



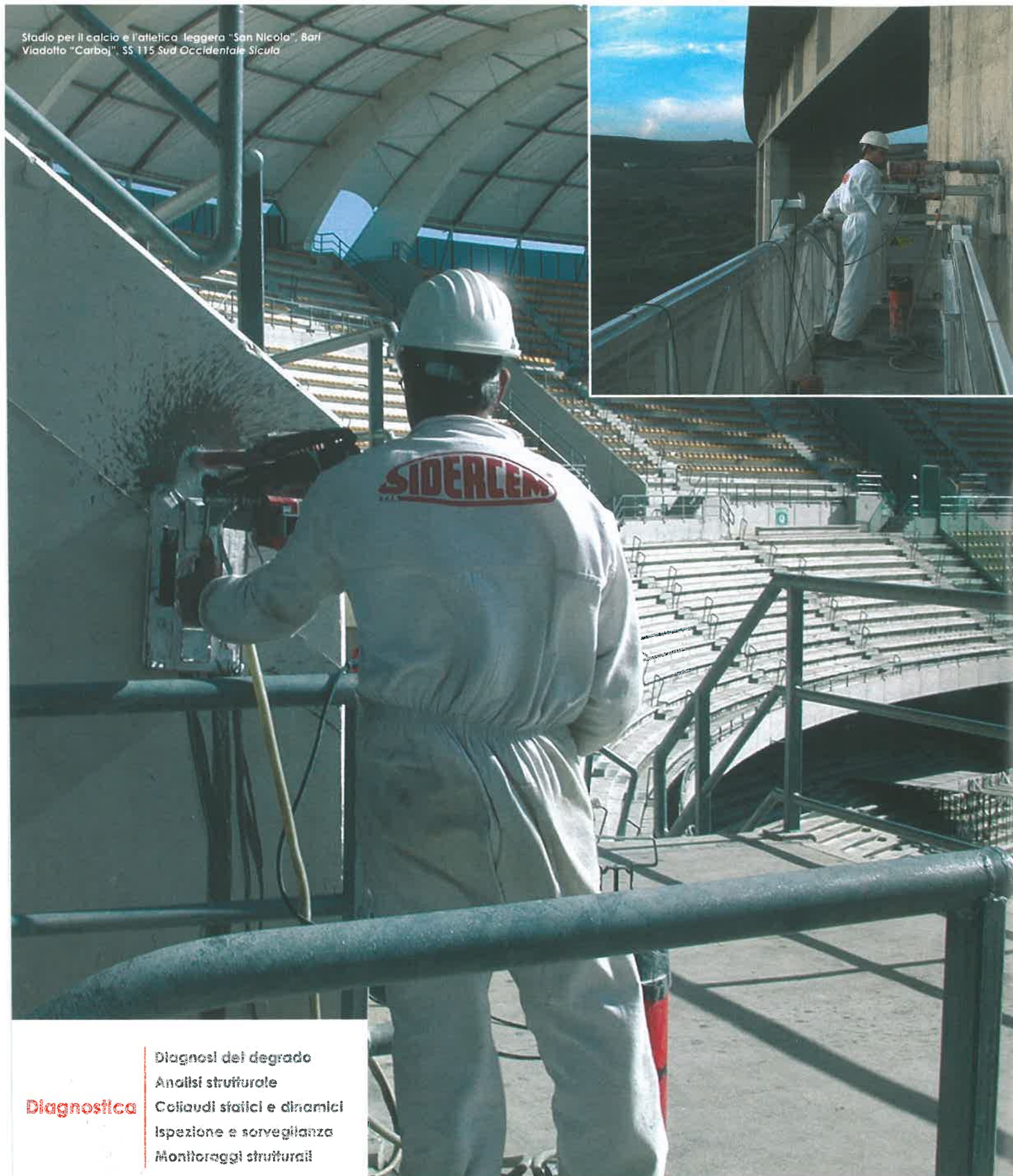
Estratto dalla rivista n° 64 luglio/agosto 2007

ANALISI E CORRELAZIONE DEI RISULTATI NELLE INDAGINI NON DISTRUTTIVE SU STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO PRECOMPRESSO

Vincenzo Venturi - Domenico Santacroce - Paolo Longo



Stadio per il calcio e l'atletica leggera "San Nicola", Bari
Viadotto "Carboj", SS 115 Sud Occidentale Sicula



Diagnostica

Diagnosi del degrado
Analisi strutturale
Collaudi statici e dinamici
Ispezione e sorveglianza
Monitoraggi strutturali

Da 25 anni al servizio della ricerca e della sperimentazione sui materiali da costruzione.

Laboratorio di Caltanissetta
C/da Calderaro (Z.I.) - C.P. 287
93100 Caltanissetta
tel. 0934 565012 PBX - fax 0934 575422
e-mail: sidercemcl@sidercem.it

Laboratorio di Misterbianco
Via Agnelli, 22 (Z.I.)
95045 Misterbianco (CT)
tel. 095 476942 PBX - fax 095 475003
e-mail: sidercemct@sidercem.it

SIDERCER
s.r.l.

