

QUADERNI PER LA PROGETTAZIONE

COLLAUDO STATICO PROVE DI CARICO SU SOLAI ED IMPALCATI

Tipologie di solai ed impalcati, schemi statici,
determinazione del carico di prova,
tecniche operative ed interpretazione dei dati

di
STEFANO BUFARINI
VINCENZO D'ARIA
DOMENICO SQUILLACIOTTI

 **EPC**
EDITORE

In homine solo ratio est, qua nihil potest esse praestantius.

Cicerone



QUADERNI
per la progettazione

INDICE GENERALE



Prefazione	9
------------------	---

CAPITOLO 1

I SOLAI	11
1.1 Solai in legno	11
1.1.1 Cenni storici	11
1.1.2 Le tipologie	17
1.1.2.1 Solai semplici a travi parallele.....	17
1.1.2.2 Solai a doppia orditura	19
1.1.2.3 I solai bidirezionali.....	21
1.1.2.4 Lo schema statico dei solai alla "SERLIO"	22
1.1.3 Caratteristiche meccaniche del legno	24
1.1.4 Proprietà deformative	28
1.1.5 Composizione di travi	29
1.2 Solai in ferro e laterizi	31
1.2.1 Cenni storici	31
1.2.2 Le tipologie	33
1.2.2.1 Solai con travi in ferro e voltine, volterrane o tavelloni	33
1.2.3 Classificazione dei profilati	36
1.2.4 Verifica delle sezioni	40
1.2.4.1 Stati limite ultimi.....	40
1.2.4.2 Tensioni ammissibili.....	41
1.2.4.3 La deformabilità.....	41
1.3 I solai composti	42
1.3.1 Comportamento meccanico della connessione	44
1.3.2 Connessione con rigidità nulla	45
1.3.3 Connessione con rigidità infinita	47
1.3.4 Le travi composte con connessione deformabile	50
1.3.5 La deformabilità della connessione a piolo	57
1.4 I solai in c.a.	59
1.4.1 Cenni storici ed evoluzioni tipologiche	59

1.4.2	Tipologie contemporanee	68
1.4.2.1	I blocchi in laterizio	69
1.4.2.2	Caratteristiche dei blocchi	70
1.4.3	Spessore minimo dei solai	72
1.4.4	Lo schema statico	72
1.4.5	Il calcolo delle sollecitazioni - il predimensionamento	74

CAPITOLO 2

LE PROVE DI CARICO.....	75	
2.1	Premessa	75
2.2	Le linee di influenza	76
2.2.1	Introduzione al problema	76
2.2.2	Il teorema di Betti ed il principio di reciprocità	77
2.2.3	Corollario (Maxwell 1864)	81
2.2.4	Corollario di Colonnetti	82
2.2.5	Corollario di Volterra	85
2.3	La determinazione analitica della linea di influenza	85
2.4	I corollari di Mohr	91
2.5	Strutture con schema statico a trave continua	95
2.5.1	L'equazione dei tre momenti di Clapeyron	95
2.6	Determinazione diretta delle linee di influenza	104
2.7	La condizione di carico longitudinale	108
2.8	La distribuzione trasversale del carico	116

CAPITOLO 3

TECNICHE OPERATIVE PER L'ESECUZIONE DELLE PROVE DI CARICO STATICHE	123	
3.1	Premessa	123
3.2	Aspetti normativi	124
3.3	Operazioni preliminari	126
3.3.1	Esame visivo	127
3.3.2	Analisi della geometria strutturale	127
3.4	Realizzazione del carico di prova	131



3.5	Strumentazione di misura	143
3.5.1	Comparatori e trasduttori	144
3.5.2	Stazioni topografiche robotizzate servo-assistite di precisione	153
3.5.3	Deformometri ed estensimetri elettrici (strain gauges)	156
3.5.3.1	Deformometri.....	156
3.5.3.2	Estensimetri elettrici (strain gauges).....	159
3.5.4	Posizione della strumentazione	163
3.6	Fasi esecutive di una prova di carico	167
3.7	Espressione dei risultati in forma tabellare e grafica	168
3.8	Analisi dei dati sperimentali	172
Allegato A: Esempio di rapporto di prova		174
Allegato B: Considerazioni sulla determinazione del carico equivalente di prova.....		184
Allegato C: Esempio di determinazione del carico equivalente di prova ...		189

