

RELAZIONE TECNICA

**SERVIZIO DI INDAGINI PER LA VALUTAZIONE DELLO
STATO DI DEGRADO E VERIFICA DELLA SICUREZZA
STRUTTURALE DEI PONTI DEL CANALE PRINCIPALE
ADDUTTORE "GUASILA I", "GUASILA II", "SEGARIU" E
"SELEGAS"
NEI COMUNI DI GUASILA, SEGARIU E SELEGAS.
CIG 4804152FA1 - CUP I29E10000990002**

GEOTECH S.R.L. - PROSPEZIONI GEOFISICHE

SEDE LEGALE E OPERATIVA:

VIA TRENTINO 13, 09127 CAGLIARI

C.F. E PARTITA IVA 03178670927

TEL.: +39 070 7966194

FAX: +39 070 7962017

WEB: WWW.GEOTECHSRL.IT

MAIL: INFO@GEOTECHSRL.IT

SOMMARIO

1. PREMESSA E SINTESI CRONOLOGICA DEGLI STADI DI AVANZAMENTO DEL SERVIZIO	1
2. INDIVIDUAZIONE E MAPPATURA DEI FERRI DI ARMATURA	6
2.1 PROVE PACOMETRICHE	6
2.2 INDAGINI ESEGUITE	7
3. ESTRAZIONE CAMPIONI CALCESTRUZZO, TEST COLORIMETRICI E PROVE DI COMPRESSIONE	9
3.1 CAROTAGGI	9
3.2 TEST COLORIMETRICI	11
3.3 PROVE DI LABORATORIO	12
4. ESTRAZIONE DELLE BARRE DI ARMATURA E PROVE DI TRAZIONE	13
5. INDAGINE GEORADAR	14
5.1 METODO GEORADAR	14
5.2 INDAGINI ESEGUITE	18
5.3 ELABORAZIONE DATI	19
5.4 RISULTATI	21
6. PROVE DI CARICO	32
6.1 INTRODUZIONE	32
6.2 INDAGINI ESEGUITE	32
6.3 RISULTATI	38
7. MESSA IN LUCE DELLE FONDAZIONI	42
8. CONTROLLI NON DISTRUTTIVI	45
8.1 PROVE ULTRASONICHE	45
8.2 PROVE SCLEROMETRICHE	53
8.3 PROVE PULL OUT	55
9. RIPRISTINI	60
10. BIBLIOGRAFIA	61

1. PREMESSA E SINTESI CRONOLOGICA DEGLI STADI DI AVANZAMENTO DEL SERVIZIO

La società scrivente, denominata Geotech S.r.l., con sede legale ed operativa in Via Trentino 13, 09127 Cagliari (CA), C.F./P.I. 03178670927, con Determinazione del Direttore del Servizio Appalti e Contratti n. 133 del 27.02.2013 è risultata aggiudicataria del "Servizio di indagini per la valutazione dello stato di degrado e verifica della sicurezza strutturale dei ponti del Canale Principale Adduttore "Guasila I", "Guasila II", "Segariu" e "Selegas" nei Comuni di Guasila, Segariu e Selegas (CA)".

A titolo di inquadramento generale, inizialmente il servizio si articolava nella realizzazione di:

- N. 57 Prove per l'individuazione della distribuzione delle armature, dello spessore del copriferro e del diametro delle barre mediante prova pachometrica e saggi diretti. L'indagine si completa con la verifica locale, ove indicato dall'Amministrazione, mediante valutazione diretta;
- N. 22 Prelievi di provini di calcestruzzo con carotatrice ai sensi della norma UNI EN 12504-1 e della Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, previa verifica della posizione dei ferri di armatura nella porzione di manufatto interessata mediante rilevazione pachometrica e tracciatura sulla superficie dello stesso;
- N. 22 Test colorimetrici da eseguirsi ai sensi della norma UNI 9944, utilizzando una soluzione di fenolfaleina all'1% di alcool metilico su provini cilindrici per la determinazione della profondità di carbonatazione del calcestruzzo;
- N. 22 Prove di compressione dei provini di calcestruzzo per la determinazione della resistenza a compressione ai sensi della norma UNI EN 12390-3, presso un Laboratorio Prove Materiali autorizzato;
- N. 8 Estrazioni di spezzoni di barre di armatura e prove di trazione presso un Laboratorio Prove Materiali autorizzato, ai sensi della norma EN ISO 6892-1 per la determinazione del carico di snervamento, di quello di rottura e dell'allungamento percentuale a rottura;
- N. 4 Prove di carico statico con determinazione di spostamenti e deformazioni attraverso applicazione di carichi statici verticali rappresentati blocchi di calcestruzzo di peso noto;
- N. 45 Prove ultrasoniche, dirette, semidirette o indirette, da eseguirsi ai sensi della norma UNI EN 12504-4 per la determinazione della velocità di propagazione delle onde di compressione e successiva determinazione della resistenza cubica del calcestruzzo;
- N. 45 Prove sclerometriche da eseguirsi ai sensi della norma UNI EN 12504-2 per la determinazione dell'indice sclerometrico e successiva determinazione della resistenza cubica del calcestruzzo;
- N. 71 Prove di pull-out da eseguirsi, ai sensi della norma UNI EN 12504-3 per la determinazione del valore medio della forza di estrazione misurata;

- N. 45 Prove Sonreb per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo a partire dai risultati ottenuti da prove combinate ultrasoniche (UNI EN 12504-4) e sclerometriche (UNI EN 12504-2);
- N. 8 Scavi a sezione obbligata per la completa messa in luce delle fondazioni;
- Ripristino corticale di qualsiasi elemento strutturale sottoposto ad azioni invasive o semi invasive finalizzate alla preparazione o all'esecuzione delle prove elencate.

Il servizio è stato attivato in data 02.04.2013 e ha inizialmente previsto l'esecuzione delle prove distruttive, con i relativi ripristini, e delle prove di carico in condizioni di canale asciutto e pertanto entro la data del 14.04.2013. Le prove non distruttive sono state previste a partire dal 15.04.2013.

Durante la prima fase di esecuzione delle indagini sono però emerse particolari e specifiche caratteristiche dei siti oggetto di indagine che hanno suggerito alcune variazioni rispetto al piano di indagini originario, in parte già eseguito, e la definizione di un nuovo quadro di prove al fine di migliorare la qualità dei risultati ottenibili.

In particolare è emerso quanto di seguito illustrato:

- Si è reso necessario eseguire le prove di carico sui ponti canale Guasila I e Guasila II secondo uno schema che ha preferito, per una delle due prove previste, il posizionamento del carico contemporaneamente sulle due campate. Ciò ha richiesto l'implementazione della strumentazione necessaria inizialmente non prevedibile;
- Le prove pacometriche eseguite sia a supporto dei carotaggi che per la caratterizzazione delle armature hanno evidenziato da un lato la complessità della distribuzione ferri presenti e dall'altro la difficoltà di individuazione degli elementi più profondi. Durante le indagini sono state infatti intercettate armature con profondità variabili oltre i 10 - 15 cm. L'abilità dell'operatore ha scongiurato la lesione dei ferri, ma è emersa la necessità di utilizzare tecnologie maggiormente risolutive. E' stato pertanto suggerito uno studio più approfondito della distribuzione delle armature su estese porzioni di manufatto attraverso l'utilizzo del metodo geofisico denominato Georadar.
- I campioni di calcestruzzo estratti hanno mostrato la presenza di una malta di ripristino posta in opera in pregressi interventi di risanamento strutturale nei ponti canale Guasila I e Guasila II. Gli spessori sono risultati variabili fino a raggiungere anche i 5-6 cm. E' stata pertanto evidenziata la difficoltà di eseguire le prove non distruttive quali ultrasuoni, sclerometriche e pull out secondo la normativa indicata e senza compromettere la qualità dei risultati. L'esecuzione delle prove non distruttive avrebbe inoltre comportato la vera e propria demolizione di ampie superfici di malta per raggiungere il calcestruzzo originario.

In data 18.04.2013 è stata richiesta la sospensione delle attività in attesa di completare le valutazioni necessarie.

Durante la prima fase dei lavori sono state eseguite:

- N. 8 Prove per l'individuazione della distribuzione delle armature,;
- N. 26 Prelievi di provini di calcestruzzo;
- N. 26 Test colorimetrici;
- N. 26 Prove di compressione dei provini di calcestruzzo;
- N. 8 Estrazioni di spezzoni di barre di armatura;
- N.4 Prove di carico statico;
- Ripristino corticale di qualsiasi elemento strutturale sottoposto ad azioni invasive o semi invasive finalizzate alla preparazione o all'esecuzione delle prove elencate.

Con Determinazione del Direttore del Servizio Progetti e Costruzioni n. 611 del 11.07.2013 è stata approvata Perizia Suppletiva e di Variante n.1 che ha previsto, rispetto al piano di indagini iniziale, la riduzione delle prove sclerometriche, delle prove pull out e delle prove combinate Sonreb. E' stato quindi incrementato il numero di prelievo di campioni di calcestruzzo e delle prove di schiacciamento, nonché delle prove di tipo ultrasonico. E' stato introdotto il rilievo georadar ad alta frequenza per la mappatura 3D delle armature. E' stato inoltre previsto lo studio di correlazioni tra prove combinate tra pull out e ultrasuoni.

3

I lavori sono ripresi in data 12.07.2013.

La seconda fase ha visto la realizzazione di:

- Indagini georadar ad alta frequenza sui ponti canale Guasila I e Guasila II;
- N. 26 Prelievi di provini di calcestruzzo;
- N. 26 Test colorimetrici;
- N. 26 Prove di compressione dei provini di calcestruzzo;
- N. 93 Prove ultrasoniche, dirette, semidirette o indirette, di cui N. 18 di verifica e taratura;
- N. 20 Prove sclerometriche;
- N. 30 Prove di pull-out;
- N. 8 Scavi a sezione obbligata per la completa messa in luce delle fondazioni;
- Ripristino corticale di qualsiasi elemento strutturale sottoposto ad azioni invasive o semi invasive finalizzate alla preparazione o all'esecuzione delle prove elencate.

Durante l'esecuzione di alcune delle prove di tipo pull out si è verificata la rottura dei tasselli di estrazione, avvenuta in maniera quasi sistematica nelle pareti e nei solai dei ponti canale.

La buona corrispondenza qualitativa con i risultati delle prove ultrasoniche e sclerometriche e le specifiche tecniche dei tasselli utilizzati lasciavano supporre un miglioramento medio delle caratteristiche di resistenza del calcestruzzo nei

punti in cui avveniva la rottura. Allo stato di avanzamento delle indagini non esisteva però riscontro con prove di tipo diretto. Al fine di confortare anche analiticamente tale ipotesi è stata prevista la realizzazione di carotaggi e relative prove di compressione in corrispondenza delle prove pull out andate a rottura.

Inoltre i risultati dell'indagine pacometrica eseguita durante la prima fase dei lavori e le elaborazioni preliminari dell'indagine georadar hanno consentito di valutare il grado di complessità della distribuzione delle armature negli elementi strutturali studiati mostrando, soprattutto nel solaio, l'elevata densità dei ferri e una certa eterogeneità nella loro posizione.

Per tali motivazioni è risultato preferibile eseguire il campionamento del calcestruzzo nelle pareti e nei solai in condizioni di canale asciutto. I lavori sono stati pertanto sospesi in data 08.08.2014.

Con determinazione del Direttore del Servizio Progetti e Costruzioni n.971 del 23.09.2013 e Nota ENAS prot. N. 14090 del 14.10.2013 sono state modificate le condizioni contrattuali e prorogato il contratto di complessivi 130 giorni naturali e consecutivi.

Le indagini sono riprese il 14.01.2014, ad avvenuto completo svuotamento del canale.

La terza fase ha visto la realizzazione di:

- N. 9 Prelievi di provini di calcestruzzo;
- N. 9 Prove di compressione dei provini di calcestruzzo;
- N. 4 Prove ultrasoniche, dirette, semidirette o indirette;
- N. 3 Prove sclerometriche;
- N. 4 Prove di pull-out;
- Ripristino corticale di qualsiasi elemento strutturale sottoposto ad azioni invasive o semi invasive finalizzate alla preparazione o all'esecuzione delle prove elencate.

4

Le condizioni meteo particolarmente avverse verificatesi alla ripresa dei lavori hanno causato il prolungamento delle ultime fasi di lavoro. Con Nota ENAS prot. N. 0003895 P del 10.03.2014 è stato prorogato il contratto di ulteriori 20 giorni naturali e consecutivi. Nel mese di Marzo 2014 sono stati consegnati gli elaborati definitivi.

La presente reazione tecnica illustra le metodologie adoperate, i criteri e le valutazioni che hanno guidato le scelte tecniche e operative per l'espletamento del servizio affidato.

Le prove e le elaborazioni aggiuntive rispetto a quanto previsto dal contratto sono state eseguite su iniziativa della Geotech S.r.l. ai fini della maggiore qualità del servizio svolto.

I risultati delle prove e dei lavori eseguiti sono raccolti ed illustrati in:

- N.4 volumi articolati in Report Guasila I, Report Guasila II, Report Segariu, Report Selegas contenenti gli esiti delle prove eseguite in ciascuno dei ponti canale;
- N.1 volume Report Prove Combinate, che illustra l'approccio metodologico e i risultati ottenuti dalle prove Sonreb e dalle altre prove combinate;
- N.1 volume Report Ripristini Strutturali, che illustra la metodologia e i materiali utilizzati per i ripristini del manufatto;
- Tavola N.1, Schema delle Prove Eseguite, che rappresenta una sintesi schematica della posizione delle singole prove eseguite in ciascuno dei ponti;
- Tavole Geo_1 e Geo_2, Risultati dell'Indagine Georadar;
- Allegato 1, 1B: Certificati delle Prove di Compressione;
- Allegato 2: Certificati delle Prove di Trazione;
- Allegato 3: Certificati di Taratura della Strumentazione;
- Allegato 4: Schede Tecniche dei Prodotti per il Ripristino del Manufatto.

2. INDIVIDUAZIONE E MAPPATURA DEI FERRI DI ARMATURA

2.1 PROVE PACOMETRICHE

Le Prove Pacometriche consistono nella misura della variazione del campo magnetico determinato dalla presenza di armature di acciaio in vicinanza della superficie del calcestruzzo degli elementi strutturali (travi, pilastri, pareti). Tali prove consentono di determinare la posizione delle armature proiettata nel piano parallelo al piano d'indagine, la stima della misura dell'interferro, del copriferro nonché del diametro delle armature stesse.

Lo strumento utilizzato è detto Pacometro (Figura 1) ed è composto da una unità emittente e da una sonda trasmittente/ricevente. L'utilizzo del pacometro, come strumento di prova non distruttivo, è regolato dalla norme BS 1881:2004.