Istituto di Ricerca e Sperimentazione
sui Materiali da Costruzione

www.sidercem.it

Una campagna di indagini di Sidercem Srl per acquisire un Livello di Conoscenza Accurata (LC3) indispensabile per l'identificazione strutturale di un viadotto e per l'eventuale progetto di adeguamento

ANALISI E CORRELAZIONE DEI RISULTATI NELLE INDAGINI NON DISTRUTTIVE SU STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO PRECOMPRESSO

Vincenzo Venturi* Domenico Santacroce** Paolo Longo***

La presente relazione prende origine da un'indagine sperimentale condotta su un viadotto autostradale con l'obiettivo di definire le caratteristiche prestazionali residue del manufatto e di consentire così all'Ente gestore la verifica dell'opera ai sensi dell'O.P.C.M. n° 3274.

Il viadotto

Il viadotto si sviluppa su due carreggiate rispettivamente a 20 e 22 campate, a sviluppo curvilineo, con lunghezza variabile delle campate compresa fra 34,5 e 45 m.

Ciascuna campata, con schema statico di semplice appoggio, è costituita da un impalcato distribuito su quattro travi in c.a.p. collaboranti lateralmente grazie alla precompressione trasversale della soletta e all'ulteriore presenza, rispettivamente, per la diversa tipologia di travi, di due o di tre serie di traversi; i carichi vengono trasferiti alle pile, del tipo a setti, mediante pulvini sui quali sono alloggiati gli apparecchi di appoggio.

In presenza di un'opera di tali dimensioni è stato necessario prevedere una campagna d'indagini, che permettesse di acquisire tutte le informazioni necessarie per raggiungere, come indicato nell'ordinanza O.P.C.M. n° 3274 del 2003, un Livello di Conoscenza Accurata (LC3) indispensabile per l'identificazione strutturale dell'opera e per l'eventuale progetto di adeguamento. Il livello di conoscenza richiesto riguarda la geometria della struttura, che può essere ottenuta mediante un rilievo topografico dal quale ricavare la corrispondenza tra l'opera realizzata e i disegni di progetto, lo sta-

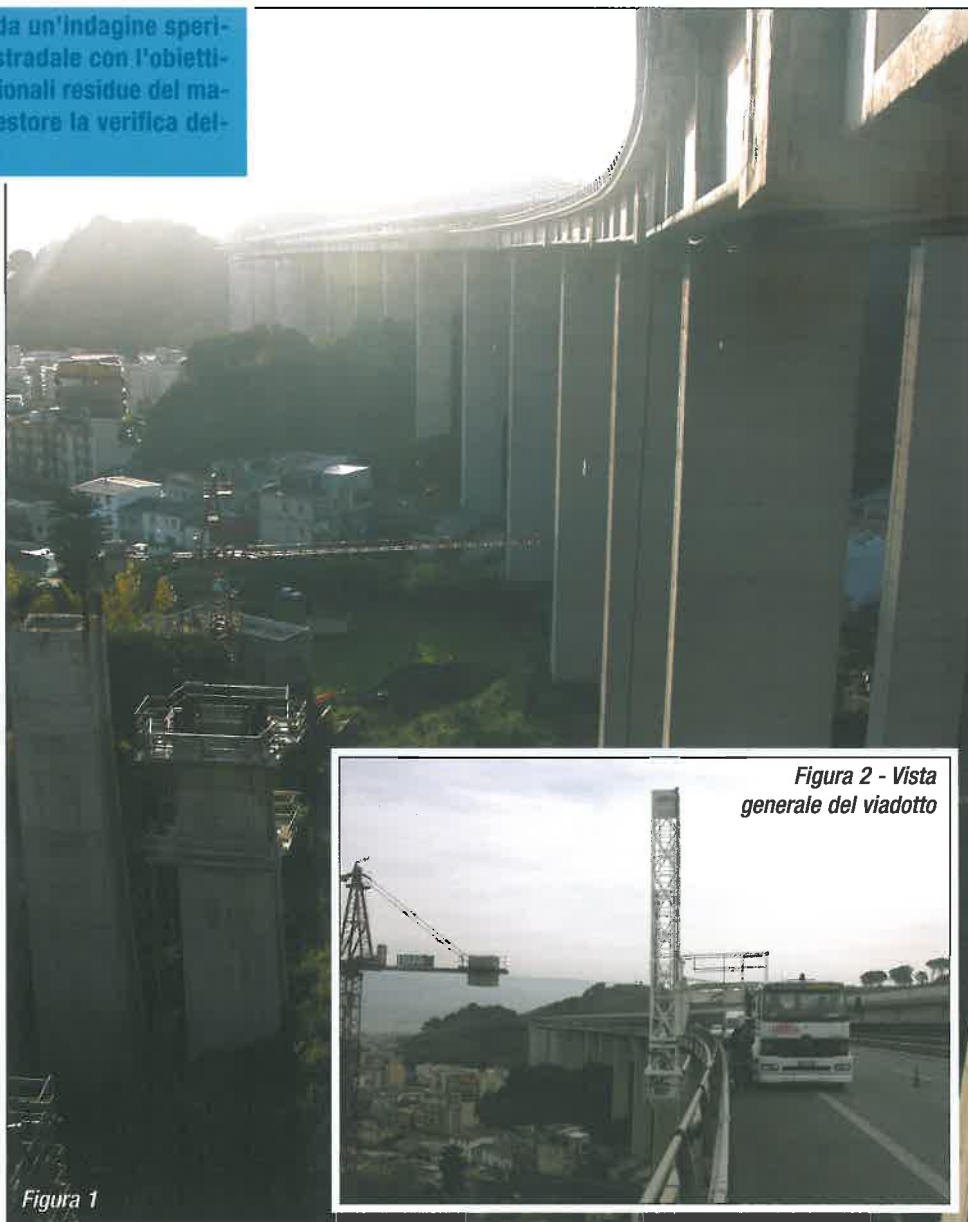


Figura 1



Figura 2 - Vista generale del viadotto

to di precompressione e la conformità al modello dinamico rispettivamente definibile mediante la tecnica dell'emissione acustica e impact echo e di monitoraggio dinamico delle frequenze proprie, e caratterizzazione della qualità dei materiali e dei fenomeni di degrado tramite l'esecuzione di un'esaustiva campagna di prove in situ.

