

*Giornata di Aggiornamento*  
*“Idoneità statica e collaudo delle strutture”*  
*Oristano, 25 febbraio 2011*



# **PROGETTAZIONE DELLE PROVE DI CARICO**

**prof. ing. Sergio Tattoni**

Università degli Studi di Cagliari - Facoltà di Ingegneria  
Dipartimento di Ingegneria Strutturale Infrastrutturale e Geomatica

## Argomenti

- Il collaudo statico nella vigente normativa
- La determinazione dei carichi di collaudo
- Interpretazione delle prove
- Le deformazioni
- Prove particolari

## Il collaudo ... a tavolino!

Sovente il collaudo di un'opera si risolveva in un banchetto ...



- ... senza nulla togliere ai piaceri conviviali ed auspicando la conservazione di tradizioni quasi perdute, oggi il collaudo statico ha ripreso la connotazione di un'operazione complessa e carica di responsabilità!

## Dove si richiama il collaudo statico - 1

DM 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

### 3.1.4 CARICHI VARIABILI

In presenza di carichi atipici (quali macchinari, serbatoi, depositi interni, impianti, ecc.) le intensità devono essere valutate caso per caso, in funzione dei massimi prevedibili: tali valori dovranno essere indicati esplicitamente nelle documentazioni di progetto e di collaudo statico.

Normativa

*Carichi atipici.*

## Dove si richiama il collaudo statico - 2

DM 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

### **7.10 COSTRUZIONI E PONTI CON ISOLAMENTO E/O DISSIPAZIONE**

#### **7.10.8 ACCORGIMENTI SPECIFICI IN FASE DI COLLAUDO**

Il collaudo statico deve essere effettuato in corso d'opera; al riguardo si segnala che di fondamentale importanza è il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto, nonché la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti, con il rigoroso rispetto delle distanze di separazione previste in progetto.

Il collaudatore può disporre l'esecuzione di speciali prove per la caratterizzazione dinamica del sistema di isolamento, atte a verificare, nei riguardi di azioni di tipo sismico, che le caratteristiche della costruzione corrispondano a quelle attese.

Normativa

*Controlli particolari degli appoggi e dei vincoli (o svincoli).*

## Dove si richiama il collaudo statico - 3

DM 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

### **8 COSTRUZIONI ESISTENTI**

Gli interventi di adeguamento e miglioramento devono essere sottoposti a collaudo statico.

Normativa

*Anche gli interventi di adeguamento dell'esistente devono essere collaudati.*

## Prescrizioni per il collaudo

DM 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

### 9 COLLAUDO STATICO

#### 9.1 PRESCRIZIONI GENERALI

Il collaudo statico riguarda il giudizio sul comportamento e le prestazioni delle parti dell'opera che svolgono funzione portante.

Il collaudo statico, tranne casi particolari, va eseguito in corso d'opera quando vengono posti in opera elementi strutturali non più ispezionabili, controllabili e collaudabili a seguito del proseguire della costruzione.

Le opere non possono essere poste in esercizio prima dell'effettuazione del collaudo statico.

Normativa

## Adempimenti del collaudatore - 1

DM 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni

### Adempimenti

- a) **controllo dei materiali** (regolamentati dal DPR 6.6.2001 n. 380, leggi n. 1086/71 e n. 64/74) sia con materiali diversi;
- b) **ispezione dell'opera** nelle varie fasi costruttive degli elementi strutturali ... con particolare riguardo alle parti strutturali più importanti.
- c) esame dei certificati delle prove sui materiali ...;
- d) esame dei certificati di cui ai controlli in stabilimento e nel ciclo produttivo...;
- e) controllo dei verbali e dei risultati delle eventuali **prove di carico** fatte eseguire dal Direttore dei Lavori.

Obbligatoria

## Adempimenti del collaudatore - 2

- f) esaminare il progetto dell'opera, l'impostazione generale, della progettazione nei suoi vari aspetti ...;
- g) esaminare le indagini eseguite nelle fasi di progettazione e costruzione ...;
- h) esaminare la relazione a strutture ultimate del Direttore dei lavori, ove richiesta;

Obbligatori

## Adempimenti del collaudatore - 3

- i) di effettuare tutti quegli accertamenti, studi, indagini, sperimentazioni e ricerche utili per formarsi il convincimento della sicurezza, della durabilità e della collaudabilità dell'opera, quali in particolare:
  - prove di carico;
  - prove sui materiali messi in opera, anche mediante metodi non distruttivi;
  - monitoraggio programmato di grandezze significative del comportamento dell'opera da proseguire, eventualmente, anche dopo il collaudo della stessa.

Discrezionali

*Le prove di carico, ove ritenute necessarie dal Collaudatore, dovranno identificare la corrispondenza del comportamento teorico e quello sperimentale.*

## Responsabilità del Collaudatore

Il programma delle prove, stabilito dal Collaudatore, con l'indicazione delle procedure di carico e delle prestazioni attese deve essere sottoposto al Direttore dei lavori per l'attuazione e reso noto al Progettista e al Costruttore.

Le prove di carico si devono svolgere con le modalità indicate dal Collaudatore che se ne assume la piena responsabilità, mentre, per quanto riguarda la loro materiale attuazione, è responsabile il Direttore dei lavori.