CAPITOLO 4

L'INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI CARICO		197
4.1	Premessa	197
4.2	La determinazione delle condizioni di vincolo	198
4.3	Il caso generale	201

CAPITOLO 5

MISURE, CARATTERISTICHE DEGLI STRUMENTI ED ANALISI DEGLI ERRORI		207
5.1	Concetto di grandezza e di misura	207
5.2	Definizione operativa di una grandezza	208
5.2.1	Le unità di misura	209
5.2.2	Il sistema metrico decimale - Il sistema internazionale di unità di misura (SI)	212
5.2.3	Come si determina il valore di una grandezza fisica	217
5.2.4	Osservare e misurare	217
5.2.5	Le misure oggettive	218
5.2.6	Misure dirette e indirette	218

5.2.7	<i>Numeri piccoli, numeri grandi, notazione scientifica ed ordine di grandezza</i>	219
5.3	Metodologie di misura	221
5.3.1	Sistema di misura	227
5.3.2	Strumenti di misura	228
5.3.2.1	Formato della lettura	228
5.3.2.2	Le caratteristiche degli strumenti di misura	229
5.3.3	Catena di misura	232
5.3.4	Settaggio	233
5.3.5	Calibrazione	233
5.3.6	Taratura	234
5.3.7	Accuratezza	235
5.3.7.1	Accuratezza della misura	235
5.3.7.2	Accuratezza strumentale ed incertezza di misura	236
5.4	Errori nelle misure dirette	237
5.4.1	Errori di sensibilità	237
5.4.2	Errori casuali	238
5.4.3	Errori sistematici	238
5.4.3.1	Difetto dello strumento	239
5.4.4	Calcolo dell'errore nelle misura dirette	240
5.4.4.1	Media come valore più probabile	240
5.4.5	Calcolo dell'errore statistico	241
5.4.6	Semidispersione	241
5.4.6.1	Errore semplice medio	242
5.4.6.2	Deviazione standard	242
5.4.7	Errore assoluto ed errore relativo	247
5.4.7.1	Errore assoluto	247
5.4.7.2	Errore relativo	248
5.4.8	Intervallo fiduciale	249
5.4.9	Cifre significative di una misura diretta	250
5.4.10	Cifre significative dell'errore di misura	251
5.4.11	Arrotondamento	251
5.5	Errori nelle misure indirette	252
	BIBLIOGRAFIA	255

PREFAZIONE

Una delle novità salienti introdotte dalle Norme Tecniche per le Costruzioni è il passaggio, come avvenuto in altri settori (impianti, ingegneria dell'antincendio, ecc), da un sistema normativo di tipo prescrittivo ad un sistema di tipo prestazionale, ovvero basato non sull'obbligo di adozione di misure tecniche ma sul raggiungimento dei risultati.

L'applicazione di norme prestazionali impone un maggiore sforzo e responsabilità al Progettista, al Direttore dei lavori e al Collaudatore, sia in fase di esecuzione che di controllo dell'opera, per verificare la rispondenza ai requisiti e ai livelli di funzionalità e prestazioni di progetto.

Le prove di carico statiche su solai ed impalcati delle strutture civili, costituiscono indubbiamente una fase cruciale del processo di controllo e richiedono una particolare cura ed attenzione.

Nelle Norme Tecniche per le Costruzioni" le prove di carico sono previste al Capitolo 9 "Collaudo statico" e riguardano in genere le nuove strutture; nella realtà, si rendono spesso necessarie anche nelle strutture esistenti quando si devono prevedere variazioni di destinazione d'uso o quando si deve verificare l'agibilità di strutture degradate e/o fessurate, ecc.

