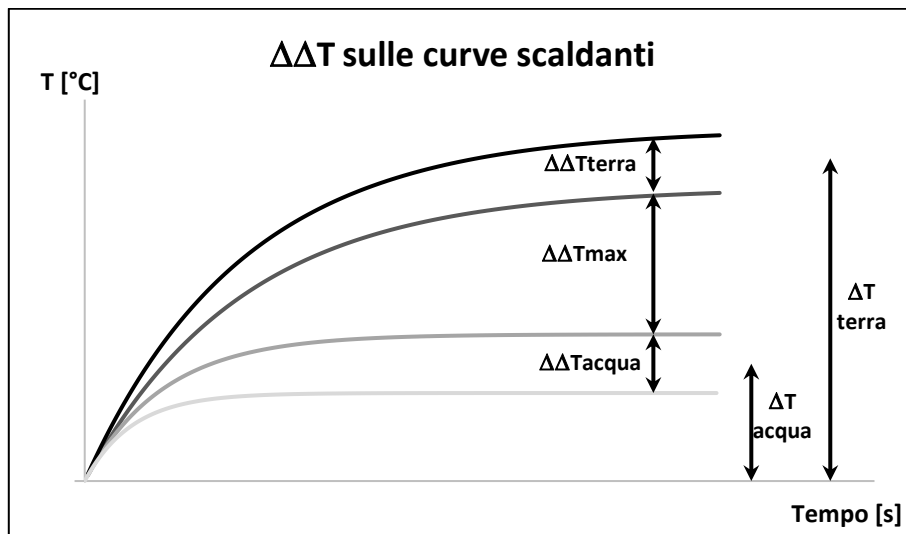


**Figura 4.4:** Esempio di determinazione visivo del fondo.

Scegliendo un valore di soglia all'interno di questa fascia (tra  $3.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $5.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) si posiziona il fondo del fiume tra l'ultimo sensore in acqua e il primo in terra. Per irrobustire la fascia così trovata, e quindi la soglia, si devono vagliare "manualmente" più prove alla ricerca di una "zona grigia" in cui non sia presente alcun sensore per l'intero arco temporale analizzato. Ciò implica una dipendenza del metodo alla serie storica di dati, con la conseguente perdita di autonomia nel primo periodo (per calibrazione) e necessità di una validazione periodica successiva.

#### 4.4.2 $\Delta\Delta T$

Guardando la **Figura 4.4** si nota che la posizione della fascia grigia coincide con la massima differenza tra due  $\Delta T$  consecutivi; questo concetto ha portato alla definizione di una nuova grandezza ovverosia la  $\Delta\Delta T$ , che rappresenta la differenza tra il  $\Delta T$  di un sensore e quello del suo precedente. Per comprendere meglio questo concetto si fa riferimento all'immagine di **Figura 4.5** ove sono state schematizzate (qualitativamente) le  $\Delta T$  generiche di 4 sensori (2 in acqua e 2 in terra) e le  $\Delta\Delta T$  tra i sensori consecutivi. Quello che ci si aspetta è che il valore di  $\Delta\Delta T$  per sensori posti nello stesso ambiente (acqua o terra) sia minore rispetto a quello di due sensori consecutivi situati in ambienti differenti.

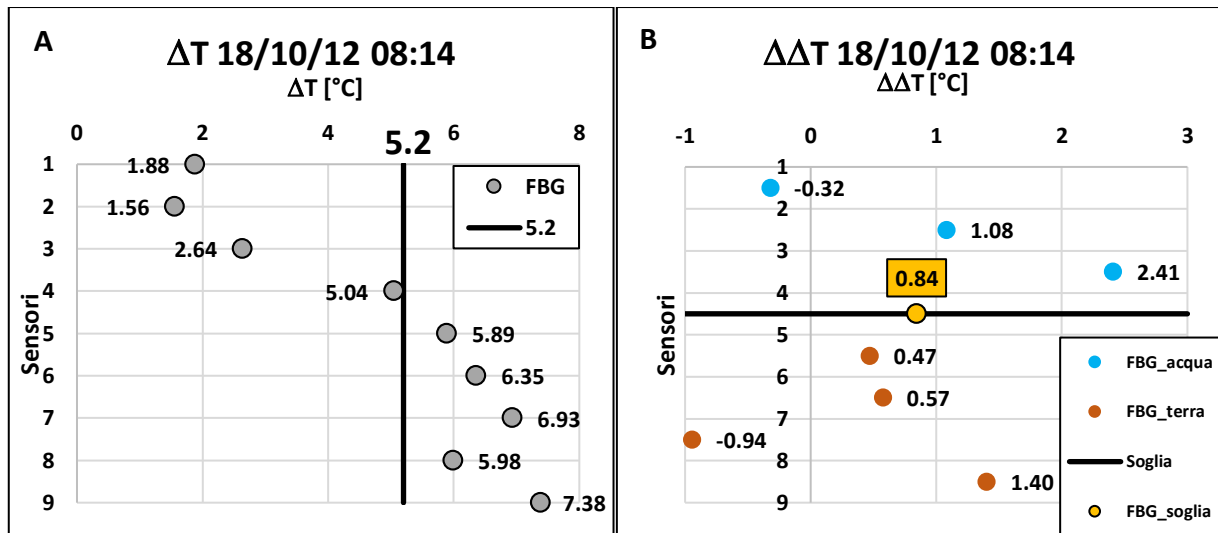


**Figura 4.5:** Curve scaldanti su cui sono rappresentate le  $\Delta T$  generiche dei due ambienti e le  $\Delta\Delta T$ .

Quindi la  $\Delta\Delta T$  massima rappresenta, per definizione, la separazione tra due ambienti diversi, ovverosia la posizione del fondo del fiume. Tale metodo oltre che essere completamente oggettivo (non necessita la visione delle prove) è anche automatico, infatti ogni prova non è legata alla serie storica e non deve essere visionata da alcun tecnico (se non per valutarne la corretta funzionalità).

Per un'analisi più accurata, sono stati imposti due vincoli al metodo in questione: il primo prevede che il  $\Delta\Delta T_{MAX}$  non sia preso in valore assoluto (il primo sensore in terra ha un valore di  $\Delta T$  maggiore dell'ultimo sensore in acqua). In questo modo si eliminano i  $\Delta\Delta T_{MAX}$  negativi dovuti soprattutto ai sensori in terra, che hanno comportamenti e quindi  $\Delta T$  molto diversi fra loro presumibilmente a causa della disomogeneità del fondo. Questa prima accortezza però non elimina i

casi in cui il  $\Delta\Delta T_{MAX}$  sia comunque tra due sensori in terra. Per eliminare anche questi falsi positivi si è introdotta una soglia sul  $\Delta T$  del generico sensore in acqua pari a 5.2 °C. Tale valore è stato trovato utilizzando il grafico in **Figura 3.8** e i dati del sistema scaldante di Borgoforte (riportati anch'essi nel capitolo 3). Al fine di chiarire i vincoli appena introdotti si riporta un esempio in **Figura 4.6**.



**Figura 4.6:** A) Profilo di  $\Delta T$  su cui è applicato il metodo del salto massimo. B) Esempio di soglia ricavata attraverso la massima  $\Delta\Delta T$

Data la prova del 18/10/12 alle 08:14, si vuole trovare l'interfaccia acqua/ suolo attraverso il  $\Delta\Delta T_{MAX}$ . Il salto massimo è pari a 2.41°C ed è a cavallo tra i sensori 3 e 4. Purtroppo tale risultato deve essere scartato poiché l'FBG 4 non rispetta il vincolo dell'ambiente terra, ovvero  $\Delta T > 5.2^\circ\text{C}$  (come mostra la **Figura 4.6 A**). Il secondo salto massimo è quello compreso tra i sensori 8 e 9. Ancora una volta la soluzione trovata non tiene conto dei vincoli imposti, infatti il sensore 8 non soddisfa la condizione dell'ambiente acqua, cioè  $\Delta T < 5.2^\circ\text{C}$  (come mostra la **Figura 4.6 A**). Proseguendo, il terzo salto massimo è dato dalla differenza tra gli FBG 8 e 7. Tale esito, però, non rispetta la condizione di salto positivo (**Figura 4.6 B**). Infine si trova l'interfaccia collocata tra i sensori 4 e 5 che rispetta tutte le restrizioni imposte (**Figura 4.6 A e B**). Prestando attenzione al profilo di  $\Delta T$  in **Figura 4.6 A** si può individuare una fascia ben distinta tra gli FBG 3 e 4 che corrisponde in **Figura 4.6 B** al salto massimo. Si deduce che, probabilmente, il sensore 4 è in terra ma al confine con l'ambiente acqua, il quale influenza la sua  $\Delta T$  portandola ad un valore inferiore della soglia 5.2 °C.

#### 4.4.3 $\tau$

L'analisi proposta per il  $\Delta T$  può essere applicata anche al secondo parametro  $\tau$ , ovvero si può cercare una fascia che separi distintamente i due ambienti come riportato nell'esempio di **Figura 4.7 A** (banda in grigio di 6 secondi). In questo caso però, al contrario della  $\Delta T$ , c'è una forte dispersione del dato e in molti casi risulta impossibile individuare l'interfaccia acqua/terra mediante questo metodo. In **Figura 4.7 B** viene riportato un esempio in cui non è possibile determinare alcuna fascia verticale che separi distintamente i sensori superiori (in acqua) da quelli inferiori (in terra). Per questo motivo la costante di tempo non sarà utilizzata per la determinazione della quota del fondo del fiume.

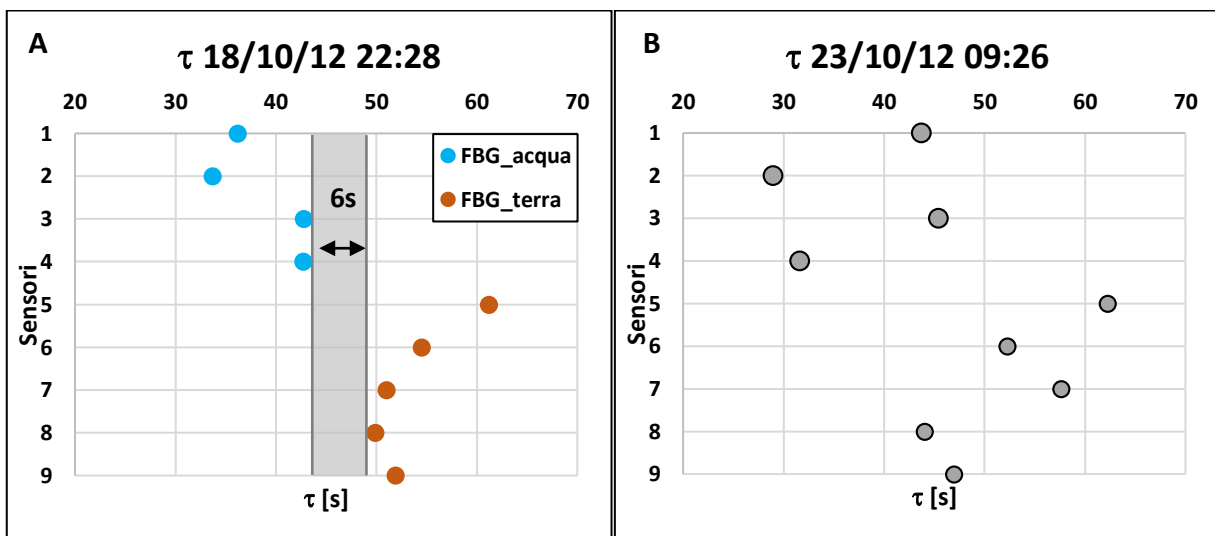
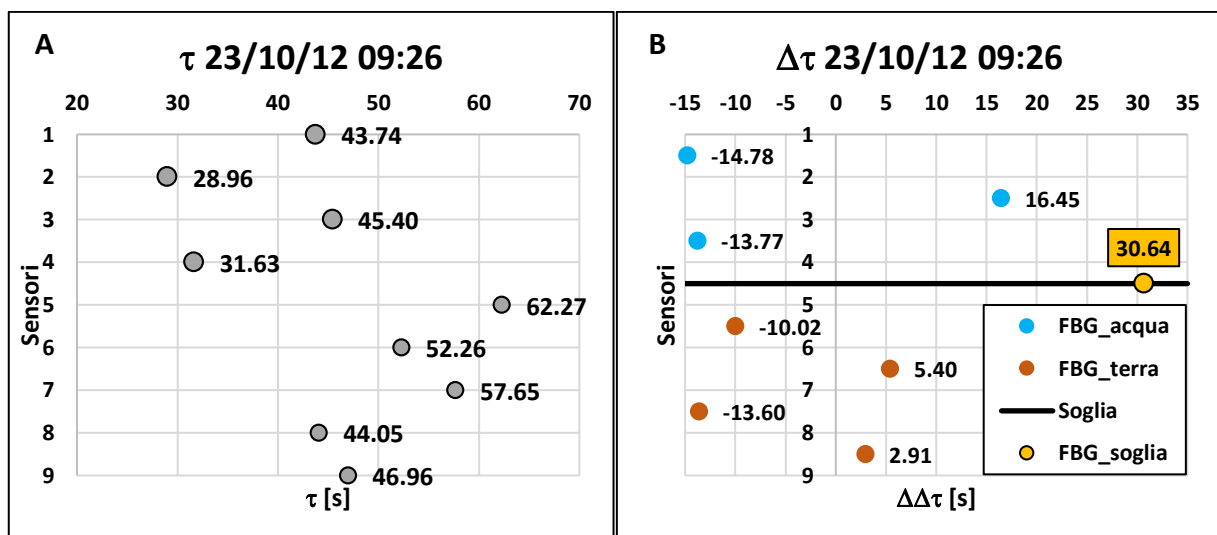


Figura 4.7: A) Esempio di ricerca della fascia per la  $\tau$ . B) Esempio di difficile interpretazione del parametro  $\tau$ .

#### 4.4.4 $\Delta\tau$

Sebbene il parametro  $\tau$  sia di difficile interpretazione, è stato deciso comunque di utilizzare la sua variazione  $\Delta\tau$  per determinare una soglia, con lo stesso criterio applicato per la  $\Delta\Delta T$ . Per definizione il valore di  $\Delta\tau$  è la differenza tra le costanti di tempo di due sensori consecutivi. Quindi il massimo valore di  $\Delta\tau$ , così come il massimo valore di  $\Delta\Delta T$ , coincide con la differenza tra due sensori situati in ambienti differenti.

La **Figura 4.8** mostra contemporaneamente il profilo della costante di tempo  $\tau$  (stesso grafico e quindi stessa prova della **Figura 4.7 B**) e il profilo di variazione della costante di tempo  $\Delta\tau$ . Mentre con il grafico **A**) è impossibile identificare il fondo il grafico **B**), utilizzando il concetto di salto massimo ( $\Delta\tau_{MAX}$ ), individua il fondo tra il sensore 4 e 5. Nonostante si sfrutti il concetto di salto massimo come nella variazione di temperatura, in questo caso si può imporre un solo vincolo, ovverosia il salto massimo deve essere positivo in quanto non è possibile definire una soglia di  $\tau$  poiché le sperimentazioni in laboratorio non forniscono indicazioni in merito [S. Manzoni et al, 2011].



**Figura 4.8:** A) Profilo di  $\tau$  legato al grafico  $\Delta\tau$ . B) Esempio di soglia ricavata attraverso la massima  $\Delta\tau$ .