Normativa

*Responsabilità del progetto delle prove*

*Responsabilità dell'esecuzione delle prove*

## Criteri di progettazione delle prove

Le prove di carico sono prove di comportamento delle opere sotto le azioni di esercizio.

Queste devono essere, in generale, tali da indurre le **sollecitazioni massime** di esercizio per combinazioni caratteristiche (rare).

In relazione al tipo della struttura ed alla natura dei carichi le prove possono essere convenientemente protratte nel tempo, ovvero ripetute su più cicli.

Normativa

**ATTENZIONE!** *Si richiede di ricreare uno stato tensionale definito, ma generalmente si misurano deformazioni (frecce).*

*Come correlare le due grandezze?*

## Criteria di valutazione delle prove

L'esito della prova va valutato sulla base dei seguenti elementi:

- le deformazioni si accrescano all'incirca proporzionalmente ai carichi;
- nel corso della prova non si siano prodotte fratture, fessurazioni, deformazioni o dissesti che compromettono la sicurezza o la conservazione dell'opera;
- la deformazione residua dopo la prima applicazione del carico massimo non superi una quota parte di quella totale commisurata ai prevedibili assestamenti iniziali di tipo anelastico della struttura oggetto della prova. Nel caso invece che tale limite venga superato, prove di carico successive devono indicare che la struttura tenda ad un comportamento elastico.
- la deformazione elastica risulti non maggiore di quella calcolata.

Normativa

*Il giudizio sull'esito della prova è responsabilità del Collaudatore.*

## Casi particolari

### **9.2.1 STRUTTURE PREFABBRICATE**

In presenza di strutture prefabbricate poste in opera, fermo restando quanto sopra specificato, si devono eseguire controlli atti a verificare la rispondenza dell'opera ai requisiti di progetto;

è inoltre fondamentale il preventivo controllo della posa degli elementi prefabbricati e del rispetto del progetto nelle tolleranze e nelle disposizioni delle armature e dei giunti, nonché nella verifica dei dispositivi di vincolo.

Normativa

## Carichi di prova

Scelta del tipo e dell'entità dei carichi in funzione:

- Delle possibilità operative
- Della porzione di struttura che si intende caricare (carichi equivalenti)
- Dello stato di sollecitazione che si vuole indurre (flessione, taglio, azione assiale, torsione)

Carichi

## Carichi equivalenti

Non sempre si riescono a ricreare le condizioni di carico di progetto (generalmente carico uniformemente distribuito su tutta la struttura).

Utilizzando carichi concentrati (pistoni tiranti o prementi o catene di appensione) o carichi distribuiti su aree limitate (sacchi di cemento o vasche d'acqua) si deve valutare il carico necessario per ottenere un'azione interna pari a quella di esercizio.

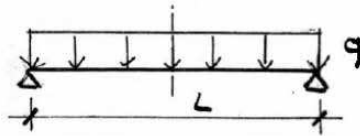
Generalmente tale azione è il momento flettente; si deve comunque controllare anche il corrispondente taglio per evitare inconvenienti, specie in elementi tozzi.

Carichi



## Carichi equivalenti flettenti per carichi concentrati -1

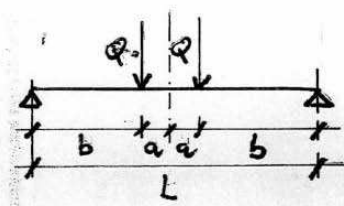
Carico distribuito:



$$M_c = \frac{q \cdot L^2}{8}$$

$$V_{\max} = \frac{q \cdot L}{2}$$

Due carichi concentrati



$$M_c = Q \cdot \left( \frac{L}{2} - a \right)$$

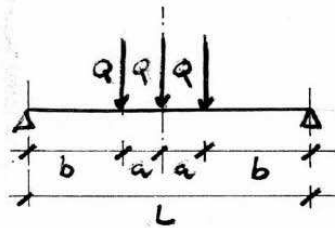
$$Q_{eq} = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot \left( \frac{L}{2} - a \right)}$$

$$V_{\max} = \frac{q \cdot L}{2} \cdot \frac{L}{4 \cdot \left( \frac{L}{2} - a \right)}$$

Carichi

## Carichi equivalenti flettenti per carichi concentrati- 2

Tre carichi concentrati

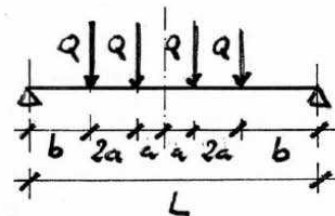


$$M_c = Q \cdot \left( \frac{3 \cdot L}{2} - a \right)$$

$$Q_{eq} = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot \left( \frac{3 \cdot L}{2} - a \right)}$$

$$V_{\max} = \frac{q \cdot L}{2} \cdot \frac{L}{8 \cdot \left( \frac{3 \cdot L}{2} - a \right)}$$