Il volume ha per obiettivo il trasferimento di professionalità e conoscenze teorico-pratiche relativamente a progettazione, determinazione del carico di prova, esecuzione e interpretazione dei dati sperimentali ottenuti dalle prove di carico statiche su solai ed impalcati.



TECNICHE OPERATIVE PER L'ESECUZIONE DELLE PROVE DI CARICO STATICHE



3.1 Premessa

Le principali motivazioni per le quali vengono richieste le prove di carico statiche sono:

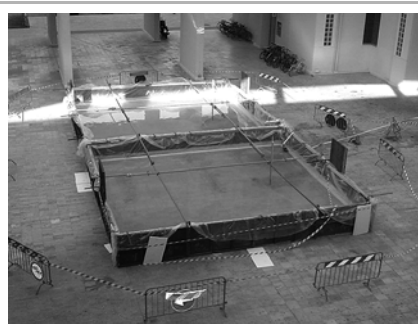
- prove di sperimentazione o di ricerca (modellazione strutturale, figura 3.1);
- prove pilota o di progetto (figura 3.2 a);
- prove di collaudo (figura 3.2 b).



Figura 3.1
Prova di carico
su nodo
trave-pilastro



a) Prova di carico su innovativo sistema di orizzontamento



b) Prova di carico su solaio eseguita in fase di collaudo



Figura 3.2

Le principali applicazioni delle prove di carico statiche sono se:

- richieste da specifiche tecniche;
- esiste un cambio di destinazione d'uso;
- la struttura è stata sottoposta a carichi eccezionali (es. carico neve) o ripetuti

(es. fuoco, esplosioni o vibrazioni);

- si sono verificate variazioni nell'assetto strutturale per effetto di cause dipendenti dal tempo (es. viscosità, fatica o creep ⁽¹⁾);
- la struttura ha una forma inusuale (es. luci molto grandi, altezze elevate e grande snellezza);
- la struttura presenta difetti di progettazione e/o di esecuzione;
- la struttura ha subito interventi di riparazione e/o di restauro;
- la capacità portante non è valutabile analiticamente.

Le finalità delle prove di carico statiche sono:

- controllo della conformità della struttura a portare i carichi di esercizio;
- stabilire il massimo carico di servizio in condizioni di "sicurezza";
- determinare la capacità portante ultima della struttura.

Nel corso delle prove di carico statiche si analizzeranno:

- valori dei carichi e delle sollecitazioni agenti;
- valori degli spostamenti e/o delle deformazioni;
- valori dell'eventuale apertura di fessure.

3.2 Aspetti normativi

Le prove di carico vengono richiamate al punto 9.2 - PROVE DI CARICO del Capitolo 9 "COLLAUDO STATICO" delle Norme Tecniche delle Costruzioni, di cui al Decreto Ministeriale del 14/01/2008.

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

I materiali degli elementi sottoposti a collaudo devono aver raggiunto le resistenze previste per il loro funzionamento finale in esercizio.

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

1. Creep = scorrimento viscoso, deformazione di un materiale sottoposto, ad alta temperatura, a sforzo costante.

loro materiale attuazione, è responsabile il Direttore dei lavori.

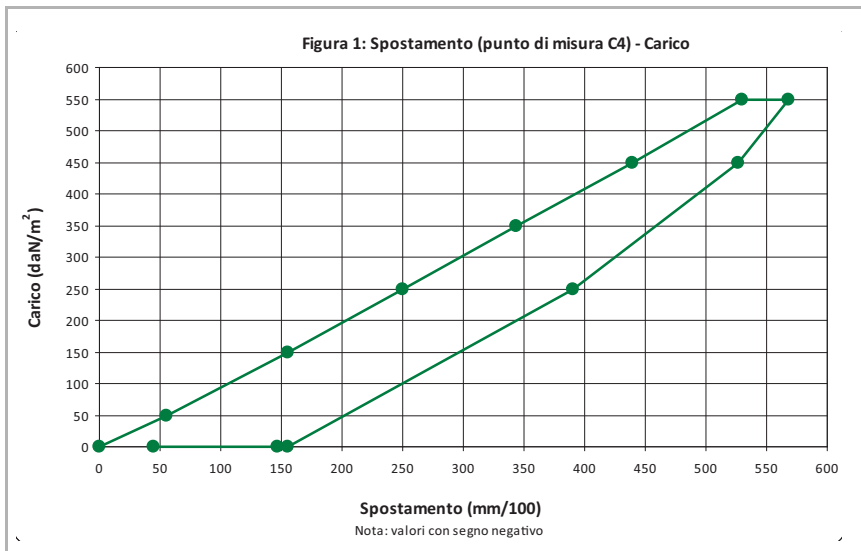
Le prove di carico sono prove di comportamento delle opere sotto le azioni di esercizio.