Figura 1 - Pacometro Elcometer Protovale P331-S

La sonda viene fatta scorrere sulla superficie del calcestruzzo consentendo di individuare le armature ortogonali alla direzione di avanzamento. L'unità emittente dello strumento consente la localizzazione attraverso un segnale acustico e la misura dell'intensità del segnale attraverso un display digitale. Durante la localizzazione viene tracciato un reticolo di punti la cui unione consente la ricostruzione della distribuzione delle armature (Figura 2).

La prova pacometrica può avere lo scopo di individuare le zone dell'elemento prive di armatura nelle quali eseguire le indagini finalizzate alla conoscenza delle caratteristiche del calcestruzzo, quali, ad esempio, il prelievo di carote, le prove sclerometriche, prove ultrasoniche e prove pull out.

2.2 INDAGINI ESEGUITE

Il metodo metodo pacometrico è stato utilizzato per:

- 1) Individuare zone del manufatto prive di armature per la successiva realizzazione di carotaggi, prove ultrasoniche, prove sclerometriche, prove pull-out;
- 2) Individuare le armature per la successiva estrazione ed esecuzione delle prove di trazione in laboratorio;
- 3) Descrivere la distribuzione delle armature, determinare la misura del copriferro e del diametro (Figura 2).



Figura 2 - Immagine di un Rilievo Pacometrico eseguito nella trave del ponte canale Guasila I



Figura 3 - Verifica dei Risultati dell'Indagine Pacometrica mediante Saggi Diretti

Lo strumento utilizzato è il Pacometro Elcometer Protovale P331-S (Figura 1).

Le indagini pacometriche di cui al punto 1) sono state realizzate durante tutte le fasi di lavoro descritte nella premessa, mentre le prove di cui al punto 2) e 3) sono state realizzate durante la prima fase, dal 02 Aprile al 14 Aprile 2013.

In seguito alla rimodulazione delle prove inizialmente previste e alla redazione della Perizia Suppletiva e di Variante N.1, sono state eseguite un totale di N.8 prove pacometriche per la ricostruzione della distribuzione delle armature di cui al punto 3.

I risultati sono mostrati nei Report Guasila I (G1PAC1 - G1PAC4), Guasila II (G2PAC1 - G2PAC2) e Selegas (SLPAC1 - SLPAC2).

I risultati dell'indagine pacometrica sono stati validati mediante saggi diretti (Figura 3).

3. ESTRAZIONE CAMPIONI CALCESTRUZZO, TEST COLORIMETRICI E PROVE DI COMPRESSIONE

3.1 CAROTAGGI

Il carotaggio e successivo prelievo dei campioni di calcestruzzo è stato eseguito secondo normativa UNI EN 12504-1.

La strumentazione utilizzata è composta dalla Carotatrice Hilti Mod. DD200 (Figura N.4) e set di carotieri a diamante di vari diametri compresi tra $\varnothing 98$ - $\varnothing 94$ mm e $\varnothing 68$ - $\varnothing 64$ mm.



Figura 4 - Carotatrice Hilti Modello DD200

9

In totale sono stati eseguiti 61 carotaggi (Tabella 2.1). I carotaggi sono stati eseguiti in differenti periodi:

- La prima fase si è svolta tra il 2 Aprile e il 6 Aprile 2013 con la realizzazione di N.26 carotaggi distribuiti in travi e pilastri;
- La seconda fase si è svolta tra il 18.07.2013 e il 26.07.2013 con la realizzazione di N.26 carotaggi distribuiti in travi, pilastri e fondazioni;
- La terza fase si è svolta tra il 14 e il 22 Gennaio 2014 con la realizzazione di N.9 carotaggi distribuiti in pareti e solai.

I carotaggi eseguiti durante la prima fase dei lavori hanno mostrato la presenza di una malta superficiale posta in opera in pregressi interventi di risanamento strutturale con spessori da un minimo di 1-2 cm fino a massimi di 5-6 cm. Ciò ha consentito di considerare e valutare la difficoltà di eseguire le prove non distruttive secondo le norme indicate e senza compromettere la qualità dei risultati in rapporto anche alla necessità di operare una vera e propria demolizione di ampie porzioni per la preparazione delle superfici interessate dalle prove. Durante l'esecuzione di alcuni carotaggi sono state inoltre intercettate armature con profondità variabili oltre i 10 - 15 cm. L'abilità dell'operatore ha scongiurato la lesione dei ferri, ma è emersa la complessità della distribuzione delle armature e la necessità di sviluppare un ulteriore approccio alla caratterizzazione delle stesse. Per il prelievo dei campioni di calcestruzzo nelle pareti e nei solai, al fine di

una maggiore cautela riguardo al rischio di intercettazione di ferri di armatura, oltre al rilievo pacometrico previsto, nelle zone interessate dal campionamento è stato eseguito un ulteriore rilievo georadar ad alta frequenza.

Di seguito è riportata la tabella riassuntiva dei campioni di calcestruzzo estratti.

Ponte Canale Guasila I		Ponte Canale Guasila II	
Elemento Strutturale	Codice Provino	Elemento Strutturale	Codice Provino
Trave	G1C1	Pilastro	G2C1
Pilastro	G1C2	Pilastro	G2C2
Pilastro	G1C3	Trave	G2C3
Pilastro	G1C5	Pilastro	G2C4
Trave	G1C6	Pilastro	G1C5
Trave	G1C7	Trave	G1C6
Pilastro	C1G8	Trave	G2/BC1
Pilastro	G1C9	Trave	G2/BC2
Pilastro	G1/BC1	Trave	G2/BC3
Trave	G1/BC2	Pilastro	G2/BC4
Pilastro	G1/BC3	Trave	G2/BC5
Pilastro	G1/BC4	Trave	G2/BC6
Trave	G1/BC5	Pilastro	G2/BC7
Pilastro	G1/BC6	Fondazione	G2F1
Trave	G1/BC7	Fondazione	G2F2
Fondazione	G1F1	Parete	G2PAR1
Fondazione	G1F2	Solaio	G2SOL1
Parete	G1PAR1		
Parete	G1PAR2		
Solaio	G1SOL2		

Ponte Canale Selegas		Ponte Canale Segariu	
Elemento Strutturale	Codice Provino	Elemento Strutturale	Codice Provino
Pilastro	SLC1	Trave	SRC1
Pilastro	SLC2	Pilastro	SRC2
Trave	SLC3	Pilastro	SRC3
Pilastro	SLC4	Pilastro	SRC4
Pilastro	SLC5	Pilastro	SRC5
Trave	SLC6	Trave	SRC6
Trave	SL/BC1	Pilastro	SR/BC1
Pilastro	SL/BC2	Pilastro	SR/BC2
Pilastro	SL/BC3	Trave	SR/BC3
Fondazione	SLF1	Fondazione	SRF1
Parete	SLPAR1	Parete	SRPAR1
Solaio	SLSOL1	Solaio	SRSOL1

10

Tabella 2.1 - Elenco dei Provini di Calcestruzzo Estratti

3.2 TEST COLORIMETRICI

3.2.1 CARBONATAZIONE

Il calcestruzzo possiede un valore di pH di circa 12,5 che gli conferisce un carattere fortemente alcalino. La forte alcalinità costituisce una protezione naturale dell'armatura contro la corrosione (passivazione).

Il fenomeno chimico è conseguente all'anidride carbonica dell'aria che penetrando nei pori del calcestruzzo neutralizza la calce libera presente. Il pH dello strato superficiale del calcestruzzo si abbassa fino a scendere a 9, provocando il fenomeno della carbonatazione che aumenta fortemente la permeabilità e riduce la capacità protettiva.

In presenza di copriferro carbonatato la corrosione si sviluppa velocemente nelle zone soggette a dilavamento o per U.R.>90%. In queste condizioni l'aumento di volume prodotto dall'ossido di ferro produce il distacco del copriferro e, di conseguenza, un incremento del fenomeno della corrosione.

Il fenomeno della carbonatazione fornisce inoltre, allo strato superficiale, una durezza superiore che può determinare errori nelle misure eseguite con metodo sclerometrico e pull-out.

La penetrazione della carbonatazione segue una legge parabolica del tipo:

$$s = k \sqrt[n]{t}$$

dove s è lo spessore dello strato carbonatato, t il tempo, mentre k è un coefficiente che dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo e dai fattori ambientali. In calcestruzzi porosi l'esponente n vale circa 2 e quindi si ottiene un andamento parabolico. In calcestruzzi compatti, la diminuzione nel tempo della velocità di carbonatazione è più marcata, per cui n > 2. In calcestruzzi molto impervi la velocità tende nel tempo praticamente ad annullarsi. In generale k diminuisce assieme alla riduzione del rapporto acqua/cemento e/o garantendo una buona costipazione con stagionatura ad umido.

Il valore di k tende ad aumentare per umidità relative, U.R., comprese tra 50% e 70%, mentre tende a diminuire per U.R. basse, < 40%, o alte, > 90%.

La misura della profondità di carbonatazione consiste nell'applicare, con pennello o nebulizzatore, una soluzione di fenoftaleina, all'1% di alcool etilico sulla superficie della carota dopo aver pulito accuratamente con uno straccio. La reazione con il calcestruzzo provoca una variazione di colore nella parte non carbonatata.

L'analisi va generalmente condotta subito dopo il prelievo della carota per evitare che si formi un film superficiale carbonatato lungo tutta la superficie che impedirebbe la reazione con la fenoftaleina.

3.2.2 PROVE ESEGUITE

Successivamente all'estrazione i campioni di calcestruzzo sono stati riposti nelle apposite cassette catalogatrici e sottoposti al test colorimetrico per la determinazione della profondità di carbonatazione.

Le prove sono state eseguite secondo la norma UNI 9944:1992 - UNI 1110400:2004.

Sono state eseguite un totale di N. 35 prove di carbonatazione.

3.3 PROVE DI LABORATORIO

Le prove di compressione dei provini di calcestruzzo sono state eseguite dal Laboratorio Prove Materiali Autorizzato Geosystem del Dott. Geol. G.B. Demontis, Loc. Pill'e Matta, Quartucciu (CA) e dal Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale ed Architettura, della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Cagliari, Piazza D'Armi (CA).

I risultati delle prove sono illustrati nell'Allegato 1, 1B.

4. ESTRAZIONE DELLE BARRE DI ARMATURA E PROVE DI TRAZIONE

L'estrazione delle barre di armatura è stata condotta cercando la minore invasività possibile sui manufatti. Laddove le condizioni dei ponti lo hanno consentito sono state infatti estratte barre di armatura parzialmente o completamente esposte. Ciò ha consentito la valutazione delle resistenze anche per elementi privi di copriferro.

Le fasi di lavoro hanno visto l'esecuzione di:

- Rilievo pacometrico (solo per le armature non esposte) per l'individuazione e il tracciamento delle barre da estrarre;
- Rimozione del copriferro, taglio della barra, ripristino dell'armatura e del calcestruzzo.

Il ripristino dei ferri è stato eseguito utilizzando barre ad aderenza migliorata, saldatura con sovrapposizione pari a 20Φ , applicazione del prodotto passivante (Figura 5).



Figura 5 - Immagine del Ripristino delle Barre di Armatura

Le prove di trazione delle barre di armatura sono state eseguite presso il Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale ed Architettura, della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Cagliari, Piazza D'Armi (CA). I risultati delle prove di trazione sono illustrati nell'Allegato 2.

5. INDAGINE GEORADAR

5.1 METODO GEORADAR

Il Georadar o Ground Penetrating Radar (GPR), è un metodo geofisico attivo che si basa sulla propagazione delle onde elettromagnetiche e consente di individuare le discontinuità nelle proprietà fisico - chimiche del mezzo attraversato e di rappresentarle in due o tre dimensioni attraverso la creazione di immagini ad alta risoluzione.

Tali discontinuità possono essere originate, ad esempio, dalla presenza di vuoti, da oggetti sepolti, da variazioni litologiche nel sottosuolo o difetti strutturali nelle opere in calcestruzzo che si traducono in variazione delle proprietà elettriche, *Permittività Elettrica* e *Conducibilità Elettrica*, dei materiali attraversati e che causano lo *Scattering* delle onde elettromagnetiche, ossia la riflessione in una molteplicità di direzioni casuali. La possibilità di individuare e misurare queste ultime consente di localizzare la sorgente che ha generato la riflessione (*Riflettore*).

Il Georadar è un sistema di misura complesso (Figura 6), costituito da un *Generatore* del segnale, un sistema per la sua trasmissione e ricezione, costituito rispettivamente da *Antenna Trasmittente* e *Antenna Ricevente*, una *Unità di Controllo* per la registrazione e visualizzazione dei segnali ricevuti.

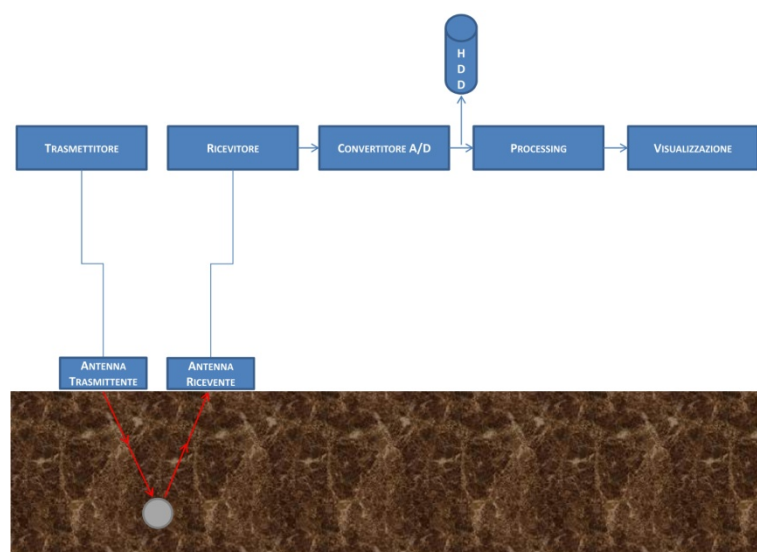


Figura 6 - Schema Semplificato del Sistema Georadar

Il segnale generato, caratterizzato da frequenze tipiche delle onde radio e in genere comprese tra 10 MHz e 2500 Mhz, viene trasmesso nel mezzo attraverso l'antenna trasmittente e, in corrispondenza di una discontinuità nelle proprietà elettriche del materiale viene riflesso in superficie dove viene captato dall'antenna ricevente e memorizzato. Il concetto alla base della localizzazione della sorgente è che esiste un ritardo tra l'impulso elettromagnetico emesso e la ricezione dell'eco riflesso dal materiale. Il tempo trascorso è il semplice risultato del rapporto tra la distanza percorsa dall'impulso in andata e ritorno e la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo in cui si propaga. L'essenza del metodo

Georadar è perciò la misura del *Tempo di Ritardo* (Delay Time), che rappresenta il tempo trascorso tra l'istante in cui il segnale viene trasmesso e quello in cui viene ricevuto. Risulta ovvio che, ipotizzando una velocità di propagazione uniforme, a un maggiore tempo di ritardo corrisponde una maggiore distanza dell'oggetto dall'antenna (Figura 7).