Quattro carichi concentrati



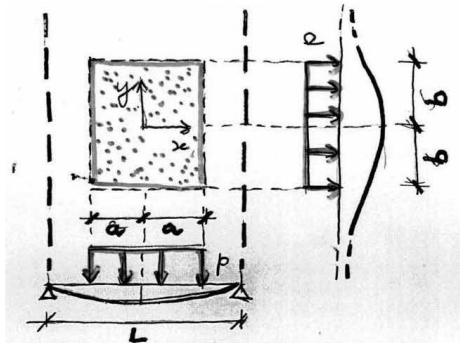
$$M_c = Q \cdot (2 \cdot L - 4 \cdot a)$$

$$Q_{eq} = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot (2L - 4a)}$$

$$V_{\max} = \frac{q \cdot L}{2} \cdot \frac{L}{4 \cdot (2 \cdot L - 4 \cdot a)}$$

Carichi

## Carichi equivalenti flettenti per aree parziali di carico -1



Maggiorazione per riduzione secondo x ( $2a < L$ )

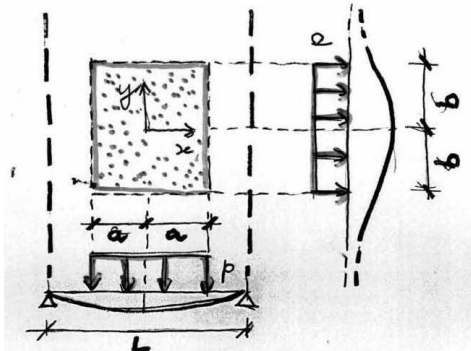
$$(c_x p) \cdot a \cdot \frac{(L - a)}{2} = \frac{p \cdot L^2}{8}$$

Maggiorazione per riduzione secondo y ( $2b < \infty$ )

Carichi

$$c_y := \frac{1}{1 - e^{-\alpha \cdot b}} \quad \alpha := \frac{k}{4 \cdot E J_y} \quad \frac{k \cdot a}{24 \cdot E J_x} \cdot (L^3 - 2 \cdot L \cdot a^2 + a^3) = 1$$

## Carichi equivalenti flettenti per aree parziali di carico -2



$J_x$  = mom. d'inerzia di una striscia secondo x di larghezza 1

$J_y$  = mom. d'inerzia di una striscia secondo y di larghezza 1

Coefficiente di maggiorazione totale

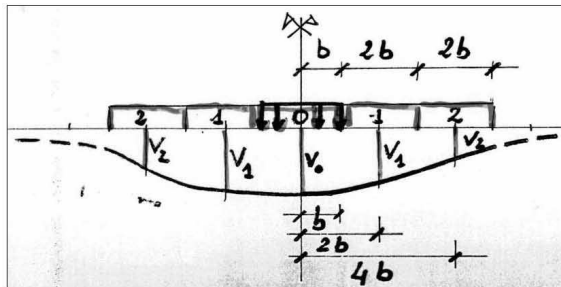
$$c = c_x \cdot c_y$$

Carico equivalente

$$p_{eq} = p \cdot c$$

Carichi

## Carichi equivalenti flettenti per aree parziali di carico: determinazione sperimentale di $c_y$



Per il teorema di Maxwell, l'effetto del carico  $i$  nel punto di applicazione del carico  $0$  è uguale all'effetto del carico  $0$  nel punto di applicazione del carico  $i$

Se tutto il solaio fosse caricato, la freccia totale potrebbe calcolarsi come contributo delle singole aree di carico

$$v_{\text{tot}} = v_0 + 2 \cdot (v_1 + v_2 + \dots) \cong v_0 + 2 \cdot (v_1 + v_2)$$

Per ottenere la stessa freccia con carico su area finita ( $2b < \infty$ ), il carico deve essere amplificato del fattore

$$c_y = \frac{v_{\text{tot}}}{v_0} = \frac{v_0 + 2 \cdot (v_1 + v_2)}{v_0}$$

Carichi

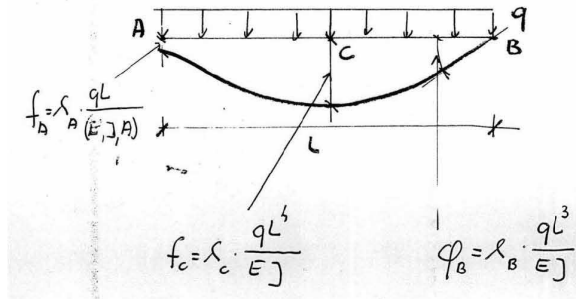
## Deformazioni

- Individuazione delle grandezze rappresentative che si intendono misurare (freccia, rotazioni, deformazioni)
- Scelta degli strumenti più opportuni, anche in funzione dell'entità delle deformazioni previste
- Posizionamento di strumenti atti a misurare spostamenti o deformazioni di natura termica
- Strumenti di controllo dei vincoli.

**Anche lo "0" è un risultato!**  
È opportuno disporre strumenti di controllo in punti di spostamento nullo (p.e. appoggi).