Tale metodo, come per il  $\Delta\Delta T$ , è oggettivo (non è necessario visionare le prove) e anche automatico, infatti ogni prova non è legata alla serie storica e non deve essere esaminata da alcun tecnico (se non per valutarne la corretta funzionalità).

#### 4.4.5 Analisi Cluster (Metodo DC)

L'analisi cluster comprende una famiglia di algoritmi in grado di distinguere, a seconda dei criteri scelti, sottogruppi di dati simili partendo da un insieme iniziale. Dato un campione (nel caso in esame di misure) e fissato il numero di parti in cui si vuole dividere tale campione, l'analisi cluster consente di individuare tanti centroidi, ovverosia centri di insiemi di punti, quante sono le

suddivisioni scelte e quindi di determinare il gruppo di appartenenza di ciascun punto. Si fa notare che anche il numero di sottoinsiemi potrebbe essere una variabile.

L'idea di applicare questo metodo al campione di dati in possesso è nata dall'articolo "Active Thermometry Based DS18B20 Temperature Sensor Network For Offshore Pipeline Scour Monitoring Using K-Means Clustering Algorithm", in cui si descrive il funzionamento di uno strumento simile a BLESS ma che utilizza un sistema Brillouin ed è installato lungo tubazioni poste in mare [X. Zhao et al, 2013].

In questo elaborato si è volutamente semplificato l'algoritmo con lo scopo di studiare il potenziale di questo metodo applicato all'analisi dati di BLESS.

L'algoritmo presentato in seguito (abbreviato con la sigla DC) è applicato al generico profilo di variazione di temperatura (un esempio è la **Figura 4.4**). Il profilo oggetto di studio vede sull'asse delle ordinate il numero di sensori e su quello delle ascisse gli incrementi  $\Delta T$  associati. Il parametro che verrà utilizzato per definire e posizionare i centroidi è la variazione termica ( $\Delta T$ ).

I passi per lo sviluppo dell'algoritmo DC sono:

- 0) Il generico profilo di variazione termica (esempio **Figura 4.4**) deve essere rivisto come un insieme di 9 punti che devono essere separati in due sottoinsiemi (acqua e terra).
- 1) Il primo passo è definire due valori di  $\Delta T$  da associare ai due centroidi C (uno di acqua  $C_{ACQUA}$  e uno di terra  $C_{TERRA}$ ) di primo tentativo. Avendo il campione a disposizione si scelgono gli estremi, ovverosia  $C_{ACQUA} = \Delta T_{MIN}$  e  $C_{TERRA} = \Delta T_{MAX}$ . Dall'analisi è stato escluso il primo sensore poiché potrebbe collocarsi in aria e quindi andrebbe a formare un terzo gruppo che però non è stato considerato in questa analisi.
- 2) Successivamente si calcolano le distanze "termiche" tra ognuno dei punti del campione e i due centri ( $\Delta T_{FBG_i} - \Delta T_{C_{ACQUA}}$  e  $\Delta T_{FBG_i} - \Delta T_{C_{TERRA}}$ ). I punti più vicini al centro  $C_{ACQUA}$  rispetto a  $C_{TERRA}$  apparterranno all'insieme acqua e viceversa;
- 3) Una volta individuato l'ambiente di appartenenza, si procede al calcolo dello scarto quadratico medio della variazione termica come somma degli scarti quadratici medi di ogni ambiente;

$$s. q. m. = \sum_{i=1}^J (\Delta T_{FBG_i} - \Delta T_{C_{ACQUA}})^2 + \sum_{k=1}^L (\Delta T_{FBG_k} - \Delta T_{C_{TERRA}})^2 \quad (Eq. 4.2)$$

Dove  $J$  è il numero totale di punti situati in acqua,  $L$  il numero totale di punti situati in terra (quindi  $J+L$  è il numero totale di punti analizzati),  $i$  è il contatore dei punti in acqua mentre  $k$  è il contatore dei punti in terra.

- 4) La nuova posizione dei centroidi  $C_{ACQUA}$  e  $C_{TERRA}$  è definita dalla media dei  $\Delta T$  dei punti appartenenti all'insieme "acqua" e "terra".
- 5) A questo punto si rientra al passo 2) iterando il procedimento per minimizzazione lo scarto quadratico medio. Da precisare che l'appartenenza del generico FBG ad un centroide piuttosto che all'altro è ridefinita ad ogni interazione, più precisamente al punto 2).
- 6) Minimizzato lo scarto, tutti gli FBG sono stati suddivisi. Conoscendo la loro posizione si può trovare il sensore in acqua posizionato a quota inferiore e il sensore in terra posizionato a quota superiore. Il fondo del fiume è tra questi due sensori.

Al fine di chiarire i passi appena descritti si è deciso di riportare in **Tabella 4.1** un esempio sintetico. Nelle prime tre righe sono stati riportati il numero di ogni sensore, il corrispettivo valore di  $\Delta T$  in °C e la scelta dei due centri di primo tentativo, punto 1) del procedimento. Scorrendo verso il basso si hanno tre blocchi rappresentanti le tre iterazioni eseguite manualmente. Di seguito viene descritta la struttura della singola iterazione:

- la prima riga indica l' $i$ -esima iterazione;
- la seconda riga contiene la differenza tra ciascun dato del campione e i due centri, accompagnati dall'ambiente in cui gli FBG si trovano all' $i$ -esima iterazione, punto 2) del procedimento;
- la terza riga contiene lo scarto quadratico medio dell' $i$ -esima iterazione, punto 3) del procedimento;
- la quarta riga propone i due nuovi centri come media dei sensori in acqua e terra, punto 4) del procedimento.



FBG	2	3	4	5	6	7	8	9
Campione ( $\Delta T$ )	1.80	2.56	2.47	4.50	6.69	5.20	5.32	7.29
1) Centri	$C_{ACQUA}=\Delta T_{min}=1.80^{\circ}C$				$C_{TERRA}=\Delta T_{max}=7.29^{\circ}C$			
Iterazione	I°							
Distanza da $C_{ACQUA}=1.80$	0.00	0.76	0.67	2.70	4.89	3.40	3.52	5.49
2) Distanza da $C_{TERRA}=7.29$	<	<	<	<	>	>	>	>
Ambiente FBG	5.49	4.73	4.82	2.79	0.60	2.09	1.97	0.00
	ACQUA	ACQUA	ACQUA	ACQUA	TERRA	TERRA	TERRA	TERRA
3) Scarto	16.92							
4) Centri	$C_{ACQUA}=(1.80+2.56+2.47+4.50)/4=2.83^{\circ}C$				$C_{TERRA}=(6.69+5.20+5.32+7.29)/4=6.13^{\circ}C$			
Iterazione	II°							
Distanza da $C_{ACQUA}=2.83$	1.03	0.27	0.36	1.67	3.86	2.37	2.49	4.46
2) Distanza da $C_{TERRA}=6.13$	<	<	<	>	>	>	>	>
Ambiente FBG	4.33	3.57	3.65	1.63	0.56	0.92	0.81	1.16
	ACQUA	ACQUA	ACQUA	TERRA	TERRA	TERRA	TERRA	TERRA
3) Scarto	7.09							
4) Centri	$C_{ACQUA}=(1.80+2.56+2.47)/4=2.28^{\circ}C$				$C_{TERRA}=(4.50+6.69+5.20+5.32+7.29)/4=5.80^{\circ}C$			
Iterazione	III°							
Distanza da $C_{ACQUA}=2.28$	0.48	0.28	0.20	2.22	4.41	2.93	3.04	5.01
2) Distanza da $C_{TERRA}=5.80$	<	<	<	>	>	>	>	>
Ambiente FBG	4.00	3.24	3.33	1.30	0.89	0.60	0.48	1.49
	ACQUA	ACQUA	ACQUA	TERRA	TERRA	TERRA	TERRA	TERRA
3) Scarto	5.63							
4) Centri	$C_{ACQUA}=(1.80+2.56+2.47)/4=2.28^{\circ}C$				$C_{TERRA}=(4.50+6.69+5.20+5.32+7.29)/4=5.80^{\circ}C$			

Tabella 4.1: Esempio numerico di applicazione dell'analisi cluster metodo DC.

Come si può notare l'iterazione 3 comporta una riduzione dello scarto quadratico medio ma non la modifica della posizione dei centroidi rispetto all'iterazione 2: questa situazione definisce la fine del ciclo iterativo e quindi l'identificazione della posizione del fondo, ovverosia tra il sensore 4 e il sensore 5. Per una miglior comprensione dell'esempio vengono allegati i tre grafici di **Figura 4.9** riportanti la situazione iniziale di ogni iterazione:

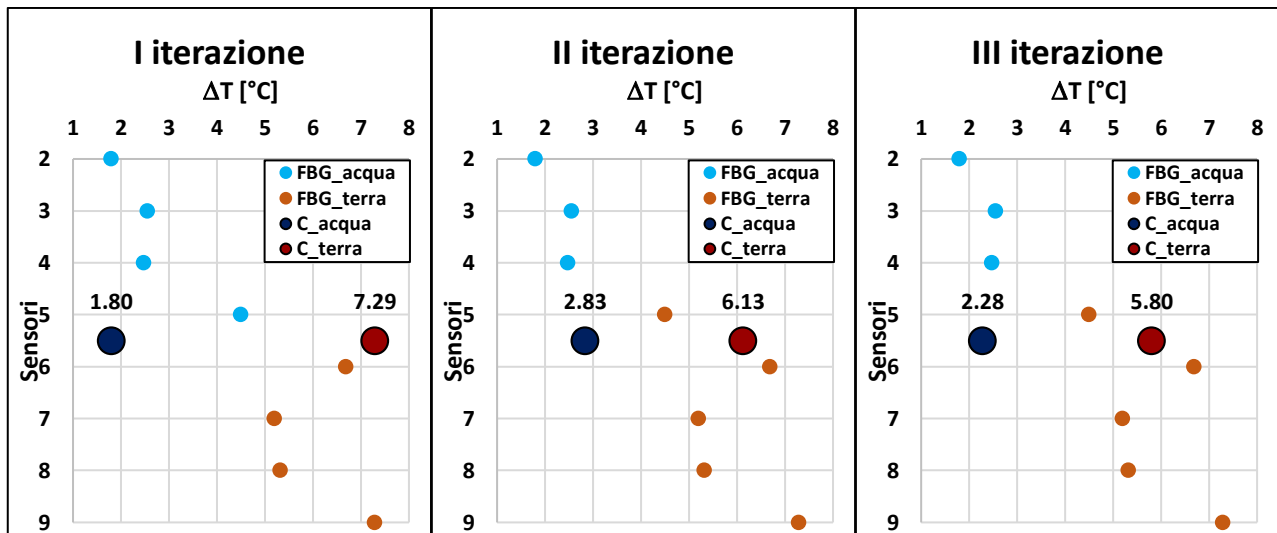


Figura 4.9: Grafici rappresentanti i tre passi d'iterazione.

Quello che si osserva è che al primo passo d'iterazione i sensori 2,3,4 e 5 risultano essere in acqua mentre gli ultimi quattro in terra. Al secondo passo i centroidi variano la loro posizione per avvicinarsi il più possibile al “baricentro” del proprio ambiente, facendo passare l'FBG 5 dall'acqua alla terra. Infine, nel terzo ed ultimo passo di questa iterazione, i centri si spostano ulteriormente adattandosi al cambiamento di ambiente dell'FBG 5.

Questo metodo ha molti vantaggi tra cui il fatto di essere completamente oggettivo, non necessitare di serie storiche di dati, quindi essere autonomo. Infatti l'analisi cluster sfrutta la distanza tra il campione ed i centroidi che ogni volta possono adattarsi il meglio possibile ai dati registrati. Però la sua completa oggettività dal fenomeno può conseguire errori nei risultati. Una possibile anomalia potrebbe essere quella di avere FBG non consecutivi all'interno dello stesso ambiente, il che non avrebbe alcun senso. Ciò porta l'algoritmo semplificato a prendere come interfaccia il primo passaggio tra ambienti. Per chiarire meglio il concetto ci si avvale ancora una volta di un esempio creato ad hoc e riportato in *Figura 4.10*.

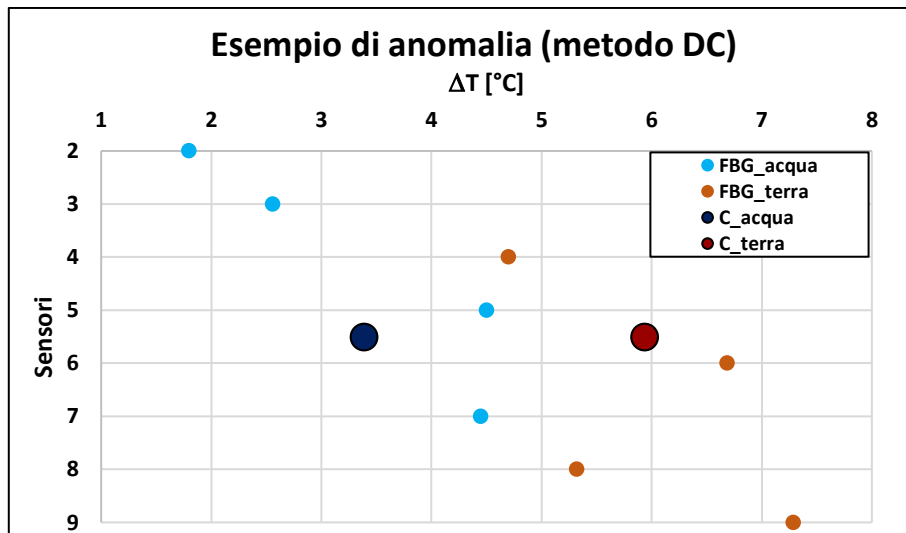


Figura 4.10: Esempio di anomalia risultante dal metodo DC.

Nell'esempio sintetico riportato in **Figura 4.10** si nota che i sensori 4,5,7 e 8 oscillano tra l'ambiente acqua e l'ambiente terra, rendendo impossibile al metodo DC l'individuazione del fondo corretto, ovvero sia tra 3 e 4. Quindi alla fine dell'algoritmo DC si introduce un vincolo che prevede l'identificazione del fondo considerando il primo passaggio di ambiente che nell'esempio di **Figura 4.10** è situato tra i sensori 3 e 4. È comunque possibile che esistano altri casi in cui il metodo DC possa fallire ma l'idea che si vuole portare avanti in questo lavoro di tesi consiste nell'applicare l'algoritmo appena espresso e confrontarlo con altri metodi per irrobustire il più possibile l'identificazione del fondo del fiume. Eventuali commenti a casi in cui il DC fallisce si rimandano alle conclusioni del lavoro.

#### 4.4.6 Riepilogo

Il presente capitolo ha descritto 5 metodi per la determinazione della posizione del fondo del fiume; come conclusione si riportano i vari metodi elencandone le possibili lacune:

**ΔT:** mediante analisi dei profili di variazione termica di un campione di dati vuole definire una fascia, valida per tutti i profili analizzati, in cui non sia mai presente un FBG. Nota la fascia può essere scelto un suo valore rappresentativo, ad esempio la media, come soglia da utilizzare successivamente. **CONTRO:** l'analisi dei profili richiede un occhio esperto; è necessario un'elaborazione preliminare di un blocco dati, quindi lo strumento per il primo periodo è soggetto a

validazione; il numero di prove da analizzare non è definibile; è possibile che non esista alcuna fascia.

