ALIG – Associazione di Laboratori d'Ingegneria e Geotecnica

I LABORATORI AUTORIZZATI PER LE PROVE SULLE COSTRUZIONI ESISTENTI

31 Maggio 2023, Roma, Fiera di Roma

Pianificazione ed esecuzione delle indagini su ponti e viadotti
Criticità teoriche e pratiche

Prof. Ing. Alessio Lupoi

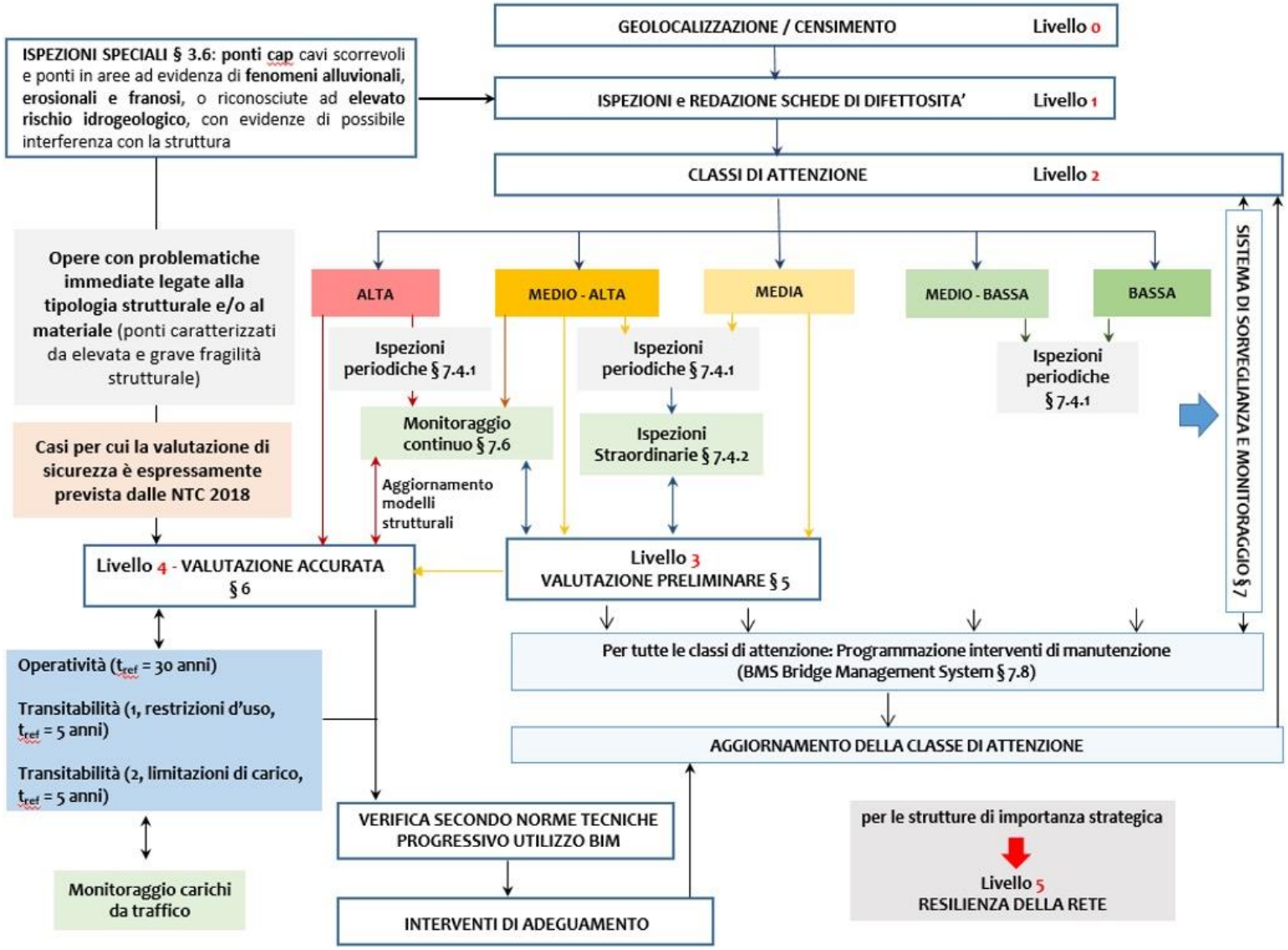
Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università La Sapienza, Roma.

SPERI Società di Ingegneria

Università La Sapienza, Roma

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Quadro Normativo



Indagini per la caratterizzazione dei dettagli costruttivi e dei materiali

Le «Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti» (LG20) prescrivono che per i ponti con *classe di attenzione **Alta*** è opportuno l'immediato avvio di ***VALUTAZIONI ACCURATE***, sia in termini di valutazioni di sicurezza sia di approfondimenti sulle caratteristiche geotecniche e/o strutturali. →

È in questo caso che la ***CONOSCENZA DEL PONTE*** rappresenta un elemento indispensabile, sia per la valutazione della sicurezza attuale, sia per la definizione degli interventi e la previsione della loro efficacia (§6.2 LG20). →

Tra le attività che competono al percorso conoscitivo sono presenti le *indagini finalizzate alla caratterizzazione dei dettagli costruttivi e dei materiali*. Quest'ultime si pianificano ed eseguono sulla base dei risultati ottenuti dalle precedenti attività di analisi storico-critica e di rilievo, mediante *saggi in situ* sugli elementi costruttivi e *indagini in situ e/o in laboratorio* sui materiali.

Criticità…

Come esposto al paragrafo §6.2.2, le LG20 non specificano nel dettaglio *né il quantitativo* delle indagini da eseguire *né le modalità*, dando indicazione in funzione del tipo di opera analizzata.

«.. *Le tabelle presenti in Circolare non sono evidentemente applicabili ai ponti esistenti. Il numero complessivo e la localizzazione delle indagini sugli elementi sono quindi calibrati dal tecnico incaricato in relazione alle informazioni reperite sul manufatto ed ai risultati ottenuti dalle eventuali valutazioni preliminari della sicurezza. Essi possono pertanto essere "modulati" in virtù del livello di conoscenza che si vuole raggiungere e di quanto già si conosce.*»

Soluzione…

PONTI, VIADOTTI E CAVALCAVIA - SPECIFICHE PER LA STESURA DEL PIANO DELLE INDAGINI AI FINI DELLE VERIFICHE DI SICUREZZA (ASPI – 09/2022)

Indagini per la caratterizzazione dei dettagli costruttivi e dei materiali

PONTI, VIADOTTI E CAVALCAVIA - SPECIFICHE PER LA STESURA DEL PIANO DELLE INDAGINI AI FINI DELLE VERIFICHE DI SICUREZZA

Obiettivo…

Fornire *istruzioni operative* per la redazione dei piani di indagine propedeutici alla esecuzione di *verifiche di sicurezza* su opere d'arte (ponti, viadotti e cavalcavia) esistenti. →

Le istruzioni possono applicarsi, nei principi e nei criteri di *definizione della numerosità delle indagini*, a tutte le opere d'arte della rete, indipendentemente dalla tipologia costruttiva.

Criteri di definizione del Piano di indagine…

1. IDENTIFICARE gli elementi e/o le parti d'opera che, per caratteristiche di ripetitività e di omogeneità, possono essere ritenute ***elementi affini***;
2. DEFINIRE le indagini da svolgere (tipologia, numerosità ed ubicazione) per ciascuno gruppo di elementi affini;
3. FORNIRE indicazioni sulla ***numerosità*** delle indagini da svolgere ricavate su base probabilistica.

Indagini per la caratterizzazione dei dettagli costruttivi e dei materiali

PONTI, VIADOTTI E CAVALCAVIA - SPECIFICHE PER LA STESURA DEL PIANO DELLE INDAGINI AI FINI DELLE VERIFICHE DI SICUREZZA (ASPI – 09/2022)

Novità…

1. Ai fini dell'ottimale pianificazione delle indagini, è essenziale tener conto della documentazione progettuale disponibile per definire il corretto livello di approfondimento delle indagini in funzione del prefissato ***Livello di Conoscenza*** che si intende raggiungere.

2. La specifica introduce il concetto di ***ELEMENTI AFFINI*** per caratteristiche meccaniche e/o per dettagli costruttivi:

- ***Affinità per caratteristiche meccaniche:***
  a) Elementi costituiti da materiali con caratteristiche meccaniche omogenee;
  b) Elementi realizzati con le medesime modalità costruttive.
- ***Affinità per dettagli costruttivi:***
  a) La geometria degli elementi è sostanzialmente equivalente;
  b) Gli elementi svolgono il medesimo ruolo strutturale nello schema statico dell'opera.

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione *in alternativa* rilievo completo ex-novo	Da progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca con indagini *limitate* in situ	Da valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca o valori desunti dagli elaborati progettuali con prove *limitate* in situ	1,35
LC2		Da elaborati progettuali completi con verifica a campione *in alternativa* Da elaborati progettuali incompleti con indagini *limitate* in situ; *in alternativa* in assenza di documentazione, indagini *estese* in situ	Dalle specifiche originali di progetto, o di manufatti analoghi dello stesso lotto di costruzione, con prove *limitate* in situ; *in alternativa* in assenza di documentazione, prove *estese* in situ	1,20
LC3		Da elaborati progettuali completi con indagini *limitate* in situ *in alternativa* in assenza di documentazione, indagini *esaustive* in situ	Dai certificati di prova originali con prove *limitate* in situ (*estese* se i valori risultano inferiori a quelli attesi); *in alternativa* Dalle specifiche originali di progetto con prove *estese* in situ; *in alternativa* in assenza di documentazione, prove *esaustive* in situ	1,00

Indagini per la caratterizzazione dei dettagli costruttivi e dei materiali

PONTI, VIADOTTI E CAVALCAVIA - SPECIFICHE PER LA STESURA DEL PIANO DELLE INDAGINI AI FINI DELLE VERIFICHE DI SICUREZZA (ASPI – 09/2022)

Novità…

Le percentuali degli elementi da indagare, per ciascun gruppo di elementi affini, ed in funzione del livello di approfondimento, sono state definite seguendo tale criterio:
- 30% in caso di indagini limitate;
- 40% in caso di indagini estese;
- 50% in caso di indagini esaustive.

Il numero di campioni da indagare, invece, è stato determinato a seguito di un approfondimento probabilistico-statistico.

NUMERO DI PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL CALCESTRUZZO

N° TOT Elementi del gruppo affine	Livello di approfondimento indagini					
	LIMITATE		ESTESE		ESAUSTIVE	
	N° elementi da indagare	N° Campioni	N° elementi da indagare	N° Campioni	N° elementi da indagare	N° Campioni
1	Sempre LC3		Sempre LC3		1	4
2					1	4
3					2	6
4					2	6
5					3	9
6	2	3	3	8	3	9
7	2	3	3	8	4	12
8	2	3	3	8	4	12
9	3	3	4	8	5	15
10	3	3	4	8	5	15
11	4	4	5	10	6	18
12	4	4	5	10	6	18
13	4	4	5	10	7	21
14	4	4	5	10	7	21
15	5	5	6	12	8	24
16	5	5	6	12	8	24
17	5	5	7	12	9	24
18	5	5	7	12	9	24
19	6	6	8	12	10	24
20	6	6	8	12	10	24
da 21 a 30	8	7	10	14	13	26
da 31 a 40	11	8	14	16	18	28
da 41 a 50	14	10	18	17	23	29
≥ 51	17	12	22	18	28	30

NUMERO DI PROVE PER LA CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELL'ACCIAIO ORDINARIO

N° TOT Elementi del gruppo affine	Livello di approfondimento indagini					
	LIMITATE		ESTESE		ESAUSTIVE	
	N° elementi da indagare	N° Campioni	N° elementi da indagare	N° Campioni	N° elementi da indagare	N° Campioni
1	Sempre LC3		Sempre LC3		1	3
2					1	3
3					2	4
4					2	4
5					3	5
6	2	3	3	4	3	5
7	2	3	3	4	4	6
8	2	3	3	4	4	6
9	3	3	4	4	5	7
10	3	3	4	4	5	7
11	4	4	5	5	6	9
12	4	4	5	5	6	9
13	4	4	5	5	7	11
14	4	4	5	5	7	11
15	5	5	6	6	8	12
16	5	5	6	6	8	12
17	5	5	7	7	9	12
18	5	5	7	7	9	12
19	6	6	8	8	10	12
20	6	6	8	8	10	12
da 21 a 30	8	7	10	9	13	13
da 31 a 40	11	8	14	10	18	14
da 41 a 50	14	10	18	11	23	15
≥ 51	17	11	22	12	28	16

Ispezioni speciali

Percorso da seguire (§ 7.4.3.1)

- *Nel corso delle ispezioni periodiche deve essere posta particolare attenzione alla presenza di* ***difetti catalogati*** *(Allegato C)* ***sub c.a.p._4, c.a.p._5, c.a.p._6, c.a.p._7 e c.a.p._10****. Il difetto c.a.p._9 corrisponde ad una situazione in cui il danneggiamento dei fili o dei cavi di precompressione risulta evidente anche ad un esame visivo.*

- *Inoltre, la corrosione dei cavi provoca una diminuzione della forza di precompressione che può causare la* ***comparsa di lesioni, anche modeste, nelle sezioni critiche a flessione o a taglio*** *e* ***spostamenti a carattere permanente****. Tali manifestazioni, in associazione con i difetti sopradescritti, denunciano la probabile presenza di uno stato di corrosione significativo delle armature di precompressione ma, anche in assenza di difetti tipici concomitanti, vanno comunque considerate con attenzione.*

- ***In detti casi è necessario*** *ridefinire la Classe di Attenzione dell'opera e quindi* ***procedere con urgenza, e comunque entro il termine già detto di 60 giorni, ad una accurata ispezione straordinaria*** *da compiersi con l'ausilio di metodi non distruttivi e semidistruttivi.*

Ispezioni speciali

Osservazioni

- Le ispezioni speciali si attivano se sono rilevati difetti specifici ben definiti nelle ispezioni periodiche

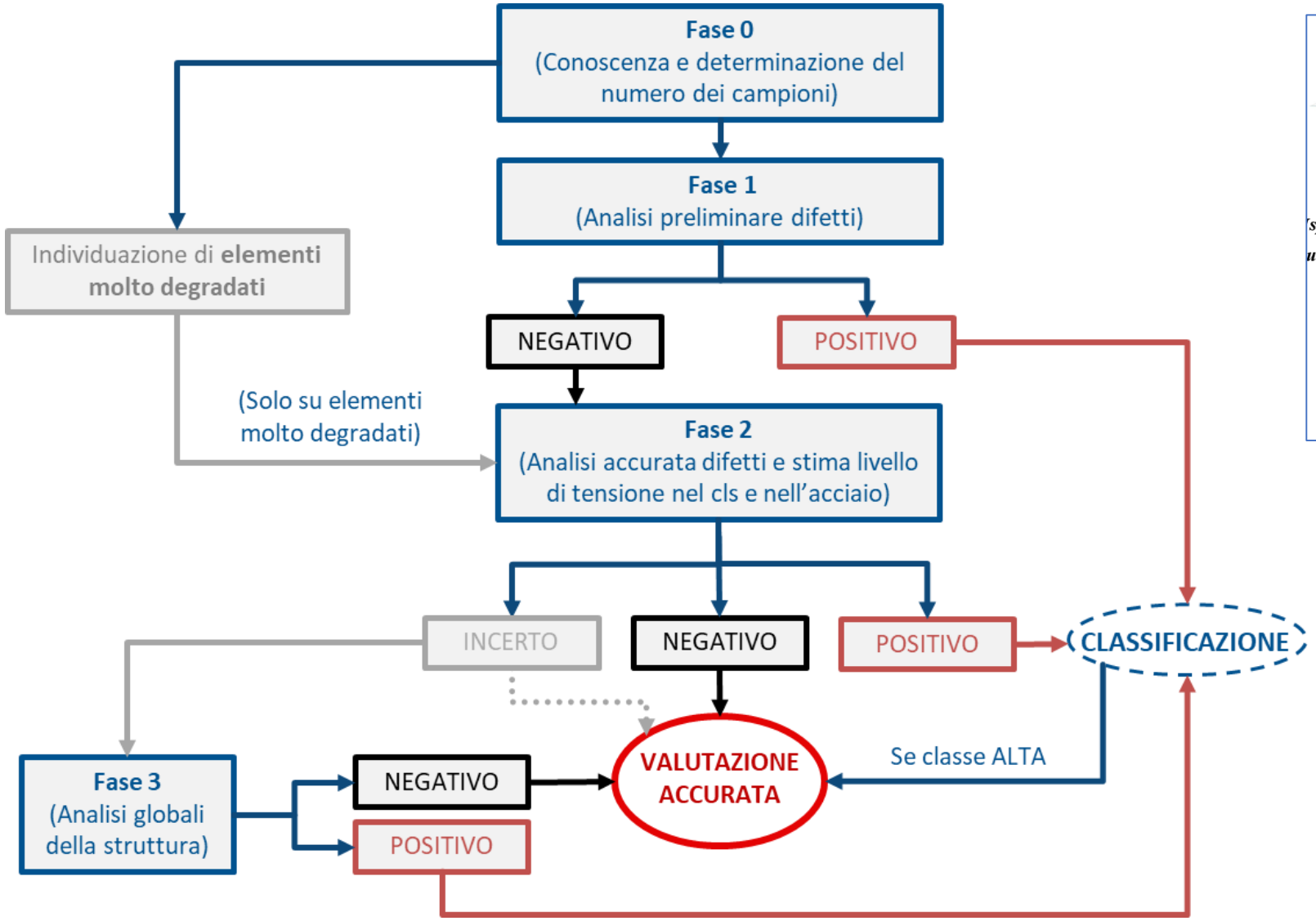
- Le ispezioni speciali sono preliminari alla valutazione di sicurezza di Livello 4, ne sanciscono la necessità

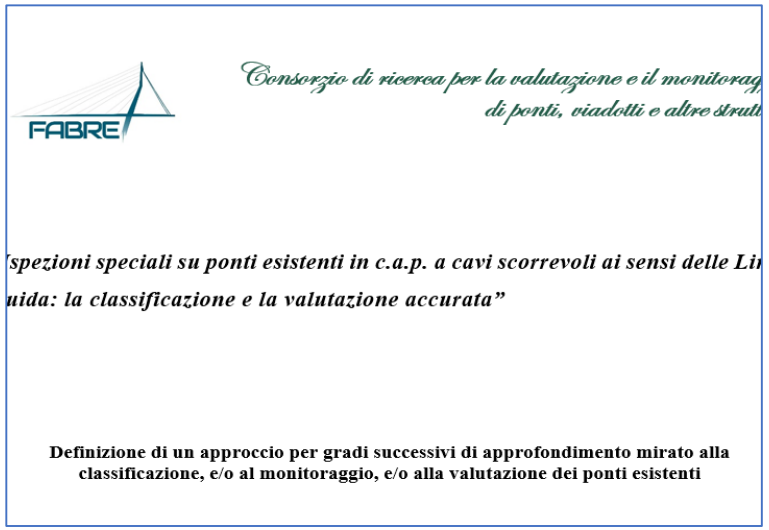
- La priorità deve essere data a ponti degli anni 60/70 ed a quelli in avanzato e rilevante stato di degrado

- Se le ispezioni speciali non evidenziano difettosità rilevanti, l'opera segue il processo standard di analisi multilivello previsto dalle LG.