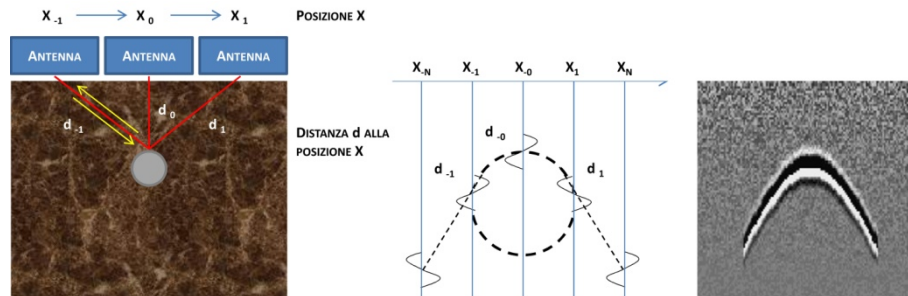


Figura 7 - Schema Semplificato di Funzionamento del Sistema Georadar

Si pongono le questioni di *Risoluzione*, *Profondità d'Indagine* e *Accuratezza*. La Risoluzione è definita come la capacità di distinguere due oggetti tra loro vicini. Poiché il Georadar misura ritardi di tempo, il periodo trascorso tra la ricezione della riflessione associata ad un primo bersaglio e quella associata alla presenza di un secondo bersaglio deve essere tale da permettere di riconoscerli come eventi distinti. La risoluzione dipende dalla Lunghezza d'Onda del segnale trasmesso secondo la relazione:

$$5) \quad \lambda = \frac{V}{f}$$

Dove la Velocità dell'onda elettromagnetica nel mezzo attraversato è pari a

$$6) \quad V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Dove f è la Frequenza, c è la velocità della luce, ϵ_r è la Permettività Elettrica Relativa.

Affinché due eventi siano distinguibili l'intervallo ΔT tra due riflessioni dovrà essere

$$7) \quad \Delta T > \frac{T_0}{2}$$

Con T_0 Periodo dell'Onda. Risulta inoltre che ΔT è pari al percorso z di andata e ritorno fratto la velocità

$$8) \quad \Delta T = \frac{2z}{V}$$

E pertanto la Risoluzione Verticale è pari a $\lambda/4$.

Analogamente è possibile definire una Risoluzione Orizzontale esprimibile con il raggio della cosiddetta "Prima Zona di Fresnel" (Figura 8), ovvero la porzione di spazio all'interno della quale due riflettori adiacenti risultano indistinguibili. Esso è definito come

$$9) \quad r = \sqrt{\frac{zV}{2f}}$$

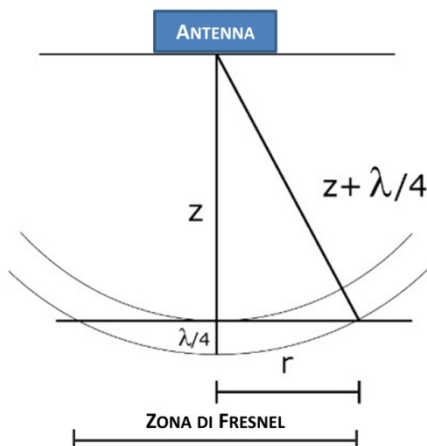


Figura 8 - Schema della “Prima Zona di Fresnel”

La stima della Profondità di Indagine raggiungibile con un sistema GPR è notevolmente complessa poiché dipendente da molteplici fattori quali le Perdite per Attenuazione, legate alle proprietà del materiale, per Dispersione legate alla propagazione del campo elettromagnetico e per Riflessione, legate alla natura e alla forma del bersaglio, ma la cui trattazione esula dagli obiettivi di questa nota. In via del tutto approssimativa è però possibile affermare che la profondità di indagine dipende dalla Frequenza e dalle Caratteristiche Elettriche del Mezzo attraversato. Risulta infatti che nei materiali dielettrici il segnale si attenua in maniera indipendente dalla frequenza mentre, per quelli conduttori esso si attenua maggiormente all'aumentare della stessa. A parità di frequenza, all'aumentare della conducibilità elettrica aumenterà l'attenuazione e pertanto diminuirà la profondità d'indagine.

16

L'Accuratezza definisce la capacità di descrivere la geometria e la posizione nello spazio dell'oggetto individuato. In maniera del tutto analoga a quanto esposto per la risoluzione è possibile definire i concetti di Accuratezza Verticale e Accuratezza Orizzontale o, più in generale, Accuratezza Spaziale. L'accuratezza orizzontale è definita dalle caratteristiche di ruote contametri (Survey Wheels) e DGPS che possono soffrire di errori di calibrazione, della cartografia di base, ma in generale garantiscono precisione centimetrica.

L'accuratezza verticale dipende dalla determinazione dei tempi di arrivo degli echi riflessi, che il Radar misura ad altissima precisione. L'errore risiede perciò principalmente nella conversione Tempi/Profondità secondo la relazione 10)

$$d = V \frac{\Delta T}{2}$$

Nella quale è necessaria la valutazione precisa della velocità di propagazione nel mezzo.

L'indagine Georadar si articola nelle fasi di Acquisizione dei Dati, Elaborazione ed Interpretazione dei Risultati.

L'acquisizione dei dati può essere realizzata in modalità Monostatica o Bistatica. Nel primo caso antenna trasmittente e ricevente sono coincidenti mentre, nel secondo, risultano due apparati distinti. A seconda degli obiettivi e del contesto in cui si opera è possibile acquisire per Riflessione, per Trasparenza o per Common Mid Point (Figura 9).

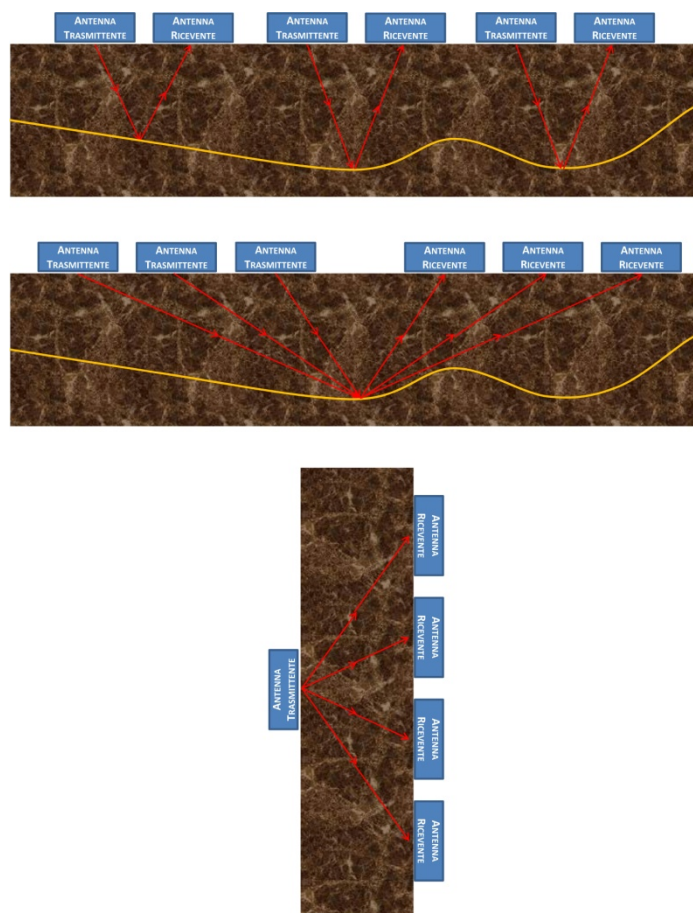


Figura 9 - Schemi di Acquisizione per Riflessione, Common Mid Point, Trasparenza

Il rilievo può essere finalizzato ad ottenere rappresentazioni bidimensionali del mezzo indagato quali Sezioni (Tempi/Distanze, Profondità/Distanze), Mappe (Rappresentazioni Piane dell'Ampiezza del Segnale Riflesso) o tridimensionali, ossia Volumi di Ampiezza del Segnale Riflesso. Il progetto dell'indagine Georadar consiste nella definizione di tutti i parametri di acquisizione che influenzano risoluzione, profondità d'indagine e accuratezza e che sono rappresentati da:

- Frequenza;
- Finestra Temporale di Acquisizione;
- Intervallo di Campionamento Temporale;
- Intervallo di Campionamento Spaziale;

- Spaziatura tra le Antenne (In caso di acquisizione in Modalità Bistatica);
- Griglia di Acquisizione e Sistema di Coordinate;
- Orientamento delle Antenne.

Le fasi successive consistono nell'implementazione delle grandezze determinate nelle impostazioni della strumentazione e la materializzazione in situ delle geometrie di acquisizione progettate. Viene infine eseguito il rilievo sul campo che operativamente consiste nel trascinare l'antenna secondo la griglia prestabilita. Le misure registrate sono quindi disponibili per successiva fase di elaborazione. L'elaborazione dei dati Georadar è un processo iterativo complesso attraverso il quale l'informazione contenuta all'interno dei *Dati Grezzi*, essenzialmente costituiti da segnali rappresentati in Tempi/Ampiezze, vengono depurati dai disturbi e trattati in modo tale da poter essere rappresentati e interpretati. La prima fase del trattamento è rappresentato dal cosiddetto *Editing* che consiste nel corredare i puri segnali registrati con informazioni al contorno quali, ad esempio, i dati topografici, correzione delle coordinate di acquisizione, eccetera. Successivamente si procede con l'applicazione di filtri numerici verticali, orizzontali, in dominio di tempo e di frequenza, l'impostazione del guadagno, l'analisi di velocità.

Approfondimenti sui metodi di trattamento dei segnali radar sono illustrati da Annan A.P., 2001, Daniels D.J., 2007.

18

5.2 INDAGINI ESEGUITE

Le indagini georadar sono state eseguite nei ponti canale Guasila I e Guasila II tra il 12 e il 17 Luglio 2013.

La strumentazione utilizzata è il Georadar K2 MF della Ingegneria dei Sistemi S.p.a. e composto da:

- Unità di acquisizione DAD;
- Antenna a frequenza di 2 GHz dotata di rotella metrica digitale;
- Laptop Panasonic CF19;
- Software di acquisizione IDS K2.

Le indagini hanno interessato $\frac{1}{4}$ della superficie totale della campata e hanno riguardato parete, solaio, trave e pilastro di ciascuno dei due ponti. Le zone studiate sono state scelte al fine di poter estendere i risultati per simmetria alle altre porzioni del manufatto.

Le fasi del lavoro sono state articolate in:

- Definizione del sistema di riferimento locale;
- Tracciamento sulla superficie interessata dalle indagini delle progressive e degli allineamenti per il successivo passaggio dell'antenna radar;
- Esecuzione del rilievo attraverso una maglia 0,20 x 0,20 m realizzata attraverso profili paralleli lungo due direzioni ortogonali tra loro;
- Processing dei dati georadar;

- Determinazione del diametro attraverso rilievo pacometrico.

Successivamente è stato determinato il diametro delle armature attraverso misure pacometriche e, laddove fattibile, da misure dirette attraverso calibro digitale finalizzate alla validazione delle indagini indirette e all'approfondimento delle zone in cui i dati hanno restituito qualche incertezza.

5.3 ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione dei dati è stata eseguita attraverso i software di processing del segnale Gred 3D Utilities della IDS S.p.a. e software di restituzione CAD. Il processing del dato radar ha visto in primo luogo l'applicazione di filtri numerici per il miglioramento del rapporto segnale rumore e la restituzione di Radargrammi (Figura 10), sezioni verticali ortogonali alla superficie di scorrimento dell'antenna, e di Time Slices (Figura 11), mappe a profondità costante, determinata dall'operatore, parallele alla superficie di scorrimento dell'antenna, nelle quali è rappresentata l'ampiezza di riflessione del segnale radar. Radargrammi e time slices rappresentano gli strumenti per il successivo "picking" delle anomalie generate dalla presenza delle armature. Tale operazione genera un database di informazioni costituite dalla posizione delle armature, ossia dalle coordinate x,y,z rispetto all'origine del sistema di riferimento locale oltreché informazioni accessorie utili all'identificazione del bersaglio.

Viene quindi creata una matrice 3D di informazioni rappresentabile graficamente (Figura 12)

Il database viene gestito successivamente in ambiente CAD all'interno del quale sono tracciate le polilinee che rappresentano le armature. Il risultato grafico è strettamente legato al dato radar di partenza attraverso il database delle anomalie rilevate.