Deformazioni

## Deformazioni elastiche: il problema dell'interpretazione



Deformazioni

In genere  $q$  ed  $L$  sono facilmente misurabili, mentre sono soggetti ad incerta valutazione

- coefficienti  $\lambda_i$  che dipendono dalle condizioni di vincolo (anche quelle non previste dal calcolo)
- modulo elastico del materiale  $E$
- momento d'inerzia  $J$  della sezione (collaborazione di elementi non strutturali quali cappe, intonaci, murature)

## Deformazioni elastiche: il problema dell'interpretazione - 1

Trave continua L=5m sez 25x45

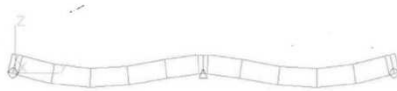
Una struttura può essere modellata con diverso grado di accuratezza e sofisticazione, giungendo a risultati spesso assai diversi

Modellazione classica

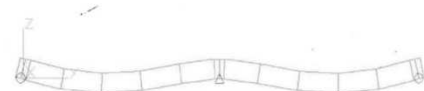


SCHEMA 2: 10 elem. beam, appoggi puntiformi, carichi sui nodi

Elementi 2D ed appoggi puntiformi o con larghezza finita



SCHEMA 3: 16 elementi lastre, appoggi puntiformi, carichi sui nodi

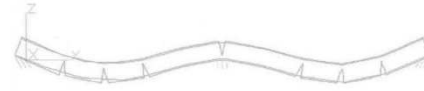


SCHEMA 3: 16 elementi lastre, appoggi puntiformi, carichi sui nodi

Elementi 2D con fessurazione ed appoggi bilateri o unilateri



SCHEMA 5: elem. lastre e truss, appoggi puntiformi, carichi sui nodi



SCHEMA 6: elem. lastre e truss, appoggi unilateri, carichi sui nodi

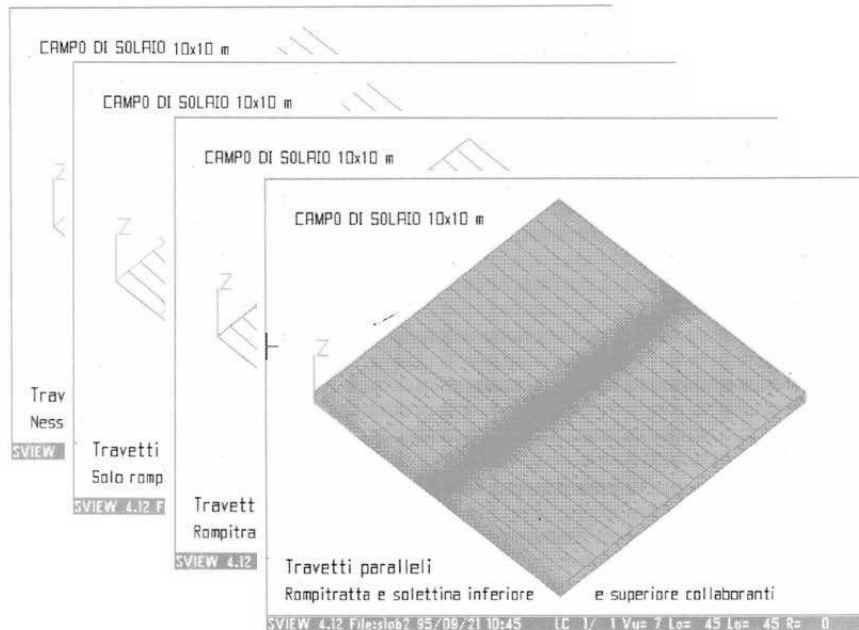
## Deformazioni elastiche: il problema dell'interpretazione - 2

Trave continua L=5m sez 25x45

N	Modello di calcolo	F mm	Diff. %
1	Trave continua (formule chiuse) appoggi puntiformi carico uniformemente distribuito	3.481	-
2	FEM 5+5 elementi beam appoggi puntiformi carico applicato ai nodi	3.479	~ 0
3	FEM 8+8 elementi 2D appoggi puntiformi carico applicato ai nodi	3.362	-3.4
4	FEM 8+8 elementi 2D appoggi di larghezza finita(b = 25 cm) carico applicato ai nodi	2.184	-37.3
5	FEM elementi 2D (cls) e truss (armature), fessure appoggi di larghezza finita(b = 25 cm) carico applicato ai nodi	6.03	+73.2
6	FEM elementi 2D (cls) e truss (armature), fessure appoggi unilateri di larghezza finita(b = 25 cm) carico applicato ai nodi	5.295	+52.1