- In assenza si difetti e/o lesioni è comunque sempre necessario procedere all'esecuzione di indagini sui cavi ????

Modalità esecuzione ispezioni speciali – Proposta Tavolo Tecnico FABRE




FABRE

Consorzio di ricerca per la valutazione e il monitorag
di ponti, viadotti e altre strut

'spezioni speciali su ponti esistenti in c.a.p. a cavi scorrevoli ai sensi delle Li
uida: la classificazione e la valutazione accurata"

Definizione di un approccio per gradi successivi di approfondimento mirato alla classificazione, e/o al monitoraggio, e/o alla valutazione dei ponti esistenti

L'articolazione proposta è coerente con l'impostazione delle Linee Guida

Tipologia, **quantità**, e **ubicazione** delle indagini sono demandate al professionista

4 fasi operative → Approfondimento progressivo della conoscenza

Modalità esecuzione ispezioni speciali – Proposta Tavolo Tecnico FABRE

FASE 0: Conoscenza e determinazione del numero dei campioni

FASE 1: Analisi preliminare dei difetti

FASE 2: Analisi accurate dei difetti e stima del livello di tensione nel cls e nell'acciaio

FASE 3: Analisi globali della struttura (opzionale)

FASE 0: *Conoscenza dell'opera tramite l'analisi storico-critica della documentazione disponibile, dello stato attuale di difettosità, dei rischi connessi e determinazione del numero dei campioni da indagare*

- **Analisi storico-critica**
- Determinazione dello stato di conservazione
- Individuazione del tracciato dei cavi
- **Determinazione del numero dei campioni**
- **Localizzazione dei campioni da indagare**

FASE 1: *Analisi preliminare dei difetti tramite l'esecuzione di prove non distruttive o semi-distruttive e poco invasive e valutazione preliminare della probabilità di corrosione*

- **Preparazione del campione: esecuzione del tracciato dei cavi**
- **Indagini per l'individuazione dei difetti attivi e dei vuoti nei condotti**
- **Analisi preliminare della probabilità di corrosione**

FASE 2: *Analisi accurata dei difetti tramite l'esecuzione di prove localmente distruttive, valutazione della probabilità di corrosione e stima del livello di tensione nel calcestruzzo e nell'acciaio da precompressione*

- **Analisi accurata dei difetti**
- **Determinazione della tensione locale nell'acciaio e nel calcestruzzo**
- **Valutazione della probabilità di corrosione**

FASE 3 opzionale: *informazioni sul comportamento d'insieme dell'opera.*

- Indagini dinamiche sperimentali → informazioni sull'evoluzione dei fenomeni di degrado e sulla capacità di prestazione residua
- Prove statiche → informazioni definitive sulle capacità resistenti della struttura

Le Fasi 1 e 2 prevedono l'esecuzione di indagini
(GPR, Tomografie, endoscopie, saggi, etc.)

Modalità esecuzione ispezioni speciali

Ad oggi sono state eseguite varie sperimentazioni su selezionate opere per verificare l'eseguibilità della procedura proposta (ad esempio, V.tto Settefonti)

Inoltre, sono state eseguite indagini speciali su più di 300 opere da parte dei vari Concessionari e di ANAS, molte delle quali seguendo il protocollo FABRE

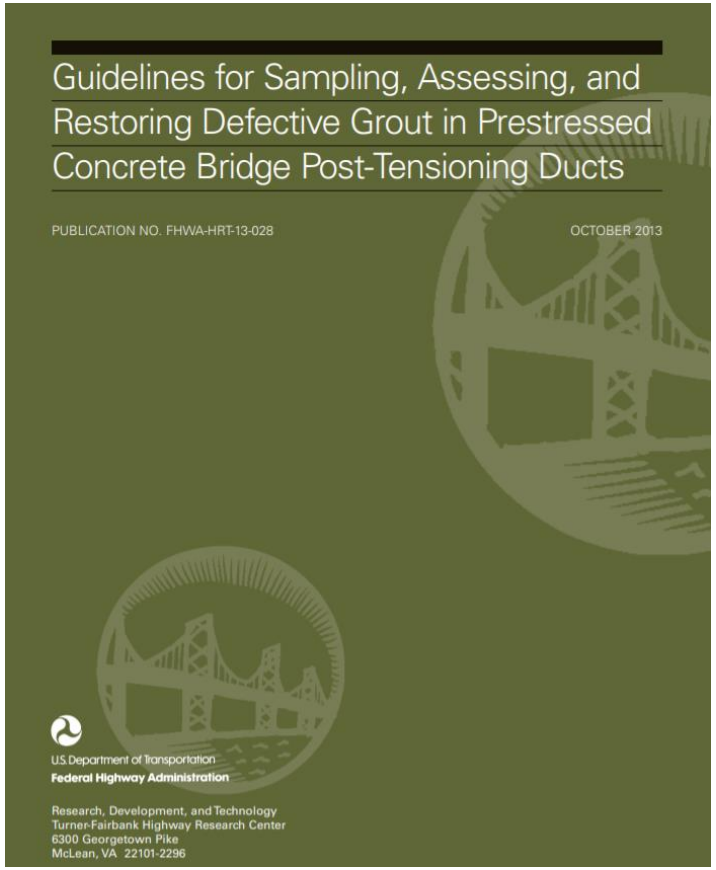
→ Si è accumulato un notevole bagaglio di esperienza utile per fare valutazioni critiche

Questioni Aperte / criticità

- *Numerosità* dei cavi da indagare
- *Affidabilità* delle tecniche di indagine ad oggi disponibili
  - Tomografie ultrasoniche
  - Indagini endoscopiche
  - Prove di durezza
- *Interpretazione* degli esiti ai fini dello svolgimento della valutazione accurata della sicurezza (VAL4)
- *Onerosità* delle prove – tempi, costi, tecnici specializzati

Numerosità dei cavi da indagare

La difettosità dei cavi è statisticamente descrivibile mediante la distribuzione Ipergeometrica



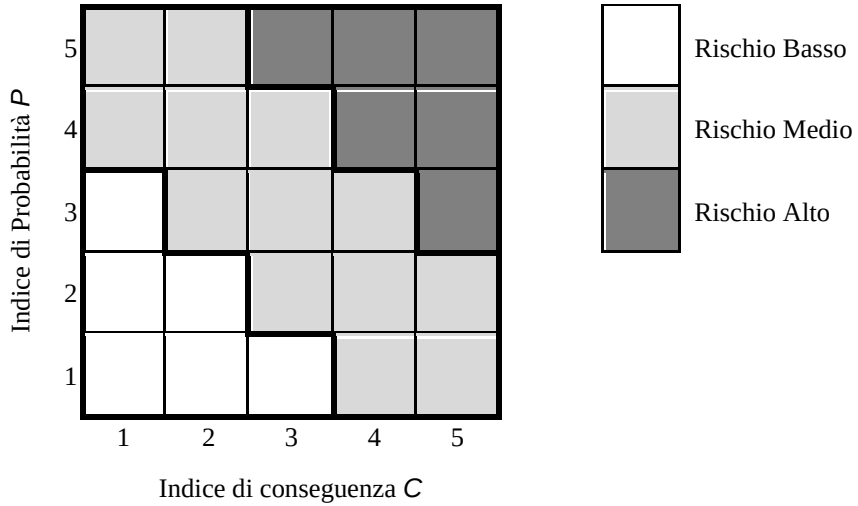
La distribuzione ipergeometrica è una distribuzione di probabilità discreta che descrive la probabilità di ottenere i elementi dotati di una certa caratteristica, effettuando n estrazioni senza reinserimento da un insieme composto da N elementi totali di cui m risultano dotati di quella caratteristica

$$P(x = i) = \frac{\binom{m}{i}\binom{N-m}{n-i}}{\binom{N}{n}}$$

Dove:

- $i =$ n° di volte che il campione selezionato risulta dotato di una certa caratteristica
- $m =$ n° effettivo di campioni dotati di quella caratteristica
- $N =$ dimensione totali dell'insieme
- $n =$ dimensione del campione estratto

Numerosità dei cavi da indagare



% accettabile di cavi con difetto

Classe di rischio	Grado di impatto delle indagini sulla sicurezza strutturale globale		
	Alto	Medio	Basso
Alto	20%	10%	10%
Medio	30%	20%	10%
Basso	30%	30%	20%

LC2 (P_d 95%)				
Numero di cavi identificato	Percentuale accettabile di cavi difettosi			
	5%	10%	20%	30%
10	10	10	7	6
20	19	15	10	6
50	38	22	12	7
100	44	25	13	8
150	50	26	13	8
200	50	26	13	8
500	54	27	13	8
1000	55	28	13	8

LC3 (P_d 99%)				
Numero di cavi identificato	Percentuale accettabile di cavi difettosi			
	5%	10%	20%	30%
10	10	10	9	7
20	20	18	12	9
50	44	28	16	11
100	56	33	18	12
150	67	35	18	12
200	68	37	18	12
500	76	39	19	12
1000	79	40	19	12

Redazione ed esecuzione del Piano di Indagini: Criticità operative

Una corretta pianificazione ed esecuzione delle indagini è garantita solo attraverso le attività elencate a seguire:

1. Un efficace coordinamento tra i soggetti coinvolti in tutte le fasi di indagine;
2. La verifica dell'accessibilità dell'opera e di eventuali interferenze;
3. La definizione dei mezzi a disposizione del Laboratorio;
4. L'analisi critica del Piano di Indagine.

1	SOPRALLUOGO	
Stato del sopralluogo		Note
Effettuato	☐	
Non effettuato	☐	
Non necessario	☐	

2	ACCESSIBILITÀ ALL'OPERA	
Dal basso	☐	Note
Inacessibile	☐	
Parziale	☐	
Completa	☐	
Da piattaforma stradale	☐	Note
Inacessibile	☐	
Parziale	☐	
Completa	☐	

3	INTERFERENZE	
Sottostanti l'opera		Note
Corsi d'acqua	☐	
Dislivelli orografici	☐	
Viabilità stradale	☐	
Viabilità ferroviaria	☐	
Linee elettriche aeree	☐	
Altro:	☐	
Su piattaforma stradale		Note
Barriere fonoassorbenti	☐	
Barriere con reti di protezione	☐	
Limitazioni geometriche di carreggiata	☐	
Altro:	☐	

4	MODALITÀ DI ESECUZIONE INDAGINI	
Mezzi previsti		Note
Nessuno	☐	
PLE (Piattaforma di lavoro elevabile)	☐	
Trabattello / Ponteggio	☐	
ByBridge	☐	
Altro:	☐	

Redazione ed esecuzione del Piano di Indagini: Figure coinvolte

- Committente (**RUP**)
- Engineering Coordinator (**EC**) – responsabile pianificare lo svolgimento delle indagini (con **LAB-PM**), di verificare l'andamento delle attività e la corretta comunicazione tra le parti
- Professionista (**ING**) - responsabile della definizione delle indagini
- Laboratorio (**LAB**) - esecutore delle indagini. LAB-PM per la pianificazione temporale delle indagini (con EC) - CAPOSQUADRA responsabile del programma di dettaglio di esecuzione delle prove e della corretta esecuzione
- Uffici Tecnici Autostradali (**UTA**) – responsabile della logistica e supporto durante l'esecuzione delle indagini e contabilità (DL indagini)
- Unità CND Collaudi (**CND**) – supervisione delle indagini speciali

È indispensabile che i ruoli e competenze di ciascuno siano compresi da tutti per una efficace interazione e per raggiungere l'obiettivo finale **!**

Redazione ed esecuzione del Piano di Indagini: Attività

FLUSSO delle ATTIVITÀ

1. Redazione Piano di Indagine **ING**
2. Analisi preliminare accessibilità ed ispezionabilità opera **UTA**
3. Individuazione del Laboratorio **EC**
4. Sopralluogo congiunto per verificare accessibilità ed interferenze (Si definiscono apprestamenti e mezzi per l'esecuzione delle prove) **UTA** – LAB – ING (se serve)
5. Analisi preliminare eseguibilità PIN da remoto o in loco qualora necessario **ING**/**LAB**/UTA(EC)
6. Pianificazione temporale dell'esecuzione della campagna di Indagine **EC** – UTA - LAB
   → DEFINITE LE DATE DI ESECUZIONE DARNE COMUNICAZIONE PER TEMPO A ING

7. <u>SVOLGIMENTO INDAGINI</u> **LAB** /UTA / CND / ING / **EC**
   → IL CAPOSQUADRA DEVE ESSERE PRESENTE IN CAMPO DURANTE TUTTO LO SVOLGIMENTO DELLE INDAGINI

ING e LAB (caposquadra) devono essere in contatto diretto durante lo svolgimento delle indagini, anche per e per eventuali rIallineamento del PI.
ING valuta se presenziare allo svolgimento di prove «critiche». CND supervisiona lo svolgimento delle Indagini Speciali

8. Prima Bozza Rapporti **LAB**
9. Confronto LAB/ING
10. Approfondimento di indagini (eventuale)
11. Restituzioni finale Indagini **LAB**

Redazione ed esecuzione del Piano di Indagini: Aspetti operativi

COMUNICAZIONE !

- Sarebbe opportuno studiare in modo ben approfondito il PIN prima dell'inizio delle attività segnalando gli eventuali dubbi e problematiche al progettista per cercare di ridurre al minimo richieste di chiarimenti e/o integrazioni in fase di cantiere.

- Qualora, in corso di lavorazione, fosse necessario modificare la posizione o la tipologia di prova rispetto a quanto previsto da PIN, si raccomanda di comunicare preventivamente l'informazione in quanto la decisione dovrà essere accordata con i progettisti.