19

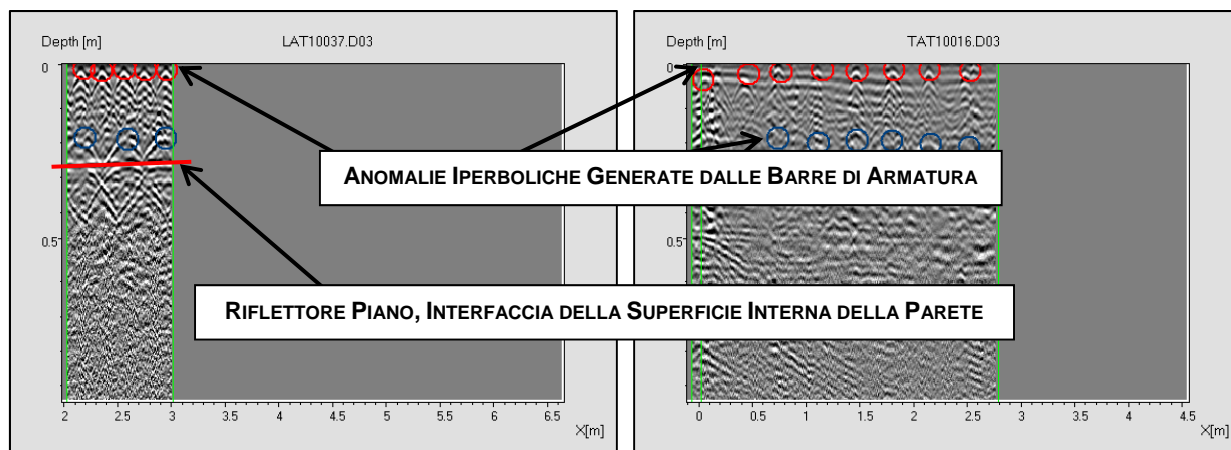


Figura 10 - Radargrammi Elaborati ed Interpretati

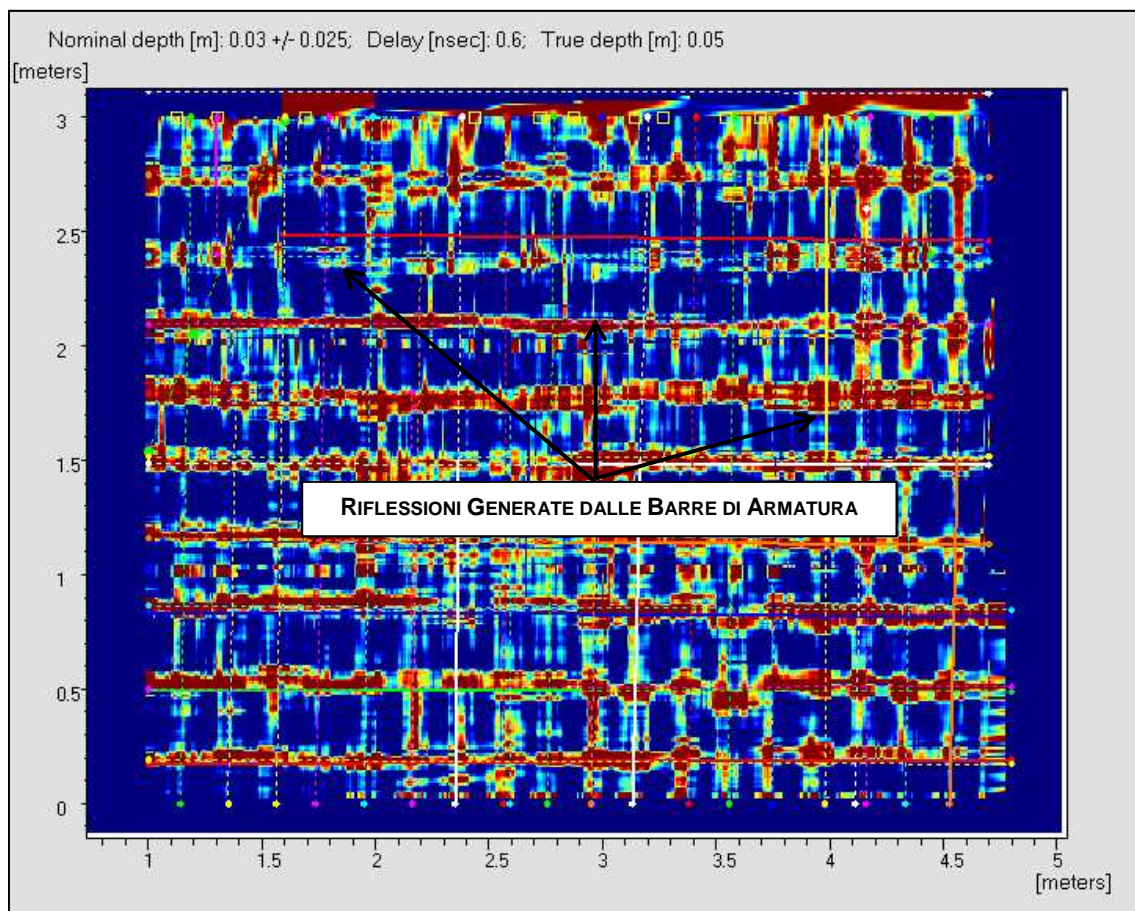


Figura 11 - Time Slice a Profondità di 0.05 m dalla Superficie

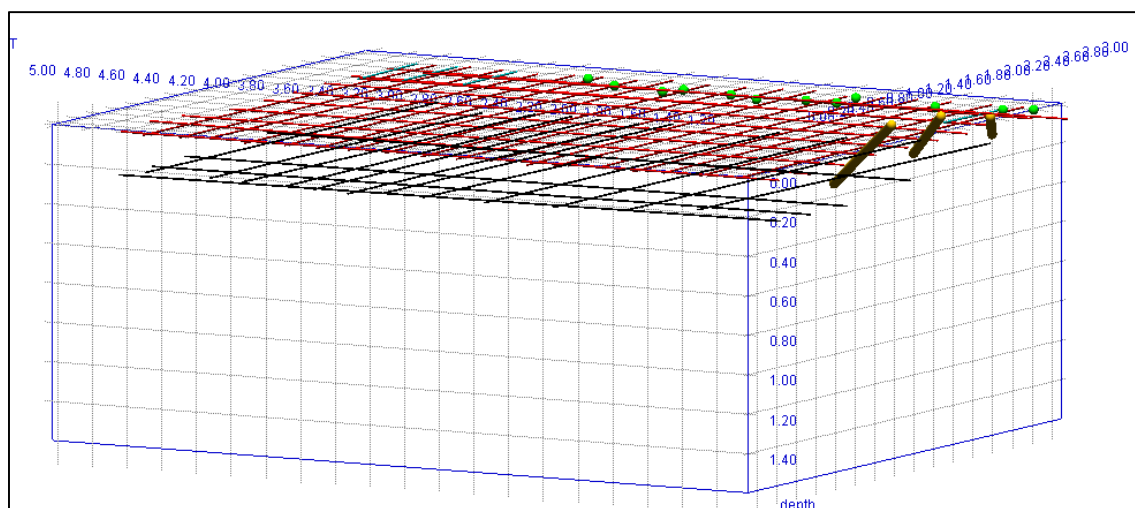


Figura 12 - Modello 3D dei Bersagli

5.4 RISULTATI

5.4.1 ORGANIZZAZIONE DEI RISULTATI

I risultati dell'indagine georadar sono rappresentati nei report di prova Guasila I, Geo1_PAR, Geo1_SOL, Geo1_TR, Geo1_PL e nella tavola Geo 1 per quanto riguarda le prove eseguite nel ponte canale Guasila 1.

Sono rappresentati nei report di prova Guasila II, Geo2_PAR, Geo2_SOL, Geo2_TR, Geo2_PL e nella Tavola Geo 2 per quanto riguarda le prove eseguite nel ponte canale Guasila 2.

I report di prova contengono le seguenti informazioni:

- Codice, Data, , Posizione della prova;
- Strumentazione utilizzata;
- Frequenza di acquisizione;
- Sintesi dei risultati quali copriferro, interferro, spessore del calcestruzzo.
- I risultati dell'indagine sono densi ed estesi spazialmente e pertanto gli elementi riportati sono da considerarsi medi. Ad esempio si consideri il dato riguardante il passo delle armature. Questo è certamente variabile nei vari punti della zona indagata, ma contenuto all'interno di un range di valori che è stato riportato nella tabella di sintesi dei risultati;
- Radargrammi, Time Slices e Rappresentazioni 3D per la rappresentazione delle anomalie rilevate.

21

Le tavole Geo_1 e Geo_2 riportano su base grafica fornita dal Committente il risultato dell'elaborazione dei dati georadar, che consiste nella rappresentazione grafica delle anomalie generate dalle armature rilevate.

Laddove non sia stata disponibile una base grafica o un rilievo il risultato è stato presentato con rappresentazioni schematiche standard (Output del software di elaborazione). Sono state inoltre rappresentate anomalie riferite a zone di particolare degrado. Per ciascun elemento strutturale studiato, parete, solaio, trave e pilastro, il risultato è rappresentato, attraverso viste in pianta, prospetti e sezioni, dalla distribuzione 3D di tutte le armature rilevate nei vari elementi strutturali rispetto all'origine del sistema di riferimento del rilievo georadar, dalla profondità, dal copriferro, dal passo delle armature. Sono inoltre riportati i diametri delle armature più superficiali rilevati con metodo pacometrico e calibro digitale. Il sistema di riferimento locale è stato materializzato negli elementi strutturali indagati (vedi report di prova) e riportato nella base grafica.

Tutti gli elementi rilevati attraverso l'indagine radar sono restituiti rispetto al solo sistema di riferimento locale.

Laddove la continuità del bersaglio si è interrotta a causa di disturbi o attenuazione del segnale è stato restituito il solo dato effettivamente presente. In un limitato numero di punti i segmenti che rappresentano le armature possono quindi essere interrotti o alcune armature possono non essere state rappresentate.

5.4.2 DESCRIZIONE DEGLI ELEMENTI SALIENTI DEI RISULTATI OTTENUTI

L'indagine georadar ha consentito la ricostruzione tridimensionale della distribuzione delle armature in parete, solaio, trave e pilastro dei ponti canale Guasila I e Guasila II. I risultati sono densi ed estesi spazialmente e hanno consentito la misura del copriferro, dell'interferro, dello spessore del manufatto, hanno consentito di descrivere la posizione delle armature più profonde e di individuare aree di evidente degrado all'interno del calcestruzzo confermato da evidenze nella superficie esposta del manufatto. Considerando il medesimo elemento strutturale, la distribuzione delle armature presenta caratteristiche comuni nei due ponti. Ad esempio nei solai è emersa una prima orditura di armature, ortogonale rispetto all'asse del canale, avente interferro pari a circa 20 cm nella parte più esterna mentre, verso la parte centrale, a partire da circa 1 m dalla parete, compare una seconda orditura. Nella parte centrale del solaio l'interferro è quindi pari a circa 10 cm. Le armature longitudinali non presentano variazioni in tal senso.

Nelle pareti non sono state evidenziate orditure differenti in differenti punti dell'elemento studiato. Sono state individuate armature oblique verso l'appoggio. Anche le travi presentano distribuzione delle armature pressoché identiche. Sono state descritte chiaramente la prima orditura più superficiale, una seconda orditura costituita da N. 3 armature poste verso l'appoggio e armature oblique poste anch'esse verso l'appoggio.

Le maggiori criticità si sono verificate in corrispondenza del vincolo tra la parete e il solaio. In tali punti l'elevata densità delle armature non ha consentito la discriminazione del numero dei ferri presenti, della loro distribuzione, etc. Nelle pareti è stata riscontrata invece una notevole eterogeneità nella distribuzione delle staffe che ha reso particolarmente difficoltosa l'interpretazione e la successiva fase di carotaggio.

22

5.4.3 DETERMINAZIONE DEL DIAMETRO DELLE ARMATURE CON INDAGINE PACOMETRICA

La determinazione del diametro delle armature è stata eseguita attraverso indagine pacometrica (Figure 13 - 16). Questa ha riguardato tutte le porzioni di manufatto precedentemente indagate con metodo georadar.

I risultati sono mostrati nelle tavole Geo_1 e Geo_2.

Le maggiori criticità si sono verificate in alcuni punti dei solai, ove la presenza diffusa di elementi metallici quali parti di fil di ferro, chiodi, etc. ha reso estremamente difficoltoso il rilievo pacometrico e in corrispondenza del vincolo tra la parete e il solaio dove l'elevata densità delle armature non ha consentito di effettuare la misura.

La verifica dei dati rilevati è stata eseguita attraverso misure dirette attraverso calibro digitale (Figure 17 - 28).

Le misure dirette sono indicate nelle tavole Geo_1 e Geo_2 con la dicitura (C).

La scelta dei punti di verifica è stata dettata da alcune considerazioni sullo stato di degrado del manufatto.

In primo luogo si è appurato che diverse zone sono caratterizzate da un elevato stato di degrado della porzione più superficiale del calcestruzzo in cui il copriferro è pressoché totalmente assente.

Inoltre sono presenti tratti più o meno estesi in cui le malte poste in opera per interventi pregressi di risanamento mostrano ampie zone di distacco. Alcune prove di rimozione delle stesse hanno mostrato il rischio elevato che estese parti della malta si distaccassero.

Pertanto, al fine di limitare le azioni invasive al minimo indispensabile e preservare le superfici più sane del manufatto, in accordo con la direzione tecnica del servizio, la verifica diretta è stata condotta seguendo il seguente approccio metodologico:

- Individuazione di punti di elevato degrado in cui la parziale o totale assenza del copriferro consentisse la misura del diametro delle armature senza ulteriori interventi invasivi;
- Individuazione di elementi di medesime caratteristiche strutturali e di distribuzione dei carichi che consentissero di estendere il risultato alle parti non indagabili;
- Individuazione di punti di indagine, situati anche all'esterno delle zone indagate, che fornissero ulteriori elementi di valutazione sulle aree in cui non fosse stato tecnicamente possibile eseguire le misure;

Nel ponte canale Guasila I sono state effettuate misure in una armatura trasversale esterna all'area indagata con il georadar (Figura 18) e sulla trave N.3 (Lato Monte), in cui era assente una parte estesa del copriferro (Figure 19 - 23).

23

Nel ponte canale Guasila I per poter eseguire misurazioni in corrispondenza del vincolo solaio - parete è stata considerata la campata speculare, soggetta alle medesime condizioni di distribuzione del carico (Figure 24 - 26).

Sono di seguito riportate le misure dirette eseguite in corrispondenza del vincolo parete - solaio.

Ponte	Tipo Armatura	Diametro	Figura
Guasila I (Campata Speculare)	Longitudinale	25.36 mm	24
Guasila I (Campata Speculare)	Longitudinale	12.81 mm	25
Guasila I (Campata Speculare)	Staffa	10.45 mm	26
Guasila II	Staffa	10.27 mm	27
Guasila II	Longitudinale	16.51 mm	28

Tabella 5.1 - Elenco Misure Eseguite in Corrispondenza del Vincolo Parete - Solaio

Il rilievo diretto ha in primo luogo consentito di validare il dato acquisito strumentalmente limitando al massimo l'invasività sulla struttura. Ha inoltre permesso l'acquisizione di informazioni anche su aree non interessate dal rilievo georadar e pacometrico fornendo ulteriori elementi di verifica dei risultati.