In questo contesto, al fine di ottenere un numero statisticamente adeguato di dati sperimentali senza perturbare oltremodo la struttura, si è provveduto a correlare i risultati ottenuti dalle diverse tecniche di indagine non distruttive (pull-out, sclerometro, rilievi microsismici) con i valori ottenuti mediante le prove di compressione eseguite sulle carote, di certo maggiormente identificative del reale stato di consistenza dell'opera.

Nel seguito si illustrano i metodi impiegati nella determinazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo di ciascun elemento strutturale: travi, traversi, pulvini, pile, mediante il prelievo di campioni (carote) e l'esecuzione di prove non distruttive.

Le indagini sperimentali

La campagna di indagini in situ ha interessato quasi tutte le campate. Il prelievo di carote di calcestruzzo, di diametro variabile da 80 a 100 mm, è stato preceduto da una indagine magnetometrica che, oltre a evitare il taglio delle barre, ha consentito di ridurre il disturbo determinato da queste durante il prelievo stesso e ha permesso di definire la posizione e la tipologia dell'armatura presente.

Sono state prelevate complessivamente 19 carote dalle travi, dieci carote dai traversi, 14 carote dalle pile e tre carote dai pulvini, in zone di indagine distribuite su 20 campate appartenenti alle due carreggiate.

I campioni, prelevati in conformità alla Norma UNI EN 12390-1, sono stati ridotti in laboratorio e sottoposti a rettifica in maniera da rispettare le prescrizioni e le tolleranze previste dalla UNI EN 12390-1 con particolare riguardo al parallelismo tra le facce dei provini cilindrici e alla perpendicolarità tra le generatrici. Da ogni prelievo sono stati ricavati due provini, indicati come A e B, ricavati in sequenza nella direzione di prelievo rispetto alla superficie esterna del calcestruzzo.

Per ciascun provino è stata determinata la massa volumica secondo UNI EN 12390-7 e la resistenza a compressione secondo la UNI EN 12390-1. Si è inoltre proceduto alla determinazione del profilo di carbonatazione, in conformità alla UNI 9944, dalle quali sono state ottenute mediamente profondità di carbonatazione intorno a 30 mm.

L'esecuzione dei prelievi di conglomerato è stata integrata da una serie di indagini non distruttive o semidistruttive, delle quali viene nel seguito fornita una sintesi.

La prova di pull-out, eseguita secondo la Norma UNI 10157, consiste nel determinare la forza necessaria a estrarre, da un elemento di calcestruzzo, un inserto metallico di geometria e di caratteristiche meccaniche specifiche, che viene inserito, previa foratura, nell'elemento di calcestruzzo in esame. La peculiarità dell'inserto è data dal fatto che, essendo a espansione geometrica, si adatta alla cavità del foro senza indurre stati tensionali nel calcestruzzo.



Figura 4 - Il pull-out test

A seguito dell'estrazione dell'inserto con l'ausilio di un martinetto oleodinamico, dalla forza di estrazione F misurata si risale alla resistenza meccanica a compressione R_{mc} in base a una legge di correlazione lineare del tipo proveniente dalla curva di taratura del tassello utilizzato (formula sottostante).

$$R_{mc} = a \cdot F + b$$

Sono state eseguite complessivamente 44 prove di pull-out, equamente divise tra travi, traversi, pile e pulvini.

L'indagine sclerometrica in base alla Norma UNI EN 12504-2, consiste nel rilevare il rimbalzo di una massa battente mobile sulla superficie del calcestruzzo, assunta idealmente come avente una massa infinita (Figura 5).



Figura 3 - Le fasi di prelievo delle carote



Figura 5 - L'indagine sclerometrica



A seguito dell'urto, parte dell'energia cinetica iniziale viene assorbita dal materiale sotto forma di energia di deformazione plastica, mentre la restante parte viene restituita alla massa mobile, che rimbalza per un tratto proporzionale all'energia disponibile.

Prima della prova la superficie viene levigata meccanicamente e su una griglia con un passo pari a circa 150 mm e tale da ottenere 12 punti di misura, di questi si scarta il più alto e il più basso, accettando le misure con uno scostamento dal valore medio non superiore alle sei unità. Sono state eseguite 52 prove, equamente ripartite tra travi, traversi, pulvini e pile.

Sul calcestruzzo sono stati inoltre eseguiti dei rilievi microsismici in situ, secondo la UNI 9524: tale indagine ha lo scopo di determinare i tempi di propagazione di impulsi di vibrazione in strutture di calcestruzzo, considerando una o più coppie di punti tra loro.

Il parametro di controllo è la "velocità virtuale o apparente" di propagazione degli impulsi, intesa come rapporto tra distanza geometrica tra i punti di rilievo e tempo di transito rilevato.