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

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

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

- le deformazioni si accrescano all'incirca proporzionalmente ai carichi (figura 3.3);



- nel corso della prova non si siano prodotte fratture, fessurazioni, deformazioni o dissesti che compromettono la sicurezza o la conservazione dell'opera (figura 3.4);

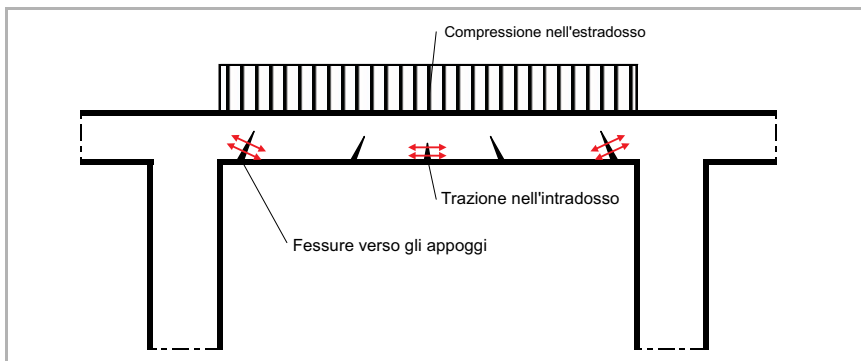


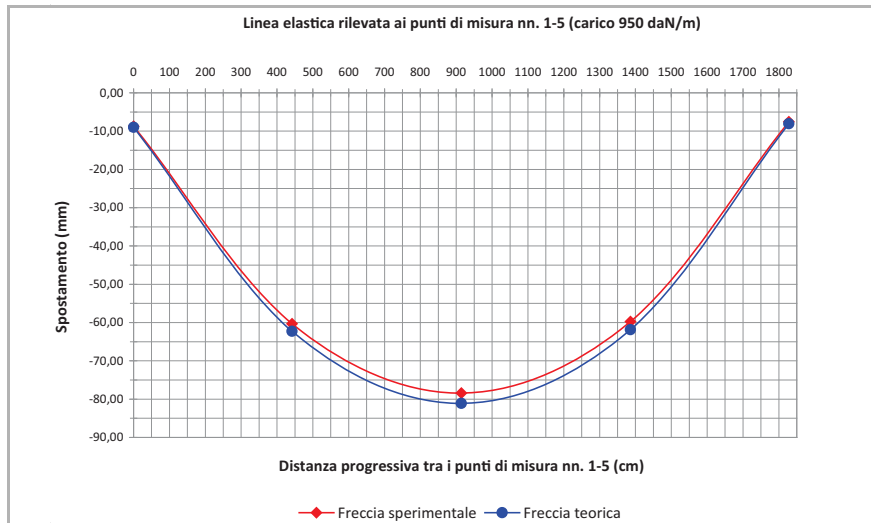
Figura 3.3
Diagramma
"Spostamento-
Carico"



Figura 3.4
Fessurazioni
che si possono
produrre nel
corso di una
prova di carico

Figura 3.5
Linea elastica
teorica e linea
elastica
sperimentale
rilevata nel corso
di una prova
di carico

- 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 (figura 3.5).