## Deformazioni elastiche: il problema dell'interpretazione - 3

Solajo in c.a.  
carico su una striscia



## Deformazioni elastiche: il problema dell'interpretazione - 4

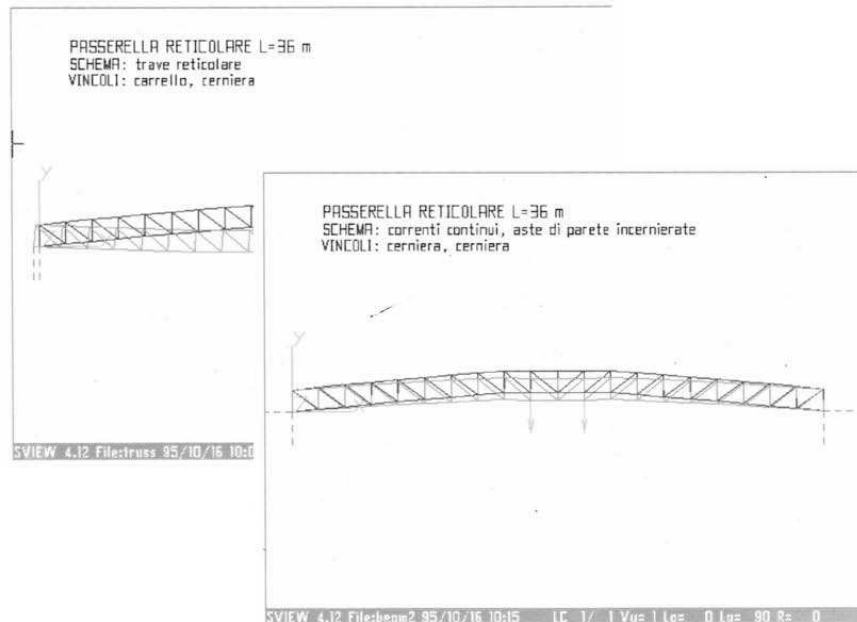
### SOLETTA 10 × 10 m CARICATA SU UNA STRISCIA CENTRALE

Solaio in c.a.  
carico su una striscia

N°	Modello di calcolo		f <sub>max</sub> [mm]	Trave princ.		Soletta inf.re	
				M <sub>max</sub> [KNm]	M <sub>max</sub> [KNm]	σ <sub>max</sub> [MPa]	σ <sub>max</sub> [MPa]
1	Travi parallele Nessuna collaborazione		42.8	125	-	-	-
2	Travi parallele Solo rompitratta collaborante		20.6	55.2	117	-	-
3	Travi parallele Collaborano il rompitratta e la soletta superiore		20.0	53.4	104	-	-
4	Travi parallele Collaborano il rompitratta e le solettine superiore ed inferiore		2.8	6.8	11	2.23	2.23

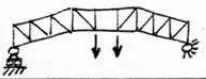
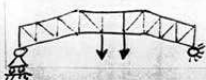
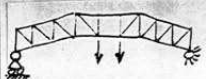
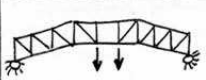
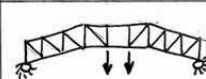
## Deformazioni elastiche: il problema dell'interpretazione - 5

Ponte pedonale in acciaio  
L = 36 m



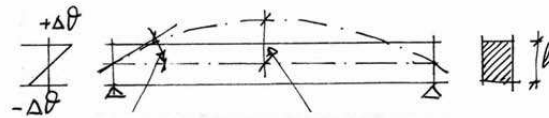
## Deformazioni elastiche: il problema dell'interpretazione - 6

Ponte pedonale in acciaio  
L = 36 m

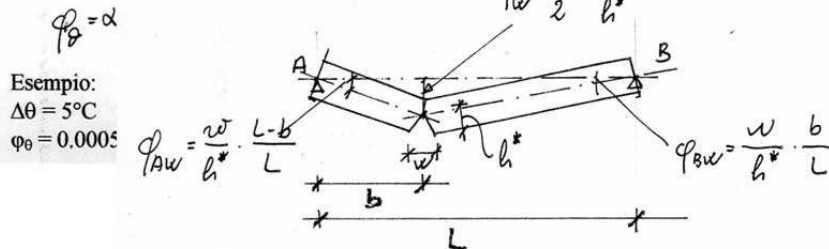
N°	Modello di calcolo	Schema di vincolo	$f_{max}$ [mm]
1	Trave reticolare isostatica. Correnti: bielle Aste di parete: bielle		79.6
2	Telaio piano. Correnti: travi continue Aste di parete: bielle		75.8
3	Telaio piano. Correnti ed aste di parete: incastrati fra loro.		74.3
4	Trave reticolare iperstatica. Correnti: bielle Aste di parete: bielle		23.5
5	Telaio piano. Correnti: travi continue Aste di parete: bielle		22.2
6	Struttura reale	?	24.1

## Deformazioni anelastiche - 1

Deformazioni termiche



Apertura di fessure



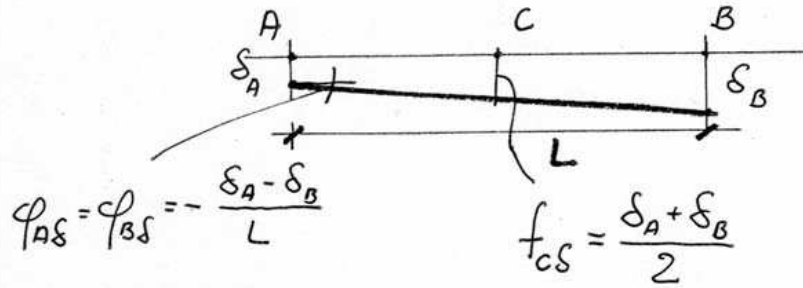
Esempio:  
 $L = 6 \text{ m}$        $h = 60 \text{ cm}$        $w = 0.1 \text{ mm}$        $b = L/2$   
 $f_w = 0.3 \text{ mm}$