**ΔΔT**: sfrutta il massimo salto termico tra i due ambienti per distinguerli. Per irrobustire questa analisi sono stati introdotti due vincoli: il salto deve essere positivo ( $\Delta T_{\text{terra}} > \Delta T_{\text{acqua}}$ ) e il sensore in acqua a cavallo dell'interfaccia deve avere  $\Delta T < 5.2^\circ\text{C}$  (perciò l'FBG in terra avrà  $\Delta T > 5.2^\circ\text{C}$ ). **CONTRO**: non è completamente oggettivo visto il legame con dati sperimentali ( $5.2^\circ\text{C}$ ); tali dati non rendono il metodo generale, infatti questa elaborazione vale solo nel caso in cui la potenza erogata sia pari a 1.2 W/FBG (Cap. 3) e tale soglia potrebbe non essere applicabile data la differente natura tra sperimentazioni di laboratorio e campo.

**τ**: mediante analisi dei profili di costanti temporali vuole definire una fascia, valida per tutto il campione analizzato, in cui non sia mai presente un FBG. Nota la fascia può essere scelto un suo valore rappresentativo, ad esempio la media, come soglia da utilizzare successivamente. **CONTRO**: l'analisi dei profili richiede un occhio esperto; è necessario un'elaborazione preliminare di un blocco dati, quindi lo strumento per il primo periodo è soggetto a validazione; il numero di prove da analizzare non è definibile; è possibile che non esista alcuna fascia; la sua elevata dispersione rende i dati ardui da interpretare perciò è stato abbandonato.

**Δτ**: sfrutta il salto massimo nella velocità di risposta di due ambienti per individuare la posizione del fondo. In assenza di dati sperimentali questa analisi è stata rafforzata da un unico vincolo, ovverosia il salto massimo deve essere positivo ( $\tau_{\text{terra}} > \tau_{\text{acqua}}$ ). L'analisi  $\Delta\tau$  risulta essere la più oggettiva tra quelle legate al fenomeno del riscaldamento per la sua indipendenza da qualsiasi tipo di valore teorico/sperimentale. **CONTRO**: essendo  $\tau$  un parametro dotato di elevata dispersione potrebbe risultare che tra due FBG in terra intercorra un salto maggiore rispetto a quello tra due ambienti differenti.

**DC**: sfrutta la minima distanza “termica” tra i punti e i corrispettivi centroidi per definire l'ambiente di ciascun FBG. **CONTRO**: Essendo completamente esterno al fenomeno del riscaldamento potrebbe fornire risultati anomali e fisicamente insensati.

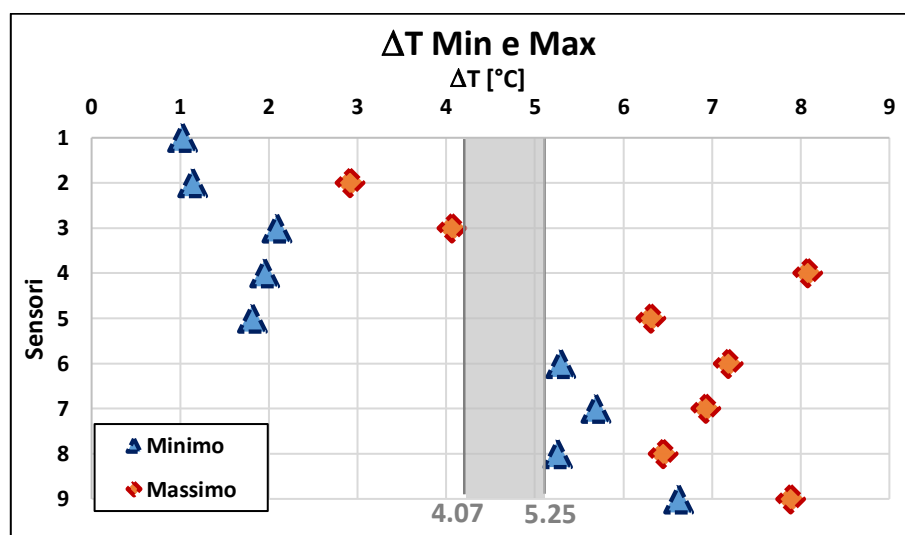
## 5 2012

---

Avendo come database 3 anni di registrazioni, dal 2012 al 2014, si è scelto di utilizzare il primo anno per la validazione dei criteri di identificazione della posizione del fondo del fiume descritti nel capitolo precedente, cercando di capirne la bontà e provando a incrociare i risultati per definire, se possibile, una procedura automatica per l'analisi dati. Il campione analizzato è di 315 prove. Si vuole ricordare che l'analisi seguente è stata eseguita senza l'utilizzo dei dati del sonar e senza sapere l'altezza d'acqua in modo da rendere l'analisi il più indipendente possibile.

### 5.1 $\Delta T$

La procedura descritta nel paragrafo 4.1.1 è stata estesa a tutti i profili di variazione termica del 2012. Al fine di indentificare una possibile fascia che separi l'ambiente "acqua" da quello "terra" si è scelto di analizzare tutti i profili definendo il massimo e il minimo  $\Delta T$  per i 9 FBG, come mostra la *Figura 5.1*:



*Figura 5.1: Minimo e massimo  $\Delta T$  nel 2012.*

In *Figura 5.1* non è mostrato volontariamente il massimo dell'FBG 1 poiché troppo elevato. Il grafico mostra tre comportamenti distinti:

- i primi tre sensori sono sempre rimasti immersi in acqua poiché il loro valore massimo raggiunge al più 4.07°C, inferiore anche a 5.2 °C (valore sperimentale massimo di  $\Delta T$  in acqua);
- gli ultimi quattro (6,7,8 e 9) sono sempre stati in terra, infatti il loro minimo non scende al di sotto dei 5.25°C (superiore a 5.2 °C valore sperimentale minimo di  $\Delta T$  in terra);
- i sensori compresi da questi due gruppi (4 e 5) hanno un range di  $\Delta T$  molto ampio avente come minimo un valore compatibile con l'ambiente acqua e come massimo un valore compatibile con l'ambiente terra, ovverosia questi due sensori nel corso del 2012 sono stati, almeno una volta, in due ambienti differenti.

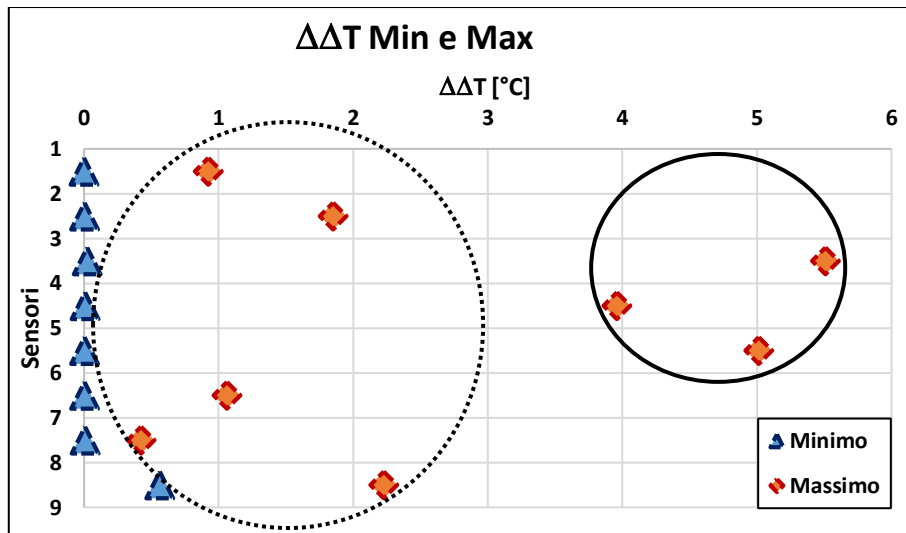
È possibile identificare una zona di  $\Delta T$  che non appartenga ai sensori delle prime due categorie, che per tutto il 2012 sono rimasti nello stesso ambiente considerando il massimo  $\Delta T$  in acqua e il minimo  $\Delta T$  in terra, ovverosia il range 4.07 - 5.25°C (zona grigia in *Figura 5.1*). Volendo utilizzare un numero che rappresenti tale fascia si è scelto il valor medio pari a 4.65°C.

Si conclude che l'analisi dati del 2012 in merito all'identificazione del fondo utilizzando la variazione termica  $\Delta T$  ha identificato una soglia pari a 4.65°C che separa l'ambiente acqua (minore della soglia) dall'ambiente terra (superiore alla soglia). Si è volutamente scelto questo valore rispetto a quello "teorico" 5.2 °C per disaccoppiare, almeno a livello iniziale, l'analisi dei dati di campo da eventuali evidenze sperimentali di laboratorio.

## 5.2 $\Delta\Delta T$

Innanzitutto si ricorda (paragrafo 4.4.2) che valori bassi di  $\Delta\Delta T$  corrispondono a coppie di sensori consecutivi appartenenti allo stesso ambiente. Al contrario, valori alti di  $\Delta\Delta T$  corrispondono a coppie di sensori consecutivi che almeno una volta si sono trovati in ambienti diversi (per maggior chiarezza si rimanda alla *Figura 4.5*). Il fondo è identificato automaticamente dal massimo salto  $\Delta\Delta T$  per ogni profilo utilizzando due ulteriori criteri che devono essere soddisfatti: il massimo salto deve essere positivo e il sensore in acqua (il primo della coppia di FBG consecutivi; per primo si intende quello posizionato a quota superiore) che genera il salto massimo deve avere un  $\Delta T$  pari al più a 5.2°C (e viceversa, il sensore in terra deve avere un  $\Delta T$  superiore a tale valore). Se il salto massimo non soddisfa entrambi i criteri si passa al salto successivo.

Come per il caso precedente (analisi del  $\Delta T$ ), si sono determinati tutti i profili di  $\Delta\Delta T$  del 2012 calcolando il valore minimo e massimo, ottenendo la **Figura 5.2**. In questo caso tale grafico non serve per l'individuazione di una soglia in quanto, come precedentemente spiegato, tale metodo identifica il salto massimo  $\Delta\Delta T$  automaticamente, ma consente di fare qualche commento sul comportamento generale dei sensori.



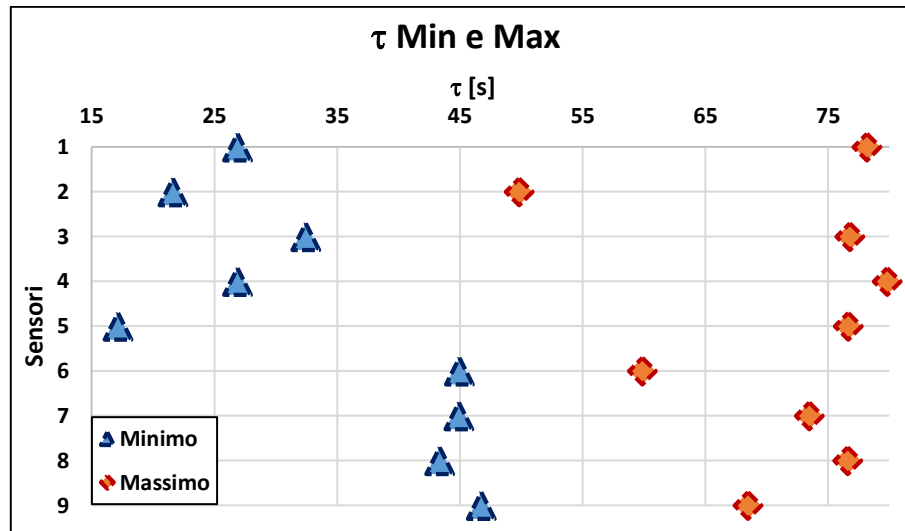
**Figura 5.2:** Minimo e massimo  $\Delta\Delta T$  nel 2012.

La **Figura 5.2** mostra che i massimi formano essenzialmente due gruppi: il primo, linea tratteggiata, comprende tutte le coppie di sensori che sono sempre stati nello stesso ambiente (con valori di  $\Delta\Delta T$  più contenuti) mentre il secondo, linea continua, racchiude tutte le coppie di sensori nelle quali almeno uno dei due FBG nel 2012 ha effettuato una volta il passaggio da acqua a terra o viceversa. Questo grafico conferma il grafico precedente di **Figura 5.1**, ovvero sia durante il 2012 i sensori che hanno cambiato ambiente sono due, il 4 e il 5.

### 5.3 $\tau$

Nel paragrafo 4.4.3 si è mostrato come la costante di tempo abbia valori molto dispersi tale da non rendere possibile l'individuazione di una fascia che definisca la separazione tra “acqua” e “terra”. Come diretta conseguenza è stato dichiarato che la costante di tempo non sarà utilizzata per la

determinazione della quota del fondo del fiume. Per completezza espositiva si riporta comunque la **Figura 5.3** in cui, come per il  $\Delta T$ , si riportano i valori massimi e minimi di  $\tau$  per i 9 FBG.



**Figura 5.3:** Minima e massima  $\tau$  per il 2012.

Tale grafico rafforza quanto citato in precedenza, ovvero sia non è possibile capire quale sia stato nel 2012 l'ambiente in cui i sensori sono stati immersi (acqua, terra, acqua e terra). Osservando i minimi si può intuire che i primi cinque FBG manifestano un comportamento differente dagli ultimi quattro. Perciò si può pensare che dall' FBG 6 in poi i sensori siano stati sempre interrati. Purtroppo non si può ripetere un ragionamento simile anche per i primi cinque sensori, poiché i valori massimi assumono un andamento confuso e di difficile interpretazione. Si conferma l'abbondanza di questo metodo a fronte di approcci più affidabili.

## 5.4 $\Delta\tau$

L'analisi presentata per il  $\Delta\Delta T$  è riproposta utilizzando come parametro la variazione della costante di tempo  $\Delta\tau$  (paragrafo 4.4.4) definendo per tutto il 2012 il minimo e massimo della  $\Delta\tau$  per ogni FBG, come mostra la **Figura 5.4**. Nel grafico sono presenti solo le variazioni positive, con minimo positivo della grandezza, poiché la  $\Delta\tau_{MAX}$  non può essere negativa (costante di tempo in terra è maggiore di quella in acqua). Anche in questo caso si hanno i salti massimi in corrispondenza dell'interfaccia e salti minimi per sensori nello stesso ambiente.



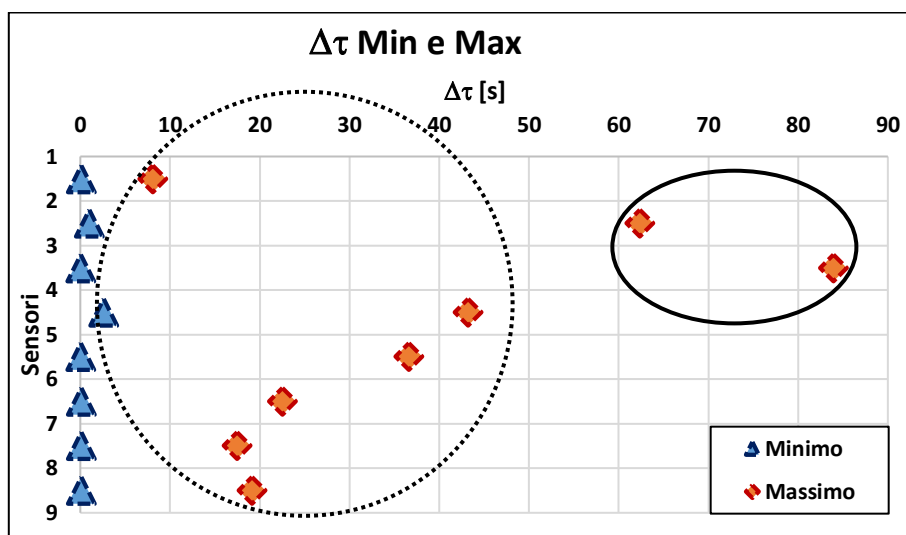


Figura 5.4: Minimo e massimo  $\Delta\tau$  nel 2012.