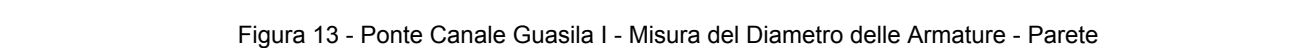


Figura 13 - Ponte Canale Guasila I - Misura del Diametro delle Armature - Parete

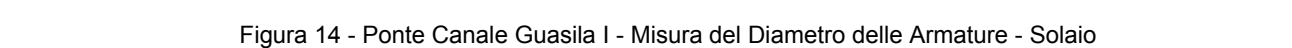


Figura 14 - Ponte Canale Guasila I - Misura del Diametro delle Armature - Solaio



Figura 15 - Ponte Canale Guasila I - Misura del Diametro delle Armature - Trave

25



Figura 16 - Ponte Canale Guasila I - Misura del Diametro delle Armature - Pilastro



Figura 17 - Ponte Canale Guasila I - Rilievo Diretto del Diametro delle Armature - Solaio - Armatura Longitudinale

26



Figura 18 - Rilievo con Calibro su Armatura Trasversale Esterna all'Area Indagata con Georadar



Figura 19 - Ponte Canale Guasila I - Rilievo Diretto del Diametro delle Armature - Trave

27



Figura 20 - Ponte Canale Guasila I - Rilievo Diretto del Diametro delle Armature - Trave - Armature Verticali



Figura 21 - Ponte Canale Guasila I - Rilievo Diretto del Diametro delle Armature - Trave - Armature Verticali

28



Figura 22 - Ponte Canale Guasila I - Rilievo Diretto del Diametro delle Armature - Trave - Armature Verticali



Figura 23 - Ponte Canale Guasila I - Rilievo Diretto del Diametro delle Armature - Trave - Armature Orizzontali

29



Figura 24 - Ponte Canale Guasila I - Campata Speculare - Misura del Diametro con Calibro Digitale



Figura 25 - Ponte Canale Guasila I - Campata Speculare - Misura del Diametro con Calibro Digitale

30



Figura 26 - Ponte Canale Guasila I - Campata Speculare - Misura del Diametro con Calibro Digitale

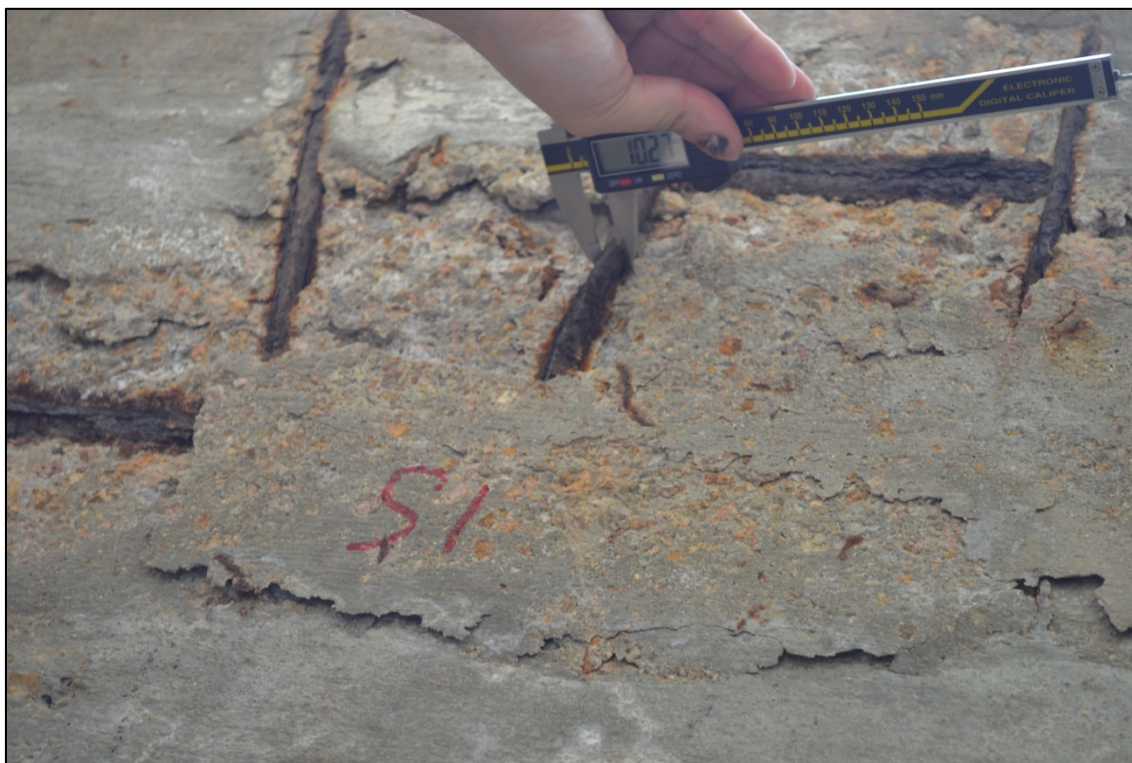


Figura 27 - Ponte Canale Guasila II - Misura del Diametro con Calibro Digitale

31



Figura 28 - Ponte Canale Guasila II - Misura del Diametro con Calibro Digitale

6. PROVE DI CARICO

6.1 INTRODUZIONE

Le prove di carico sono effettuate su elementi strutturali con lo scopo di verificare sperimentalmente il loro comportamento sotto le azioni di un carico predeterminato.

Possono essere distinte principalmente in:

- Prove di collaudo, eseguite precedentemente alla messa in esercizio delle strutture, hanno lo scopo di verificare il comportamento deformativo sperimentale rispetto a quello teorico;
- Prove di analisi, eseguite al fine di verificare il comportamento di un elemento strutturale già in opera.

Il carico può essere uniformemente distribuito, concentrato o lineare e viene generalmente applicato attraverso utilizzo di contenitori d'acqua (serbatoi, materassi, vasche), di mezzi meccanici (autocarri, locomotori), oppure pallet, sacchi di materiale in polvere, etc.

Le deformazioni prodotte dal carico imposto sono rilevate in tempo reale attraverso trasduttori di spostamento posti alla base di aste telescopiche e registrate da una centralina di acquisizione e da un computer.

Possono comunque essere utilizzati flessimetri centesimali con precisione di 1/100 mm.

32

Il flessimetro viene collocato vicino a terra su un supporto solido fisso e stabile collegato alla struttura mediante un cavetto di acciaio Invar contrappesato per poter vincere gli attriti interni dei flessimetri.

Tale modalità di misurazione prevede necessariamente la lettura diretta delle misure da parte dell'operatore.

6.2 INDAGINI ESEGUITE

6.2.1 DESCRIZIONE DELLE PROVE

Le prove di carico hanno avuto la finalità di ricavare parametri utili alla taratura di un modello numerico sperimentale. Le prove sono state eseguite sui ponti canale Guasila I e Guasila II. Gli elementi strutturali oggetto delle prove sono le campate di solaio comprese tra la 12°, 13° e 14° trave nel ponte Guasila I e le campate di solaio comprese tra la 4°, 5° e 6° trave nel ponte Guasila II (Tavola N.1) Le travi sono caratterizzate da 5.70 m di luce ed interasse di 10,00 m. Le prove sono state eseguite durante i giorni 9, 10, 11, 12, 13 e 15 Aprile 2013.

La durata delle diverse prove eseguite è di seguito indicata:

- Guasila I, Campata 1 circa 6 ore - Campata 1 + Campata 2, circa 10 ore;
- Guasila II, Campata 1, circa 5 ore e mezza - Campata 1 + Campata 2, circa 6 ore e mezza.

Durante la prova eseguita a Guasila II il carico è stato fatto permanere sul ponte anche durante la notte.

L'entità dei carichi, la loro disposizione, la durata della loro permanenza sulla struttura è stata indicata dalla direzione tecnica e scientifica dell'Ente.

6.2.2 APPLICAZIONE DEL CARICO

Il carico è stato applicato secondo le modalità e gli schemi illustrati nel rapporto di prova. Il massimo carico introdotto è stato pari a 392 kN su ciascuna delle campate. Il carico è stato applicato attraverso l'utilizzo di N.11 blocchi di acciaio pesati e certificati (Figura 29 - a) e 29 blocchi in calcestruzzo il cui peso è stato determinato in situ con bilancia a catene installata su una gru. A protezione dell'impermeabilizzazione del fondo del canale è stato posato un telo in TNT al di sopra del quale sono state poste tavole per poter adagiare i blocchi. Il posizionamento dei blocchi sul fondo del canale è stato effettuato attraverso l'utilizzo di gru a catene (Figura 29 - b, Figura 30). Il carico è stato incrementato di 19.6 kN per ciascun blocco posizionato.



Figura 29 - a) Certificato di Pesatura del Blocco in Acciaio - b) Gru Utilizzata per il Posizionamento dei Blocchi

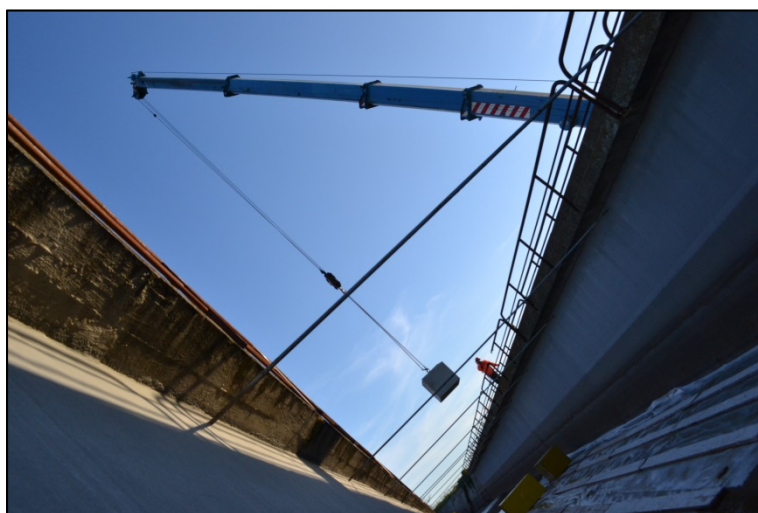


Figura 30 - Fase di Posizionamento dei Blocchi

6.2.3 MISURAZIONE DEGLI SPOSTAMENTI

La catena di misura degli spostamenti è stata realizzata tramite:

- Centralina di Acquisizione 12+2 canali TTest K12;
- Centralina di Acquisizione a 8 canali FBMA;
- N.10 Trasduttori Potenzimetrici di Spostamento TR100;
- N.8 Trasduttori Potenzimetrici di Spostamento PY50;
- Cavi di collegamento;
- N.3 Comparatori Meccanici Centesimali;
- Software di Acquisizione TTest e Titano.

Lo schema di posizionamento dei trasduttori e dei flessimetri è mostrato nel report di prova.

N.2 trasduttori potenziometrici e 1 flessimetro sono stati posizionati in una zona non influenzata dal carico al fine di monitorare l'effetto termico. In Figura 31 sono mostrate le centraline di acquisizione mentre nelle Figure 32 - 36 è mostrato il posizionamento dei trasduttori all'estradosso del solaio. Al fine di valutare gli effetti termici sui comparatori centesimali sul supporto fisso sono stati installati termometri digitali. Il giorno 15.04.2013 (Prova G1PC2) i termometri sono stati installati anche sulle aste telescopiche di supporto dei trasduttori.

34



Figura 31 - Centraline di Acquisizione

I trasduttori presentano le seguenti caratteristiche (riportate nei certificati di taratura mostrati nell'Allegato 4):

- Campo di Misura: +/- 100 mm;
- Linearità: +/- 0.15%;
- Sensibilità: 0.01 mm.

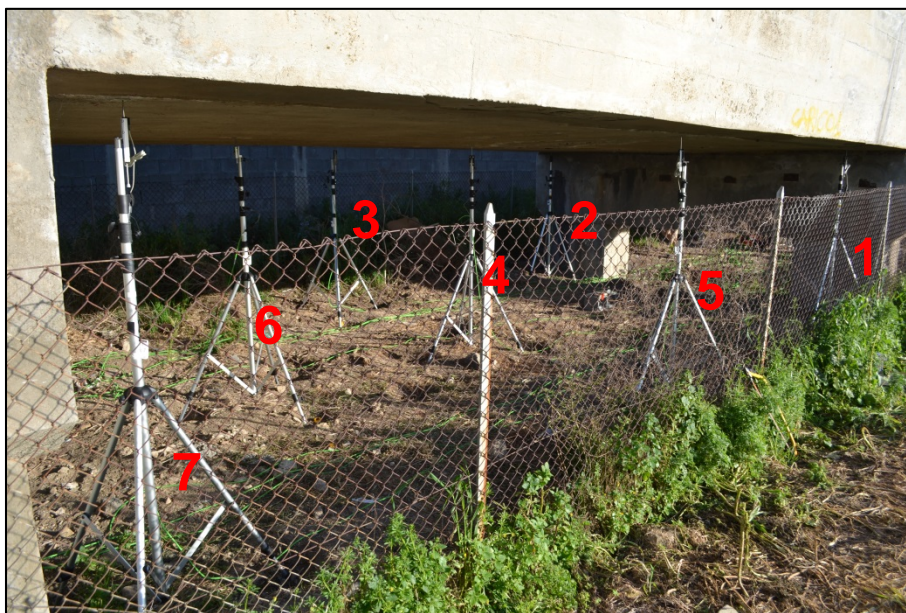


Figura 32 - Immagine del Posizionamento dei Trasduttori all'Intradosso della Campata tra le Travi 13°-14° del Ponte Canale Guasila I, Prova del 15.04.2013



Figura 33 - Immagine del Posizionamento dei Trasduttori all'Intradosso di parte della Campata tra le Travi 12°-13° del Ponte Canale Guasila I, Prova del 15.04.2013

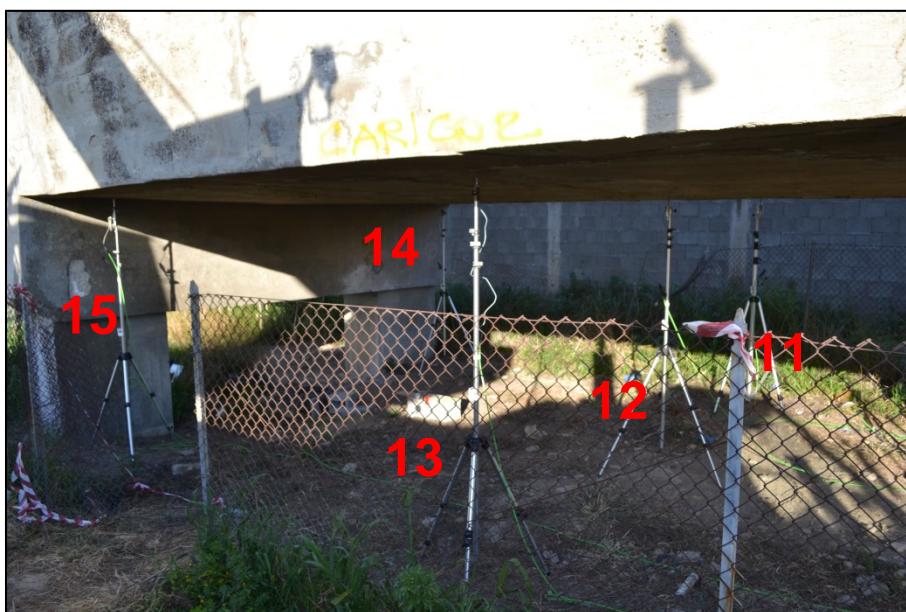


Figura 34 - Immagine del Posizionamento dei Trasduttori all'Intradosso di parte della Campata tra le Travi 12°-13° del Ponte Canale Guasila I, Prova del 15.04.2013

36



Figura 35 - Immagine del Posizionamento dei Trasduttori all'Intradosso di parte della Campata tra le Travi 14°-15° del Ponte Canale Guasila I, Prova del 15.04.2013



Figura 36 - Comparatore Centesimale CH19

6.3 RISULTATI

6.3.1 PREMESSA

I risultati delle prove di carico sono mostrati nei Report Guasila I (G1PC1 - G1PC2) e Report Guasila II (G2PC1 - G2PC2).

Nel ponte canale Guasila I, durante la prova G1PC1, ai fini di una maggiore tutela e controllo sulle misurazioni nella zona maggiormente sollecitata del solaio è stato previsto l'accoppiamento di due trasduttori. Sono stati pertanto posizionate le coppie CH4-CH14 e CH6-CH15.