Travi semplici

## Deformazioni anelastiche - 2

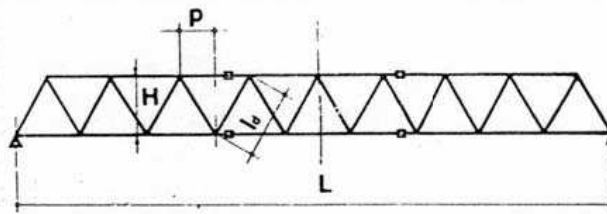
### Cedimento degli appoggi

Travi semplici  
cedimento degli appoggi



## Deformazioni anelastiche - 3

Travi reticolari  
assessamento giunzioni



$$f_0 = f_c + f_a$$

Precisamente se:

- $\Delta$  = differenza tra il diametro dei fori e quello dei bulloni;
- $n$  = numero totale dei giunti nei correnti, del tipo a sovrapposizione (i giunti coprigiuntati contano per due);
- $L$  = luce della trave;
- $H$  = altezza della trave;
- $p$  = passo della tralicciatura;
- $l_a$  = lunghezza della diagonale;

$$f_c = \frac{n}{6} \frac{L}{H} \Delta$$

$$f_a = \frac{L}{p} \frac{l_a}{H} \Delta$$

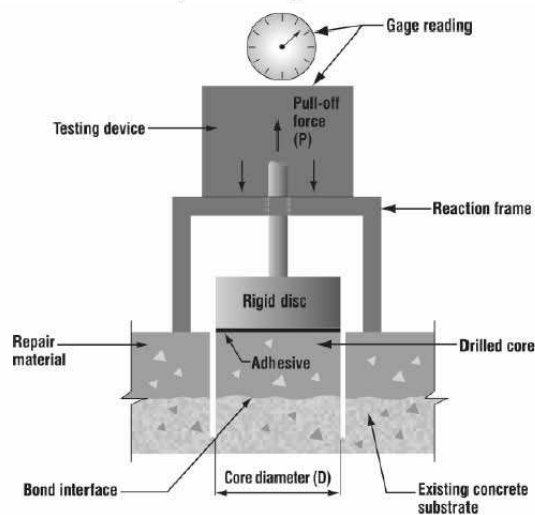


## Adesione riporto di calcestruzzo su esistente

- Prove di pull-off
- Prove di scorrimento

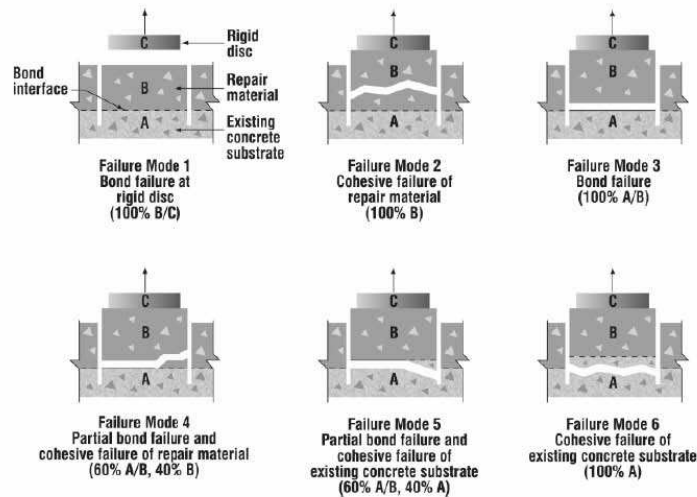
## Modalità di prova: esecuzione

Si applica una trazione a velocità costante ( $0.04 \pm 0.02$  MPa/sec) perpendicolarmente alla superficie e parallelamente all'asse della carota.



## Modalità di prova: interpretazione

L'osservazione della modalità di rottura della carota fornisce utili informazioni sulla qualità dell'adesione e sull'affidabilità dei risultati conseguiti.



## Criteri di accettazione

Calcolato lo sforzo di strappo, i risultati della prova saranno accettati se:

- la media della resistenza a strappo, è superiore a quella richiesta in progetto;
- Il minimo valore di resistenza non è inferiore al 75% della media.

Forza di strappo F

$$Area := \frac{\pi \cdot \Phi^2}{4}$$

$$adesione := \frac{F}{A}$$

Normalmente, per una buona preparazione del supporto e buone tecniche di ripristino, si riesce a conseguire una resistenza a strappo superiore a **1.5 – 1.8 MPa**.

Valori inferiori a **1.2 MPa** possono essere attribuiti a scarsa pulizia della superficie di contatto.

Valori inferiori a **0.7 MPa** sconsigliano la riparazione mediante ripresa di getto

Il valore minimo di adesione consigliato è di circa **1 MPa**.

## Una prova di carico particolare

Un problema di ripristino

Si tratta di una vasca per il deposito di carbone sfuso nella quale si è sviluppato un incendio.

Le opere di ripristino prevedevano il riporto di calcestruzzo nuovo su quello esistente.

Prove di carico convenzionali non avrebbero potuto né essere eseguite né avrebbero potuto dare informazioni sul raggiungimento dei requisiti prestazionali essenziali (aderenza dei calcestruzzi).