Le prove statiche, a giudizio del Collaudatore e in relazione all'importanza dell'opera, possono essere integrate da prove dinamiche e prove a rottura su elementi strutturali.

Le prove di carico sono quindi prove che vengono effettuate su elementi strutturali con lo scopo di verificarne sperimentalmente il loro comportamento sotto le azioni di esercizio.

Possano essere prove di:

- collaudo, da effettuare prima di mettere in esercizio le strutture, al fine di verificarne la rispondenza alle previsioni progettuali;
- analisi, al fine di verificare il comportamento di un elemento strutturale già in opera.

3.3 Operazioni preliminari

Prima di procedere con la progettazione e la realizzazione di una prova di carico statica bisognerà eseguire un sopralluogo per l'analisi preliminare della struttura.

Tale sopralluogo dovrà contemplare:

- l'esame visivo;
- l'analisi della geometria strutturale.

3.3.1 Esame visivo

L'esame visivo è inteso come identificazione e classificazione degli eventuali degradi ⁽²⁾ e dissesti ⁽³⁾ presenti sulla struttura.

Per l'esame visivo si faccia riferimento, per le strutture in muratura, alla UNI 9124 – UNI 9124-2 *“Edilizia residenziale - Strutture di elevazione di muratura (ed elementi costruttivi associati). Classificazione dei degradi e degli interventi”*. Nella stessa norma vengono classificati i degradi di:

- strutture di fondazione;
- strutture di elevazione verticale;
- strutture di elevazione orizzontali (solai e volte);
- strutture di copertura;
- strutture di scale;
- strutture di balconi e ballatoi;
- strutture di partizione interna verticale: tramezzi;
- nuove costruzioni adiacenti o sovrapposte a fabbricati esistenti;
- strutture di contenimento.

Dovranno essere rilevati eventuali dissesti, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi e dei meccanismi di danno.

Va comunque rilevato se l'eventuale degrado e/o fenomeno fessurativo sia esteso (ed in quale entità) ad altre strutture limitrofe a quella presa in esame.

3.3.2 Analisi della geometria strutturale

Fondamentale importanza riveste il rilievo geometrico dell'opera inteso come identificazione dimensionale dei suoi elementi strutturali e non strutturali.

2. Degrado: è il cambiamento progressivo di uno “stato iniziale del materiale” in ragione del tempo ed in risposta all'aggressività ambientale.

3. Dissesto: è la modifica di uno “stato iniziale di equilibrio dell'assetto strutturale” in risposta ad azioni imposte (forze e/o deformazioni), a variazioni termiche e mutazioni di natura reologica.



Il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza.

Nel rilievo dovranno essere prese in considerazione le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica.

Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costruttivi.

Figura 3.6

Micrometro ottico portatile

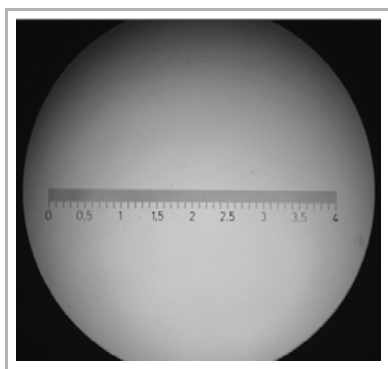


Deve essere inoltre rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo (localizzazione in pianta, in sezione ed in prospetto, realizzazione di ampia documentazione fotografica, rilievo dell'estensione e dell'ampiezza delle lesioni mediante micrometro ottico portatile - figura 3.6), classificando possibilmente ciascuna lesione secondo la tipologia del meccanismo associato (distacco, rotazione, scorrimento, spostamenti fuori del piano, ecc.), e deformativo (evidenti fuori piombo, rigonfiamenti, depressioni nelle volte, ecc.).

Il micrometro ottico portatile è dotato di sorgente luminosa, la messa a fuoco avviene ruotando una manopola e la scala di lettura può essere orientata a 360° per allinearsi all'asse della fessura.