La figura sovrastante consente di individuare due gruppi distinti: uno rappresenta coppie di sensori che sono sempre state nello stesso ambiente (tratteggio) e l'altro quelle che hanno cambiato ambiente di misura (cerchio con linea continua). Ciò che si osserva, però, è che la coppia 2-3 rientra nel gruppo di sensori a cavallo dell'interfaccia, ovvero sia per la  $\Delta\tau$  anche il sensore 3 almeno una volta nel 2012 è andato in "terra" e la coppia 5-6 esce da questo gruppo, perciò il sensore 5 risulta essere sempre situato in terra. Tali informazioni sono in disaccordo sia con  $\Delta T$  che con il  $\Delta\Delta T$ .

## 5.5 DC

Anche per l'analisi cluster, denominata DC, si propone un grafico per la posizione dei sensori (acqua, terra o entrambi) durante l'anno 2012, come mostra la *Figura 5.5*.

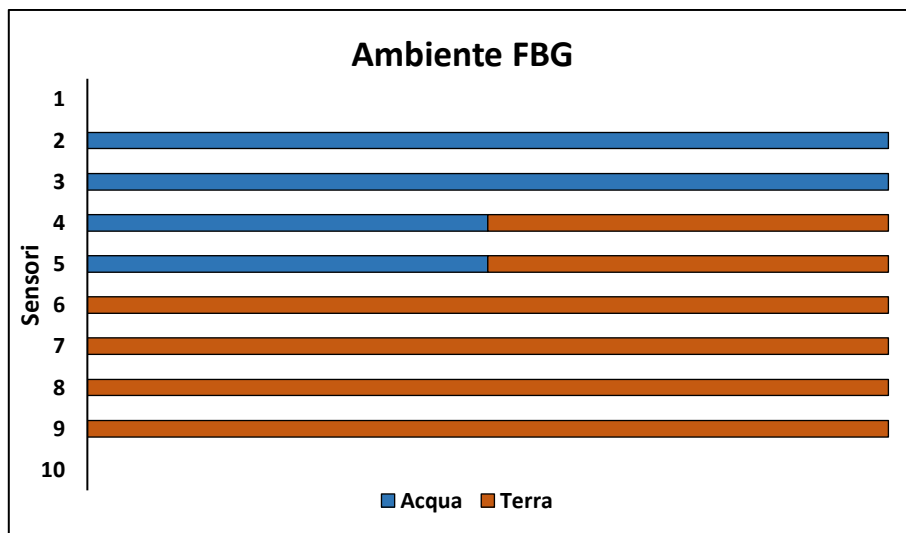


Figura 5.5: 9 FBG con i relativi ambienti del 2012.

Osservando il comportamento di ciascun sensore si nota che nel 2012 questo metodo vede i sensori 2 e 3 sempre in acqua (azzurro in *Figura 5.5*), gli ultimi quattro sempre in terra (marrone in *Figura 5.5*) e gli FBG 4 e 5 in entrambi gli ambienti (da precisare che la barra orizzontale di due colori dichiara che tale sensore è stato almeno una volta in entrambi gli ambienti e non fornisce nessuna informazione sulla percentuale di permanenza di un sensore in acqua rispetto alla terra). Tale metodo è in completo accordo con il  $\Delta T$  e con il  $\Delta \Delta T$ .

## 5.6 METODO GK

Trascurando momentaneamente il metodo cluster DC, gli altri tre approcci ( $\Delta T$ ,  $\Delta \Delta T$  e  $\Delta \tau$ ) nascono dall'interpretazione fenomenologica del comportamento del sensore BLESS nei due ambienti di misura, ovvero si potrebbero essere soggetti a scelte/decisioni/interpretazioni che dipendono da quanta familiarità la generica persona possiede con queste tipologie di dati (e dalla reale possibilità di utilizzare soglie riferite a sperimentazioni di laboratorio). Volendo creare un metodo il più possibile robusto per l'identificazione del fondo del fiume si è deciso di far lavorare insieme questi tre metodi definendone così uno nuovo, denominato metodo GK.

La prima operazione è stata quella di confrontare il fondo ottenuto nel 2012 con i tre approcci, valutando la percentuale di accordo di 2 metodi sui 3 a disposizione, *Tabella 5.1*. A prescindere da dove il fondo si trovi, questa tabella mostra come i primi due metodi, basati sulla variazione termica siano in accordo per il 98.73% dei casi (abbastanza prevedibile in quanto i due metodi non sono

completamente scorrelati), mentre quando entra in gioco la variazione della costante di tempo la percentuale scende all'83% circa.

CONFRONTO	$\Delta T - \Delta \Delta T$	$\Delta T - \Delta \tau$	$\Delta \Delta T - \Delta \tau$
PERCENTUALE	98.73%	82.86%	83.49%

*Tabella 5.1: Confronto tra i vari metodi.*

È stata inoltre effettuata un'analisi di sensitività della soglia  $\Delta T$ , utilizzando come valore non solo quello medio ma anche il minimo 4.07°C e massimo 5.25°C, dedotti dal grafico di **Figura 5.1**. I risultati sono proposti in **Tabella 5.2**:

Soglia $\Delta T$	$\Delta T - \Delta \Delta T$	$\Delta T - \Delta \tau$	$\Delta \Delta T - \Delta \tau$
4.07	97.14%	81.90%	83.49%
4.65	98.73%	82.86%	83.49%
5.25	98.73%	83.17%	83.49%

*Tabella 5.2: Confronto tra i tre metodi variando la soglia della  $\Delta T$ .*

Si osserva che, all'aumentare del valore di soglia  $\Delta T$ , aumenta la coincidenza tra  $\Delta T$  e  $\Delta \Delta T$ , poiché la soglia  $\Delta T$  si avvicina sempre più al vincolo di 5.2°C legato alla  $\Delta \Delta T_{MAX}$ ; la corrispondenza tra  $\Delta T$  e  $\Delta \tau$  rimane quasi costante all'83% e la coincidenza tra  $\Delta \Delta T$  e  $\Delta \tau$ , non essendo influenzata dalla soglia  $\Delta T$ , non varia.

Anche se  $\Delta \tau$  può essere considerato il metodo più indipendente, per la sua assenza di soglie soggettive o sperimentali (al contrario degli altri due metodi), il suo minor allineamento con i risultati degli altri 2 approcci porta ad un suo "declassamento" a soglia di secondo livello.

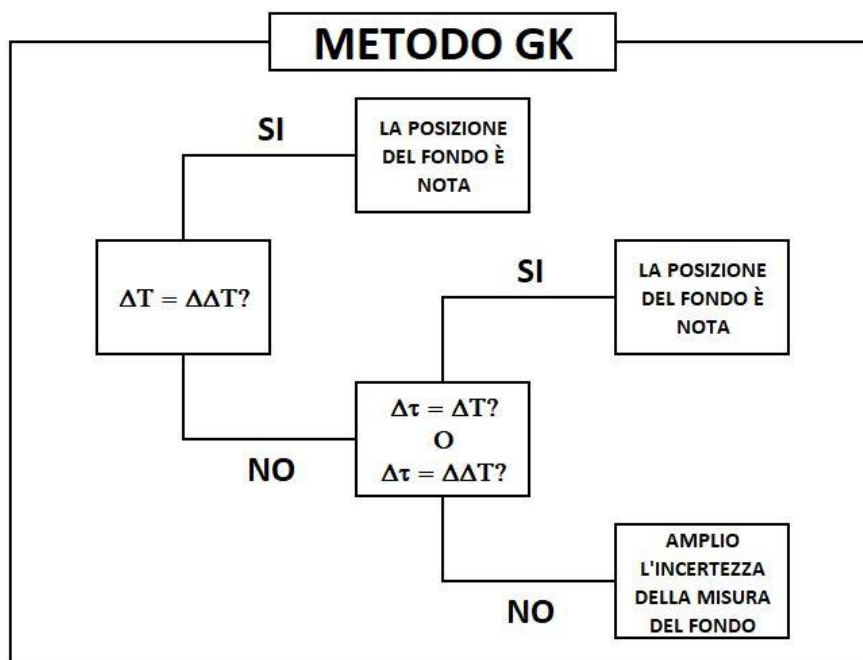
Considerando che l'obiettivo è la definizione della quota del fondo del fiume a prescindere dalla prova si considera il seguente iter:

- Si confrontano i due metodi ritenuti più affidabili, ovverosia il  $\Delta T$  e il  $\Delta \Delta T$ . In questo caso, ovverosia nel 2012, il 98.73% delle volte essi coincidono, quindi il 98.73% delle volte si ottiene la posizione del fondo;
- Per le prove che rientrano nella percentuale in cui il fondo è incognito (1,27%) si utilizza la soglia secondaria  $\Delta \tau$ : se essa conferma uno dei due precedenti metodi ( $\Delta T$  o  $\Delta \Delta T$ ) il fondo è

noto. Applicando questo tipo di analisi si recupera uno 0,64%, portando la percentuale di identificazione del fondo al 99.37%.

- Per raggiungere il 100% e recuperare così anche l'ultimo 0,63%, si deve, non avendo più metodi a disposizione, accettare un aumento dell'incertezza di misura (attualmente, a prescindere dai due sensori che definiscono il range ove il fondo si trova, l'incertezza di misura è pari al loro interasse, ovverosia 50 cm). Quindi, nel caso in cui tutti e tre i metodi forniscano risultati diversi, si è scelto di ampliare la fascia che comprende il fondo considerando l'FBG in acqua a quota più bassa e l'FBG in terra a quota più alta tra i metodi  $\Delta T$  e  $\Delta\Delta T$ , ovverosia quelli ritenuti più affidabili.

La **Figura 5.6** mostra lo schema logico appena descritto e la **Figura 5.7** mostra un esempio in cui serve applicare tutta la procedura per la determinazione della quota del fondo del fiume.



**Figura 5.6:** Schema riassuntivo del metodo GK.

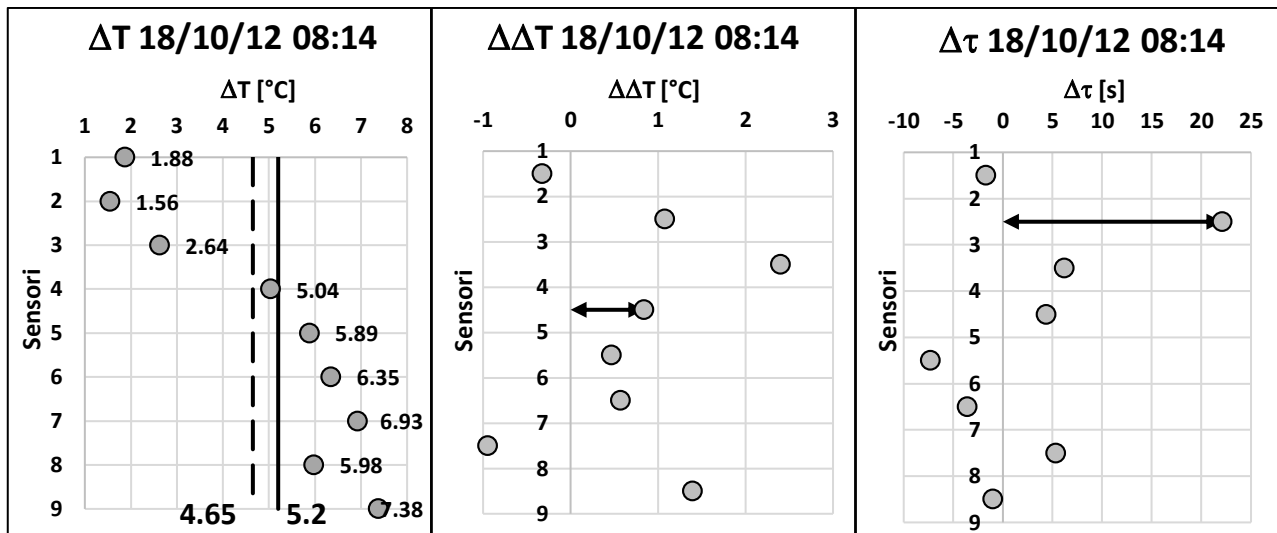


Figura 5.7: Profilo di  $\Delta T$ ,  $\Delta\Delta T$  e  $\Delta\tau$  della prova del 18/10/12 alle 08:14.

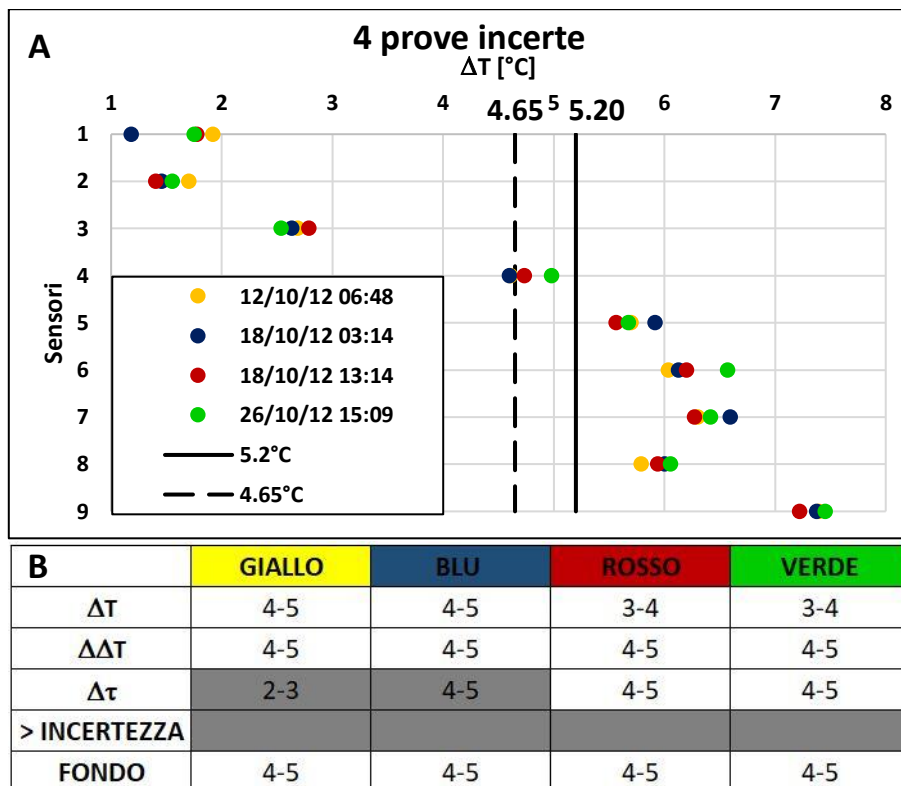
L'esempio in **Figura 5.7** mostra che la soluzione di nessuna coppia dei tre metodi corrisponde. Infatti il  $\Delta T$  posiziona il fondo tra i sensori 3 e 4 attraverso la soglia di  $4.65^\circ\text{C}$  (linea tratteggiata), il  $\Delta\Delta T$  con i suoi due vincoli ( $\Delta\Delta T$  positivo e  $\Delta T$  del sensore in acqua maggiore di  $5,2^\circ\text{C}$ , linea continua) colloca l'interfaccia tra gli FBG 4 e 5, infine il  $\Delta\tau$  situa il passaggio di ambiente a cavallo dei sensori 2 e 3. Perciò il metodo GK consente di prendere il minimo e il massimo FBG tra i metodi  $\Delta T$  e  $\Delta\Delta T$  come nuovo intervallo di valori contenente la posizione del fondo, ovvero sia il sensore 3 del metodo legato all'incremento termico e il 5 del metodo connesso al massimo salto termico.