- Condivisione esiti prove in tempo utile con il progettista:
  tomografie per la definizione dei punti in cui effettuare le video endoscopie e/o i saggi visivi

  rilasci tensionali prima di procedere con tutto il programma (per intercettare subito eventuali anomalie)

- La presenza di fibre e/o ripristini con malte fibrorinforzate non indicate nel piano di indagine (che determinano quindi l'impossibilità di svolgere alcune prove/scassi/intagli) devono essere comunicate tempestivamente

- Se si riscontrano fenomeni di corrosione nei cavi, va avvisato il professionista

PER OGNI CAMPAGNA DI INDAGINE IL LABORATORIO DEVE INDIVIDUARE UN RESPONSABILE DELLE ATTIVITA' – **CAPOSQUADRA** - CHE DEVE PRENDERE CONTATTO CON IL PROFESSIONISTA E TENERSI AGGIORNATI SULL'ANDAMENTO DELLE INDAGINI RELATIVAMENTE AGLI ASPETTI CRITICI

Redazione ed esecuzione del Piano di Indagini: Aspetti operativi

ESECUZIONE ! (considerazioni generali)

- Attenzione ai difetti «spia» → segnalare tempestivamente la presenza, per adeguare il piano di indagine.
- Segnalare presenza di parti risonanti che possono portare all'identificazione di corrosioni di armature/guaine/trefoli, concordando l'eventuale disgaggio locale.
- Quando si riscontrano significativi vuoti di iniezione nelle indagini dei cavi post-tesi, l'indagine va estesa tramite endoscopie/saggi per definire l'estensione complessiva del tratto non iniettato. Se il tratto è significativo (maggiore di 20-30 cm), occorre avvisare il progettista (per valutare eventuali indagini sul cavo quali prove di durezza e/o prelievi di fili per prova di trazione, e/o indagini su altri cavi)
- In presenza di ripristini, controllare la presenza di parti risonanti
- Avere sempre in mente l'ordine di grandezza atteso delle misure che si eseguono

FORMAZIONE DEI TECNICI INCARICATI DELLE «INDAGINI SPECIALI»
ANCHE ALL'USO DELLA STRUMENTAZIONE

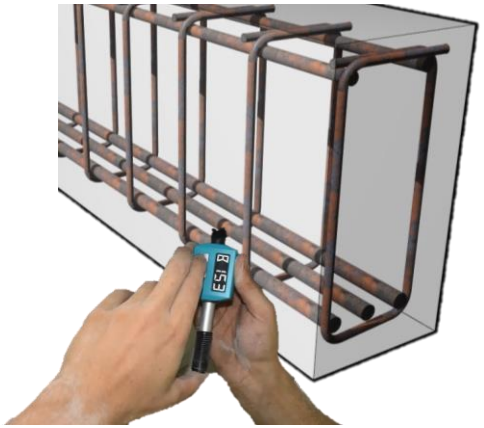
INTERAZIONE «IN TEMPO REALE» CON IL PROGETTISTA

Controlli Non Distruttivi nell'ambito delle Indagini ''Ordinarie''

Prove sclerometriche su calcestruzzo

Prove di Carbonatazione del calcestruzzo

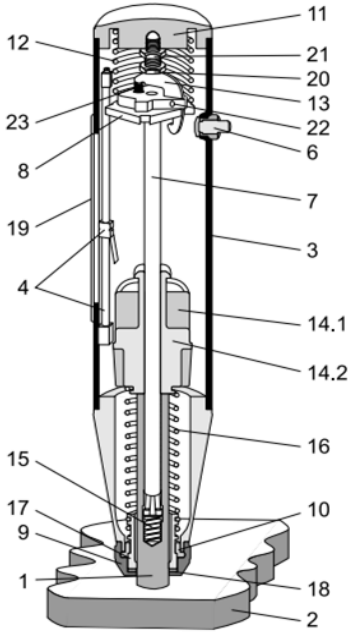
Prove di durezza su acciaio ordinario



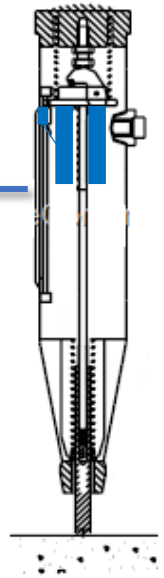
Misura della velocità ultrasonica nel calcestruzzo

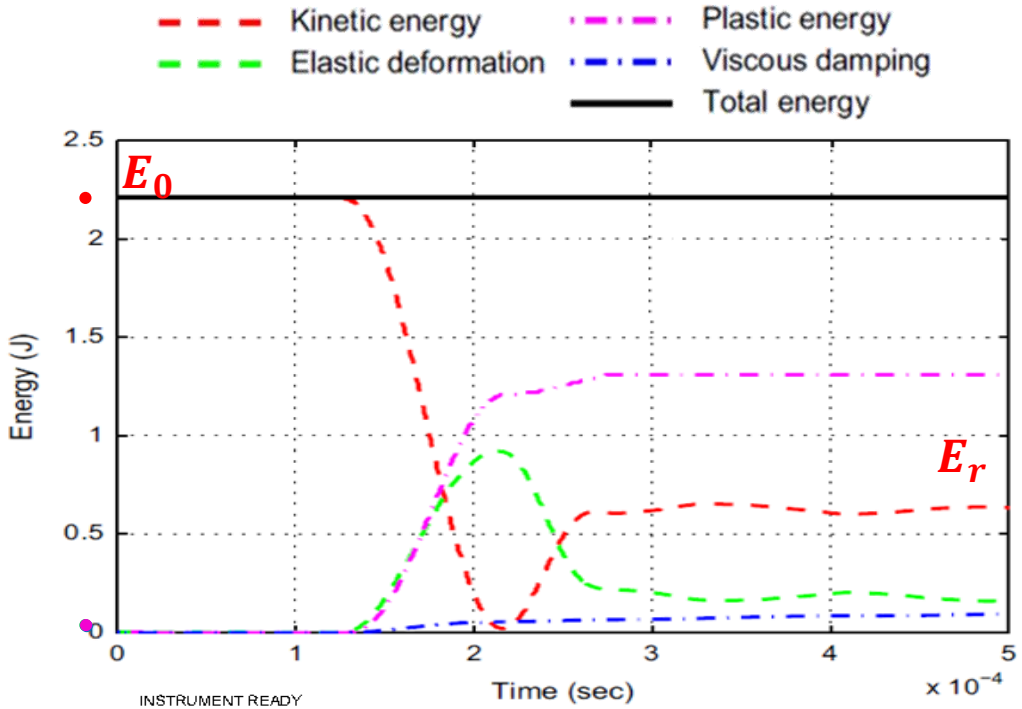
Controlli Non Distruttivi: Prove sclerometriche

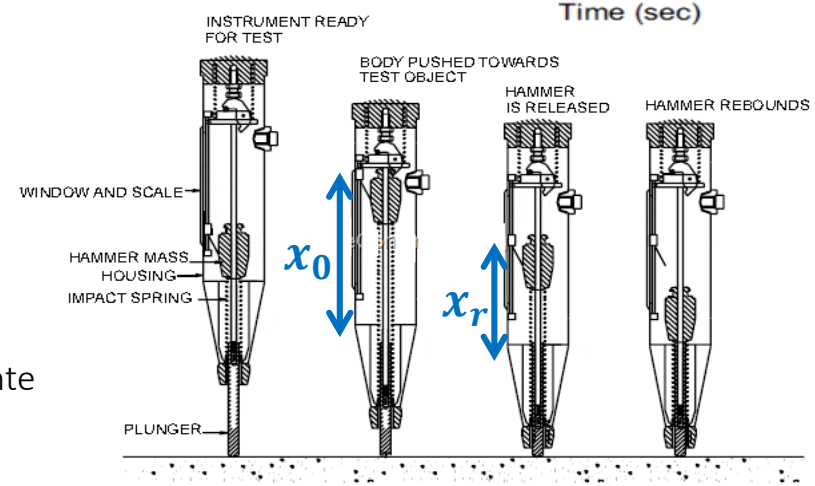
SCLEROMETRO



1 Impact Plunger
2 Test surface
3 Housing
4 Rider with guide rod
5 Not used
6 Push-button, complete
7 Hammer guide bar
8 Guide disk
9 Cap
10 Two-part ring
11 Rear Cover
12 Compression spring
13 Pawl
14 Hammer mass
15 Retaining spring
16 Impact spring
17 Guide sleeve
18 Felt washer
19 Plexiglas window
20 Trip screw
21 Lock nut
22 Pin
23 Pawl spring







Indice di rimbalzo

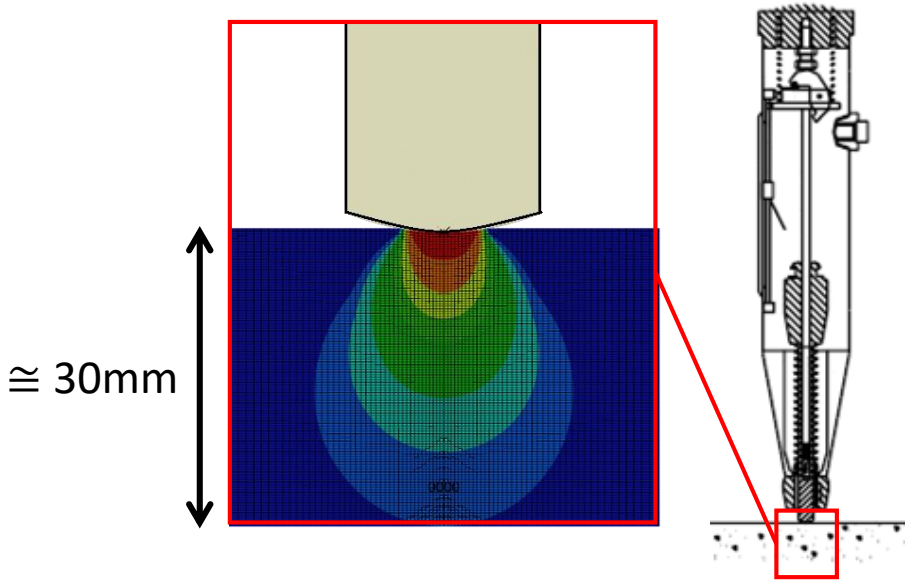
$$R = \frac{x_r}{x_0} \cdot 100$$

Rapporto percentuale tra la distanza percorsa dalla massa dopo il rimbalzo x_r e quella percorsa inizialmente prima dell'impatto x_0.

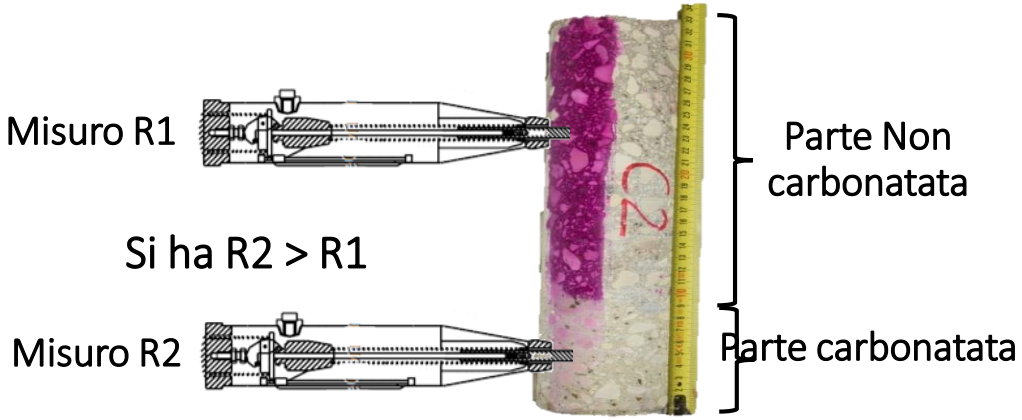
Controlli Non Distruttivi: Prove sclerometriche

FATTORI CHE INFLUENZANO LA MISURA

1. Tipo, qualità e quantità di cemento
2. Tipo, qualità e quantità di aggregati
3. Contenuto di umidità
4. Qualità della superficie
5. Carbonatazione
6. Posizione del punto di misura
7. Età del calcestruzzo

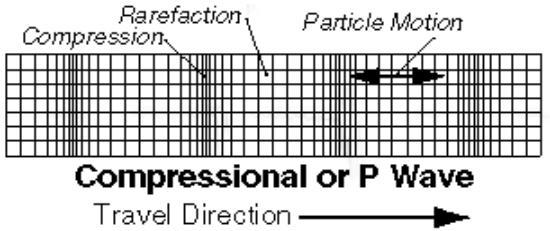


INFLUENZA DELLA CARBONATAZIONE

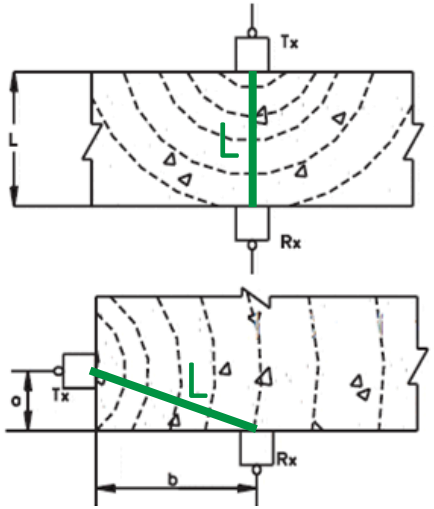


Controlli Non Distruttivi: Misura della velocità ultrasonica

PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)



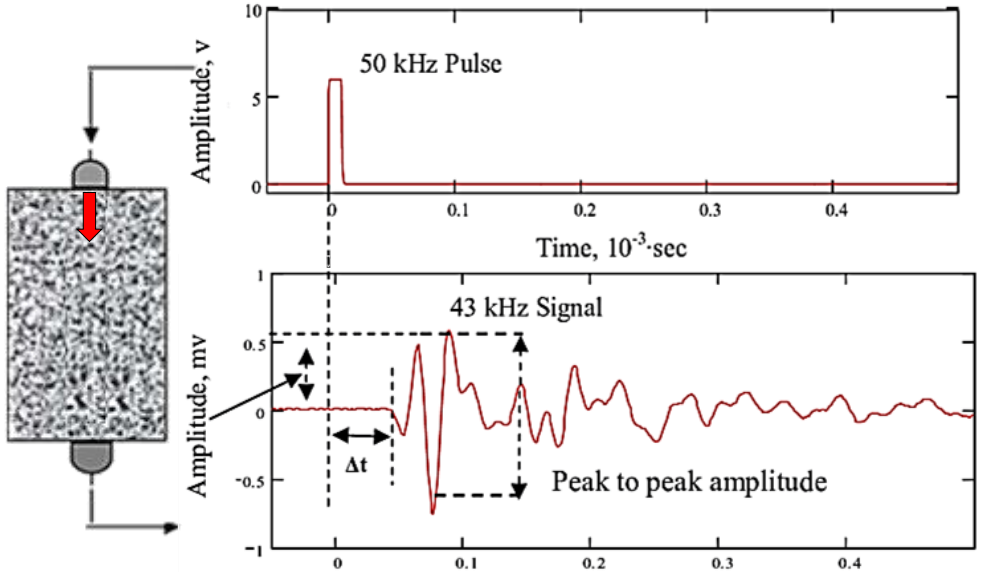
$$V_P = \sqrt{\frac{(1-\upsilon_d)E_d}{(1+\upsilon_d)(1-2\upsilon_d)\rho}} \quad [m/s]$$



Velocità ultrasonica

La velocità ultrasonica è data dal rapporto tra il percorso apparente L e il tempo che impiega il segnale a percorrerlo

$$\boldsymbol{V = \frac{L}{\Delta_t}} \textbf{ [m/s]}$$

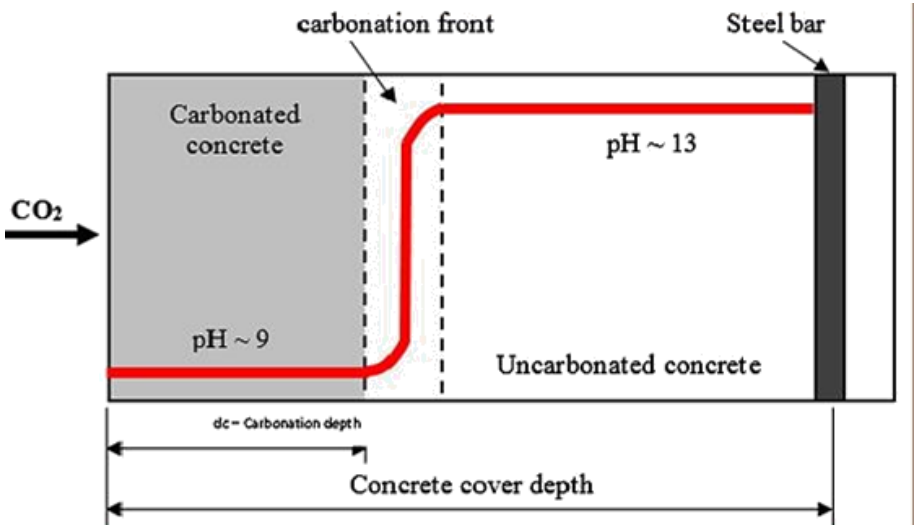


Controlli Non Distruttivi: Misura della profondità di carbonatazione

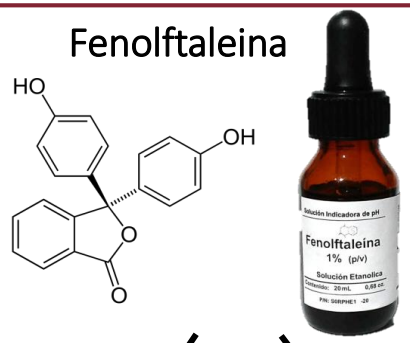
PROVA DI CARBONATAZIONE

Carbonatazione: Reazione dell'anidrite carbonica con l'idrossido di calcio con formazione di carbonato di calcio e acqua. La reazione di carbonatazione del calcestruzzo è:

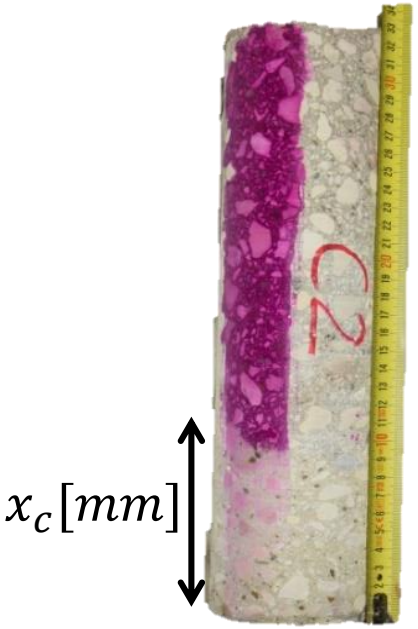
$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$