Nella prova G2PC1 - G2PC2 eseguita nel ponte canale Guasila II il trasduttore N.9 mostra una deriva crescente a partire dal minuto 400. Da tale punto in poi la misura non può essere considerata affidabile. Tale evento è indicato nella tabella 6.4 con il colore rosso. Inoltre il canale N.19 ha subito un urto determinando un nuovo valore di zero. E' preferibile non considerare affidabile il dato di tale comparatore. Nella seconda parte prova G1PC1-G2PC2 non è stato pertanto possibile eseguire la correzione dell'effetto termico per i comparatori centesimali.

Le curve carico spostamento risentono della curvatura termica indotta dal gradiente di temperatura verificatosi durante le prove e dalla variazione di esposizione delle aste.

Sono di seguito illustrati i risultati ottenuti dai dati depurati dall'effetto termico indotto sulla struttura.

Non è esclusa la presenza di un effetto termico residuo dovuto all'alternanza dell'esposizione delle aste telescopiche a condizioni di soleggiamento e ombreggiatura. Considerando, ad esempio, la prova G1PC1 è possibile notare come successivamente alla rimozione del carico i canali disposti sul lato sud-est (ombreggiati) del ponte abbiano avuto un andamento decrescente mediamente regolare, i canali posti verso il centro del ponte abbiano avuto un andamento variabile, ma con lievi oscillazioni mentre, i canali disposti sul lato nord-ovest (soleggiati alla sera) pur mantenendo un trend medio in diminuzione presentino in alcuni punti un andamento in controtendenza leggermente crescente.

Medesimo comportamento, ma meno accentuato, è visibile anche nella prova G1PC2 dove i canali esposti a nord-ovest (1, 5, 7, 15) mostrano anch'essi un trend in diminuzione ma con andamento più graduale e in alcuni punti in controtendenza.

Nella prova G2PC1-G2PC2 è inoltre da evidenziare che la stessa è stata eseguita senza soluzione di continuità. Lo zero della catena di misura è collocato alle ore 15.15 del 12.04.2013 con temperature, misurate in corrispondenza dei comparatori centesimali, tra 20 e 21 gradi. Il primo ciclo si è concluso alle 18.25 con temperature di 17 - 19 gradi. Il secondo ciclo è iniziato immediatamente dopo caricando solo la prima campata. Il carico è stato fatto permanere la notte. La prova è ripresa alle 8.30 del 13.04.2013 con temperature intorno ai 10 gradi concludendosi intorno alle temperature intorno ai 20 gradi.

6.3.2 RISULTATI GUASILA I

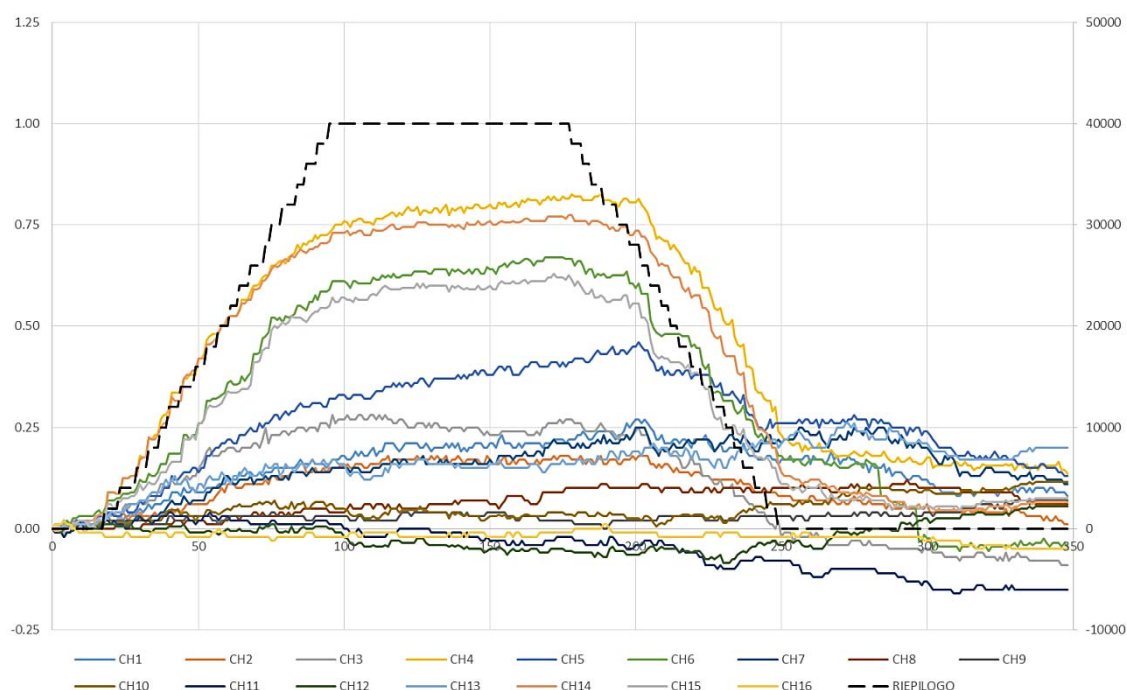


Figura 37 - Curva Carico - Spostamento della Prova G1PC1 Depurata dell'Effetto Termico

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
Max	0.27	0.18	0.28	0.83	0.46	0.67	0.25	#
Res	0.08	0.01	-0.09	0.14	0.13	-0.05	0.11	#

	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16
Max	0.07	0.12	0.04	0.06	0.26	0.78	0.63	#
Res	0.07	0.12	-0.15	0.06	0.20	0.07	0.08	#

	CH17	CH18	CH19
Max	0.00	0.61	#
Res	0.00	0.12	#

Tabella 6.1 - Freccie Massime e Residue della Prova G1PC1 Depurati dall'Effetto Termico

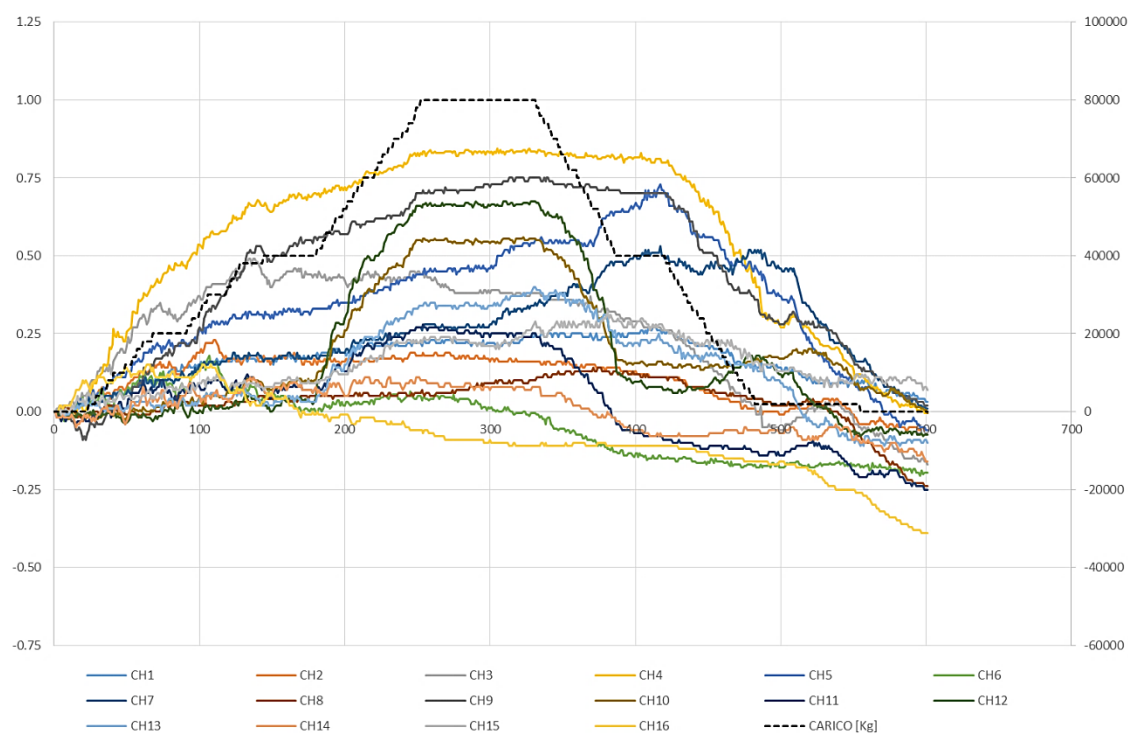


Figura 38 - Curva Carico - Spostamento della Prova G1PC2 Depurata dell'Effetto Termico

40

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
Max	0.27	0.23	0.49	0.85	0.73	0.18	0.53	#
Res	0.03	-0.06	-0.17	-0.01	-0.06	-0.20	0.01	#

	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16
Max	0.75	0.56	0.28	0.68	0.40	0.11	0.32	#
Res	0.02	-0.01	-0.25	-0.08	-0.10	-0.16	0.07	#

	CH17	CH18	CH19
Max	0.45	0.23	#
Res	-0.07	-0.31	#

Tabella 6.2 - Frecce Massime e Residue della Prova G1PC2

6.3.3 RISULTATI GUASILA II

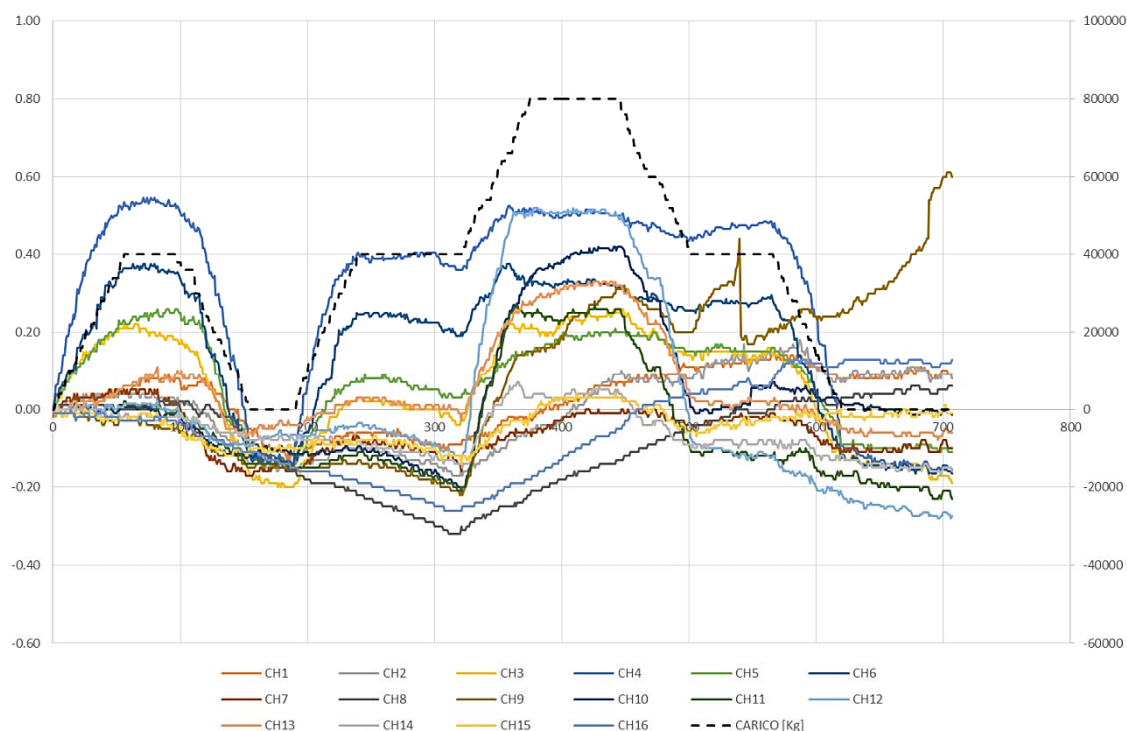


Figura 39 - Curva Carico - Spostamento della Prova G2PC1-G2PC2 Depurata dell'Effetto Termico

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
Max	0.09	0.05	0.22	0.55	0.26	0.38	0.05	#
Res	-0.13	-0.15	-0.19	-0.10	-0.14	-0.13	-0.16	#

	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16
Max	0.01	0.01	0.02	0.02	0.11	0.01	0.00	#
Res	-0.13	-0.11	-0.14	-0.06	-0.03	-0.08	-0.11	#

	CH17	CH18	CH19
Max	0.02	0.37	#
Res	-0.05	-0.16	#

Tabella 6.3 - Frecce Massime e Residue della Prova G2PC1

	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
MAX	0.14	0.18	0.26	0.53	0.21	0.38	0.00	#
RES	0.22	0.23	0.00	-0.06	0.03	-0.04	0.06	#

	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16
MAX	0.61	0.42	0.27	0.52	0.33	0.07	0.04	#
RES	0.75	0.10	-0.08	-0.21	-0.02	-0.08	0.10	#

Tabella 6.4 - Frecce Massime e Residue della Prova G2PC2

7. MESSA IN LUCE DELLE FONDAZIONI

Gli scavi per la messa a giorno delle fondazioni sono stati eseguiti tra il 24.07.2013 ed il 26.07.2013.

Sono stati eseguiti N.8 scavi attraverso mini escavatore JBC (Figura 40).

Terminato lo scavo è stato eseguito il rilievo fotografico e la misura delle dimensioni delle fondazioni (Figura 41 - 42).

Successivamente è stato eseguito il rilievo pacometrico finalizzato all'estrazione dei campioni di calcestruzzo.

Sono stati eseguiti N.6 carotaggi distribuiti in N.2 in ciascuno dei ponti canale Guasila I e Guasila II e N.1 campione in ciascuno dei ponti canale Segariu e Selegas.

L'attività di messa in luce delle fondazioni, il successivo rilievo delle strutture, il carotaggio e prelievo dei campioni di calcestruzzo sono incluse nei Report Guasila I, Guasila II, Segariu e Selegas.



Figura 40 - Immagine della Fase di Scavo per la Messa in Luce delle Fondazioni sul Ponte Canale Segariu



Figura 41 - Immagine della Fondazione del Ponte Canale Segariu

44



Figura 42 - Immagine del Rilievo della Fondazione del Ponte Canale Segariu

8. CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

8.1 PROVE ULTRASONICHE

8.1.1 IL METODO AD ULTRASUONI

Il metodo ad ultrasuoni sfrutta la propagazione di onde elastiche caratterizzate da frequenze maggiori rispetto a quelle percepibili dall'orecchio umano.

La frequenza utilizzate sono normalmente comprese tra 20 e 200 KHz. Il metodo si basa sull'analisi del segnale ricevuto per la determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni attraverso il materiale. La grandezza misurata è il tempo di ritardo degli impulsi ultrasonici, detto anche tempo di volo TOF (Time of Flight), impiegato a percorrere la distanza tra la sonda emittente e la sonda ricevente tra punti di rilievo sul materiale indagato.