Tale velocità è funzione delle caratteristiche elastiche del mezzo, quali modulo elastico e modulo di Poisson e dalla sua densità. La presenza di disomogeneità nel materiale, quali lesioni o cavità, altera la velocità di propagazione, assorbendo parzialmente, riflettendo o rifrangendo l'onda di propagazione che, così, risulta attenuata secondo determinate direzioni.

Nel caso del calcestruzzo, che non ha requisiti di omogeneità e di isotropia, è possibile rilevare con buona precisione le onde di pressione, che si propagano in direzione longitudinale. La velocità di propagazione, in presenza di un difetto all'interno del getto, subisce una diminuzione.

L'impulso di vibrazione longitudinale viene prodotto da un trasduttore piezoelettrico, messo a contatto sulla superficie del calcestruzzo tramite interposizione di un materiale di accoppiamento che garantisce la buona trasmissione delle onde microsismiche.

Nota la lunghezza del percorso L [m] nel calcestruzzo, l'impulso di vibrazione è convertito in un segnale elettrico da un secondo trasduttore, e un circuito calcola il tempo di transito T [ms]. Calcolando il rapporto tra i due parametri si ottiene la velocità di impulso V .

Nella campagna di indagini descritte sono stati eseguiti 52 rilievi microsismici, ripartiti tra travi, traversi e pulvini, adottando la tecnica di trasmissione indiretta; in tal caso il trasduttore emittente e quello ricevente sono posizionati sulla stessa superficie (Figura 6).



Figura 6 - I rilievi microsismici in situ (tecnica di trasmissione indiretta)

Nella fase preliminare, lo strumento di acquisizione viene sottoposto a verifica della taratura, interponendo tra le due sonde una barra di riferimento, avente tempo e velocità di propagazione note. In ciascuna zona di indagine, è stata presa in esame una superficie di 750 x 200 mm, tenendo in giusta considerazione la presenza di fessure, lesioni o irregolarità di varia natura.

L'interpretazione dei risultati

I risultati sperimentali, scaturiti dalle prove di compressione, sono stati analizzati seguendo l'approccio della Norma europea provvisoria prEN 13791:2003, con lo scopo di pervenire, dal valore a rottura ottenuto $R_{c,car}$ alla resistenza cubica in opera, o resistenza effettiva, $R_{c,cub}$, tramite la seguente relazione, valida nel caso di provini aventi un rapporto tra altezza e diametro pari a 1.

$$R_{c,cub,pot} = k_1 \cdot k_2 \cdot R_{c,car}$$

dove:

k_1 = fattore geometrico di correzione pari a 1, nel caso di provini con rapporto h/d unitario;

k_2 = coefficiente che tiene conto delle differenti condizioni di confezionamento, di compattazione e di stagionatura.

Entrambi i valori distinguono il calcestruzzo prelevato durante il getto nella forma di campioni cubici convenzionali dal conglomerato posto in opera [2], pari a $1/0,85 = 1,17$.

Sostituendo nella seconda formula si ottiene pertanto:

$$R_{c,cub,pot} = 1,17 \cdot R_{c,car}$$

In Tabella 1 si riepilogano i parametri statistici relativi agli elementi strutturali indagati.

Elemento strutturale	n° Campioni	$R_{c,cub,pot}$			
		minimo [N/mm ²]	massimo [N/mm ²]	media [N/mm ²]	σ [N/mm ²]
Travi	38	18,4	58,7	38,0	10,8
Traversi	20	17,1	58,0	35,9	10,5
Pile	28	19	63,5	35,9	11,3
Pulvini	6	17,3	37,6	26,5	7,2

Tabella 1 - I parametri statistici di resistenza cubica in opera ottenuti secondo l'approccio della prEN 13791:2003

I valori di resistenza ottenuti a seguito delle prove di rottura a compressione sono stati correlati ai risultati ottenuti dalle prove non distruttive, sulla base di un confronto tra i valori di resistenza alla compressione e i valori di resistenza determinati dalle prove non distruttive eseguite nella stessa zona di indagine.

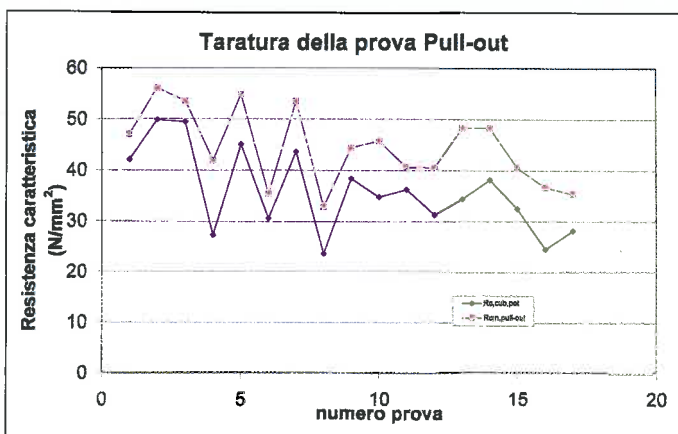


Figura 7 - I valori di resistenza meccanica ottenuti a seguito delle prove di pull-out e rottura a compressione