Fenolftaleina

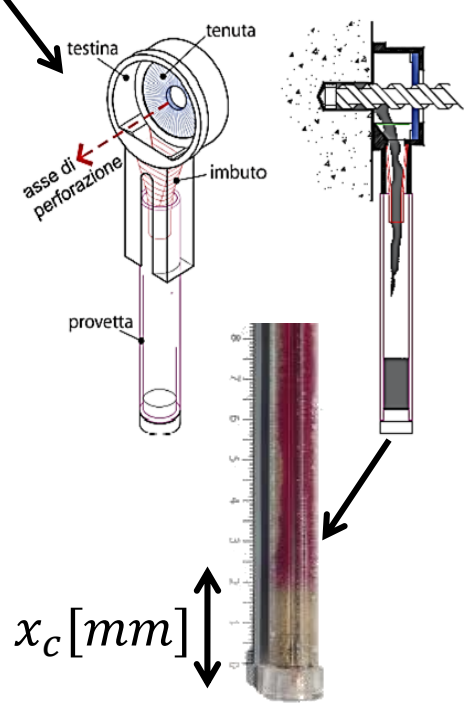


Metodo tradizionale



$x_c[mm]$

Metodo Carbontest®

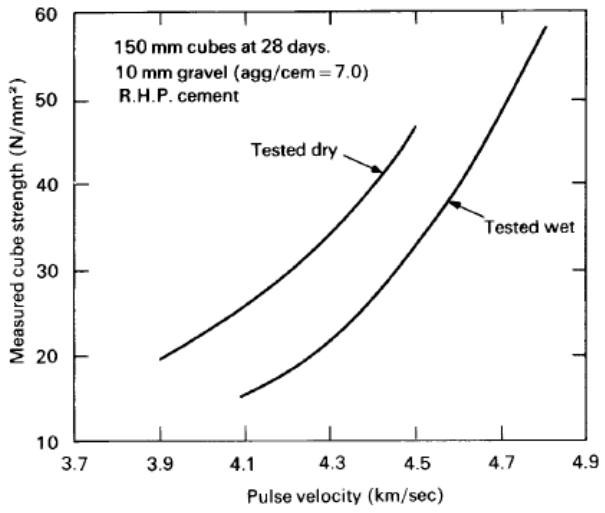


$x_c[mm]$

Controlli Non Distruttivi: Misura della velocità ultrasonica

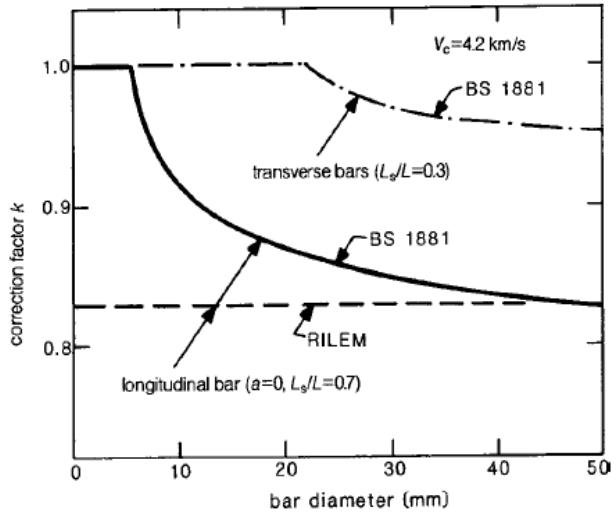
FATTORI CHE INFLUENZANO LA MISURA

1. Tempo di maturazione
2. Tipo e qualità degli aggregati
3. Tipo e quantità di cemento
4. Contenuto di umidità
5. Barre di armatura
6. Temperatura
7. Fessure e microfessure



INFLUENZA DELLE BARRE DI ARMATURA

$$V_c = kV_m$$



Controlli Non Distruttivi: Metodo SonReb

METODO SONREB
(SONic + REBound)

Il metodo SonReb nasce grazie all'idea dell'ingegnere I. Făcăoaru di combinare i risultati delle prove sclerometriche e prove ultrasoniche in modo da compensare gli errori associati alle prove eseguite singolarmente

SCLEROMETRO

ULTRASUONI

Diminuisce con il contenuto di umidità

Molto Influenzato dalle proprietà superficiali

Poco influenzato dalla granulometria e dal dosaggio degli inerti

$$f_c(R,V) = a \cdot R^b \cdot V^c$$

Aumenta con il contenuto di umidità

Poco Influenzato dalle proprietà superficiali

Molto influenzato dalla granulometria e dal dosaggio degli inerti

Controlli Non Distruttivi: Metodo I-SonReb

METODO I-SONREB
(Improved SonReb)

Il metodo I-SonReb nasce grazie all'idea degli autori Breccolotti M, Bonfigli MF, Materazzi AL. di migliorare la valutazione della resistenza del calcestruzzo tramite il metodo SonReb correggendo il valore dell'indice di rimbalzo in funzione della profondità di carbonatazione

SonReb

$$f_c(R,V) = a_1 \cdot R^{a_2} \cdot V^{a_3}$$

XC

Correzione indice di rimbalzo nota la carbonatazione

$$k_c(x_c) = 1 - e^{b_1} + e^{b_1 \cdot e^{\frac{x_c}{b_2}}}$$

$$f_c(R,V,x_c) = a_1 \cdot \left[R \cdot \left(1 - e^{b_1} + e^{b_1 \cdot e^{\frac{x_c}{b_2}}}\right)\right]^{a_2} \cdot V^{a_3}$$

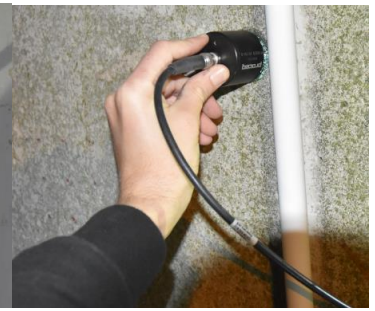
Controlli Non Distruttivi: Modelli per la valutazione della resistenza del cls

MODELLO DI LETTERATURA

- **Vantaggi: Sono calibrati su di un elevato numero di dati sperimentali e non è necessario eseguire prove distruttive**
- **Svantaggi: La maggior parte derivano da esperienze di laboratorio.**

↓

Coefficienti del modello sono già noti
(L'utilizzo dei risultati di prove distruttive è già stato fatto a monte quindi sono necessarie solo prove non distruttive)



MODELLO CALIBRATO CON I RISULTATI DELLE PROVE ESEGUITE SULL'OPERA

- **Vantaggi: Hanno una maggiore capacità previsionale per l'opera in esame**
- **Svantaggi: Non sono calibrati su di un elevato numero di dati ed inoltre è necessario eseguire prove distruttive**

↓

Coefficienti del modello sono da determinare ex novo

CALIBRAZIONE DI UN MODELLO

Raccolta dati sperimentali
- *Prove distruttive*
- *Prove non distruttive*

↓

Definizione di un modello

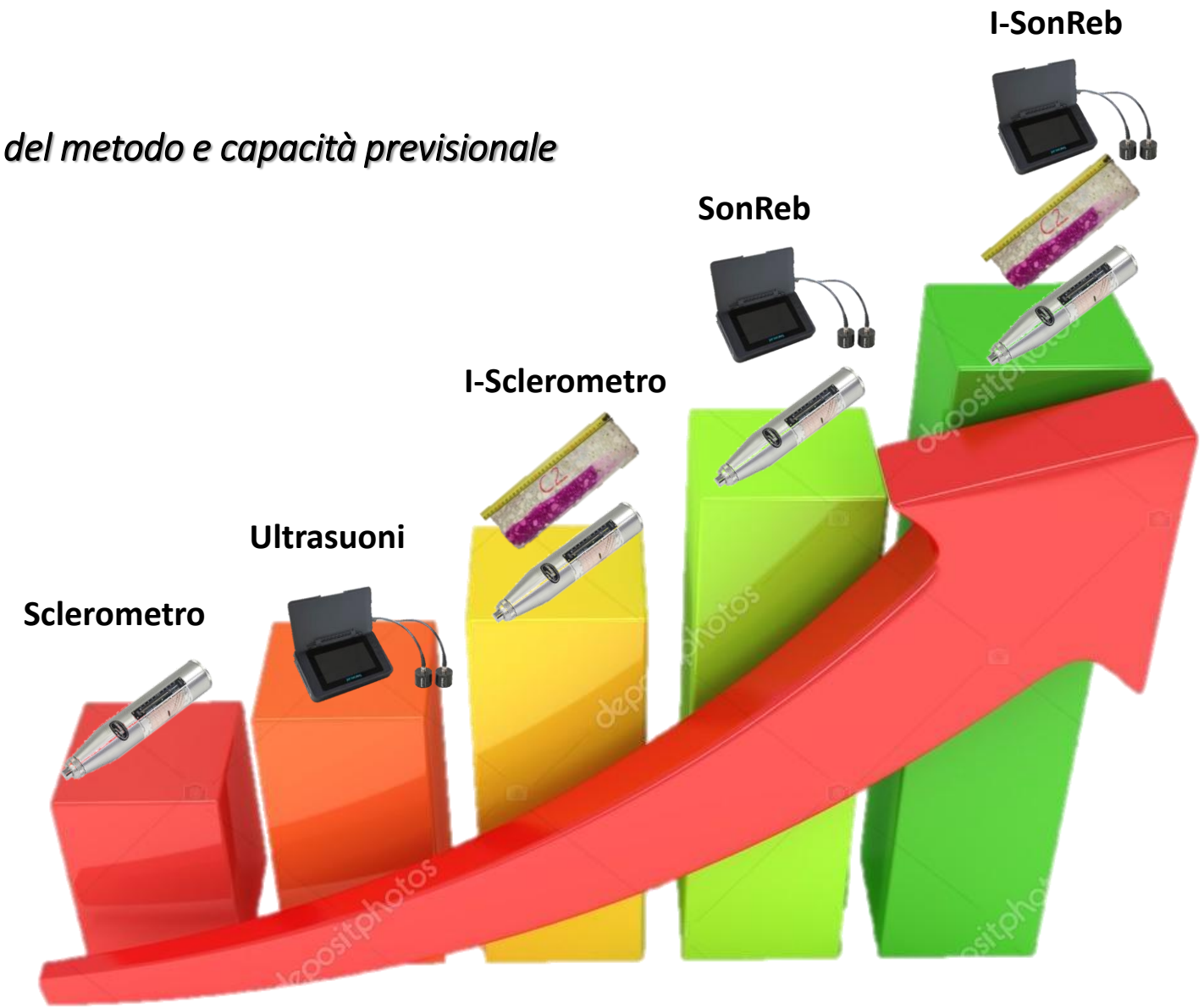
$$f_c = f_c(Variabili, Coefficienti)$$

↓ ***Regressione dei dati***

Coefficienti del modello

Controlli Non Distruttivi: Affidabilità delle tecniche non distruttive

Affidabilità del metodo e capacità previsionale

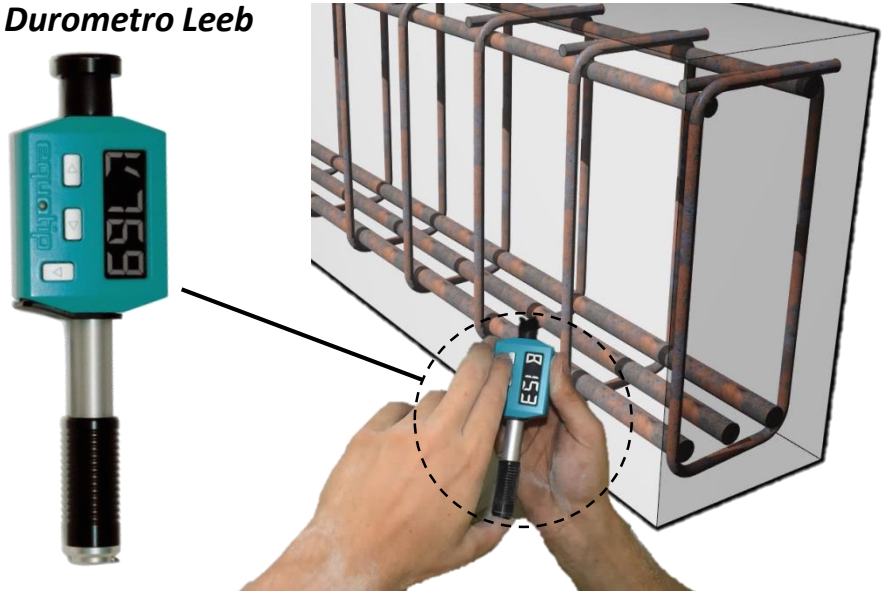


Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio ordinario

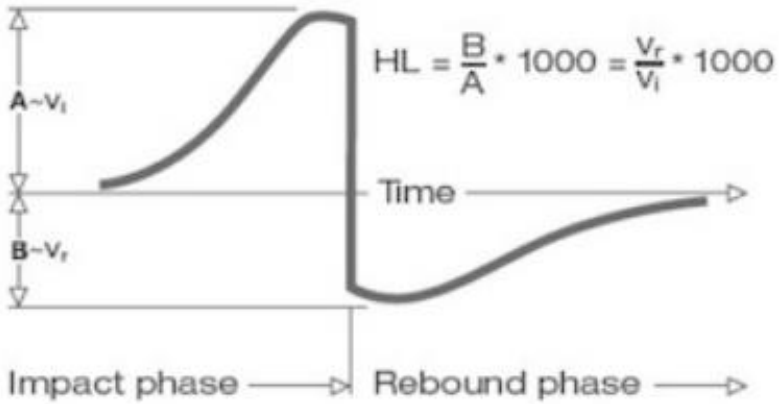
La prova viene generalmente eseguita con **Durometro a rimbalzo** (o **Durometro Leeb**).

La determinazione della durezza dei materiali metallici secondo metodo Leeb è definita nelle norme **ISO 16859** e **ASTM A956**.

Durometro Leeb



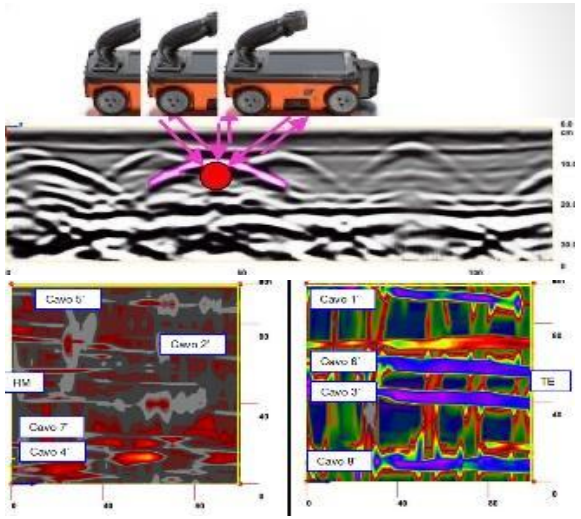
Quando si utilizza il principio dinamico di Leeb, il **valore di durezza** viene derivato dalla perdita di energia di un corpo di impatto, detto dardo (nel caso in esame sfera all'estremità dello strumento), dopo essere stato scagliato contro il provino ed essere, appunto rimbalzato. Il quoziente Leeb (vi,vr) viene considerato come espressione dell'energia persa dal dardo nell'impatto grazie alla deformazione plastica del provino: il dardo rimbalzerà più velocemente per corpi con maggiore durezza rispetto a corpi più morbidi.



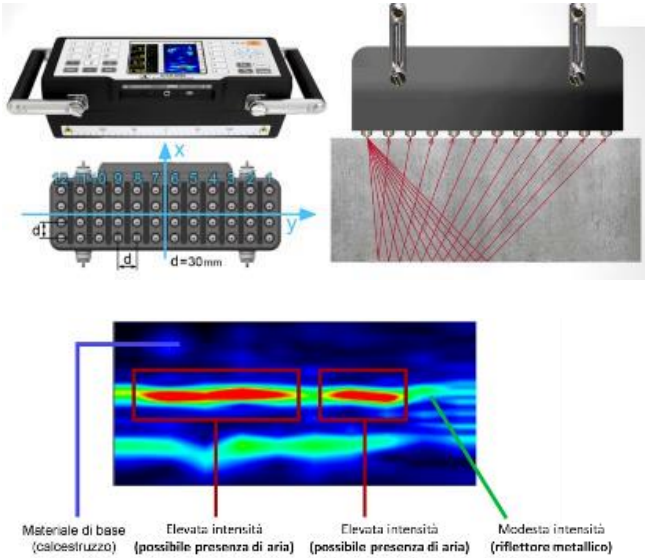
Criticità: non si adatta per prove su acciaio da precompressione in quanto il diametro della sfera è comparabile con il diametro dei fili di acciaio armonico