Nel 2012 si deve rinunciare solo due volte (uno è l'esempio sopra riportato) all'incertezza di 0.5 m per una doppia (1 metro), raggiungendo così il 100% dei casi in cui si determina la quota del letto del fiume.

## 5.7 CONFRONTO TRA METODO GK E METODO DC

Dopo aver combinato i metodi legati alla curva scaldante per ottenerne uno nuovo (GK) che permettesse di individuare sempre la posizione del fondo, si è deciso di confrontarlo con il metodo DC. Tale confronto nasce dalla necessità di verificare due metodi basati su principi completamente diversi: il primo, più specifico, fondato su esperienza di laboratorio e esperienza della persona che analizza i dati BLESS, il secondo, più generale, legato semplicemente a distanze che intercorrono

tra i dati raccolti (quindi applicabile a qualunque tipo di campione ignorando il fenomeno che lo governa). La percentuale di corrispondenza è del 98.73%, ovverosia 311 prove su 315. Per indagare la percentuale di fallimento (1.27%) si riportano in **Figura 5.8 A** i profili di incremento termico delle prove in questione e in **Figura 5.8 B** i passi del metodo GK sotto forma di tabella.



**Figura 5.8:** A) Profili di  $\Delta T$  delle 4 prove in cui non combaciano i due metodi. B) Passaggi tabulati.

Le quattro prove d'interesse mostrano una distribuzione di punti pressoché identica, la quale potrebbe giustificare la non coincidenza dei due metodi. In tutti i casi il metodo DC vede il fondo tra i sensori 3 e 4 mentre il metodo GK tra gli FBG 4 e 5. Ricordando che questo secondo approccio è basato su  $\Delta T$ ,  $\Delta\Delta T$  e  $\Delta\tau$ , si osserva che in ogni prova il sensore 4 ha un valore di incremento termico inferiore a  $5.2^\circ\text{C}$ , per questo motivo il  $\Delta\Delta T$  individua il massimo salto che rispetti le sue restrizioni (per maggiori informazioni si veda il paragrafo 4.4.2) tra gli FBG 4 e 5. Inoltre gli incrementi termici dello stesso sensore nelle prove del 12/10/12 alle 06:48 e del 18/10/12 alle 03:14 (giallo e blu in **Figura 5.8 A**) oltre a sovrapporsi quasi completamente, presentano anche un valore di incremento termico inferiore a  $4.65^\circ\text{C}$ , ovverosia la soglia individuata mediante la  $\Delta T$ . In queste due prove il  $\Delta T$  e il  $\Delta\Delta T$  combaciano, di conseguenza anche l'interfaccia individuata dal metodo GK assume lo stesso valore. Nelle restanti due prove i metodi in questione forniscono informazioni

diverse, per questo motivo si introducono i risultati ottenuti attraverso il metodo  $\Delta\tau$  che confermano, in entrambi i casi, l'intervallo compreso tra gli FBG 4-5 (come mostrato in **Figura 5.8 B**). Infine si può notare che per la prova “blu” la posizione del fondo stimata dal metodo GK è confermata da tutte e 3 le soglie. A questo livello di analisi non è possibile capire quale dei due metodi sia il migliore ma è assolutamente positivo e incoraggiante la loro percentuale di accordo.

Volendo forzare l'analisi alla determinazione del fondo del fiume per tutti i profili, e avendo utilizzato tutti i metodi a disposizione, si è deciso di perdere “precisione”, aumentando l'incertezza di misura, ovvero si ampliando la fascia del metodo GK fino a contenere completamente le soluzioni del metodo DC. Così facendo si ottiene un aumento di 0.5 m nei quattro casi incerti, passando da 0.5 m di incertezza ad 1 m. In totale, nel 2012, gli aumenti di fascia sono sei e tutti pari a 0.5 m (due per far coincidere il  $\Delta T$  con il  $\Delta\Delta T$  e quattro per far coincidere gli approcci GK e DC), ovvero solo l'1.9% delle prove ha una fascia aumentata e pari a 1 m.

È infine importante ricordare che modificando le soglie del metodo GK è possibile a priori far combaciare i due metodi al 100%, ma è altrettanto vero che un algoritmo cluster più avanzato del metodo semplificato DC potrebbe a sua volta dare lo stesso risultato. Anche se un'analisi più approfondita è necessaria (per le soglie del metodo GK, per il legame “forzato” tra evidenze di laboratorio e di campo del metodo GK e analisi cluster migliore di DC) la loro quasi completa coincidenza (circa 99%) sembra confermare la robustezza dei due metodi.

## 6 CHECK 2013-2014

---

Nel capitolo precedente sono stati validati i metodi GK e DC al fine di trovare sempre una posizione del fondo, a costo di aumentare il grado d'incertezza della soluzione. In questo capitolo si vogliono proiettare le analisi eseguite anche ai due anni successivi, ovverosia 2013 e 2014, raffrontando, ancora una volta, i risultati ottenuti dai due metodi. Si ricorda che lo scopo principale di questo elaborato è quello di ottenere sempre delle misure del fondo dai dati registrati nella maniera più oggettiva e autonoma possibile.

Il confronto tra i due metodi (DC e GK) ha portato ad una percentuale di coincidenza media pari al 4.2%, valore molto basso rispetto alle aspettative createsi nel 2012 (98.73%). Al fine di individuare la motivazione di tale anomalia, si è diviso il periodo di analisi nei due anni. Ciò che ne consegue è che la percentuale di corrispondenza del 2013 sia mediamente del 8.8% mentre quella del 2014 dello 0%. Per entrare ancora più nel dettaglio del problema si è deciso di concentrare l'attenzione solo sul 2013, anno in cui almeno una parte dei risultati coincide, applicando un'ulteriore suddivisione per mesi. I risultati sono riassunti in **Tabella 6.1**, dove la prima riga contiene il mese con il numero di prove acquisite da BLESS tra parentesi e la seconda la percentuale di coincidenza tra i due metodi (in grigio i mesi in cui non si hanno acquisizioni).

ANNO	GEN (0)	FEB (0)	MAR (0)	APR (2)	MAG (98)	GIU (105)	LUG (83)	AGO (123)	SET (119)	OTT (122)	NOV (119)	DIC (123)
2013				0%	0%	0%	17%	32%	22%	0%	0%	0%

*Tabella 6.1: Percentuali di coincidenza del 2013 suddivise per mesi.*

Ciò che si osserva è che fino a giugno la corrispondenza è molto bassa, mentre nei tre mesi successivi si ha una ripresa, anche se non si supera mai il 32%, per poi crollare a zero nei mesi seguenti, 2014 compreso.

### 6.1 ANALISI DEL METODO GK

Con lo scopo di capire il problema, si è deciso di analizzare ogni passo del metodo GK (paragrafo 5.6) per tutto l'arco temporale in questione, affinché si possa trovare l'anomalia (o le anomalie) che



portano a percentuali così basse la coincidenza tra i due metodi. In **Tabella 6.2** sono riportati i risultati.

ANNO	$\Delta T - \Delta \Delta T$	$\Delta \tau$	INCERTEZZA
2012	98.73%	99.37%	100.00%
2013-2014	13.52%	21.67%	32.43%

**Tabella 6.2:** Confronto dei passaggi del metodo GK tra il 2012 e i successivi due anni.

Nella **Tabella 6.2** la prima colonna indica il periodo di analisi, le successive tre rappresentano la percentuale di incidenza cumulata di ogni passaggio del metodo GK rispetto al metodo stesso. Si ricorda che tale metodo è stato introdotto al fine di avere sempre una misura del fondo. Ciò che si osserva è che, tra il 2012 e i due anni seguenti, le volte in cui è stato individuato il fondo si riducono a meno di un terzo, ciò non ha senso poiché il metodo GK è stato introdotto con lo scopo di individuare sempre l'interfaccia acqua/terra. Per questo motivo l'unica possibilità di non avere un riscontro sulla posizione del fondo è legata alle soglie che probabilmente non funzionano come nel 2012. Un altro aspetto riguarda l'aumento d'incertezza. A questo proposito viene riportata la **Tabella 6.3**. Nella prima colonna vengono mostrati i possibili aumenti di fascia mentre nelle due seguenti la percentuale di volte in cui si è costretti ad aumentare l'incertezza nel 2012 e nel 2013-2014. Inoltre nell'ultima riga sono proposte le percentuali di utilizzo nei due periodi.

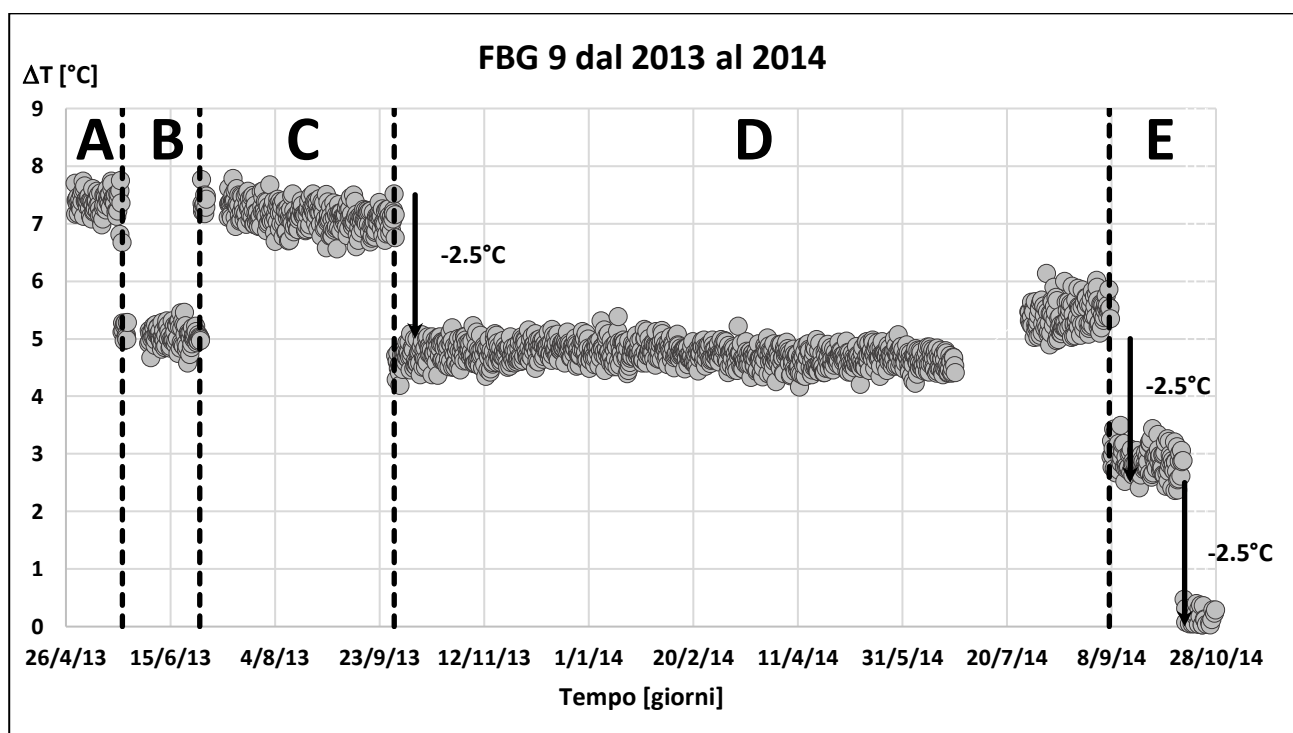
AUMENTO DI INCERTEZZA	2012	2013-2014
[metri]	% volte	% volte
0.5	100.00%	0.00%
1	0.00%	17.96%
1.5	0.00%	36.41%
2	0.00%	43.20%
2.5	0.00%	0.49%
3	0.00%	1.46%
3.5	0.00%	0.49%
4	0.00%	0.00%
Utilizzo fascia	0.63%	10.76%

**Tabella 6.3:** Confronti percentuale tra le fasce del 2012 e quelli degli anni successivi in termini di sensori.

Nel 2013-2014 non cresce solo il numero di volte in cui si è costretti ad aumentare l'incertezza, ma cresce anche l'incertezza stessa. Infatti se nel 2012 è stato necessario aumentare la fascia solo nello

0.63% dei casi e di 0.5 m, negli anni a seguire la fascia è stata ampliata il 10.76% delle volte e in media da 1 m ai 2 m, fino ad un massimo di 3.5m. L'aumento di fascia definisce lo scostamento tra il fondo trovato con  $\Delta T$  e quello con  $\Delta \Delta T$ , ovverosia le **Tablelle 6.2 e 6.3** dichiarano che non solo i due metodi si “parlano” poco ma il loro risultato è molto diverso in termini di posizione del fondo (risultato strano rispetto all’ottima coincidenza ottenuta nel 2012).

Al fine di identificare le cause del fallimento del metodo GK per il 2013 e 2014, si è deciso di esaminare gli incrementi di temperatura di questi due anni, ovverosia i contributi che più influenzano il metodo GK. In **Figura 6.1** sono riportati i valori di  $\Delta T$  nel tempo del sensore 9.



**Figura 6.1:** Andamento del  $\Delta T$  acquisito dal sensore 9 nel 2013-2014.

Tale sensore è sempre rimasto interrato (osservazione possibile in quanto si sono valutati più sensori ma si è deciso per semplicità di riportare solo il sensore 9), di conseguenza ci si aspetta un andamento costante che oscilli tra i 7°C e gli 8°C, come nel 2012 e nel primo periodo del 2013. Ciò che si osserva, invece, è che l’andamento dell’incremento termico può essere suddiviso in cinque fasce A, B, C, D ed E, in ognuna delle quali l’FBG assume sì un andamento compatto e costante (a conferma del fatto che sia interrato) ma di valore differente. Nelle prime tre zone, per un periodo di circa 5 mesi, si manifesta un calo improvviso che viene recuperato poco dopo. Nella fascia D (circa

un anno) l'andamento di  $\Delta T$  si stabilizza sui  $5^{\circ}\text{C}$ , perdendo un terzo del valore iniziale, ovvero  $2.5^{\circ}\text{C}$ . Nell'ultimo mese di tale periodo sembra manifestarsi un minimo di ripresa che, però, viene nuovamente persa all'inizio dell'ultima fascia, la E. Ancora una volta l'entità della perdita è di circa  $2.5^{\circ}\text{C}$ , ovvero un altro terzo del valore iniziale. Alla fine della zona E, di durata un mese, si perdono gli ultimi  $2.5^{\circ}\text{C}$ , dopodiché, fino alla fine dell'arco temporale analizzato, l'incremento termico si stabilizza tra gli  $0^{\circ}\text{C}$  e gli  $0.5^{\circ}\text{C}$  (guasto permanente del circuito scaldante). Il comportamento anomalo osservato porta a pensare che la causa di tutto sia un problema al circuito scaldante. Infatti la caduta nelle fasce A, B e C potrebbe essere dovuta all'inizio dal danneggiamento di un primo circuito, fino alla completa perdita del suo contributo all'inizio della banda D, questo giustificherebbe il fatto che si perda un terzo del  $\Delta T$  (per maggiori dettagli si vedano i risultati ottenuti dall'esperimento nel paragrafo 3.4). Lo stesso vale per la fine dei periodi D ed E in cui si hanno due cali di  $\Delta T$  pari a  $2.5^{\circ}\text{C}$ , dovuti presumibilmente alla perdita prima di uno, poi anche dell'altro circuito scaldante.