Il parametro ricavato è la velocità apparente di propagazione delle onde (P o S), misurata in m/s.

Lo strumento ad ultrasuoni per il calcestruzzo è sostanzialmente costituito da:

- Dispositivo Emittitore di Impulsi, che genera impulsi di vibrazioni meccaniche in sincronismo con un segnale elettrico;
- Regolatore di ampiezza e durata dell'impulso;
- Dispositivo Ricevitore, che trasforma le vibrazioni meccaniche in segnali elettrici;
- Dispositivo di Amplificazione del Segnale;
- Dispositivo di Misura, che rileva l'intervallo di tempo fra istante di emissione e ricezione dell'impulso;

45

L'impulso di vibrazione che perviene alla sonda ricevente, trasformato in un segnale elettrico, opportunamente amplificato, viene visualizzato sull'oscilloscopio e rappresentato in diagrammi tempi/ampiezze.

I principali fattori che influenzano il metodo ad ultrasuoni applicato allo studio del calcestruzzo sono:

- Aggregati. Tipo, porosità e densità. E' dimostrato come l'incremento del volume degli aggregati incrementa la velocità di propagazione. Essa dipende inoltre dal rapporto cemento-aggregato e dal tipo di
- Entità del carico. Entro i limiti del carico di rottura la velocità aumenta all'aumentare del carico;
- Età del calcestruzzo. La velocità di propagazione aumenta con la maturazione.
- Condizione della superficie del calcestruzzo: liscia, rugosa, etc;
- Forma e dimensione del campione. La velocità degli impulsi può essere sensibilmente influenzata dalle dimensioni trasversali dell'elemento in esame, rispetto alla direzione di propagazione.

Per una frequenza di trasmissione di 50 KHz sono raccomandabili valori rispettivamente compresi tra un minimo di 80 mm e lunghezza attraversata di 100 mm e 150 mm per calcestruzzi con inerti di diametro massimo di 30 mm e 45 mm. Al di sotto dei valori indicati la velocità si riduce.;

- Lunghezza del percorso. Esiste una dipendenza nei casi di percorsi molto brevi, dovuta alla natura eterogenea del calcestruzzo. L'intervallo di lunghezze di percorso è limitato:
 - a) Inferiormente, dall'influenza che le condizioni di rugosità superficiale, le caratteristiche fisiche del materiale (per esempio porosità), e soprattutto la composizione (distribuzione granulometrica degli aggregati) possono avere sulle misure. Di conseguenza vengono raccomandate le seguenti distanze minime di misura: 100 mm per calcestruzzo in cui la dimensione massima dell'aggregato è < di 30 mm e 150 mm per calcestruzzo in cui la dimensione massima dell'aggregato è < 45 mm;
 - b) Superiormente, dalla variazione subita dal segnale in ampiezza ed in frequenza. Percorsi più lunghi possono essere indagati facendo uso di trasduttori con frequenze naturali di vibrazioni basse (10 a 20 KHz, e talvolta anche minori), per minimizzare l'assorbimento del segnale nel calcestruzzo. L'uso di sonde con frequenze più elevate (~ 50 KHz) permette, su percorsi brevi, di ottenere misure di tempo più accurate.
 - Presenza di armature. In prossimità di barre di armatura la velocità potrebbe risultare maggiore poiché l'impulso potrebbe essersi in parte propagato nelle barre. La velocità degli ultrasuoni nell'acciaio è infatti maggiore da 1,4 a 1,7 volte rispetto a quella del calcestruzzo. La diminuzione del tempo di propagazione dipende dalla vicinanza delle barre di armatura rispetto all'asse congiungente i centri dei trasduttori, dalle dimensioni e dal numero delle barre di armatura, dal loro orientamento rispetto all'asse congiungente i centri dei trasduttori
- Per quanto possibile è pertanto opportuno evitare che il tratto interessato dalla misura sia attraversato dalle barre di armatura

8.1.2 INDAGINI ESEGUITE

Le prove ultrasoniche sono state eseguite nei ponti canale Guasila I, Guasila II, Segariu e Selegas tra il 30.07.2013 e il 05.02.2014. Le prove ultrasoniche sono state eseguite ai sensi della norma UNI EN 12504-4:2005.

Le prove sono state eseguite sia sui campioni cilindrici di calcestruzzo estratti durante le fasi di carotaggio, sia in situ nei vari elementi strutturali indagati pareti, solai, travi, pilastri. Lo strumento utilizzato è il PunditLab+ della Proceq con trasduttori di frequenza a 54 kHz e superficie di contatto di 78.5 cm² (Figura 43 - 44).



Figura 43 - Strumento ad Ultrasuoni. Unità di Controllo e Laptop



Figura 44 - Strumento ad Ultrasuoni. Trasduttori

Per ragioni puramente logistiche è stato ovviamente impossibile eseguire sempre la medesima tipologia di prova.

In particolare le prove ultrasoniche sono state eseguite attraverso:

- Metodo Diretto, nei campioni di calcestruzzo prelevati e in alcuni pilastri;
- Metodo Indiretto, nelle superfici delle pareti, solai, travi e nei pilastri;

E' risultata pertanto una certa eterogeneità nella distribuzione dei valori di velocità dovuta al differente metodo applicato. Al fine di una maggiore qualità del risultato, le prove sono state incrementate e laddove possibile, sono stati applicati nel medesimo punto più metodi di misura.

Sono state inoltre eseguite misure aggiuntive di tipo Semi Diretto.

Ciò ha consentito successive elaborazioni statistiche per la stima delle resistenze.

Sono di seguito riportate tabelle di sintesi delle prove ultrasoniche eseguite.

Ponte Canale Guasila I					
Elemento	Metodo	Codice Prova	Elemento	Metodo	Codice Prova
Pilastro	Diretto	G1/BC1	Solaio	Indiretto	G1U11_SOL
Trave	Diretto	G1/BC2	Parete	Indiretto	G1U12_PAR
Pilastro	Diretto	G1/BC3	Solaio	Indiretto	G1U13_SOL
Pilastro	Diretto	G1/BC4	Solaio	Semi Diretto	G1U13_SD
Trave	Diretto	G1/BC5	Solaio	Indiretto	G1U14_SOL
Pilastro	Diretto	G1/BC6	Parete	Indiretto	G1U15_PAR
Trave	Diretto	G1/BC7			
Fondazione	Diretto	G1F1			
Fondazione	Diretto	G1F2	Passerella	Semi Diretto	PASG1U1_PAR
Parete	Indiretto	G1U1_PAR	Passerella	Semi Diretto	PASG1U2_PAR
Parete	Indiretto	G1U2_PAR	Passerella	Semi Diretto	PASG1U3_PAR
Parete	Indiretto	G1U3_PAR	Solaio	Semi Diretto	G1U4_SD
Solaio	Indiretto	G1U4_SOL	Solaio	Semi Diretto	G1U8_SD
Solaio	Indiretto	G1U5_SOL	Solaio	Semi Diretto	G1U10_SD
Solaio	Indiretto	G1U6_SOL			
Solaio	Indiretto	G1U7_SOL			
Solaio	Indiretto	G1U8_SOL			
Solaio	Indiretto	G1U9_SOL			
Solaio	Indiretto	G1U10_SOL			

48

Tabella 8.1 - Sintesi delle Prove Ultrasoniche nel Ponte Canale Guasila I. In giallo le prove aggiuntive eseguite.

Ponte Canale Guasila II					
Elemento	Metodo	Codice Prova	Elemento	Metodo	Codice Prova
Trave	Diretto	G2/BC1	Solaio	Indiretto	G2U11_SOL
Trave	Diretto	G2/BC2	Solaio	Indiretto	G2U12_SOL
Trave	Diretto	G2/BC3	Parete	Indiretto	G2U13_PAR
Pilastro	Diretto	G2/BC4	Solaio	Semi Diretto	G2U13_SD
Trave	Diretto	G2/BC5	Solaio	Indiretto	G2U14_SOL
Trave	Diretto	G2/BC6	Solaio	Indiretto	G2U15_SOL
Pilastro	Diretto	G2/BC7			
Fondazione	Diretto	G2F1			
Fondazione	Diretto	G2F2	Solaio	Semi Diretto	G2U1_SD
Parete	Indiretto	G2U1_PAR	Solaio	Semi Diretto	G2U4_SD
Solaio	Indiretto	G2U2_SOL	Solaio	Semi Diretto	G2U7_SD
Solaio	Indiretto	G2U3_SOL	Solaio	Semi Diretto	G2U10_SD
Parete	Indiretto	G2U4_PAR			
Solaio	Indiretto	G2U5_SOL			
Solaio	Indiretto	G2U6_SOL			
Parete	Indiretto	G2U7_PAR			
Solaio	Indiretto	G2U8_SOL			
Solaio	Indiretto	G2U9_SOL			
Parete	Indiretto	G2U10_PAR			

Tabella 8.2 - Sintesi delle Prove Ultrasoniche nel Ponte Canale Guasila II. In giallo le prove aggiuntive eseguite.

Ponte Canale Segariu					
Elemento	Metodo	Codice Prova	Elemento	Metodo	Codice Prova
Pilastro	Diretto	SR/BC1	Solaio	Semi Diretto	SRU1_SD
Pilastro	Diretto	SR/BC2	Solaio	Semi Diretto	SRU2_SD
Trave	Diretto	SR/BC3	Solaio	Semi Diretto	SRU4_SD
Fondazione	Diretto	SRF1	Solaio	Semi Diretto	SRU6_SD
Parete	Indiretto	SRU1_PAR			
Parete	Indiretto	SRU2_PAR			
Solaio	Indiretto	SRU3_SOL			
Parete	Indiretto	SRU4_PAR			
Solaio	Indiretto	SRU5_SOL			
Parete	Indiretto	SRU6_PAR			
Solaio	Indiretto	SRU7_SOL			
Solaio	Indiretto	SRU8_SOL			
Pilastro	Diretto	SRU9_PL			
Pilastro	Diretto	SRU10_PL			

Tabella 8.3 - Sintesi delle Prove Ultrasoniche nel Ponte Canale Segariu. In giallo le prove aggiuntive eseguite.

Ponte Canale Selegas					
Elemento	Metodo	Codice Prova	Elemento	Metodo	Codice Prova
Trave	Diretto	SL/BC1	Solaio	Semi Diretto	SLU1_SD
Pilastro	Diretto	SL/BC2	Solaio	Semi Diretto	SLU2_SD
Pilastro	Diretto	SL/BC3	Solaio	Semi Diretto	SLU4_SD
Fondazione	Diretto	SLF1	Solaio	Semi Diretto	SLU6_SD
Parete	Indiretto	SLU1_PAR			
Parete	Indiretto	SLU2_PAR			
Solaio	Indiretto	SLU3_SOL			
Parete	Indiretto	SLU4_PAR			
Solaio	Indiretto	SLU5_SOL			
Solaio	Indiretto	SLU6_SOL			
Solaio	Indiretto	SLU7_SOL			

Tabella 8.4 - Sintesi delle Prove Ultrasoniche nel Ponte Canale Selegas. In giallo le prove aggiuntive eseguite.

La superficie dell'elemento oggetto della prova è stata preliminarmente preparata con spatola metallica e pietra abrasiva e successivamente sottoposta alla verifica delle armature mediante pacometro. E' stato quindi tracciato un reticolo di punti di misura distanti il più possibile dalle armature individuate e aventi spaziatura costante, generalmente pari a 20 cm.

I dati sono stati acquisiti con controllo remoto su laptop, tensione di eccitazione pari a 500 V, guadagno 1000X, impulso continuo. Per l'accoppiamento ottimale trasduttore - calcestruzzo è stato utilizzato gel per ultrasuoni.

I dati acquisiti sono stati memorizzati sotto forma di valori numerici e registrazione della forma d'onda (Figura 45) direttamente su laptop, per la successiva analisi del segnale.

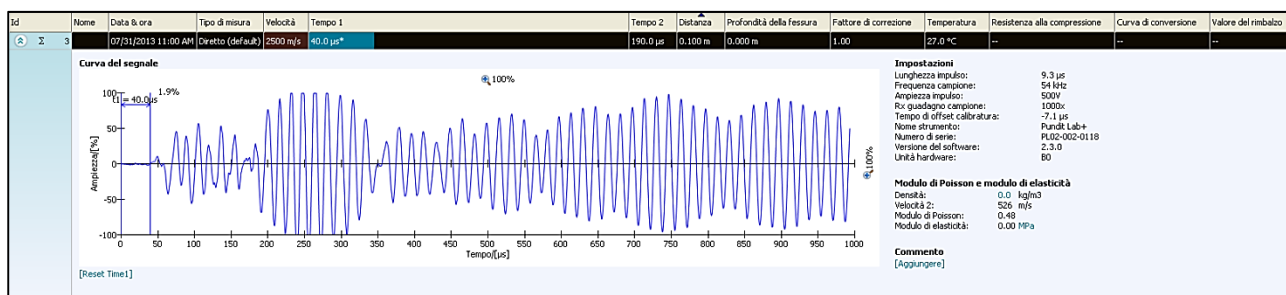


Figura 45 - Registrazione delle Misure ad Ultrasuoni e Forma d'Onda

8.1.3 ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI

L'elaborazione dei dati è stata eseguita attraverso il software Pundit Link. L'elaborazione dei dati ha visto essenzialmente l'analisi e verifica delle forme d'onda registrate e il picking manuale dei tempi, laddove ritenuto necessario. Per le prove indirette i dati sono stati resi su grafico e interpolati con retta di regressione per la stima della velocità.

I risultati sono illustrati nei Report di Prova Guasila I, Guasila II, Segariu e Selegas e nel Report Prove Combinate.

Di seguito sono invece riportati i risultati delle prove aggiuntive eseguite e non comprese nei report di prova.