Controlli Non Distruttivi nell'ambito delle Indagini Speciali

Georadar

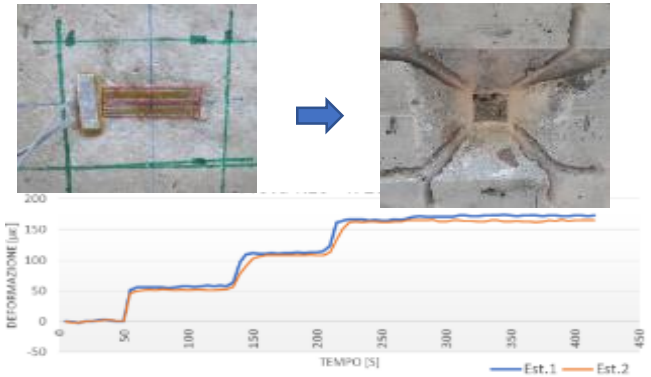


Tomografie



Video-endoscopie

Rilasci tensionali



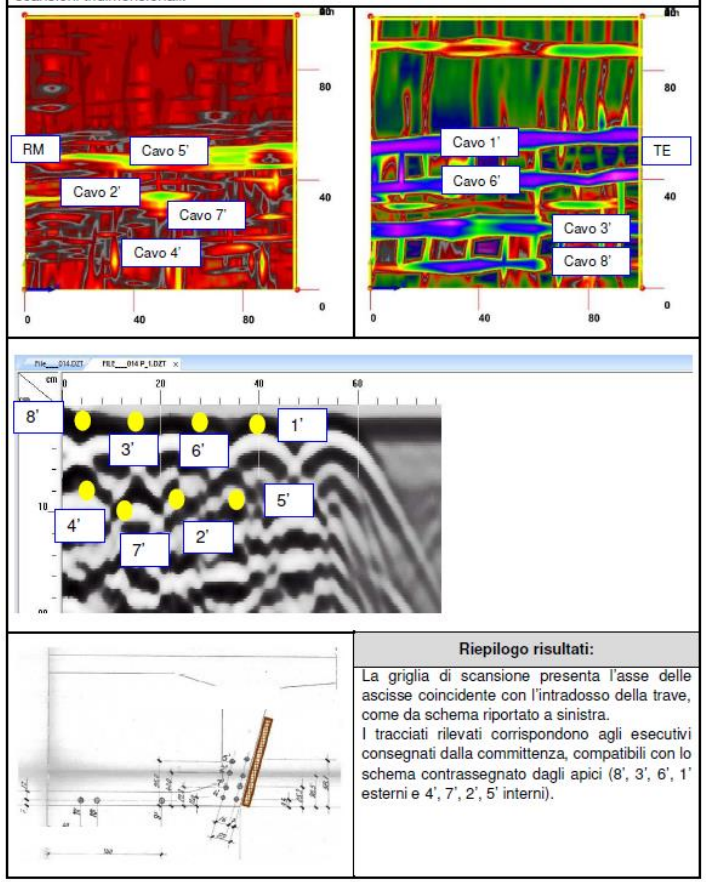
Rilasci tensionali

Prove di durezza

Controlli Non Distruttivi: Georadar

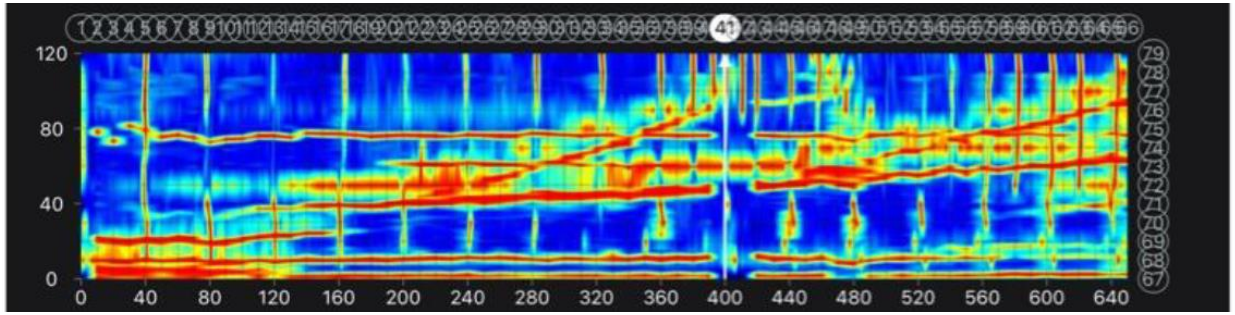
Georadar

Modalità di acquisizione: nella posizione indicata si è realizzata una griglia di dimensione 1 x 1 m. Il radargramma superiore destro riporta il tracciato dei cavi superficiali (n. 8', 3', 6', 1'), mentre quello di sinistra il tracciato dei cavi più profondi (n. 4', 7', 2', 5') rispetto al piano di scansione, coincidente con la facciata esterna della trave.
Ad ulteriore verifica si riporta il radargramma 2 D, che conferma lo schema evidenziato con le scansioni tridimensionali.



Riepilogo risultati:

La griglia di scansione presenta l'asse delle ascisse coincidente con l'intradosso della trave, come da schema riportato a sinistra.
I tracciati rilevati corrispondono agli esecutivi consegnati dalla committenza, compatibili con lo schema contrassegnato dagli apici (8', 3', 6', 1' esterni e 4', 7', 2', 5' interni).



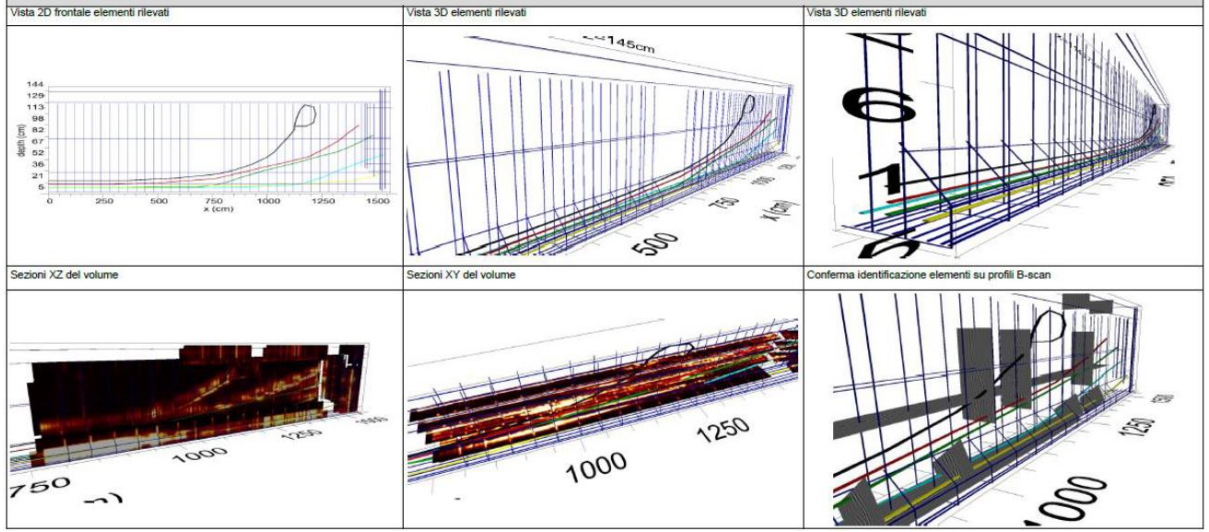
NOTE

- Scansioni su maglia quadrata 10 X 10 cm su tutte le superfici accessibili (anima e bulbo inferiore) comprese fra la mezzeria e la pila 6; non accessibile il lato interno della trave
- Scansioni trasversali sull'intradosso con passo 20 cm
- Diametro elementi indicativo e non misurabile
- Vedi file allegato A1 Taro_C7_T8.dwg

LEGENDA

- Armatura Lenta
- Cavo 1
- Cavo 2
- Cavo 3
- Cavo 4
- Cavo 5

VISTE RAPPRESENTATIVE



Criticità: individuazione dei cavi nelle zone d'ombra, post-elaborazione dei risultati

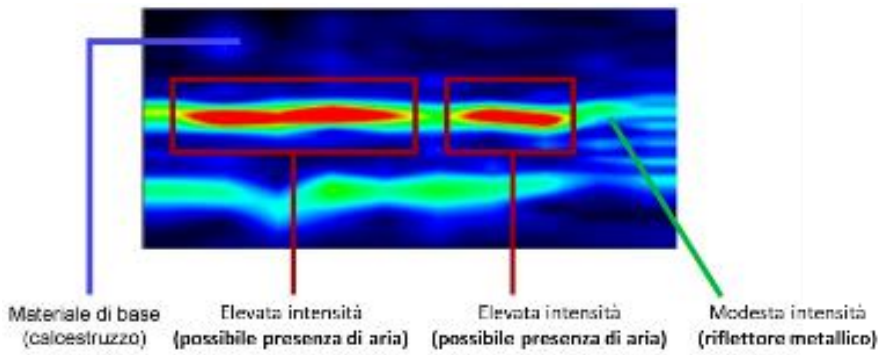
Controlli Non Distruttivi: Prove Tomografiche

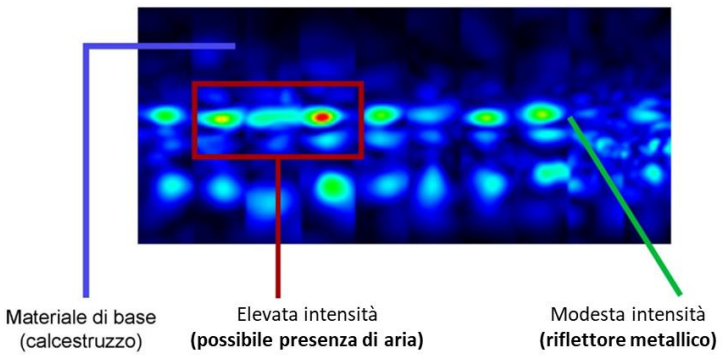
Tomografie

Finalità della prova: individuazione dei difetti e dei vuoti nelle guaine.

Ubicazione della prova: zone critiche, possibilmente su porzioni di limitata estensione, circa 150cm x 20 cm lungo l'andamento dei cavi.

Restituzione dei risultati: elaborazione grafica tramite analisi SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique),





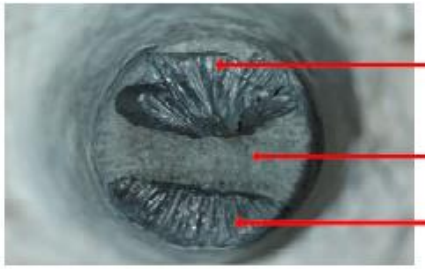
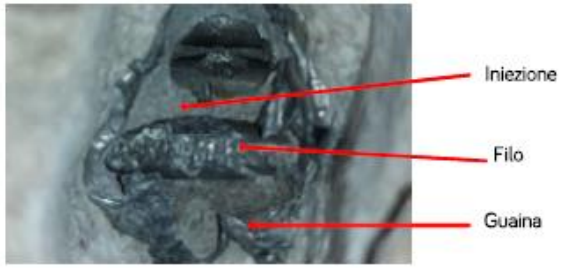
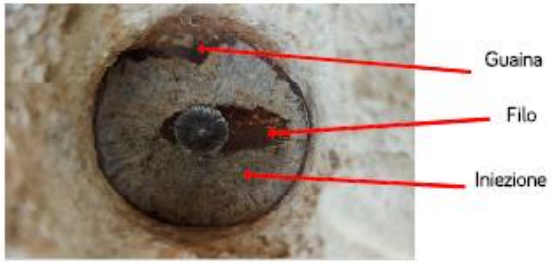
Criticità: La presenza di intensità "anomale" non è necessariamente riconducibile a un difetto di iniezione all'interno della guaina. Il tomografo è in grado di identificare la differenza in termini di impedenza acustica (e quindi in termini di densità e velocità di attraversamento delle onde acustiche all'interno del materiale attraversato), ma spesso è complicato quantificare l'estensione e la gravità effettiva del difetto come la sua esatta collocazione.

Può accadere che intensità "anomale" lette in corrispondenza del cavo siano:
-cavità d'aria esterne alla guaina, e cioè che si abbia distacco tra la guaina e il calcestruzzo,
-piccole sacche d'aria tra trefoli/fili e guaina,
-piccole fessurazioni e frantumazioni della boiacca.

L'analisi SAFT porta alla perdita di segno della variazione di impedenza acustica; ne consegue che è necessaria un'attenta calibrazione dello strumento, poiché una saturazione eccessiva del segnale (causata ad esempio da valori di amplificazione digitale eccessiva) potrebbe causare una visualizzazione grafica simile delle zone in cui è presente l'acciaio e delle zone in cui è presente aria o acqua

Controlli Non Distruttivi: Prove endoscopiche

Endoscopie

VE_1		VE_2	
			
Guaina	Guaina in lamierino metallico integra	Guaina	Guaina in lamierino metallico integra
Iniezione	Completa	Iniezione	Completa
Fili di precompressione	Integri	Fili di precompressione	lievemente ossidati
VE_3		**VE_4**	
			
Guaina	Guaina in lamierino metallico ossidata	Guaina	Guaina in lamierino metallico ossidata
Iniezione	Completa	Iniezione	Completa
Fili di precompressione	Ossidati	Fili di precompressione	Ossidati

<u>Criticità</u>: possibile chiusura/schiacciamento della guaina e perdita di informazione sull'eventuale presenza di vuoti, possibile danneggiamento del cavo, no sempre chiaro l'esito

Controlli Non Distruttivi: Prove di detensionamento

Prove di Rilascio Tensionale su fili

1

Taglio del filo con mini-troncatrice e disco ϕ 24 mm

Particolare dell'estensimetro e del taglio

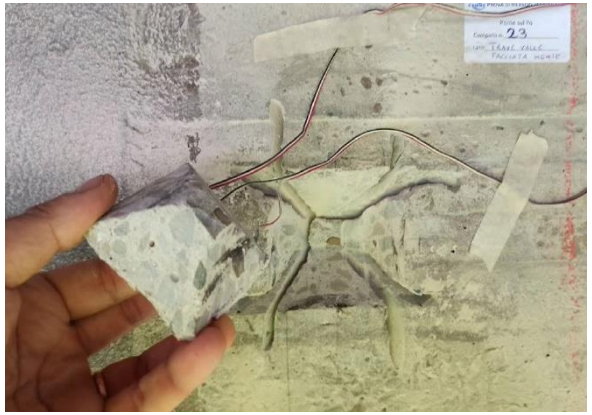
Pro e contro

- Dato accurato ma a carattere locale
- Prova invasiva e danneggiamento del filo

.. il gioco non vale la candela ..

Prove di Rilascio Tensionale su Calcestruzzo

1



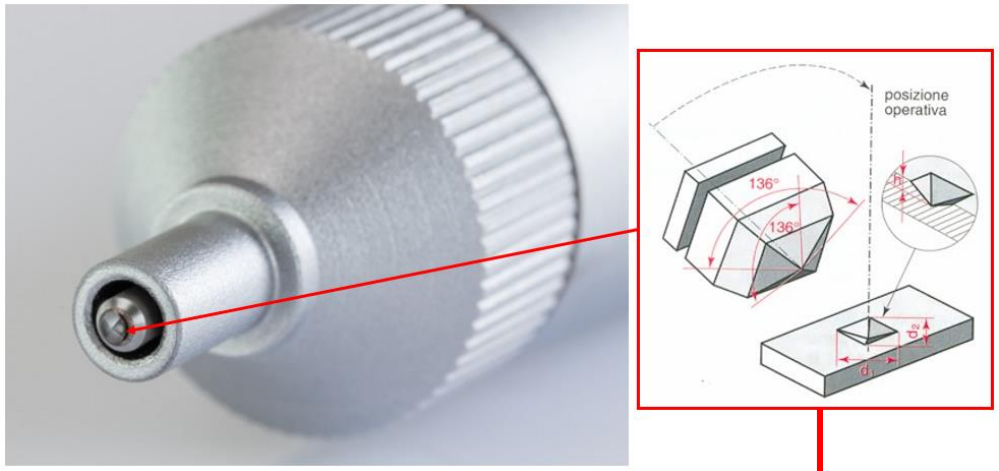
Pro e contro

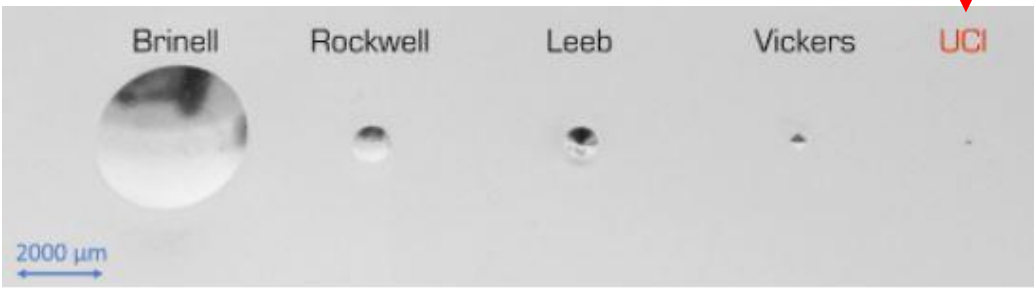
- Prova non invasiva
- Dato influenzato dalla modalità di esecuzione della prova e dalle condizioni del calcestruzzo

Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

Strumentazione

La prova di durezza deve essere eseguita con Microdurometro Vickers basato su metodologia UCI (Ultrasonic Contact Impedance).In commercio sono disponibili numerose tipologie di microdurometri UCI portatili dotati di diversi tipi di sonde e anelli di accoppiamento per l'esecuzione della prova anche su superfici non piane.