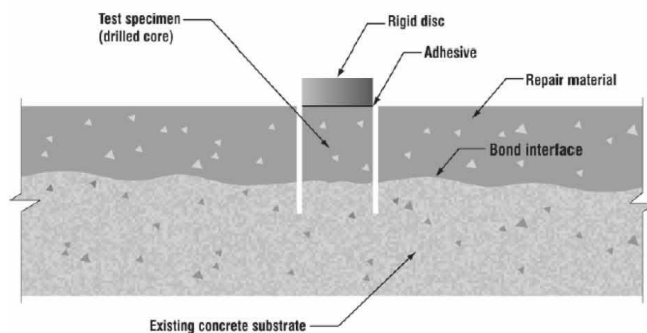


Si è quindi individuata una modalità di prova atta a valutare quantitativamente il raggiungimento di tale requisito.

## Una prova particolare - 2

Un problema di ripristino

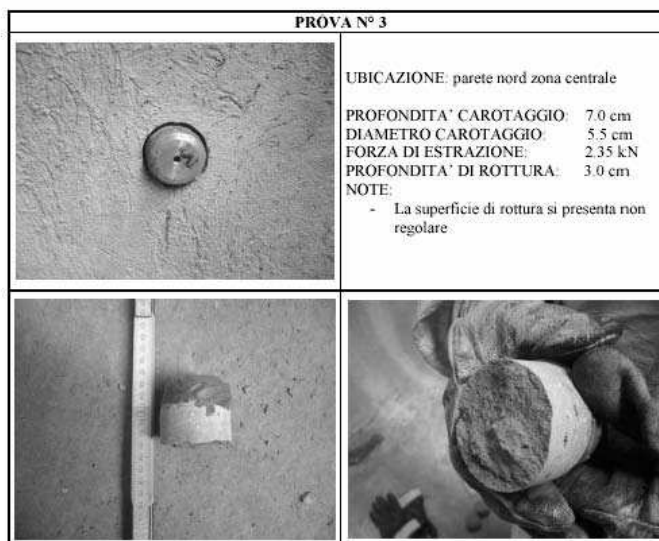
Preparato un taglio cieco con carotiere si procede all'estrazione della carota con un dispositivo atto a misurare la forza di strappo (pull-off).



## Una prova particolare - 3

Un problema di ripristino

Presentazione dei risultati. Oltre alla resistenza allo strappo si deve evidenziare anche la modalità di rottura.

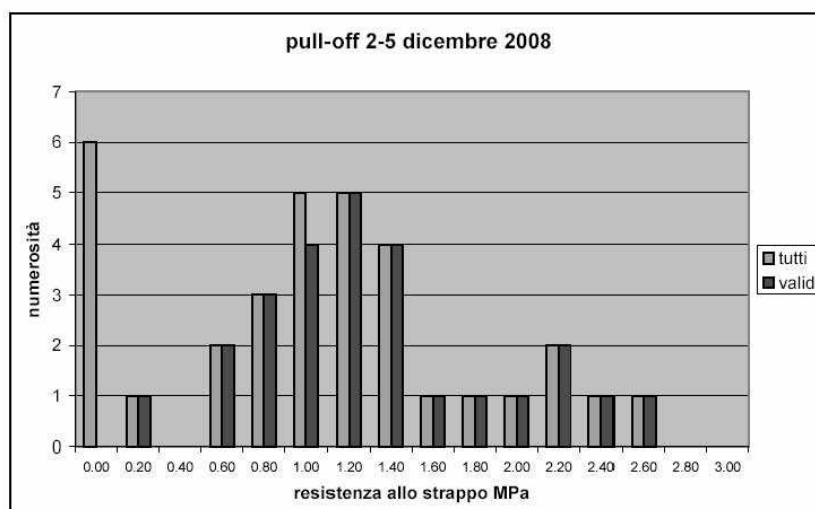


Sollecitazione di strappo:  $\sigma_t = 2350/2344 = 1.002 \text{ MPa} > 1.0$

## Una prova particolare - 4

I risultati devono poi essere oggetto di una interpretazione fisica (validità o meno) e statistica.

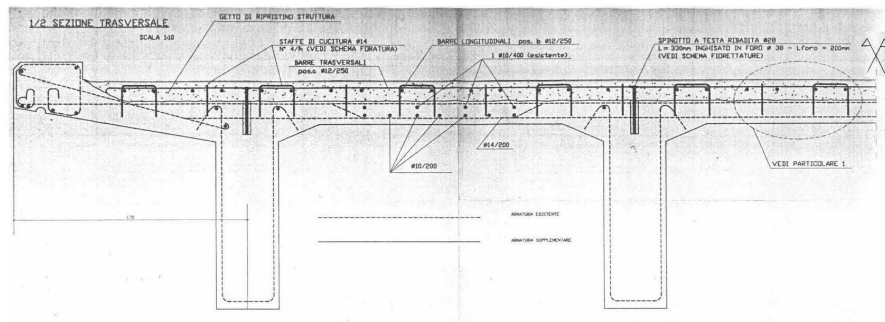
Un problema di ripristino



## L'intervento

L'intervento prevedeva l'asportazione della soletta deteriorata ed il riporto di un nuovo getto di calcestruzzo.