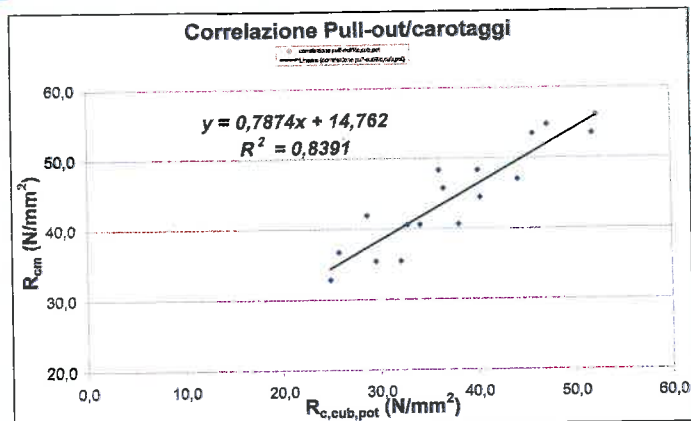


Figura 8 - La correlazione tra prove di pull-out e carotaggi

In Figura 7 si riporta l'andamento della resistenza R_{mc} estrapolata dalle prove di pull-out e i valori di resistenza cubica a compressione ricavati dai campioni cilindrici prelevati in situ.

Si evidenzia un andamento qualitativamente compatibile che unito alle specifiche della linea di tendenza associata ai valori di $R_{c,cub,pot}$ e R_{mc} (Figura 7) consente di assumere un coefficiente di correlazione k_3 pari a 0,840.

In tali condizioni è possibile risalire alla resistenza cubica potenziale, a partire dai valori ottenuti dal pull-out, in base alla formula sottostante.

$$R_{c,cub,pot} = k_3 \cdot R_{mc} = 0,840 \cdot R_{mc}$$

Lo stesso approccio è stato adottato nel caso delle prove sclerometriche; e vista la buona corrispondenza tra i valori di resistenza cubica a compressione e quelli di resistenza meccanica scaturita dalle battute sclerometriche, riportata in Figura 8, è stato possibile calcolare in ogni punto di indagine il rapporto tra i corrispondenti valori di resistenza ottenuti.

La media dei rapporti, pari a 0,801, è stata assunta come coefficiente di correlazione k_4 , al fine di estrapolare la resistenza cubica potenziale, sulla base dei valori di resistenza a compressione, estrapolati dalla curva di taratura dello sclerometro, sulla base della seguente equazione:

$$R_{c,cub,pot} = k_4 \cdot R_{c,scl} = 0,801 \cdot R_{c,scl}$$

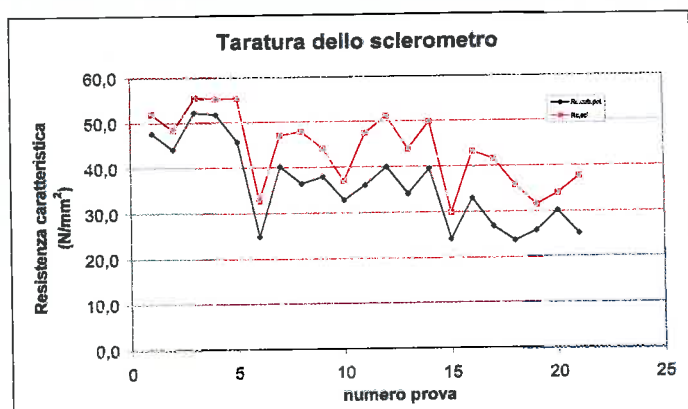


Figura 9 - L'andamento della resistenza cubica potenziale e della resistenza meccanica estrapolata dalle battute sclerometriche

In tali condizioni, è stato possibile definire una popolazione significativa di dati, che ha permesso di determinare la resistenza cubica in opera per tutte le zone di indagine investigate, comprendendo anche le parti strutturali non direttamente interessate dall'esecuzione di prelievi di calcestruzzo.

Per l'analisi dei dati è stato adottato un approccio statistico. In Figura 10 si riporta la distribuzione statistica, espressa in termini di frequenza percentuale, della resistenza cubica potenziale dei diversi elementi strutturali indagati, includendo anche i risultati relativi ai basamenti delle pile, per le quali sono state eseguite esclusivamente prove di rottura a compressione.

Nella Tabella 2 è stato posto in evidenza che gli elementi dell'impalcato, travi e traversi, hanno una resistenza cubica media tendenzialmente superiore agli elementi costituenti le pile tranne che nel caso delle basi, per le quali la maggiore dispersione, sottolineata dall'elevato intervallo di confidenza, si correla all'esiguo numero di campioni costituenti la popolazione. Le distribuzioni sono risultate pressoché simmetriche per travi, per traversi e per pulvini, mentre nel caso dei fusti e dei basamenti delle pile, è stato registrato un addensamento verso valori più positivi della media. Per quanto concerne i rilievi microscismici in situ, nelle Figure 11A e 11B si riportano i diagrammi, che riportano la frequenza sperimentale dei dati sperimentali, suddivise per diverse classi di velocità di propagazione, per le due carreggiate.