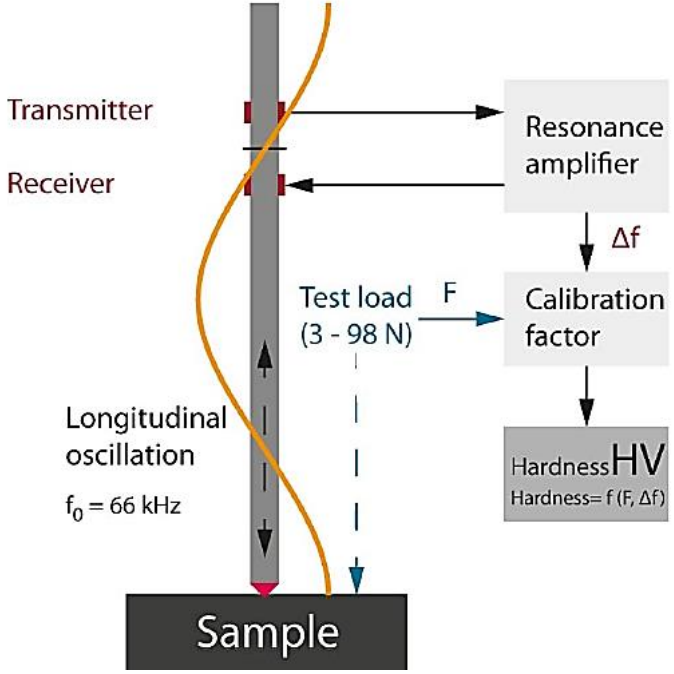
L'impronta del microdurometro UCI è quella avente dimensioni minori e pertanto quella che ben si presta per l'esecuzione delle prove di durezza sui fili dei cavi da precompressione che hanno un diametro di pochi millimetri (3mm-7mm)

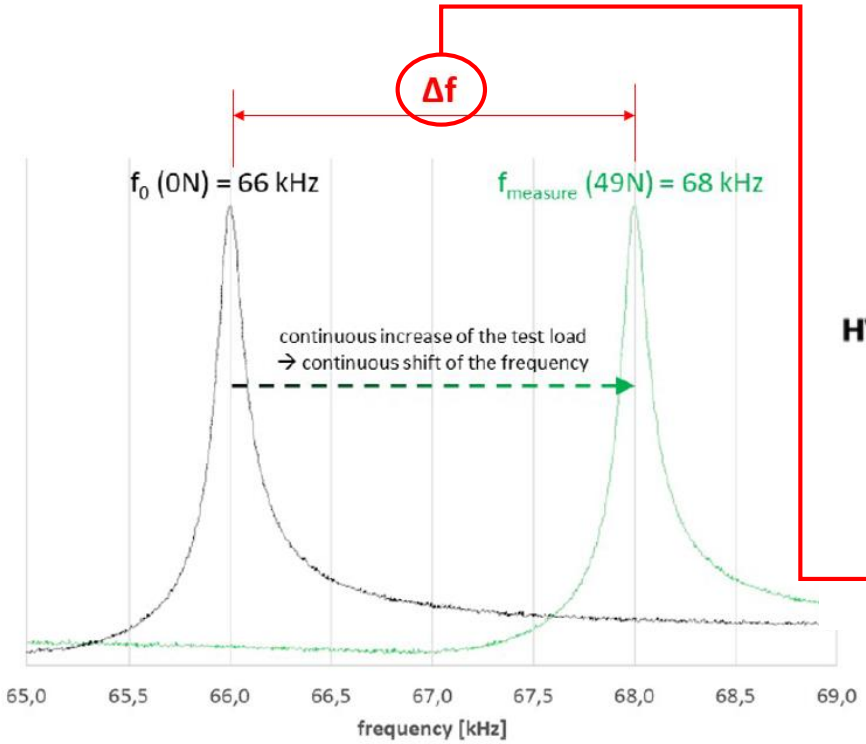
Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

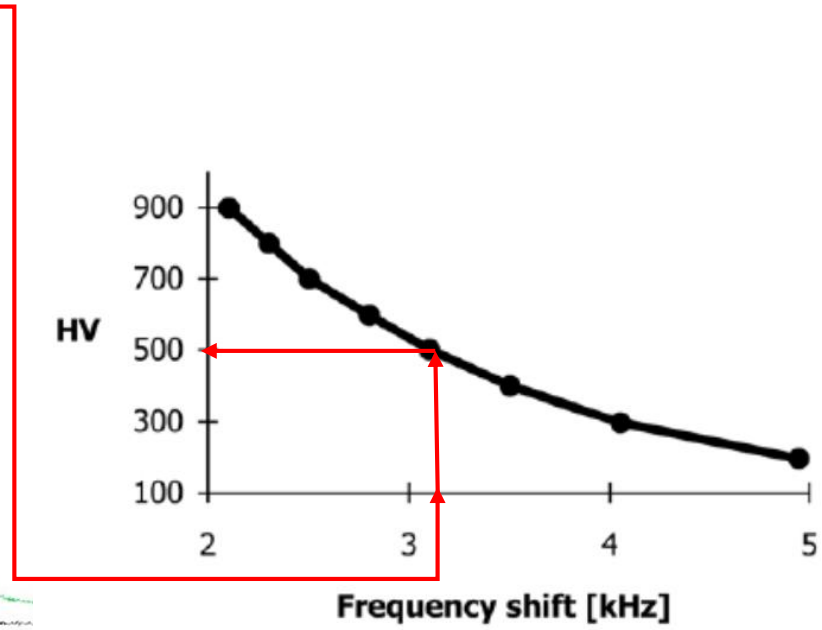
Principio di funzionamento

Un carico di prova definito (da 1a 98 N) viene applicato sul campione da indagare. Per a questo scopo, viene utilizzato un diamante Vickers avente caratteristiche geometriche in accordo con DIN EN ISO 6507-2, montato all'estremità di un'asta vibrante; l'asta, sottoposta a vibrazioni longitudinali create da cristalli piezoelettrici, vibra inizialmente alla sua frequenza di risonanza naturale di f_0=66 kHz.

Man mano che il carico di prova viene applicato dall'operatore, la frequenza misurata si sposta in seguito all'aumento della superficie di contatto tra punta dello strumento e campione. Quando il carico di prova specificato viene raggiunto, la differenza di frequenza $\Delta f = f_{misurata} - f_0$ viene correlata al numero di durezza Vickers .







Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

Procedura

Passi da seguire:

1. Controllo della strumentazione in termini di integrità dello strumento e impostazioni;
2. Ricavare un incavo per ogni punto di misura con mazzetta e scalpello o con martello demolitore, fino al rinvenimento del cavo;
3. Pulitura e sgrassatura della superficie di prova (5-6 cm);
4. Lavorazione della superficie di prova con rettifica e lucidatura del cavo;
5. Scelta del carico di prova (sonda da 50N);
6. Calibrazione dello strumento;
7. Esecuzione delle misure;
8. Valutazione della resistenza a rottura;

Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

Misure attese

Il numero di durezza Vickers (HV) atteso per l'acciaio da precompressione è variabile tra 450HV e 600HV.

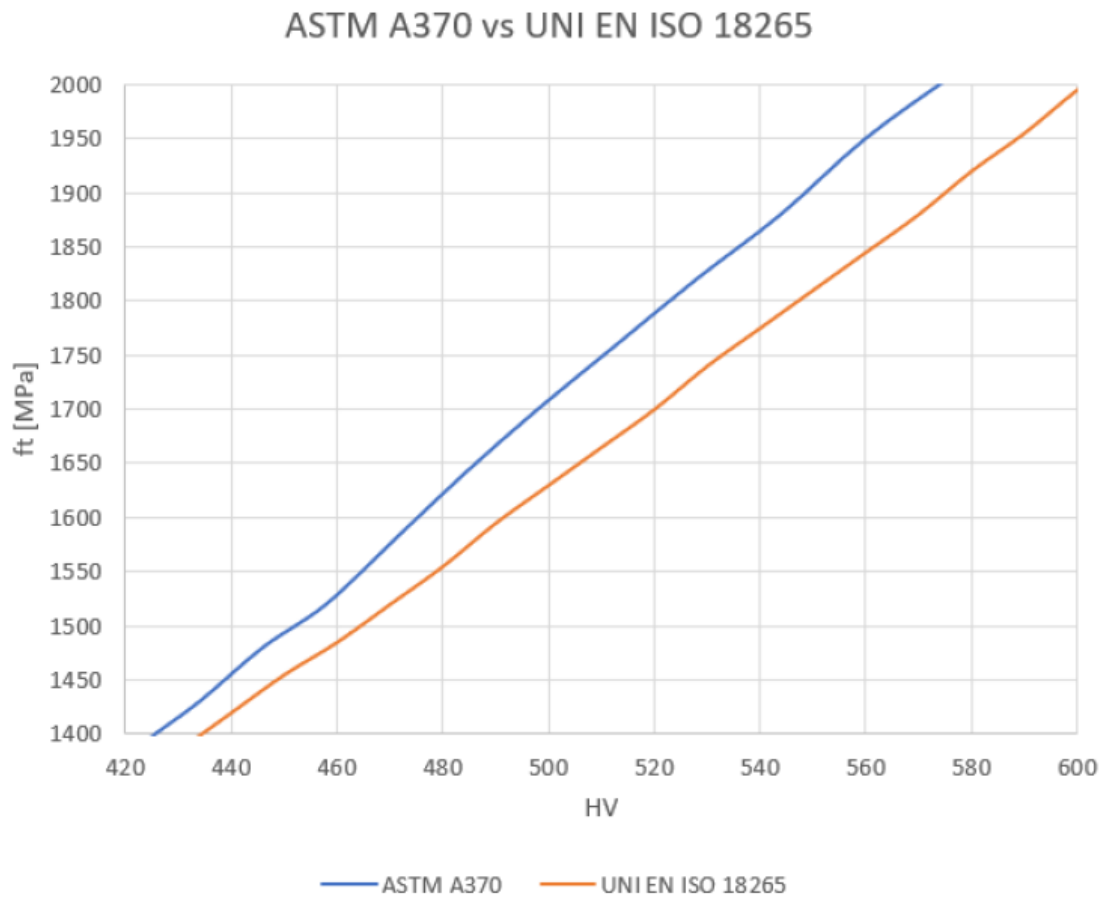
Per la stima della resistenza a rottura dell'acciaio da precompressione si può far riferimento alla seguente formulazione:

$$f_t \cong 3{,}3\mathrm{HV} \quad [\mathrm{MPa}]$$

Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

Criticità

Criticità: conversione valori di durezza per ottenere il valore della resistenza a rottura



- l'ASTM A1038, relativamente a valori di durezza nell'intorno di 500HV (tipici dell'acciaio da precompressione), fornisce valori di resistenza maggiori (5% in più) rispetto alla UNI EN ISO 18265 con differenza che possono arrivare anche a 100MPa
- Le tabelle di conversione non fanno riferimento a tipologie di acciaio come quello impiegato per i cavi da precompressione
- Necessità di avere una legge di correlazione calibrata ad hoc utilizzando i risultati di prove di durezza eseguite in sito e valori di resistenza a rottura da laboratorio

Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

Criticità

Criticità: influenza della superficie da testare (rugosità della superficie, planarità, presenza di polveri…)

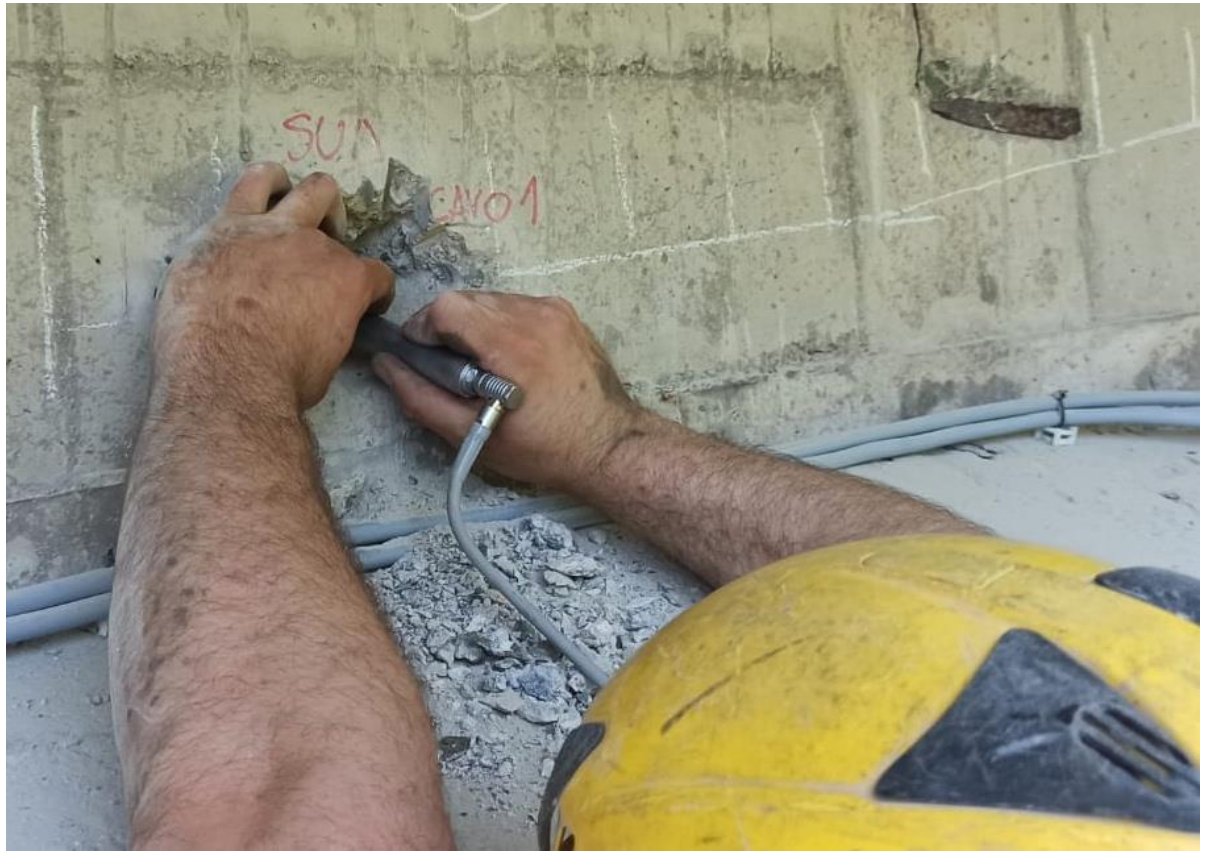
Fig. 27 – Punto di prova n.5.

Fig. 28 – Foto di dettaglio dei fili del cavo di precompressione al punto di prova n.5.

Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

Criticità

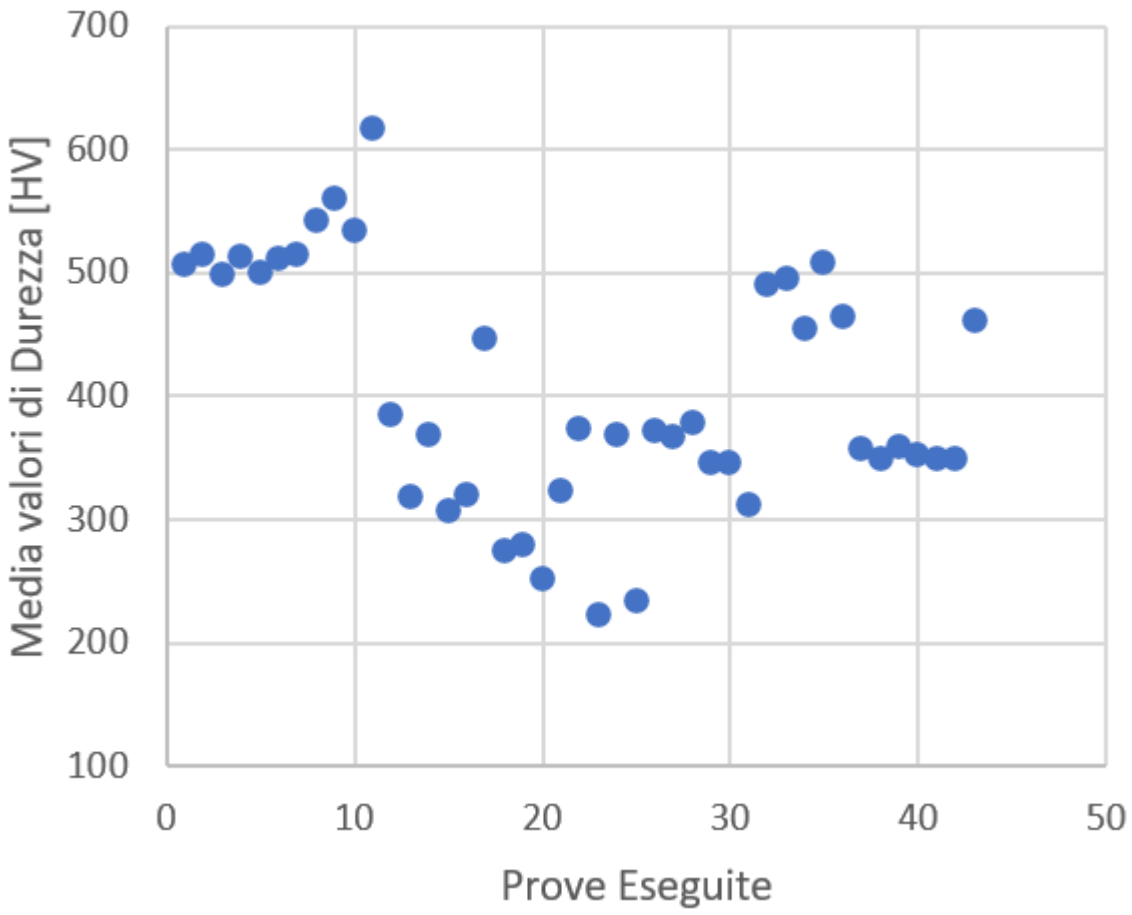
Criticità: influenza delle condizioni di prova come utilizzo o meno di piattaforme (by-bridge o ple), ortogonalità dello strumento alla superficie levigata, inclinazione dello strumento, pressione esercitata dall'operatore