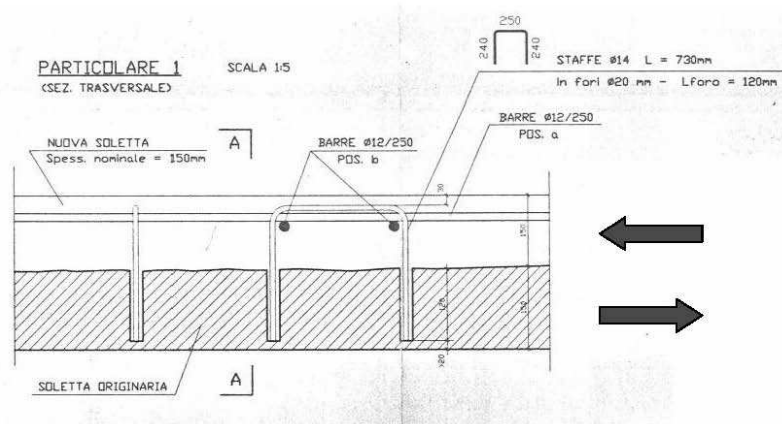
Un problema di rinforzo



## Il requisito prestazionale

Volendosi ripristinare completamente la **monoliticità** della soletta, particolare cura è stata posta al collegamento di interfaccia, sia come preparazione del supporto esistente, sia come collegamenti resistenti a scorrimento.

Un problema di rinforzo



## L'ideazione della prova

### Prova di scorrimento

Non risulta che tale prova sia stata codificata da una raccomandazione o da una linea guida.

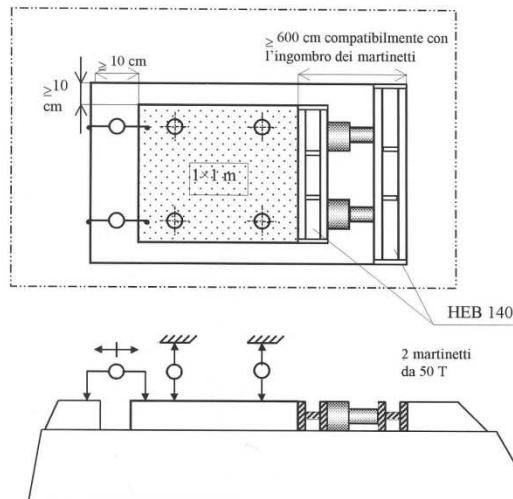
Un caso di rinforzo

La si è ideata, sulla base di prove di laboratorio per lo studio dei connettori nelle travi miste, per verificare il raggiungimento dell'obiettivo prestazionale di **ripristino della capacità di resistenza a scorrimento**.

## La prova di scorrimento

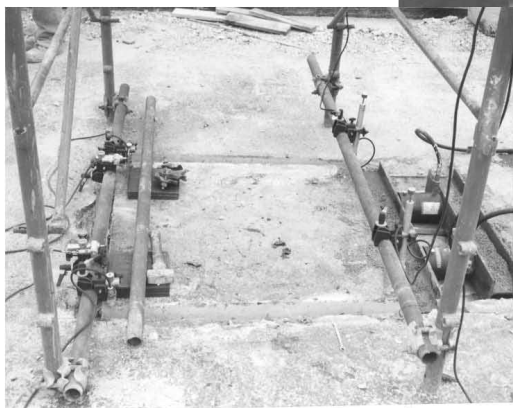
Dispositivo per la realizzazione della prova di scorrimento. Dopo il getto del cls di completamento e l'indurimento, si ritaglia una zona di  $1 \text{ m}^2$  e la si sottopone a spinta orizzontale mediante martinetti idraulici.

Un problema di ripristino



## La prova di scorrimento: esecuzione

Esecuzione del taglio



Posizionamento strumenti (trasduttori di spostamento).

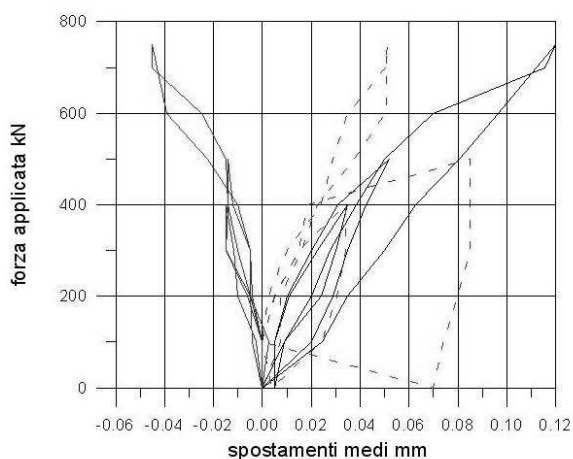
Un problema di ripristino

## La prova di scorrimento: risultati

Si osserva il **recupero pressoché integrale della deformazione anche dopo il raggiungimento dello scorrimento resistente di progetto (SLU).**

Accanto alla deformazione di scorrimento si osserva anche il movimento di **dilatanza della piastra testata.**

PROVA DI SCORRIMENTO  
DEL 27.3.00



Risultati delle prove