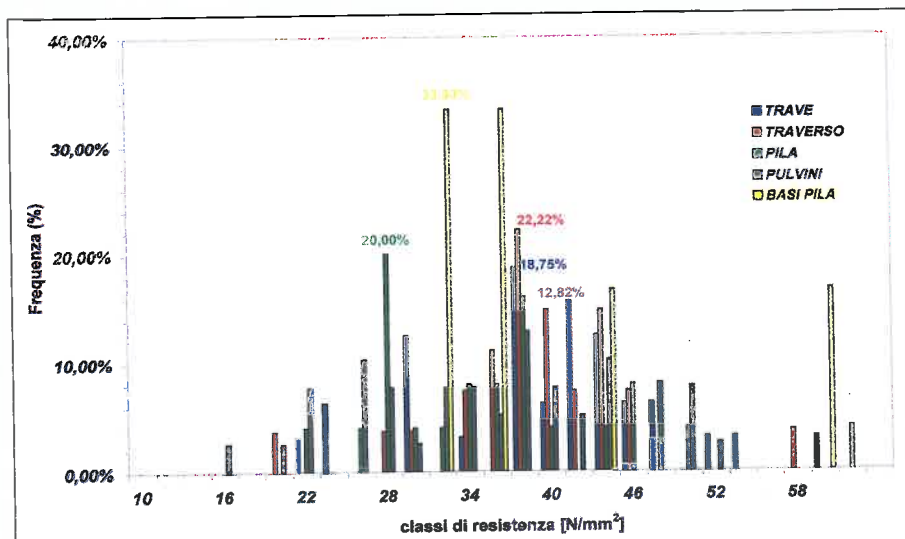


Figura 10 - La distribuzione statistica degli elementi strutturali indagati

	Elemento strutturale				
	Trave	Traverso	Pila	Pulvini	Basi Pila
Popolazione	32	27	25	39	6
Media	38,6	38	36,1	34	39,1
Errore standard	1,5	1,3	1,9	1,5	4,5
Mediana	40	38	35,8	34,4	35,6
Moda	36,6	37	27,7	31,9	/
Deviazione standard	8,7	7	9,3	9,1	11,1
Varianza campionaria	75,9	49,2	86,1	83,1	123,8
Curtosi	0,2	3,1	0,9	-0,5	3
Asimmetria	-0,2	-0,1	0,8	-0,1	1,7
Minimo	20,1	18,8	20,3	14,6	30,2
Massimo	58,3	57,9	61,7	51,8	60
Livello di confidenza (95,0%)	3,1	2,8	3,8	3	11,7

Tabella 2 - L'analisi statistica della resistenza cubica potenziale inerente ai differenti elementi strutturali

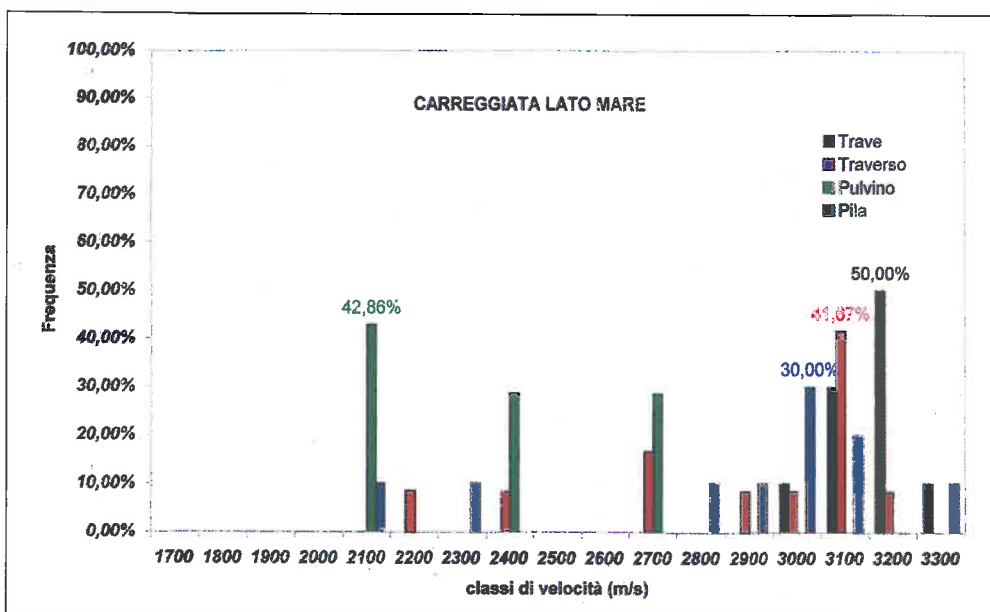
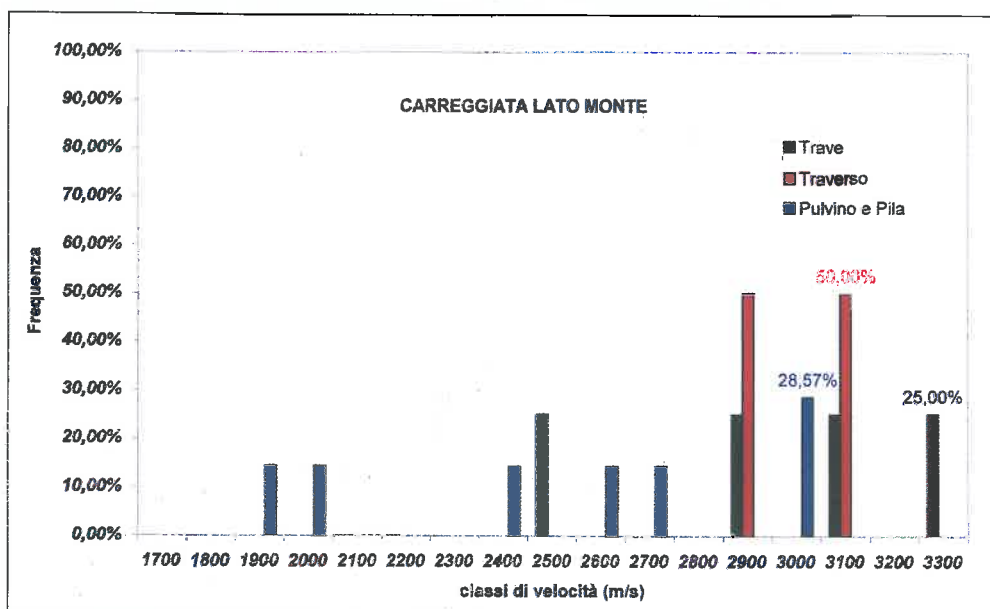