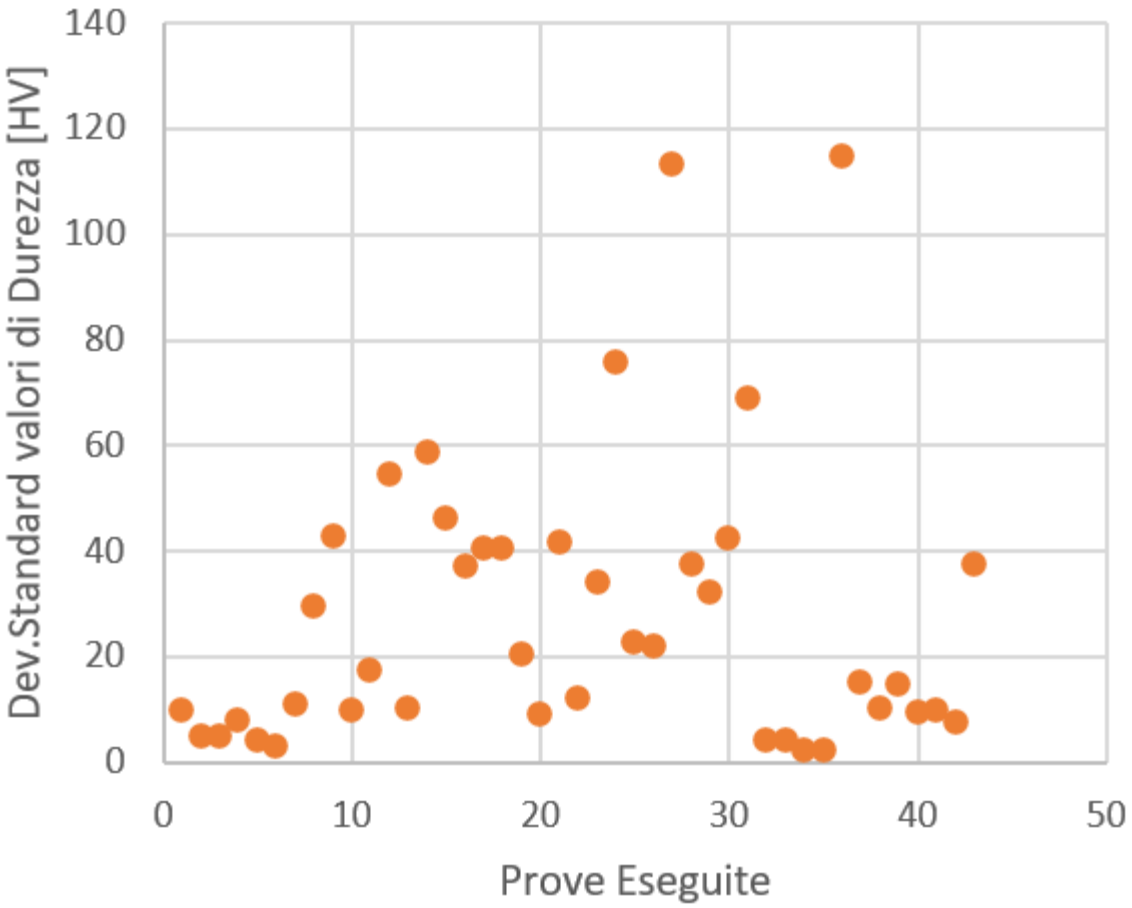


Controlli Non Distruttivi: Prove di durezza su acciaio da precompressione

Criticità

Criticità: variabilità dei risultati





Interpretazione degli esiti delle prove ai fini della valutazione accurata della sicurezza

PROBLEMI (*alcuni, ma non tutti….forse i principali*)

- Fattori di confidenza associati ai 3 Livelli di conoscenza NTC da applicare alla resistenza dell'acciaio armonico
- Definizione del numero di prove per raggiungere un prefissato livello di conoscenza
- Valutazione sperimentale della resistenza dell'acciaio armonico
- Quantificazione dei difetti rilevati sui cavi

Interpretazione degli esiti delle prove ai fini della valutazione accurata della sicurezza

FATTORE DI CONFIDENZA

- Il cap. 8 delle NTC18 è stato concepito per la **valutazione sismica** degli **edifici** prevede tre livelli di conoscenza per i due materiali calcestruzzo ed acciaio ma NON indica i valori dei corrispondenti Fattori di Confidenza.

- Valori indicativi dei Fattori di Confidenza sono proposti nella Circolare Applicativa del 2019

  LC1 -> FC=1,35 / LC2 -> FC = 1,2 / LC3 -> FC = 1,0

- Tali valori pensati per travi e colonne di edifici in c.a. sono ***inadeguati*** se applicati alla resistenza meccanica dell'acciaio armonico degli elementi in c.a.p. post tesi…. **bastano semplici calcoli per rendersene conto**

Considerato che:

- L'acciaio armonico è un prodotto industriale caratterizzato ridotta variazione della resistenza meccanica
- I «dettagli costruttivi» relativi ai cavi da precompressione sono ben definiti nei progetti degli elementi
- Il fattore di confidenza non deve «coprire» rispetto alla presenza dei difetti nei cavi, che devono essere localizzati e quantificati mediante le prove eseguite nel corso delle indagini speciali

→ sarebbe opportuno (e necessario) un aggiornamento normativo con indicazione di FC idonei per il c.a.p. !

Tuttavia, volendo mantenere i livelli di conoscenza ed i corrispondenti valori suggeriti nella CIR19, la proposta FABRE suggerisce tipologia e numerosità delle indagini e prove da eseguire per raggiungere i tre livelli di conoscenza

Interpretazione degli esiti delle prove ai fini della valutazione accurata della sicurezza

Definizione del numero di indagini per la determinazione sperimentale della **resistenza a snervamento dei cavi**

$$R_{py} = A_{res} \cdot f_{py}/FC$$

Area residua del cavo
Parametro geometrico influenzato da eventuale corrosione

→ I difetti hanno distribuzione ipergeometrica → Metodologia delle FHWA per la valutazione del n° di campioni

Tensione a snervamento dell'acciaio
Parametro intrinseco del materiale

→ distribuzione pressoché normale → Applicazione inversa del **metodo t di Student** per la valutazione del n° di campioni

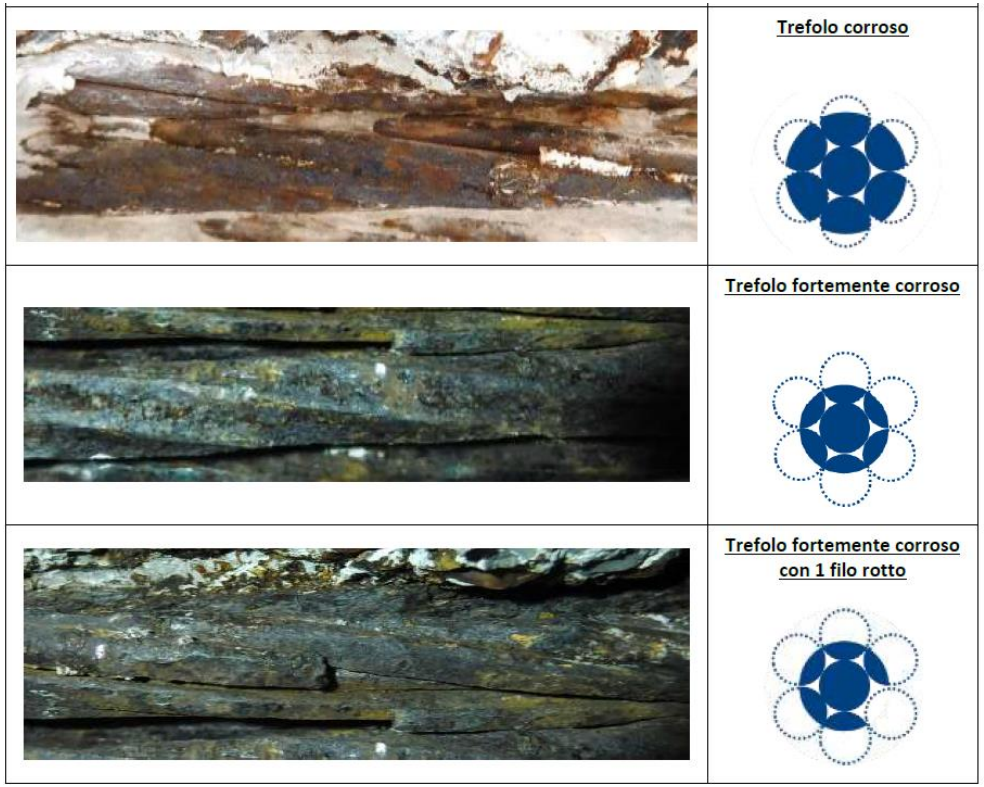
Numerosità delle prove da eseguire in assenza di informazioni sulle caratteristiche del materiale (no prior knowledge) per diversi valori del CV

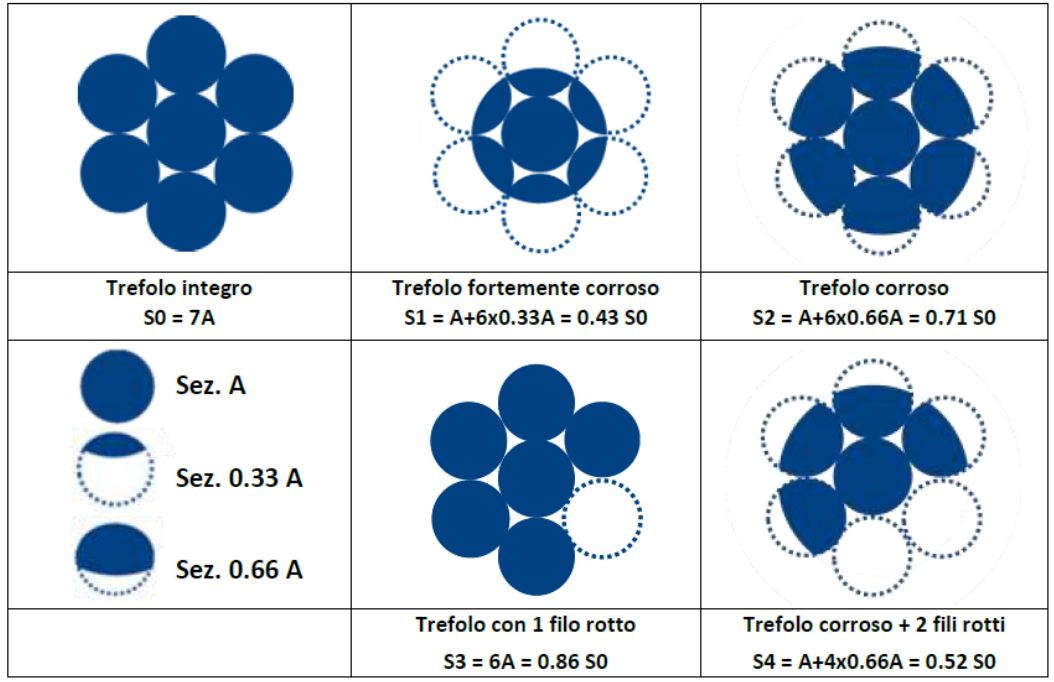
Se sono disponibili informazioni (prior knowledge) i valori in tabella possono essere dimezzati

CV	FC = 1,35	FC = 1,2	FC = 1,0
3%	2	3	6
4%	2	3	9
5%	**2**	**3**	**13**
6 %	2	3	18
10%	2	3	46

Interpretazione degli esiti delle prove ai fini della valutazione accurata della sicurezza

Determinazione dell'area residua **dei cavi in presenza di corrosione**





Interpretazione degli esiti delle prove ai fini della valutazione accurata della sicurezza

Determinazione dell'area residua **dei cavi in presenza di corrosione**

1. Rilevato un solo elemento difettoso → Avendo una sola misura si assume che la **media coincida** con l'unico **valore misurato**

$$\bar{A}_{res} = A_{1,res}$$

2. Rilevati più elementi difettosi → Si applica il **metodo t-Student** al solo **campione difettoso**

$$\bar{A}_{res} = \mu_{1-\alpha} = \bar{X} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha;n-1}$$

3. Non si rileva alcun elemento difettoso → È necessario **ampliare il campione** fino ad ammettere una percentuale di elementi difettosi del 10%, o, in casi particolari, del 5%

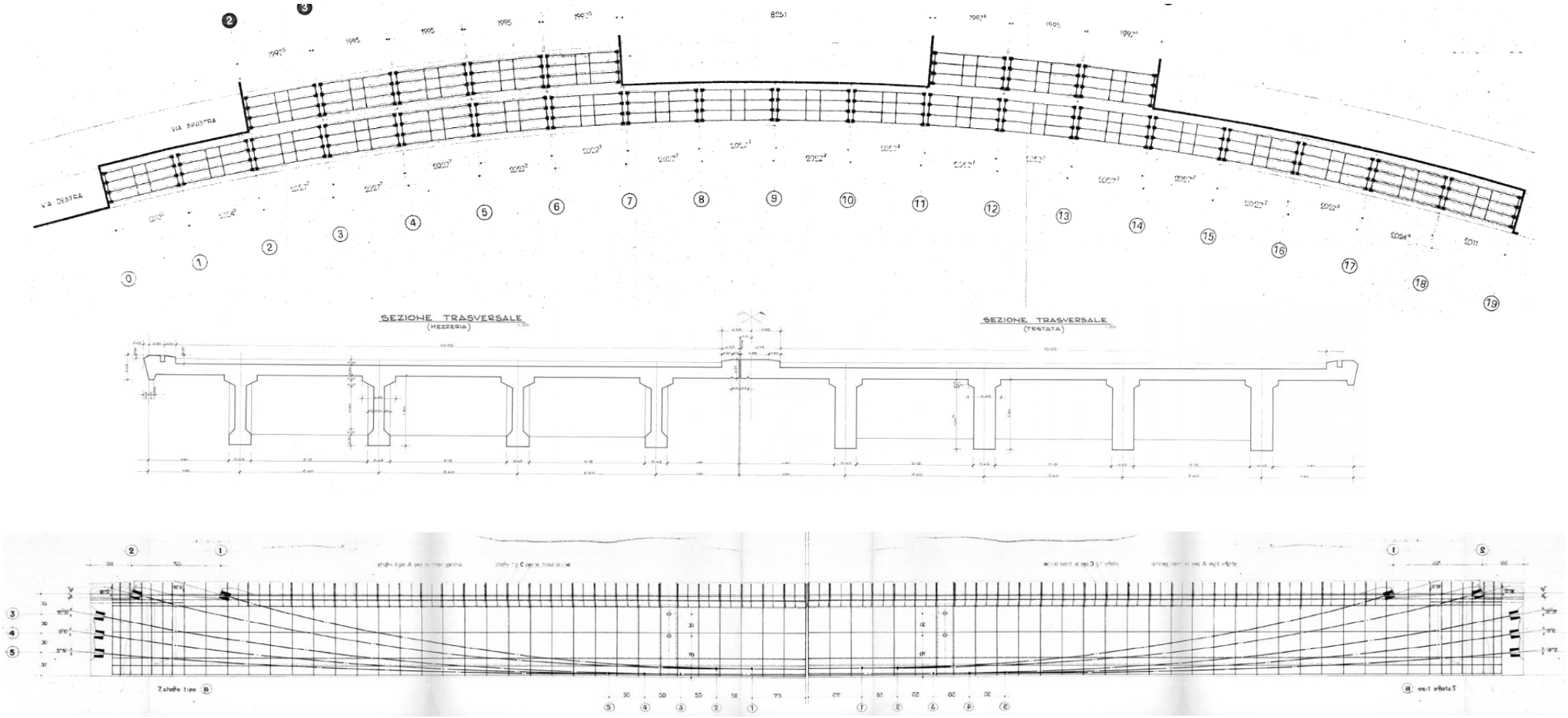
La riduzione di area resistente di applica alla percentuale ammissibile dei cavi difettosi assunta per la determinazione del numero di cavi da indagare

La riduzione di area si considera presente in tutte le sezioni di verifica

Onerosità delle indagini speciali – tempi, costi, tecnici specializzati

Esempio di consistenza delle indagini da svolgere per un tipico impalcato a graticcio

Conformi a svolgimento di FASE 1 + FASE 2 proposta FABRE → VAL4 LC3)