Tralasciando la fascia B in cui si ha un comportamento "strano" e ponendo l'attenzione sulle restanti zone, al fine di verificare quanto ipotizzato in precedenza, si è deciso di provare a ritardare, ove possibile, le grandezze in gioco per farle adattare meglio alle nuove situazioni createsi. Questo nuovo approccio, chiamato per semplicità metodo GK\*, prevede di scalare dal 100% al 66% e al 33% i seguenti parametri (di cui si riporta il valore di soglia pari al 100% di funzionamento elettrico):

- il valore da sottrarre all'FBG 6, ovvero  $4^{\circ}\text{C}$  (paragrafo 4.3);
- la soglia individuata con il  $\Delta T$ , ovvero  $4.65^{\circ}\text{C}$  (paragrafo 4.4.1);
- la condizione di sensore in acqua del metodo  $\Delta\Delta T$ . Riguardo a quest'ultimo valore bisogna fare una precisazione. Infatti si andrà a riscaldare la media di  $3.5^{\circ}\text{C}$  e non il valore massimo, ovvero  $5.2^{\circ}\text{C}$ , poiché l'incertezza dello strumento ( $1.7^{\circ}\text{C}$ ) non varia (paragrafo 3.4).

I risultati delle 3 grandezze scalate ( $^{\circ}\text{C}$ ) vengono riportati in **Tabella 6.4** dove le righe rappresentano i valori da scalare e le colonne indicano le nuove percentuali.

	100%	66%	33%
$\Delta T$	4.65	3.10	1.55
$\Delta\Delta T_{media}$	3.5	2.33	1.17
$\Delta\Delta T_{max}$	5.2	4.03	2.87
FBG 6	4	2.67	1.33

**Tabella 6.4: Risultati scalati al 66% e al 33%.**

Per poter confrontare le percentuali di coincidenza di ciascun passo del nuovo metodo GK\* con quelli del precedente (in grigio) si riporta la **Tabella 6.5**.

METODO	ANNO	$\Delta T - \Delta\Delta T$	$\Delta\tau$	INCERTEZZA
GK	2012	98.73%	99.37%	100.00%
GK	2013-2014	13.52%	21.67%	32.43%
GK	FASCIA A	82.00%	95.00%	100.00%
GK=GK*	FASCIA C	41.99%	51.06%	99.70%
GK*	FASCIA D	27.78%	49.30%	100.00%
GK*	FASCIA E	2.22%	69.63%	85.19%

**Tabella 6.5: Confronto dei passaggi del metodo GK con quelli del metodo GK\*.**

La prima colonna indica il metodo utilizzato, la seconda rappresenta il periodo a cui è stata applicata l'analisi e le ultime quattro la percentuale di incidenza cumulata di ogni passaggio del metodo GK\* rispetto al metodo stesso. La prima riga ripropone i risultati del 2012 e la seconda i risultati del 2013-2014 mentre dalla 3 in poi si analizzano le fasce dichiarate in **Figura 6.1** riscalandole le soglie in base alla perdita di potenza. Il primo risultato positivo è il recupero della percentuale di determinazione del fondo (ultima colonna) che teoricamente dovrebbe essere del 100% (anche se l'ultima fascia, E, ha un 15% dei casi in cui fondo non è identificato). Inoltre, essendo tale metodo specifico per ogni banda, esso aumenta il grado di coincidenza sia tra  $\Delta T$  e  $\Delta\Delta T$  che tra le due grandezze precedenti e il  $\Delta\tau$ . Analizzando gli aumenti di incertezza si è visto che al diminuire del numero di circuiti scaldanti attivi, aumenta la dimensione della fascia e quindi l'incertezza della soluzione. Si è volutamente inserita anche la fascia A per mostrare come tale periodo, anche se "simile" alla C è sostanzialmente differente nei risultati, come se la perdita nella fascia B non fosse stata recuperata completamente. Infatti al secondo passo del metodo GK raggiunge il 100% di volte in cui individua il fondo. Al fine di capire meglio tali percentuali si riportano in **Figura 6.2** i grafici di  $\Delta T$ ,  $\Delta\Delta T$  e  $\Delta\tau$  per le fasce A, C, D ed E.

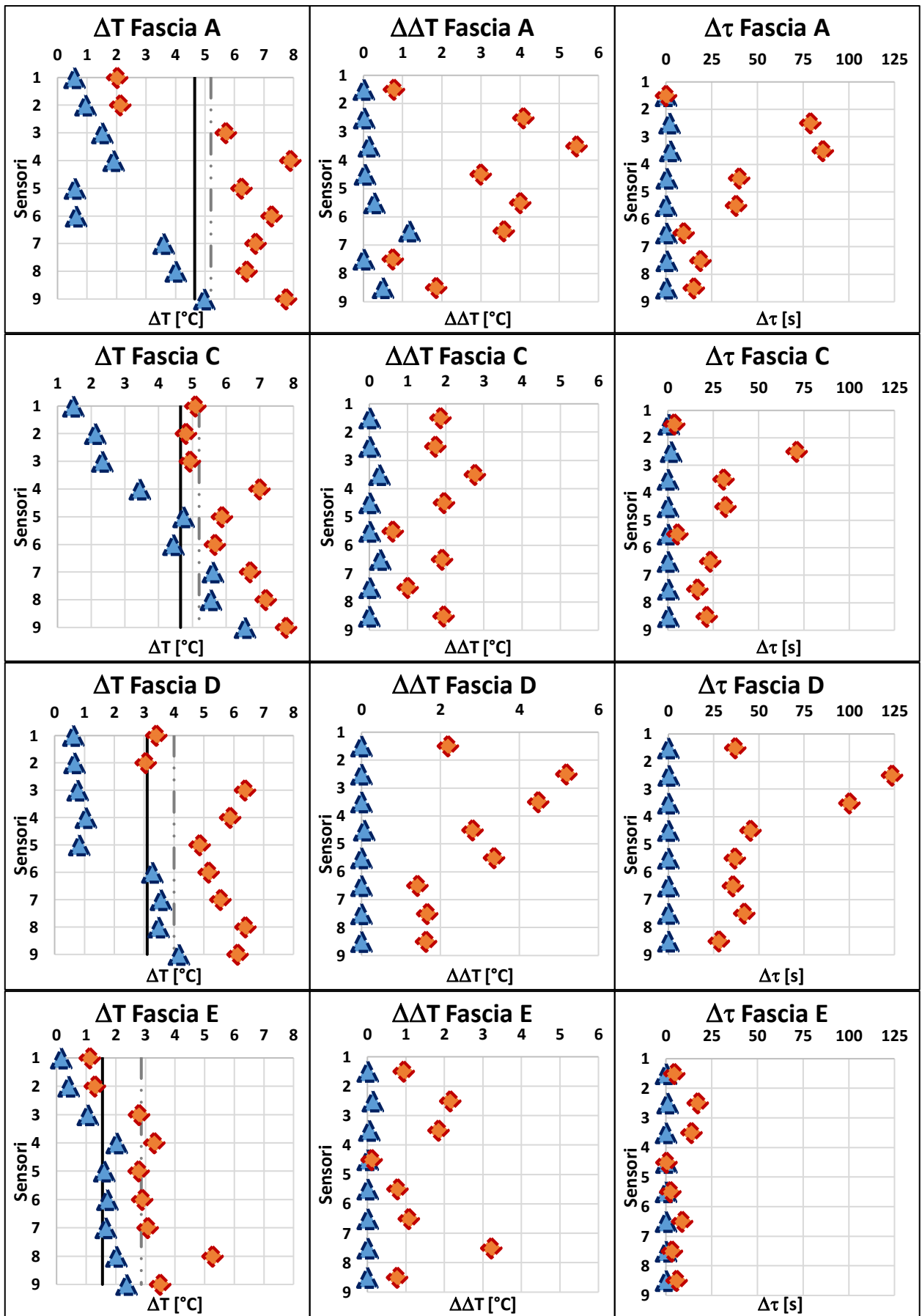


Figura 6.2: Massimi e minimi della  $\Delta T$ ,  $\Delta\Delta T$  e della  $\Delta\tau$  per le quattro fasce d'interesse.

La **Figura 6.2** presenta in orizzontale le quattro fasce prese in considerazione, mentre in verticale la  $\Delta T$ , la  $\Delta\Delta T$  e la  $\Delta\tau$  delle rispettive bande. In particolare ogni grafico riporta il minimo (blu) e il massimo (rosso) delle prove comprese nel periodo considerato (tali grafici riprendono l'impostazione utilizzata nelle **Figure 5.1 – 5.2 – 5.4**). Poiché ognuna delle tre grandezze prese in esame non può essere negativa per definizione (Cap. 4), il minimo, così come il massimo, non possono scendere al di sotto di zero. Inoltre nei grafici della prima colonna ( $\Delta T$ ) sono rappresentate anche le soglie del  $\Delta T$  (linea continua nera) e il vincolo del  $\Delta\Delta T$  (linea tratteggiata grigia) riscalate in base al numero di circuiti attivi. Ciò che si osserva è che, sebbene la fascia A e la fascia C abbiano lo stesso numero di circuiti attivi (tre), nella fascia A è possibile definire una banda che separi i sensori in acqua da quelli in terra, nella fascia C no. La causa potrebbe essere dovuta al calo di tensione avvenuto nella fascia B che ha provocato delle anomalie anche nel periodo successivo. Anche il  $\Delta\Delta T$  sembra aver subito delle conseguenze infatti i suoi valori massimi nella fascia C oltre ad essere inferiori rispetto a quelli della fascia A, sono anche allineati come se nessun sensore in tale periodo avesse effettuato un cambio di ambiente. Un altro particolare interessante da notare sono le due soglie rappresentate nei grafici del  $\Delta T$ . Infatti la soglia legata al  $\Delta T$ , riscalando, si adatta al campione, cosa che non accade per il vincolo imposto alla  $\Delta\Delta T$ . Tale comportamento è giustificato dal fatto che il dato sperimentale di laboratorio  $5.2^{\circ}\text{C}$  è la somma della media e dell'incertezza dello strumento che rimane fissa come mostrato in **Tabella 6.4**. Di conseguenza la differenza tra i due valori, che nel caso di tre circuiti scaldanti è piccola, al diminuire del numero di circuiti attivi aumenta, provocando una minor corrispondenza tra i relativi metodi come mostrato in **Tabella 6.5**. La  $\Delta\tau$ , invece, essendo legata solamente al salto massimo tra due  $\tau$  consecutive si adatta alla diminuzione di potenza erogata come mostrato nella terza colonna di **Figura 6.2**. Al fine di valutare l'influenza del vincolo numerico imposto alla  $\Delta\Delta T$ , si decide di ripetere il confronto omettendo tale restrizione dall'analisi, in **Tabella 6.6** sono riportati nella prima colonna il metodo utilizzato, nella seconda il periodo e nelle restanti tre i passi del metodo GK (o GK\*) con le percentuali di incidenza sia dell'analisi con il vincolo che dell'analisi senza vincolo.

METODO	ANNO	$\Delta T - \Delta\Delta T$		$\Delta\tau$		INCERTEZZA	
		CON VINCOLI	LIBERO	CON VINCOLI	LIBERO	CON VINCOLI	LIBERO
GK	2012	98.73%	99.05%	99.37%	99.68%	100.00%	100.00%
GK	FASCIA A	82.00%	86.00%	95.00%	90.00%	100.00%	100.00%
GK=GK*	FASCIA C	41.99%	53.17%	51.06%	63.14%	99.70%	100.00%
GK*	FASCIA D	27.78%	91.43%	49.30%	96.13%	100.00%	100.00%
GK*	FASCIA E	2.22%	62.22%	69.63%	89.63%	85.19%	96.30%

**Tabella 6.6:** Percentuali di incidenza di ogni passo sul metodo GK\* sia con il vincolo sperimentale che non.

Ciò che si osserva è che nei primi due anni (2012 e fascia A del 2013) i risultati non discostano di molto, invece nei periodi successivi, in cui si sono presentati problemi, le percentuali di coincidenza aumentano notevolmente portando a identificare il fondo nella maggior parte dei casi. La spiegazione di tutto ciò è che il  $\Delta T$  senza vincoli vede il salto massimo come banda in cui cade l'interfaccia tra i due ambienti. Al diminuire dei circuiti attivi, tutte le differenze di  $\Delta T$  tra sensori scalano proporzionalmente con la potenza, perciò il salto massimo, sebbene diventi più piccolo, risulta essere sempre maggiore degli altri. Il nuovo metodo prende il nome di GK<sub>L</sub>.

## 6.2 ANALISI DEL METODO DC

In teoria il metodo DC non dovrebbe risentire della diminuzione del numero di circuiti scaldanti. In realtà esso viene influenzato dal fattore correttivo applicato all'FBG 6 (paragrafo 4.3). Un esempio è riportato in *Figura 6.3*.

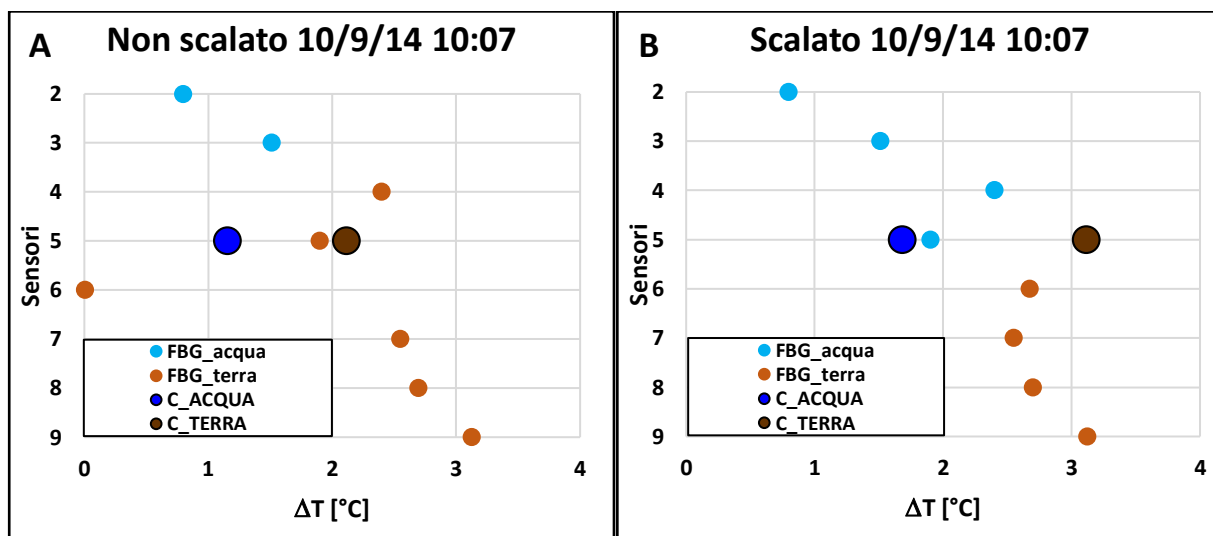


Figura 6.3: Confronto del metodo DC prima (A) e dopo (B) aver scalato l'FBG 6.