Figure 11A e 11B - La distribuzione statistica delle velocità di impulso d'onda vibrazionale per le due carreggiate

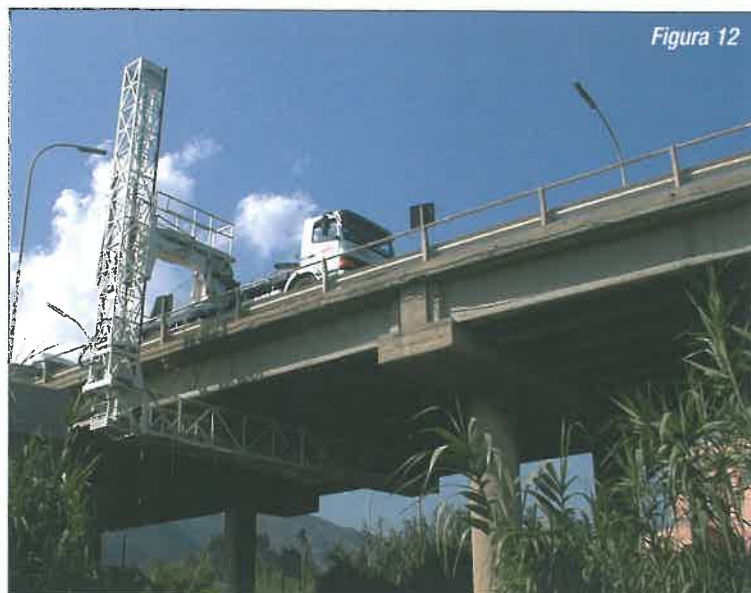


Figura 12

Si osserva una buona omogeneità nel caso di travi e di traversi, mentre i dati relativi alle pile e ai pulvini risultano più disomogenei; ciò si deve alla maggior frequenza di irregolarità sulla superficie del calcestruzzo, quali fessure o lesioni, che influenzano l'esito della prova.

Conclusioni

La campagna di indagini in situ e in laboratorio della quale è stata fornita una sintesi, ha permesso una rappresentazione coerente delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo degli elementi strutturali di un viadotto autostradale.

A causa delle caratteristiche del manufatto, ai problemi di carattere strettamente economico e di accessibilità, al disturbo e l'indebolimento, che i prelievi possono determinare sulla sezione dell'opera, si è provveduto a definire una campagna di indagini sperimentali che consentisse la determinazione della resistenza attuale del calcestruzzo riducendo il numero di prelievi.

Per tale ragione è stato correlato l'esito dei prelievi ai risultati di tecniche di indagine non invasive, quali pull-out, sclerometri e rilievi micro-sismici in situ, che hanno fornito, nei punti di indagine interessati, una buona corrispondenza permettendo, grazie ai coefficienti di correlazione determinati, di ottenere una rappresentazione generalizzata della resistenza alla compressione degli elementi strutturali oggetto delle indagini.

* Ingegnere e Direttore Tecnico di Sidercem Srl - Istituto di Ricerca e Sperimentazione

** Ingegnere e Responsabile per la Diagnosi Strutturale di Sidercem Srl - Istituto di Ricerca e Sperimentazione

*** Ingegnere e Direttore di Laboratorio di Sidercem Srl - Istituto di Ricerca e Sperimentazione

BIBLIOGRAFIA

- [1]. O.P.C.M. n° 3274, 20/03/2003.
- [2]. D. Dewar, J.D. Llewellyn, J.L. Collins, W.E. Murphy, M. Plowman, P.A. Warren - "Concrete Core Testing for strength", Concrete Society Technical Report n° 11".
- [3]. W. M. Malhotra - "Testing hardened concrete: non destructive methods", The Iowa State University Press and American Concrete Institute.
- [4]. E. Proverbio, G. Laganà, V. Venturi - "Il collasso del ponte S. Stefano: un esempio estremo di degrado delle strutture in calcestruzzo armato pre-compresso" - L'Edilizia Giugno/Luglio 2001 n° 3 - Anno XV.