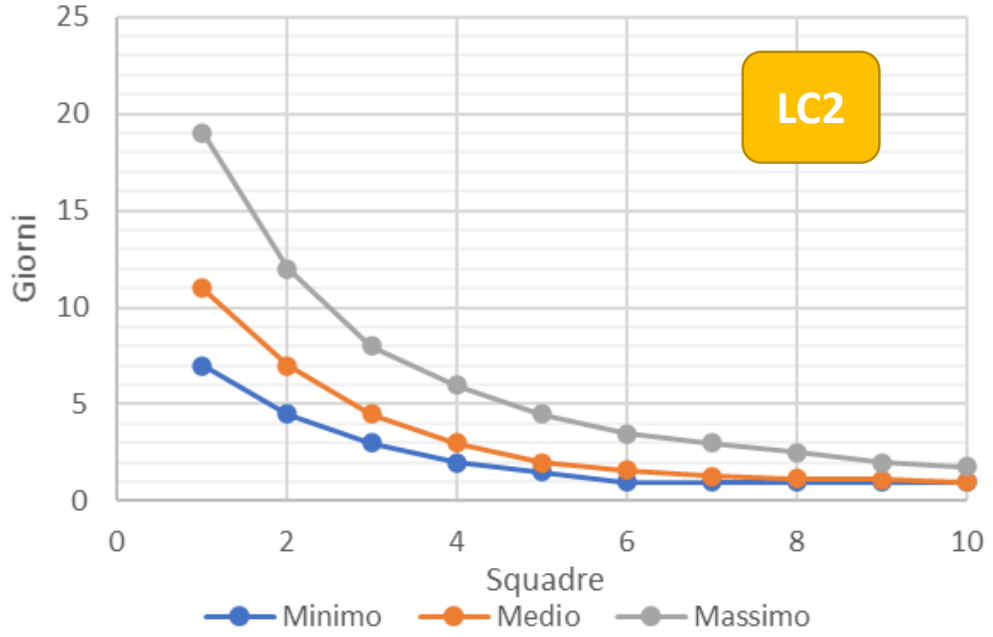
27 campate
108 travi
540 cavi

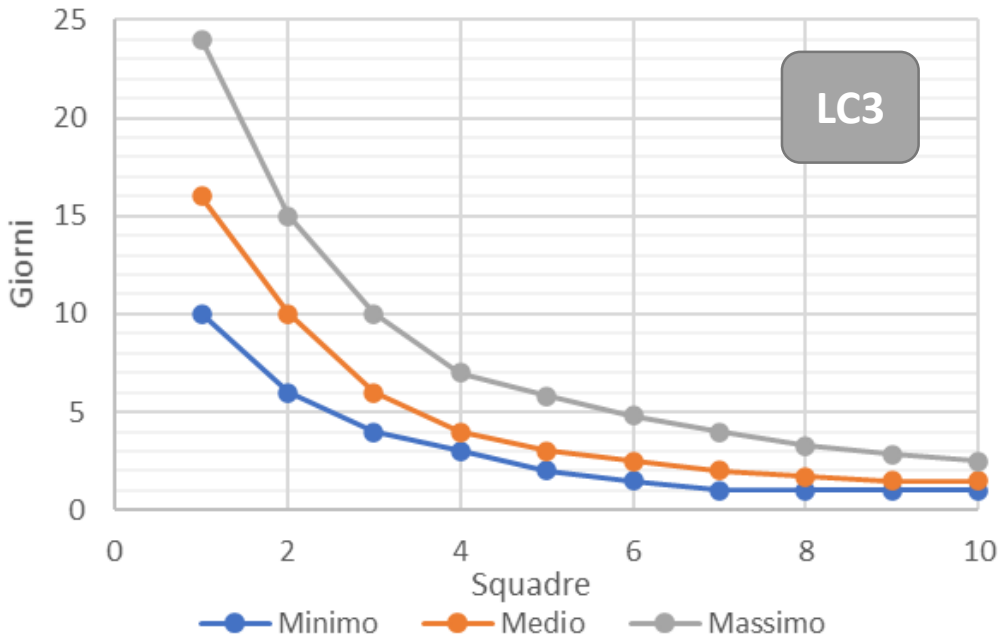
14 cavi da indagare

Prove:
9 GPR
42 tomografie
20/30 endoscopie
3 saggi in testata
6 saggi diretti
6 prove di durezza
6 rilasci cls

Onerosità delle prove – tempi, costi, tecnici specializzati

STIMA DURATA ISPEZIONE SPECIALE SU SINGOLA OPERA





Tre livelli di **complessità** di esecuzione delle indagini: minimo, medio, massimo
Funzione di vari fattori: lunghezza campata, % difetti manifesti e rilevati, agibilità

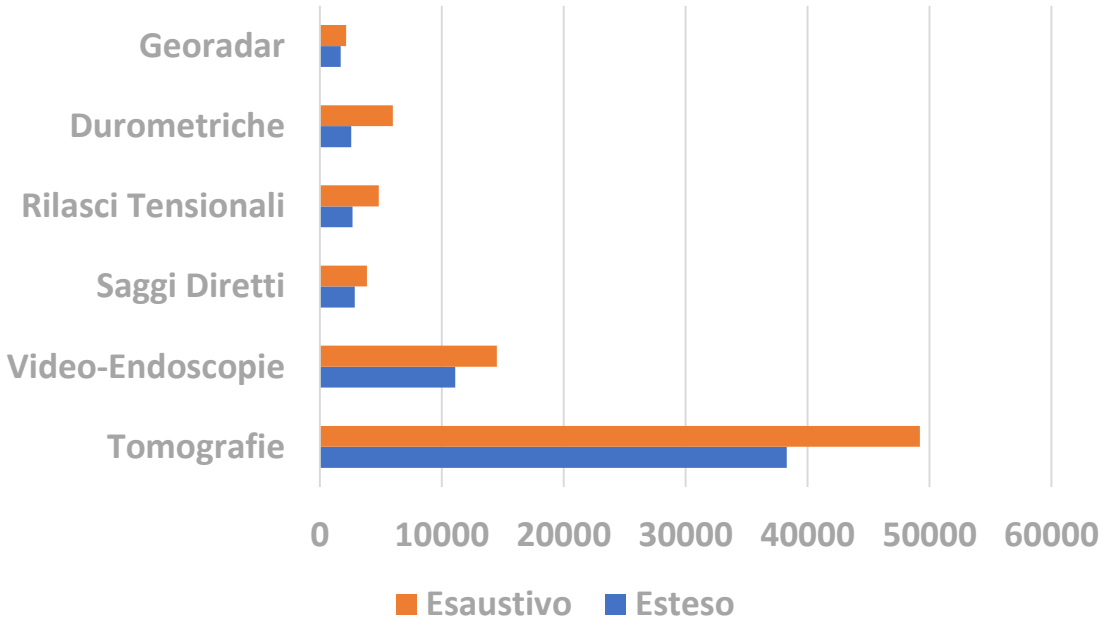
Liv. conoscenza	1 squadra	2 squadre
LC2	7d – 19d	4d – 12d
LC3	10d – 24d	6d – 15d

Hyp: l'incremento delle squadre non genera una proporzionale riduzione del tempo di indagine (**riduzione efficienza del 20%**).

Onerosità delle prove – tempi, costi, tecnici specializzati

STIMA QUANTITATA' SU UN INTERO CATASTO

Opere con cavi scorrevoli [num]	Campate con cavi scorrevoli [num]	Travi con cavi scorrevoli [num]	Lunghezza totale travi con cavi scorrevoli [m]	Lunghezza media travi con cavi scorrevoli [m]	Lunghezza totale cassoni + solettoni [m]
856	7.323	23.370	746.742	31,95	78.071



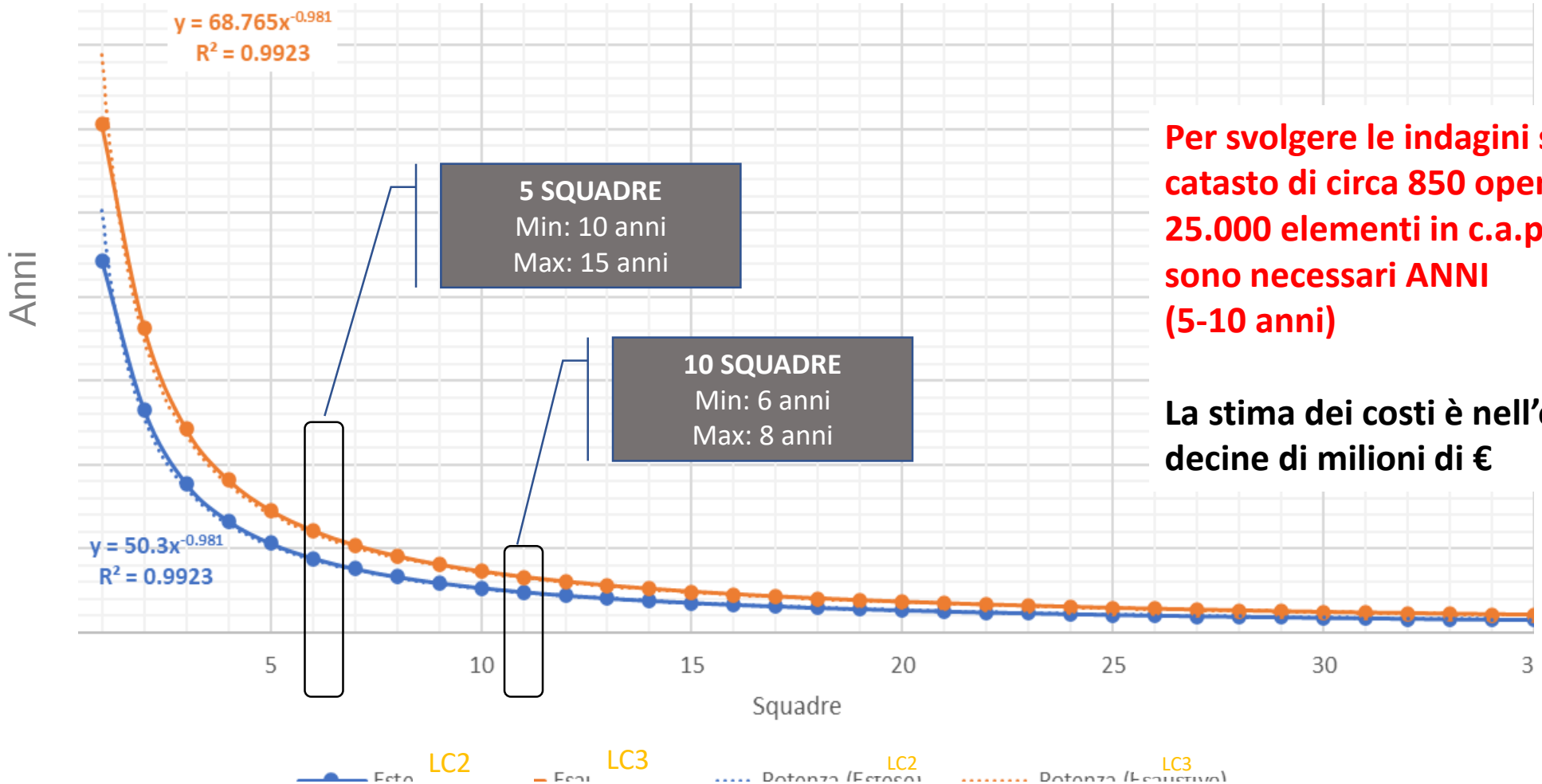
Indagine	LC2	LC3	Incremento da LC2 a LC3
Tomografie	38.294	49.202	28%
Video-Endoscopie	11.092	14.504	31%
Saggi Diretti	2.850	3.844	35%
Rilasci Tensionali	2.680	4.820	80%
Durometriche	2.568	5.992	133%
Georadar	1.712	2.140	25%

Nel passaggio da LC2 a LC3:

- Tomografie, Endoscopie, Saggi Diretti e Georadar aumentano di circa il 30%
- I rilasci tensionali aumentano dell'80% (circa il doppio)
- Le prove durometriche aumentano del 133% (più del doppio)

Onerosità delle prove – tempi, costi, tecnici specializzati

STIMA QUANTITATA' SU UN INTERO CATASTO



Per svolgere le indagini speciali su un catasto di circa 850 opere e circa 25.000 elementi in c.a.p. post-tesi sono necessari ANNI (5-10 anni)

La stima dei costi è nell'ordine delle decine di milioni di €

Il numero di mezzi speciali, di tecnici specializzati e di strumentazione NON è infinito!
Le cantierizzazioni per eseguire le indagini sono realizzabili solo in determinate finestre temporali per esigenze di traffico (e comunque generano un rischio per la sicurezza degli utenti)

Priorizzazione

- È necessario procedere ad una priorizzazione delle opere in c.a.p. a cavi post tesi da sottoporre ad indagini speciali

- Le classi di attenzione non sono idonee (né pensate) per questo scopo (*definiscono insiemi di opere, non forniscono una classifica)*

- Le LG §3.6 suggeriscono: *Nella pianificazione delle ispezioni speciali, maggiore priorità deve essere data ai ponti in c.a.p. a cavi post-tesi la cui costruzione risale agli* ***anni '60/'70*** *e comunque a quelli per cui si rileva un* ***avanzato e rilevante stato di degrado****.* Elementi non sufficienti

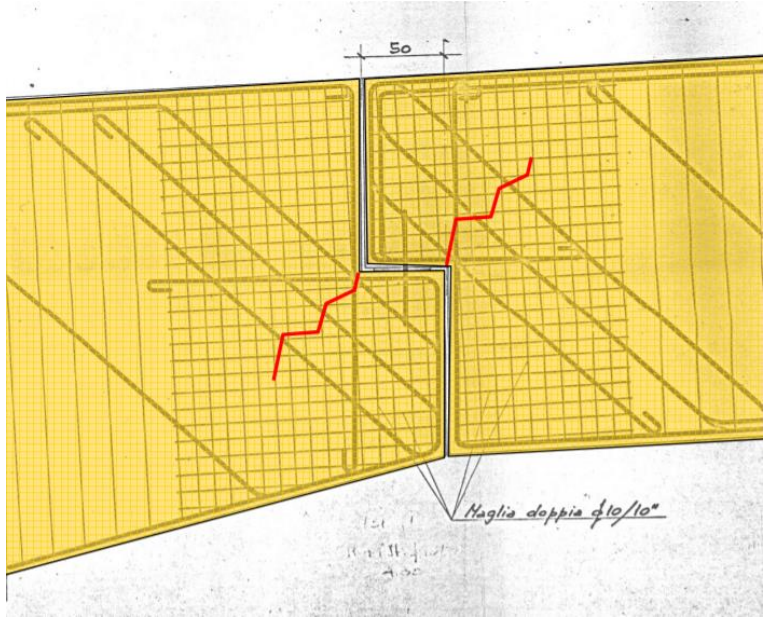
- La priorizzazione si deve basare su:
  - ✓ *robustezza strutturale*
  - ✓ *stato di conservazione*
  - ✓ *condizioni ambientali*

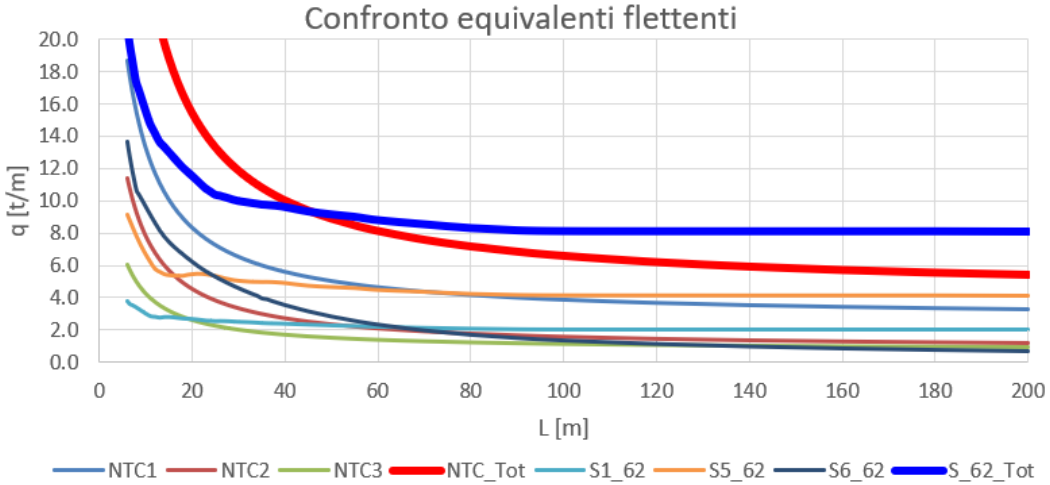
Priorizzazione

Criteri di Priorizzazione

- **Fattori Intrinseci**
  - Geometria
  - Tipologia
  - Particolari Costruttivi
  - Vetustà
  - Materiali e tecnologia Costruttiva
  - Difettosità

- **Fattori Estrinseci**
  - Rapporto Sollecitazioni di Progetto/NTC





Priorizzazione

Attribuzione Punteggio a ogni Fattore

Luce	Punteggio
Fino a 15m	+3
da 16m a 34m	+2
da 34m a 50m	+1
superiore a 50m	+0

Tipo	Punteggio
Graticcio	+1
Solettone	+0.5
Cassone	+0

Difetto su elementi principali	Punteggio
A1	+5
A2	+4
B1	+3
B2	+2
<B2	+0

Normativa di progetto	Punteggio
Normativa ≤1945	+4
1945≤ Normativa <1962	+3
1962≤ Normativa <1990	+1
1990≤ Normativa <2008	+0.5
Normativa≥2008	+0

N°travi	Punteggio
2	+2
3	+1.5
4	+1
5	+0.5
>5	+0
Solettone/Cassone	+1

Conclusioni sulle indagini speciali

- È necessario **affinare le tecniche di indagine** più ricorrenti per migliorare l'affidabilità dei risultati e ridurre tempi e costi di esecuzione. *E continuare la sperimentazione di nuovo (flusso magnetico, diffrattometria raggi X, …)*

- È necessario determinare **idonei FC** per l'acciaio armonico (*1,35 non ha senso)….*
- *…. e per raggiungere un livello di conoscenza limitato disponendo di informazioni di progetto **NON** sono necessarie prove di caratterizzazione meccanica per l'acciaio armonico*

- Ma soprattutto è necessario procedere ad una **priorizzazione** delle opere in c.a.p. a cavi post tesi da sottoporre a indagini dirette sui cavi basata su robustezza strutturale, condizioni ambientali , stato di conservazioni, esposizione … **l'attenzione va concentrata sulle opere che ne hanno effettivo bisogno**

- Per opere caratterizzate da **elevata robustezza strutturale** - classici impalcati a graticcio – in **buono stato di conservazione**, senza difetti e/o segnali spia, **le indagini dirette sui cavi non sono una reale priorità**, è più utile installare un sistema di monitoraggio ….

- … ma **sistemi di monitoraggio *semplici ed economici!*** Pochi strumenti di misura, di facile installazione ed interpretazione dei dati.

- Il **monitoraggio** è comunque necessario per tenere sotto controllo l'opera per gli anni a venire .. *le indagini speciali sono il (nuovo) tempo zero*