Ciò che si osserva è che nel caso in cui il sensore 6 non venga scalato (*Figura 6.2 A*), poiché è attivo solo un circuito scaldante, se si sottrae un fattore 4°C il valore di  $\Delta T$  va a zero. Così facendo l'interfaccia acqua/terra viene individuata tra gli FBG 3 e 4. Nel caso in cui il fattore da sottrarre venga scalato da 4°C a 1.33°C (*Figura 6.2 B*), il sensore 6 risulta allineato con il resto del campione e il fondo viene identificato tra gli FBG 5 e 6.

### 6.3 CONFRONTO METODO DC E METODO GK\*

Il prossimo passaggio è quello di confrontare il metodo GK\* e il metodo GK<sub>L</sub> con il metodo DC. In **Tabella 6.8** sono riportati i confronti del 2013-2014 suddivisi per mesi dell'approccio GK, GK\* e GK<sub>L</sub> con l'approccio DC. L'impostazione della tabella vede nella prima colonna il metodo utilizzato, nella seconda l'anno di elaborazione e nelle restanti il mese con il rispettivo numero di registrazioni tra parentesi (le celle in grigio rappresentano i periodi senza acquisizioni).

METODO	ANNO	GEN (0)	FEB (0)	MAR (0)	APR (2)	MAG (98)	GIU (105)	LUG (83)	AGO (123)	SET (119)	OTT (122)	NOV (119)	DIC (123)
GK-DC	2013				0%	3%	0%	23%	21%	11%	0%	0%	0%
GK*-DC					0%	0%	0%	18%	31%	22%	8%	2%	0%
GK <sub>L</sub> -DC					0%	0%	0%	40%	28%	10%	7%	1%	1%
METODO	ANNO	GEN (123)	FEB (110)	MAR (124)	APR (118)	MAG (123)	GIU (97)	LUG (6)	AGO (120)	SET (112)	OTT (44)	NOV (0)	DIC (0)
GK-DC	2014	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%			
GK*-DC		3%	1%	1%	2%	1%	2%	0%	0%	1%	14%		
GK <sub>L</sub> -DC		4%	2%	1%	3%	1%	3%	0%	0%	1%	9%		

**Tabella 6.7: Confronti tra il metodo GK e il metodo DC e tra il metodo GK\* e il metodo DC sia per il 2013 che per il 2014.**

Ciò che si osserva è che fino a settembre 2013 tutto rimane invariato a meno del mese di maggio che è stato escluso dall'analisi GK\* e dalla GK<sub>L</sub> poiché la  $\Delta T$  assume un calo improvviso. Per i restanti tre mesi del 2013 si hanno miglioramenti con entrambi i metodi, seppur minimi. Nel 2014, poiché la precedente analisi non forniva alcun risultato, si è manifestato un miglioramento sia con GK\* che con GK<sub>L</sub>, sebbene le percentuali di coincidenza siano molto basse. In totale le coincidenze tra il metodo GK\* e il metodo DC raggiungono il 5.8% mentre quelle tra GK<sub>L</sub> e DC 6%, poco superiore al 4.2% raggiunto mediante il metodo GK. Poiché le percentuali di corrispondenza non raggiungono ancora l'ordine di grandezza di quelle ottenute nel 2012, si è voluto valutare la percentuale di volte in cui la differenza tra il metodo DC e i metodi GK\* e GK<sub>L</sub> corrisponda ad un solo sensore di differenza rispetto ai casi in cui non si ha una coincidenza perfetta. In **Tabella 6.9** sono riportati i risultati divisi per fasce lungo le righe e separati per metodi lungo le colonne (la fascia B è stata omessa a causa del calo repentino di incremento termico).



	DC-GK	DC-GK*	DC-GK <sub>L</sub>
FASCIA A	84%	84%	86%
FASCIA B			
FASCIA C	32%	33%	37%
FASCIA D	8%	46%	92%
FASCIA E	2%	55%	74%

**Tabella 6.8: Percentuali di coincidenza con incertezza pari a un sensore.**

Ciò che si osserva è che la fascia A nei casi in cui fallisce, lo fa di un sensore nell'84% dei casi qualunque sia il metodo GK utilizzato. Tale risultato era prevedibile poiché durante tale periodo tutti e tre i circuiti scaldanti erano attivi. Lo stesso non vale per la fascia C che mantiene sempre una percentuale poco sopra il 30% in tutti i casi di confronto. Il motivo potrebbe essere legato al calo nella fascia B e ad una sua influenza anche nel periodo successivo. Le restanti due fasce, invece, con il passare dal metodo GK al GK<sub>L</sub> manifestano dei miglioramenti rilevanti. Di conseguenza il fatto di riscaldare i valori ed eliminare il vincolo sperimentale dalla  $\Delta\Delta T$  comporta un netto miglioramento al confronto tra il metodo legato al fenomeno e quello generale.

Una parentesi va aperta riguardo ai casi in cui siano attivi meno di tre circuiti scaldanti. Come già riportato nel capitolo 3.4, al fine di ottenere dei risultati interpretabili, la differenza tra l'incremento termico in terra e in acqua deve essere almeno  $3.5^{\circ}\text{C}$ , oltretutto più di due volte l'incertezza dello strumento (che è pari a  $1.7^{\circ}\text{C}$ ). Con lo scopo di fare delle considerazioni, viene riportata la **Tabella 6.8** in cui sono mostrati i  $\Delta T$  medi in acqua, i  $\Delta T$  medi in terra e la differenza dei due ambienti per ogni potenza dissipata in prossimità di ogni FBG.

POTENZA/ $\Delta T$	ACQUA	TERRA	VARIAZIONE
1.2 W/FBG	$3.5^{\circ}\text{C}$	$7.5^{\circ}\text{C}$	$4^{\circ}\text{C}$
0.8W/FBG	$2^{\circ}\text{C}$	$4^{\circ}\text{C}$	$2^{\circ}\text{C}$
0.4 W/FBG	$1^{\circ}\text{C}$	$2^{\circ}\text{C}$	$1^{\circ}\text{C}$

**Tabella 6.8: Valori ottenuti dall'esperimento in laboratorio.**

Si nota che nel caso di tre circuiti scaldanti gli ambienti presentano una differenza di  $\Delta T$  maggiore ai  $3.4^{\circ}\text{C}$  imposti dallo strumento. Ciò non accade per gli altri due casi in cui per 0.8W/FBG la differenza risulta essere dello stesso ordine di grandezza dell'incertezza ( $1.7^{\circ}\text{C}$ ), mentre per

0.4W/FBG la differenza diventa quasi la metà dell'incertezza. Questo porta l'analisi del 2013 e del 2014 a perdere di validità in quanto non garantisce a priori delle condizioni di scambio termico per l'identificazione di due comportamenti distinti nei due ambienti di misura, acqua e terra. Anche se l'analisi a posteriori del metodo GK (rinominato GK\*) migliora la situazione è evidente che in queste condizioni i due metodi (indipendenti) sono in crisi e continuare a migliorare le analisi potrebbe non portare nessun valore aggiunto.

## CONCLUSIONI

---

Lo scopo di questo elaborato di tesi è quello di validare i dati acquisiti dal sedimetro BLESS, installato a Borgoforte, attraverso dei metodi che consentano di individuare sempre la quota del fondo del fiume. Il primo passo è stato quello di eseguire una ricerca bibliografica che consentisse di esaminare gli strumenti di monitoraggio della buca d'erosione in corrispondenza delle pile di ponti e fare un quadro generale. Il risultato è che questo fenomeno viene monitorato attraverso diverse tecniche, ma tutte presentano delle mancanze nell'effettuare delle misurazioni durante eventi di piena. Tra queste si ha la dipendenza dalla temperatura, la non autonomia nelle registrazioni (che quindi devono essere fatte manualmente), la presenza o meno di traffico sull'infrastruttura e la fragilità del dispositivo. Inoltre tra i dispositivi ricercati, molti hanno poche applicazioni in campo, quindi poche informazioni sul modo di operare di tali strumenti all'aperto e sulle difficoltà che si potrebbero riscontrare. Uno degli strumenti più utilizzati è l'ecoscandaglio poiché, sebbene sia influenzato dalla torbidità dell'acqua e i risultati contengano rumori, è facile da installare e fornisce sempre delle misure. Tuttavia BLESS è una buona alternativa poiché effettua registrazioni in continuo, a intervalli regolari e in completa autonomia, inoltre le sue ridotte dimensioni permettono di collocarlo a valle delle pile al fine di proteggerlo da sassi o piante anche durante eventi di piena.

BLESS appartiene alla famiglia dei sedimetri, ovverosia quegli strumenti che devono essere a diretto contatto con gli ambienti al fine di misurare l'interfaccia solido/liquida. Tale dispositivo possiede dei sensori che sfruttano la dispersione di calore per determinare la separazione acqua/terra. Infatti i sensori in acqua mediante la convezione raggiungono incrementi termici minori rispetto a quelli raggiunti dai sensori terra tramite la conduzione. Inoltre la convezione, essendo più efficiente, permette al sensore in acqua di tendere ad un equilibrio, cosa che non accade per la terra. Al fine di misurare lo scambio termico, BLESS è dotato di un circuito scaldante.. Accendendo il circuito per un certo periodo di tempo, l'output ottenuto è una curva scaldante, il cui incremento termico  $\Delta T$  (differenza tra temperatura a fine e inizio riscaldamento) rappresenta uno dei parametri fondamentali dell'analisi. Sfruttando il fatto che i sensori in acqua raggiungano incrementi minori di temperatura rispetto a quelli in terra, si individua la posizione del fondo. Da notare che la precisione dipende dall'interasse tra i sensori che nel caso trattato, ovverosia Borgoforte, corrisponde a 50 cm. Il problema connesso a questo metodo riguarda la sua autonomia, infatti un tecnico esperto deve vagliare un pacchetto di prove (il cui numero non può essere definito a priori) per estrapolare una fascia che separi sempre i due ambienti. Un altro parametro, legato anch'esso alla temperatura, è il

$\Delta\Delta T$ , ovvero sia la differenza tra il  $\Delta T$  misurato da un sensore con quello del sensore precedente. Tale grandezza riprende il concetto di banda del  $\Delta T$  per dividere gli ambienti tramite il massimo salto di incremento termico presente nella generica prova. Al fine di ottenere risultati più precisi sono stati introdotti due vincoli: il salto massimo può essere solo positivo e, da esperimenti in laboratorio, il massimo valore di  $\Delta T$  raggiunto da un sensore in acqua è  $5.2^{\circ}\text{C}$ . Questo metodo risulta essere specifico poiché connesso ad un valore sperimentale, però individua il fondo in completa autonomia (senza il bisogno di alcun tecnico che visualizzi le prove). Infine si introduce la costante  $\tau$  che rappresenta il tempo per cui si raggiunge il 67% del salto termico finale. I sensori in acqua, che dissipano calore per convezione quindi più velocemente, tale parametro assume valori minori rispetto a quelli in terra che dissipano calore per conduzione. A causa della sua elevata dispersione questo parametro è stato trascurato dall'analisi. Viene sfruttata, però, la sua variazione  $\Delta\tau$  che riprende lo stesso concetto della  $\Delta\Delta T$ , sebbene venga applicato solo un vincolo al salto massimo, ovvero sia essere positivo. Poiché questo metodo non è legato ad alcuna soglia, risulta essere il più oggettivo dei precedenti. L'unico difetto è quello di essere direttamente connesso alla costante di tempo  $\tau$  che presenta un'elevata dispersione e quindi potrebbe inficiare i risultati (ad esempio il salto massimo potrebbe presentarsi tra due sensori in terra).

Poiché tutti i metodi appena descritti sono legati direttamente alla fenomenologia del problema, si è deciso di introdurre un metodo (chiamato GK) che comprendesse la loro combinazione allo scopo di determinare (con più di un parametro) la quota del fondo per ogni acquisizione di BLESS. Tale approccio vede come primo passo il confronto tra i risultati del  $\Delta T$  e del  $\Delta\Delta T$ . In caso di corrispondenza il fondo è noto altrimenti si passa allo step successivo, ovvero sia paragonare i precedenti metodi e il  $\Delta\tau$ . Ancora una volta in presenza di risultati coincidenti ( $\Delta T$  coincidente con  $\Delta\tau$  ovvero  $\Delta\Delta T$  coincidente con  $\Delta\tau$ ) si conosce la quota del fondo altrimenti si attua l'ultimo passo. Si fa notare che l'ordine di utilizzo delle soglie mostra come la  $\Delta\tau$  sia utilizzata al secondo step, non al primo in quanto è quella con una minor coincidenza con gli altri due approcci (quindi è stata declassata). L'ultimo step serve a ottenere sempre il fondo (cioè quando le tre soglie usate “non si parlano”): si aumenta l'incertezza della misura fino a comprendere il fondo determinato con  $\Delta T$  e con  $\Delta\Delta T$ .

Con lo scopo di applicare un metodo completamente esterno al fenomeno, è stato introdotto anche il metodo DC basato sull'analisi cluster. Tale approccio può essere applicato a qualsiasi insieme di dati poiché si basa su di un algoritmo che, tramite la distanza minima, separa l'insieme iniziale in tanti sottogruppi quanti sono gli ambienti di misura. Sebbene individui sempre una quota del fondo,

potrebbe fornire risultati in disaccordo con la teoria visto la sua completa oggettività (sensori non consecutivi negli stessi ambienti).

Per la validazione dei dati è stato scelto il primo anno di acquisizioni, ovverosia il 2012. Inoltre tale scelta permette di eseguire verifiche sugli anni successivi. Con l'obiettivo di trovare sempre il fondo si è deciso di confrontare il metodo DC con il metodo GK. Il paragone ha portato ad una coincidenza nel 99% dei casi. Per raggiungere il 100% si è deciso di rinunciare alla precisione di 50 cm aumentando la fascia d'incertezza (due volte per un aumento pari a 50 cm).

Il secondo passo è stato quello di proiettare le analisi eseguite anche al 2013 e al 2014. Su quasi duemila acquisizioni solo nel 4.2% dei casi il metodo DC e il metodo GK corrispondono. Inoltre il fondo non viene determinato sempre con il metodo GK sebbene sia stato introdotto per questo specifico motivo. Il passo successivo è stato quello di visionare il profilo di  $\Delta T$  nel tempo di un sensore che non avesse mai cambiato ambiente al fine di ottenere un profilo costante, pensando ad un problema legato alle soglie. Ciò che si è osservato è che il profilo può essere diviso in fasce, in cui si hanno differenti valori di incremento termico. Nello specifico ci si è soffermati su tre fasce, ognuna delle quali subisce un calo improvviso pari ad un terzo del valore massimo di  $\Delta T$  fino al completo malfunzionamento dello strumento. Tale comportamento ha fatto subito pensare al sistema scaldante che è composto per l'appunto da tre circuiti (ognuno dei quali contribuisce per il 33% alla potenza termica dissipata).