Istituto di Ricerca e Sperimentazione
sui Materiali da Costruzione

Area A (L.1086/71 - conc. n. 55274 del 30/10/2006 - conc. n. 54440 del 11/10/2004)

- Leganti Idraulici
- Calcestruzzi
- Laterizi
- Acciai
- Procedimenti di saldatura

Area B (D.P.R. n. 246/93 - conc. n. 52597 del 11/10/2004 - conc. n. 52603 del 11/10/2004)

- Geotecnica
- Meccanica delle terre
- Meccanica delle rocce
- Indagini geognostiche
- Monitoraggi e prove in situ
- Indagini geofisiche e georadar

Area C

Diagnostica

- Diagnosi del degrado
- Analisi strutturale
- Collaudi statici e dinamici
- Ispezione e sorveglianza
- Monitoraggi strutturali

Strade

- Conglomerati bituminosi
- Bitumi
- Controlli in corso d'opera

Ambiente

- Chimica
- Mineralogia e Petrografia
- Analisi ambientali
- Ricerca amianto

Topografia

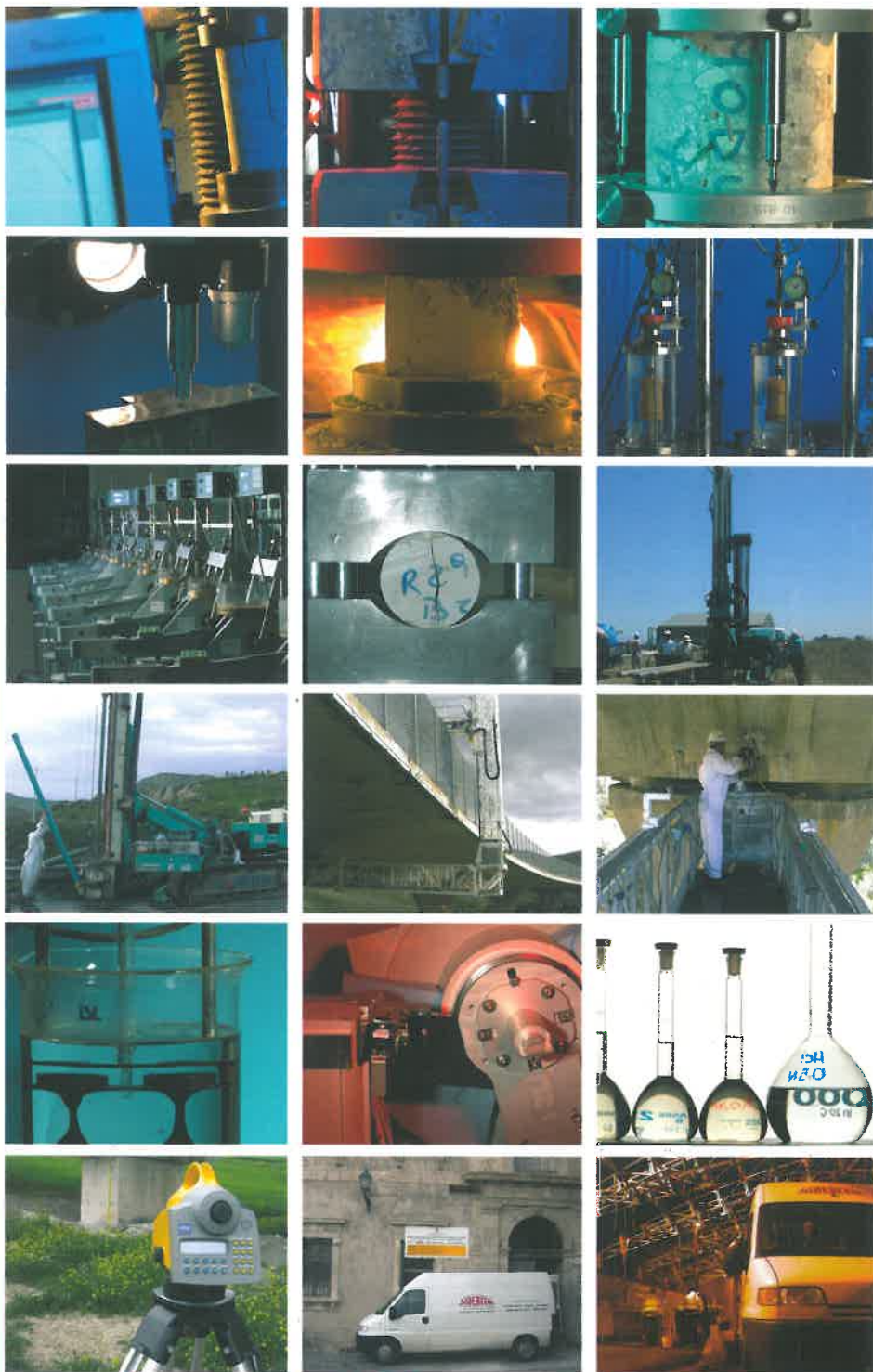
- Rilievo
- Fotogrammetria terrestre ed aerea
- 3D laser scanner

Metrologia

- Forze
- Lunghezze-Spostamenti
- Pressioni

Ricerca e Sviluppo

- Seminari
- Convegni
- Progetti di Ricerca
- Didattica e Formazione



www.sidercem.it

Laboratorio Caltanissetta
C/da Calderaro (Z.I.) - C.P. 287
93100 Caltanissetta
tel. 0934 565012 PBX - fax 0934 575422
e-mail: sidercemcl@sidercem.it

Laboratorio di Misterbianco
Via Agnelli, 22 (Z.I.)
95045 Misterbianco (CT)
tel. 095 476942 PBX - fax 095 475003
e-mail: sidercemct@sidercem.it



Ministero dell'Università e della Ricerca



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Presidenza del Consiglio Superiore
Servizio Tecnico Centrale



Ministero della Sanità
Ist. S.N.O. per la Prevenzione
e la Sicurezza sul Lavoro (ISPESL)



Ministero della Sanità
Dipartimento della Prevenzione - C.M. 07/07/97
Ambito Ambientale (Ambito MOCE - DRX - SEMI)



Istituto
Italiano
Saldatura