Ponte Canale Guasila I									
Elemento	Metodo	Nome	Risultati						
			Offset	T1	V1	T2	V2	T3	V3
Passerella	Semi Diretto	PASG1U1_PAR	0.50	121.4	4119				
Passerella	Semi Diretto	PASG1U1_PAR	0.424	102.9	4121	105.3	4027		
Passerella	Semi Diretto	PASG1U2_PAR	0.50	127.4	3925				
Passerella	Semi Diretto	PASG1U3_PAR	0.60	130.5	4598				
Solaio	Semi Diretto	G1U4_SOL	0.447	99.7	4483	106.9	4181	99.5	4492
Solaio	Semi Diretto	G1U8_SOL	0.447	100.1	4463				
Solaio	Semi Diretto	G1U10_SOL	0.431	98.9	4358				

51

Tabella 8.5 - Risultati Prove Aggiuntive sul Ponte Canale Guasila I

Ponte Canale Guasila II									
Elemento	Metodo	Nome	Risultati						
			Offset	T1	V1	T2	V2	T3	V3
Solaio	Semi Diretto	G2U1_SD	0.604	145.9	4140	142.3	4245	143.9	4197
Solaio	Semi Diretto	G2U4_SD	0.547	139.2	3930	122.1	4480	123.2	4440
Solaio	Semi Diretto	G2U7_SD	0.657	168.3	3904	168	3911	166.9	3936
Solaio	Semi Diretto	G2U10_SD	0.690	176.5	3909	163	4233	160	4313

Tabella 8.6 - Risultati Prove Aggiuntive sul Ponte Canale Guasila II

Ponte Canale Segariu									
Elemento	Metodo	Nome	Risultati						
			Offset	T1	V1	T2	V2	T3	V3
Solaio	Semi Diretto	SRU1_SD	0.743	183.1	4058	171.9	4322	167.2	4444
Solaio	Semi Diretto	SRU2_SD	0.583	132.8	4390	132.9	4387	129.2	4513
Solaio	Semi Diretto	SRU4_SD	0.634	140.7	4506	139.4	4548	139.6	4542
Solaio	Semi Diretto	SRU6_SD	0.628	147.5	4258	147.7	4252	149.3	4206

Tabella 8.7 - Risultati Prove Aggiuntive sul Ponte Canale Segariu

Ponte Canale Segariu									
Elemento	Metodo	Nome	Risultati						
			Offset	T1	V1	T2	V2	T3	V3
Solaio	Semi Diretto	SLU1_SD	0.60	130.6	4594	130.1	4612	131.6	4559
Solaio	Semi Diretto	SLU2_SD	0.531	113.4	4683	113.1	4695	113.1	4695
Solaio	Semi Diretto	SLU4_SD	0.583	121.1	4814	122.1	4775	121.7	4790
Solaio	Semi Diretto	SLU6_SD	0.447	100.3	4457	99.9	4474	99.9	4474

Tabella 8.8 - Risultati Prove Aggiuntive sul Ponte Canale Selegas

8.2 PROVE SCLEROMETRICHE

8.2.1 IL METODO SCLEROMETRICO

Nel metodo sclerometrico una massa di peso noto viene scagliata, attraverso una potente molla, contro un percussore a contatto con la superficie di calcestruzzo da esaminare. Il percussore, per effetto della reazione fornita dalla superficie del calcestruzzo, rimbalza e, contemporaneamente, muove un indice che scorre su una scala graduata.

Il valore raggiunto dall'indice sulla scala graduata viene chiamato Indice di Rimbalzo, il quale rappresenta una misura della durezza superficiale del calcestruzzo esaminato. La durezza superficiale può essere successivamente correlata, mediante relazioni empiriche o basate su metodi semiprobabilistici, alla resistenza a compressione del calcestruzzo.

La stima della resistenza avviene attraverso una correlazione che richiede necessariamente la determinazione di una curva sperimentale di taratura. La correlazione tra l'indice di rimbalzo I_m e la resistenza a compressione del calcestruzzo R_c è del tipo $R_c = A \times I_m^B$, dove A e B sono due parametri dipendenti dalle caratteristiche del calcestruzzo e I_m è l'indice medio di rimbalzo, calcolato come media degli indici di rimbalzo di tutte le misurazioni effettuate.

La stima della resistenza del calcestruzzo attraverso il metodo sclerometrico ha una accuratezza intorno al 15-20% ed è influenzata da vari fattori quali:

- Carbonatazione del calcestruzzo. Provoca un indurimento dello strato superficiale e determina una sovrastima anche del 50% del valore della resistenza a compressione;
- Contenuto di cemento. Elevati contenuti determinano maggiore deformabilità superficiale del calcestruzzo mentre, viceversa, per contenuti bassi il calcestruzzo risulta meno deformabile per effetto della resistenza offerta dagli aggregati;
- Età del calcestruzzo, a causa della maturazione del calcestruzzo e dell'esposizione agli agenti esterni, influenza notevolmente la durezza superficiale;
- Posizione all'interno della struttura del punto di misura, come ad esempio la quota del getto di calcestruzzo, influisce sulla stima della resistenza a causa della stratificazione della miscela che comporta un ingranamento degli inerti nelle zone più basse della struttura ed un incremento del rapporto acqua/cemento in quelle alte;
- Rapporto acqua/cemento. La stima della resistenza si riduce all'aumentare del rapporto;
- Superficie del calcestruzzo. Ad esempio, superfici dure realizzate attraverso casseri in materiale assorbente conducono ad una sovrastima;
- Tipo di aggregato e di cemento;
- Umidità del calcestruzzo. Si osservano riduzioni anche del 20% sulla resistenza tra un calcestruzzo umido rispetto ad uno asciutto.

8.2.2 INDAGINI ESEGUITE

Le prove sclerometriche sono state eseguite nei ponti canale Segariu e Selegas tra il 07.08.2013 e il 05.02.2014. Le prove sclerometriche sono state eseguite ai sensi della norma UNI EN 12504-2:2001.

Le prove sono state eseguite nei vari elementi strutturali indagati nelle pareti, nei solai, nelle travi e nei pilastri.

Lo strumento utilizzato è lo sclerometro GEI Concrete Boviar.

La superficie dell'elemento oggetto della prova è stata preliminarmente preparata con spatola metallica e pietra abrasiva e successivamente sottoposta alla verifica delle armature mediante pacometro. E' stato quindi tracciato il reticolo di punti di misura con maglia 2.50 x 2.50 cm per un totale di 36 punti di misura su ciascun punto di prova.

Viene di seguito riportato l'elenco delle prove eseguite.

Ponte Canale Segariu		Ponte Canale Selegas	
Elemento Strutturale	Codice Provino	Elemento Strutturale	Codice Provino
Parete	SRS1_PAR	Parete	SLS1_PAR
Parete	SRS2_PAR	Parete	SLS2_PAR
Solaio	SRS3_SOL	Solaio	SLS3_SOL
Pilastro	SRS4_PL	Trave	SLS4_TR
Trave	SRS5_TR	Pilastro	SLS5_PL
Pilastro	SRS6_PL	Parete	SLS6_PAR
Parete	SRS7_PAR	Solaio	SLS7_SOL
Solaio	SRS8_SOL	Parete	SLS8_PAR
Parete	SRS9_PAR	Solaio	SLS9_SOL
Solaio	SRS10_SOL	Pilastro	SLS10_PL
Pilastro	SRS11_PL	Solaio	SLS11_SOL
Solaio	SRS12_SOL		

54

Tabella 8.9 - Elenco delle Prove Sclerometriche Eseguite

Le prove SRS11_PL, SRS12_SOL e SLS11_SOL, indicate in giallo, sono aggiuntive rispetto alle prove previste.

8.2.3 RISULTATI

I risultati delle prove sclerometriche sono mostrati nei Report di Prova Segariu e Selegas e nel Report Prove Combinate.

8.3 PROVE PULL OUT

8.3.1 IL METODO PULL OUT

La prova Pull Out consiste nell'estrarre dal calcestruzzo della struttura indagata un tassello in acciaio con base allargata, pre o post inserito rispetto al getto, attraverso un martinetto cavo e ad uno stelo di estrazione in acciaio avvitato al tassello.

Il martinetto è collegato alla pompa e ad un manometro di precisione a doppio indice.

Dal valore di pressione letto sul manometro all'istante dell'estrazione del bullone, mediante una curva di taratura del sistema, si risale alla forza di estrazione e al valore della resistenza a compressione del calcestruzzo.

La curva di taratura esprime la relazione, ricavata sperimentalmente, tra la forza di estrazione e la resistenza a compressione del calcestruzzo. La correlazione è generalmente legata alla specifica configurazione di prova.

Un approccio più rigoroso suggerisce la determinazione della correlazione tra la forza necessaria all'estrazione del tassello con il valore della resistenza cubica determinata con prove di compressione su provini di calcestruzzo.

8.3.2 INDAGINI ESEGUITE

Le prove pull out sono state eseguite sui ponti canale Guasila I, Guasila II, Segariu e Selegas tra il 01.08.2013 e il 05.02.2014. 55

Le prove pull out sono state eseguite ai sensi della norma UNI EN 12504-3:2005.

Le prove sono state eseguite nelle pareti, nei solai, nelle travi e nei pilastri.

Lo strumento utilizzato è composto da:

- Martinetto oleodinamico in alluminio da 20T, con ritorno a molla;
- Pompa manuale dotata di manometro da 250 bar;
- Tubo da 2.50 m;
- Stelo di estrazione per tassello post inserito;
- Punta da trapano con campana svasatrice;
- Tasselli Fischer FZA M 10 14 x 40.

La superficie dell'elemento oggetto della prova è stata preliminarmente preparata con spatola metallica e pietra abrasiva e successivamente sottoposta alla verifica delle armature mediante pacometro. E' stato quindi tracciato il reticolo di punti di misura con distanze ≥ 25 cm e numero minimo di prove pari a 3.

Successivamente sono stati eseguiti i fori nei quali è stato inserito il tassello Fischer FZA M10 14 x 40.

Il foro è stato ripulito da detriti e polvere mediante una pompetta ad aria manuale.

Sono di seguito mostrate alcune immagini della fase di misura (Figure 46 - 49).



Figura 46 - Strumentazione per Prove Pull Out

56



Figura 47 - Prove Pull Out. Fase di Posizionamento dello Strumento



Figura 48 - Prove Pull Out. Posizionamento Martinetto e Stelo di Estrazione

57



Figura 49 - Prove Pull Out. Tasselli Estratti

Durante l'esecuzione delle prove pull out in alcuni punti di misura si è verificata la rottura dei tasselli.

La rottura è avvenuta sistematicamente per valori di pressione superiori a 150 bar e quasi esclusivamente nelle pareti e nei solai. Sono pertanto emersi due principali aspetti:

- Nei punti di rottura la pressione misurata si è rilevata superiore al carico di snervamento dei tasselli utilizzati;
- Le prove ultrasoniche e sclerometriche confortavano qualitativamente l'ipotesi di un miglioramento delle caratteristiche di resistenza del calcestruzzo nelle pareti e nei solai.

D'altra parte l'utilizzo di tasselli a resistenza superiore avrebbe comportato la necessità di una maggiore invasività sulla struttura e dilatazione dei tempi per l'approvvigionamento dei materiali. Al fine di confortare le ipotesi fatte si è optato pertanto per la sospensione delle prove pull out mancanti e la realizzazione di carotaggi nei punti prossimi alla rottura dei tasselli. Tale approccio ha inoltre consentito successive elaborazioni statistiche dei dati ricavati.

Sono di seguito riportate le prove pull out eseguite.

Ponte Canale Guasila I		Ponte Canale Guasila II	
Elemento Strutturale	Codice Provino	Elemento Strutturale	Codice Provino
Solaio	G1P1_SOL	Parete	G2P1_PAR
Pilastro	G1P2_PL	Solaio	G2P2_SOL
Parete	G1P3_PAR	Solaio	G2P3_SOL
Solaio	G1P4_SOL	Solaio	G2P4_SOL
Solaio	G1P5_SOL	Pilastro	G2P5_PL
Trave	G1P6_TR	Pilastro	G2P6_PL

58

Tabella 8.10 - Prove Pull Out Eseguite nei Ponti Canale Guasila I e Guasila II

Ponte Canale Selegas			
Elemento Strutturale	Codice Provino	Elemento Strutturale	Codice Provino
Parete	SLP1_PAR	Parete	SLP13_PAR
Parete	SLP2_PAR	Solaio	SLP14_SOL
Solaio	SLP3_SOL	Pilastro	SLP15_PL
Trave	SLP4_TR	Pilastro	SLP16_PL
Solaio	SLP5_SOL	Pilastro	SLP17_PL
Trave	SLP6_TR	Trave	SLP18_TR
Pilastro	SLP7_PL		
Pilastro	SLP8_PL		
Pilastro	SLP9_PL		
Pilastro	SLP10_PL		
Parete	SLP11_PAR		
Solaio	SLP12_SOL		

Tabella 8.11 - Prove Pull Out Eseguite nel Ponte Canale Selegas

Ponte Canale Segariu	
Elemento Strutturale	Codice Provino
Trave	SRP1_TR
Pilastro	SRP2_PL
Pilastro	SRP3_PL
Pilastro	SRP4_PL

Tabella 8.12 - Prove Pull Out Eseguite nel Ponte Canale Segariu

8.3.3 RISULTATI

I risultati delle prove pull out sono mostrati nei Report di Prova Guasila I, Guasila II, Segariu e Selegas e nel Report Prove Combinate.

9. RIPRISTINI

Le operazioni di ripristino del manufatto hanno riguardato:

- Saggi diretti per la verifica delle indagini pacometriche eseguite per la individuazione e mappatura delle armature;
- Carotaggi per il prelievo dei campioni di calcestruzzo;
- Estrazione delle barre di armatura;
- Indagini Pull-Out.

Le modalità attraverso le quali è stato eseguito il ripristino, i materiali utilizzati corredati di scheda tecnica sono illustrati nel Report Ripristino Strutturale.

Al fine di verificare la corretta esecuzione e la permanenza dell'efficacia del ripristino, il giorno 19 Febbraio 2014 è stato effettuato un sopralluogo tecnico congiunto tra la Geotech S.r.l. e l'ENAS. Durante il sopralluogo è stato analizzato il ripristino della barra di armatura e di alcuni carotaggi per la verifica della presenza di filature e lesioni.

E' stata eseguita la demolizione della malta e il controllo dello sviluppo in profondità delle lesioni.

E' stata inoltre verificata l'eventuale presenza di zone di scarsa adesione e di distacco della malta (Figura 50).

La verifica ha consentito di accertare l'assenza di zone di distacco e di appurare che lo sviluppo delle filature individuate, dovute probabilmente ad un lieve ritiro del materiale, è stato limitato entro pochi mm dalla superficie.

60



Figura 50 - Sopralluogo di Verifica dei Ripristini del Manufatto. Immagine della Verifica del Ripristino dell' Armatura e del Carotaggio

10. BIBLIOGRAFIA

- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale - Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive.
- D.M. 14 Gennaio 2008, Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni
- BS 1881:204 - Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters;
- Annan A. P., 2001. Ground Penetrating Radar Workshop Notes, Sensor & Software Inc.
- Daniels J. D. 2007. Ground Penetrating Radar, Published by The Institution of Engineering and Technology, London, U.K.
- UNI EN 12504-1:2009 - Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1: Carote - Prelievo, esame e prova di compressione;
- UNI 9944:1992 - Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo;
- UNI EN 12504-4 - Prove sul calcestruzzo nelle strutture Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici;
- UNI EN 12504-1 - Prove sul calcestruzzo nelle strutture Parte 2: Prove non distruttive - determinazione dell'indice sclerometrico;
- UNI EN 12504-3 - Prove sul calcestruzzo nelle strutture Parte 3: Determinazione della forza di estrazione.

Cagliari, 30 Giugno 2014

Il Tecnico

Ing. Francesco Loddo