Per sopperire a tale problema si è deciso di adattare il metodo GK (che diventa il metodo GK\*) riscaldando linearmente i parametri in gioco del 33% e del 66%, valori connessi rispettivamente al funzionamento di uno e due circuiti attivi. Confrontando nuovamente il metodo DC con il metodo GK\* la corrispondenza è aumentata (5.8%) sebbene risulti ancora irrisoria paragonata a quella ottenuta nel 2012. Inoltre si è provato ad omettere il vincolo sperimentale legato al  $\Delta\Delta T$  poiché tale valore è costituito da un termine rappresentante la media che scala con la potenza e un termine legato all'incertezza che, essendo proprio dello strumento, rimane inalterato (al diminuire della potenza, tale termine assume lo stesso ordine di grandezza della media scalata) e si è osservata l'influenza sul metodo GK<sub>L</sub> (appunto quello in cui è stato omissso il vincolo sperimentale). I risultati sono soddisfacenti poiché oltre ad aumentare le percentuali di ogni passo dell'approccio, nella maggior parte dei casi si individua sempre il fondo. Tale comportamento era prevedibile, poiché così facendo il salto massimo scala con gli altri salti rimanendo sempre il maggiore.

Si può concludere che l'analisi dei dati BLESS con i due metodi proposti è robusta e affidabile soprattutto per la natura eterogenea dei due metodi DC e GK. Nel periodo in cui BLESS non ha funzionato correttamente alcuni aggiustamenti hanno consentito di migliorare i risultati ma

sembrano superflui se BLESS non riesce a garantire un riscaldamento tale da separare il comportamento termico differente dei due ambienti di misura

Riassumendo, sia il metodo GK che il metodo DC forniscono sempre una misura del fondo. Inoltre ci si aspetta che la loro corrispondenza sia un valore aggiunto all'analisi, poiché il primo metodo è basato su fondamenti teorici mentre il secondo è completamente esterno al fenomeno. Ciò permette di attribuire a BLESS la caratteristica ricercata di strumento autonomo che effettua misure continue. Si ricorda inoltre che BLESS è stato progettato per operare con tre circuiti scaldanti, perciò un malfunzionamento di questa componente porta alla difficile interpretazione dei risultati. Al fine di evitare tale problema si suggerisce di sostituire la membrana contenente il circuito scaldante con una protezione più efficace, in modo che i tre circuiti scaldanti siano sempre attivi (caso in cui è stata verificata la piena potenzialità dello strumento). Inoltre sarebbe utile inserire più circuiti di quelli necessari per poter sopperire a improvvisi malfunzionamenti e applicare una seconda protezione a ciascun circuito. In merito a questa seconda possibilità si fa notare la difficoltà nell'inserire il circuito scaldante all'interno di BLESS (perciò la dimensione della protezione non può essere eccessiva) e l'aumento di resistenza che potrebbe influire sulla dispersione del calore in precedenza progettata. Al fine di eliminare anomalie nelle registrazioni così come per l'FBG 6, BLESS potrebbe essere monitorato durante tutte le fasi dell'installazione, in modo da aggiustare in tempo eventuali problemi. Infine si vuole focalizzare l'attenzione sugli esperimenti effettuati in laboratorio. Infatti in laboratorio vengono ricreate le condizioni di monitoraggio ideali (temperatura costante, granulometria omogenea del letto del fiume, ecc.), non quelle reali. Senza considerare che lo strumento testato in laboratorio era differente, ovvero presentava i sensori distanziati di una quantità minore rispetto a quello installato in campo per motivi di spazio. Di conseguenza sarebbe utile uno studio termico del sistema con lo scopo di verificare che la ridotta distanza tra i sensori non influenzi la fase di riscaldamento. Infatti la stessa resistenza potrebbe influenzare, non solo il rispettivo sensore, ma anche quelli adiacenti con il conseguente miglioramento dell'interpretazione dei risultati.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] S. R. Gorin, F. P. Haeni, 1989, "Use Of Surface-Geophysical Methods To Assess Riverbed Scour At Bridge Piers", U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 88-4212.
- [2] Steven R. Abt, Jerry R. Richardson, Scott A. Hogan, Brian L. Van Zanten, Thomas J. Siller, 1992; "Laboratory Tests Of Scour-Monitoring Devices", Transportation Research Record 1350 pp. 19–27.
- [3] J.B Laronne, D.N. Outhet, P.A. Carling, T.J. McCabe, 1994, "Scour Chain Employment In Gravel Bed Rivers", *Catena* 22 pp. 299–306.
- [4] D.C Hayes, F.E. Drummond, 1995, "Use Of Fathometers And Electrical-Conductivity Probes To Monitor Riverbed Scour At Bridges And Piers", U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 94-4164.
- [5] Milo D. Crumrine, Karl K. Lee, Richard L. Kittelson, 1996, "Bridge-Scour Instrumentation And Data For Nine Sites In Oregon, 1991-94", U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-366.
- [6] S.G. Millard, J.H. Bungey, C. Thomas, M.N. Soutsos, M.R. Shaw, A. Patterson, 1998, "Assessing Bridge Pier Scour By Radar", PII S0963-8695(98)00006-1 pp. 251–258.
- [7] Fernando De Falco, Raffaele Mele, 2002, "The Monitoring Of Bridges For Scour By Sonar And Sedimetri", *NDT&E International* 35 pp.117–123.
- [8] Francesco Ballio, Alessio Radice, 2003, "A Non Touch Sensor For Local Scour Measurements", *Journal of Hydraulic Research* pp. 105-108.
- [9] Yung Bin Lin, Kuo Chun Chang, Jihn-Sung Lai, I-Wen Wu, 2004, "Applications Of Optical Fiber Sensor On Local Scour Monitoring", *IEEE* pp. 832–835.
- [10] Inchan Park, Woncheol Cho, 2004, "Assessment Of Bridge Scour And Riverbed Variation By A Ground Penetrating Radar", Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, Delft, The Netherlands, pp. 411–414.
- [11] Yung Bin Lin, Jin-Chong Chen, Kuo Chun Chang, Jenn-Chuan Chern, Jihn-Sung Lai, 2005, "Real-Time Monitoring Of Local Scour By Using Fiber Bragg Grating Sensors", *Institute of Physics Publishing, Smart Materials and Structures*, pp. 664–670.
- [12] Yung Bin Lin, Jin-Chong Chen, Kuo Chun Chang, Jihn-Sung Lai, 2006, "Bridge Local Scour Monitoring System Using Mems Sensor Zigbee Network", *NSTI-Nanotech* pp. 451–454.
- [13] Jau-Yau Lu; Jian-Hao Hong; Chih-Chiang Su; Chuan-Yi Wang; and Jihn-Sung Lai, 2008, "Field Measurements And Simulation Of Bridge Scour Depth Variations During Floods", *Journal Of Hydraulic Engineering* © ASCE / June 2008 pp. 810–811.
- [14] Xinbao Yu, Xiong Yu, 2009, "Time Domain Reflectometry Automatic Bridge Scour Measurement System Principles And Potentials", *Structural Health Monitoring Vol. 8(6)* pp. 463–476.
- [15] B. Griffoni, C.G. Someda, G. Crotti, S. Manzoni, 2010, "Il Monitoraggio Strutturale Mediante Tecniche Ottiche", *Articolo esteso per TMN*.
- [16] F. Ballio, A. Cigada, G. Crotti, F. Inzoli, S. Manzoni, 2010, "Bridge Pier Scour Measurement By Means Of Bragg Grating Arrays", *EPJ Web of Conferences* 6 34004.
- [17] Xinbao Yu, Xiong Yu, 2010, "Laboratory Evaluation Of Time-Domain Reflectometry For Bridge Scour Measurement Comparison With The Ultrasonic Method", *Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering*.
- [18] S. Manzoni, G. Crotti, F. Ballio, A. Cigada, F. Inzoli, E. Colombo, 2011, "BLESS A Fiber Optic Sedimeter", *Flow Measurement and Instrumentation* 22 pp. 447–455.

- [19] Jean-Louis Briaud, Stefan Hurlebaus, Kuang-An Chang, Congpu Yao, Hrishikesh Sharma, Ok-Youn Yu, Colin Darby, Beatrice E. Hunt, Gerald R. Price, 2011, “Realtime Monitoring Of Bridge Scour Using Remote Monitoring Technology CHAPTER 3”, Report 0-6060-1
- [20] Xue-Feng Zhao, Qin Baa, Le Li, Peng Gong, Jin-Ping Ou, 2012, “A Three-Index Estimator Based On Active Thermometry And A Novel Monitoring System Of Scour Under Submarine Pipelines”, *Sensors and Actuators A* 183 pp. 115–122.
- [21] A. Cigada, S. Manzoni, F. Ballio, G. Crotti, G. Rossi, C. Someda, 2012, “Bridge Pier Scouring A New Approach For Monitoring A Case In Northern Italy”, *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability – Biondini & Frangopol (Eds)* pp. 354–361.
- [22] Xue-Feng Zhao, Le Li, Qin Ba, Jin-Ping Ou, 2012, “Scour Monitoring System Of Subsea Pipeline Using Distributed Brillouin Optical Sensors Based On Active Thermometry”, *Optics & Laser Technology* 44 pp. 2125–2129.
- [23] M. Sukru Guney, Gokcen Bombar, Aysegul O. Aksoy, Mustafa Dogan, 2012, “Use Of UVP To Investigate The Evolution Of Bed Configuration”, *KSCE Journal of Civil Engineering* pp. 1188–1197.
- [24] Xinbao Yu, Bin Zhang, Junliang Tao, Xiong Yu, 2013, “A New Time-Domain Reflectometry Bridge Scour Sensor”, *Structural Health Monitoring* pp. 99–113.
- [25] Xuefeng Zhao, Weijie Li, Lei Zhou, Gang-Bing Song, Qin Ba, Jinping Ou, 2013, “Active Thermometry Based DS18B20 Temperature Sensor Network For Offshore Pipeline Scour Monitoring Using K-Means Clustering Algorithm”, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks Volume 2013*.
- [26] Murray Fisher, Md Nasimul Chowdhury, Abdul A. Khan, Sez Atamturktur, 2013, “An Evaluation Of Scour Measurement Devices”, *Flow Measurement and Instrumentation* 33 pp. 55–67.
- [27] L.J. Prendergast, K. Gavin, 2014, “A Review Of Bridge Scour Monitoring Techniques”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 pp. 138–149.
- [28] Xuefeng Zhaoa, Qin Baa, Lei Zhoub, Weijie Lia, Jinping Oua, 2014, “BP Neural Network Recognition Algorithm For Scour Monitoring Of Subsea Pipelines Based On Active Thermometry”, *Optik* 125 pp. 5426–5431.
- [29] Kate Porter, Richard Simons, John Harris, 2014, “Comparison Of Three Techniques For Scour Depth Measurement Photogrammetry, Echosounder Profiling And A Calibrated Pile”, *Coastal Engineering* 2014.
- [30] Wen-Yi Chang, Jihn-Sung Lai, Teng-Yi Yu, Franco Lin, Lung-Cheng Lee, Whey-Fone Tsai, and Chin-Hsiung Loh, 2014, “Pier Scour Monitoring System By Bed-Level Image Tracking”, *International Journal of Sediment Research*, Vol. 29, No. 2, 2014, pp. 269–277.



- [31] Yong Ding, Tengteng Yan, Qingxiong Yao, Xuehua Dong, Xin Wang, 2015, “A New Type Of Temperature-Based Sensor For Monitoring Of Bridge Scour”, *Measurement* 78 pp. 245–252.
- [32] Chen-Chia Chen, Chih-Chyau Yang, Ssu-Ying Chen, Wen-Ching Chen, Gang-Neng Sung, Chih-Ting Kuo, Yi-Jie Hsieh, Chien-Ming Wu, Chun-Ming Huang, 2015 “Low Cost Hall-Effect Sensors For Real-Time Monitoring Pier Scour”, *Sensors & Transducers*, Vol. 184, Issue 1, January 2015, pp. 11–18.
- [33] Mohsen Amirmojahedi, Shatirah Akib, Hossein Basser, CH, Raymond Ooi, 2015, “Methods For Monitoring Scour From Large-Diameter Heat Probe Tests”, *Structural Health Monitoring*, Vol. 15(1) pp. 38–49.
- [34] Faezeh Azhari, Peter J. Scheel, Kenneth J. Loh, 2015, “Monitoring Bridge Scour Using Dissolved Oxygen Probes”, *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol. 2, No. 2 (2015) pp. 145–164.
- [35] Panagiotis Michalis, Alessandro Tarantino, Christos Tachtatzis, Martin D Judd, 2015, “Wireless Monitoring Of Scour And Re-Deposited Sediment Evolution At Bridge Foundations Based On Soil Electromagnetic Properties”, *Smart Materials and Structures* 24.
- [36] G. Crotti, D. Isidori, A. Cigada, F. Ballio, F. Inzoli, E. Concettoni, C. Cristalli, 2016, “A Hydraulic Monitoring System On A Bridge Over The River Esino, Italy”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*.
- [37] Hongwei An, Weidong Yao, Liang Cheng, Scott Draper, Ming Zhao, Guoqiang Tang, Yu Zhang, Philip Hortin, 2016, “Detecting Local Scour Using Contact Image Sensors”, *Journal of Hydraulic Engineering*.
- [38] Fae Azhari, Kenneth J. Loh, 2016, “Dissolved Oxygen Sensors For Scour Monitoring”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, N<sup>o</sup>. 23, December 1, 2016 pp. 8357–8358.
- [39] Lukasz Topczewski, Juliusz Ciesla, Pawel Mikolajewski, Pawel Adamski, Zenon Markowski, 2016, “Monitoring Of Scour Around Bridge Piers And Abutments”, *Transportation Research Procedia* 14 pp. 3963–3971.
- [40] Chen Wang, Xiong Yu, Fayun Liang, 2017, “A Review Of Bridge Scour Mechanism, Estimation, Monitoring And Countermeasures”, *Nat Hazards* 87 pp. 1881–1906.
- [41] Tzu-Kang Lin, Yu-Shian Chang, 2017, “Development Of A Real-Time Scour Monitoring System For Bridge Safety Evaluation”, *Mechanical Systems and Signal Processing* 82 pp. 503–518.
- [42] A. Cigada, F. Ballio, F. Inzoli, Hydraulic Monitoring Unit, application for international patent n. PCT/EP2008/059075, publication n. WO/2009/013151 (2008).
- [43] K.O. Hill, G. Meltz, Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of Lightwave Technology* 15 8 (1997), 1263-1276.
- [44] Melville BW, Coleman SE. Bridge scour. Water Resources Publications; 2000.

- [45] Briaud, J.-L. (2006). "Bridge scour." Geotech. News, 24(3).
- [46] Franzetti S., Rossi G., Biroli G., Come consolidare un ponte sul Po, Le strade 8-9, 2012.
- [47] ESDU 82026, Strong winds in the atmospheric boundary layer. Part 1: hourly-mean wind speeds.
- [48] Ballio F., Cigada A, Silvio F., Crotti G., Manzoni S., Ballio G., Inzoli F., Impianto fisso di monitoraggio in tempo reale della vulnerabilità idraulica del ponte stradale sul fiume Po in località Borgoforte, 014.