Figura 3.7

Reticolo di misura di micrometro ottico portatile



Lo strumento, di forma cilindrica, è costituito da un microscopio che generalmente ingrandisce 40 volte la fessurazione osservata inquadrandola in un reticolo di misura avente sensibilità 0,02 mm (figura 3.7).

Si applica a cavallo della fessura e perpendicolarmente ad essa. Lo strumento può essere applicato ad una macchina fotografica per catalogare le letture eseguite mediante osservazioni fotografiche.

Nella figura 3.9 viene riportata la localizzazione del quadro fessurativo presente all'intradosso di un impalcato realizzato con elementi prefabbricati

modulari a lastre alveolari (Spiroll), sia prima che dopo la realizzazione di una prova di carico statica.

Nella stessa figura, per ciascuna fessura rilevata, viene riportata l'estensione iniziale (prima della prova) e quella finale (dopo la prova di carico statica). Con T1-T2 vengono indicati i trasduttori di spostamento LVDT (figure 3.8 e 3.9) in configurazione estensimetrica posti a cavallo della fessura denominata "F45", per monitorare l'evoluzione della lesione al variare del carico applicato.



QUADERNI
per la progettazione



Figura 3.8
Trasduttore di spostamento posto a cavallo di una lesione

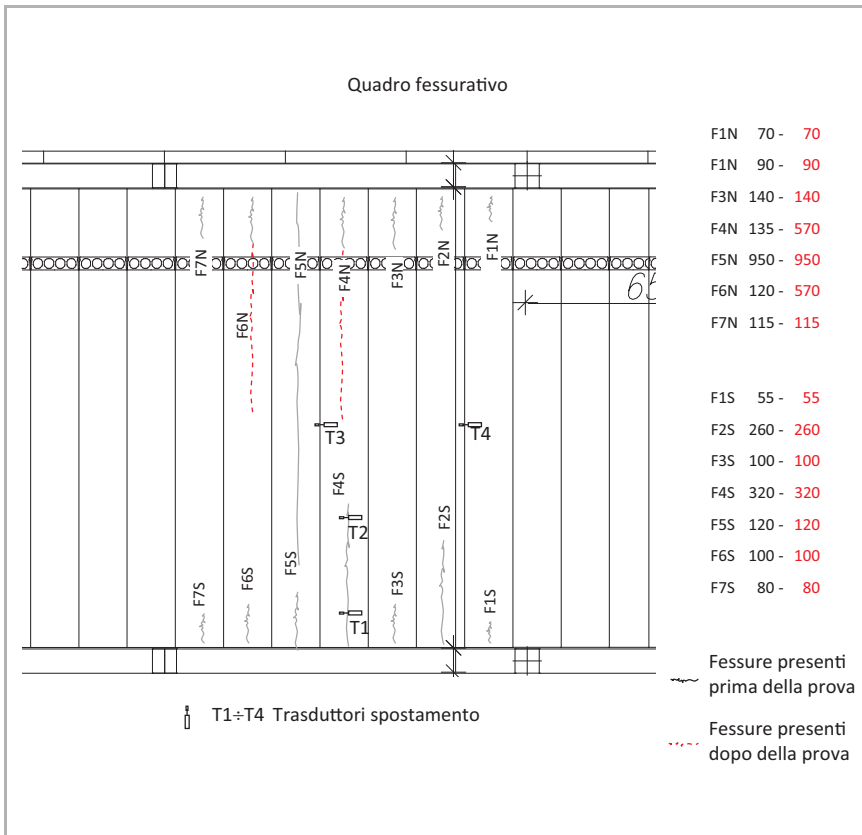


Figura 3.9
Localizzazione del quadro fessurativo presente all'intradosso di un impalcato oggetto di una prova di carico statica

Per le strutture datate può essere utile, al fine di ricostruire la tessitura e la geometria del solaio o dell'impalcato da testare eseguire dei saggi diretti (figura 3.10), un'indagine magnetometrica (figura 3.11 a) e delle tomografie endoscopiche (figura 3.11 b).

Figura 3.10
Ricostruzione della tipologia, tessitura e stratigrafia di un solaio mediante saggio diretto

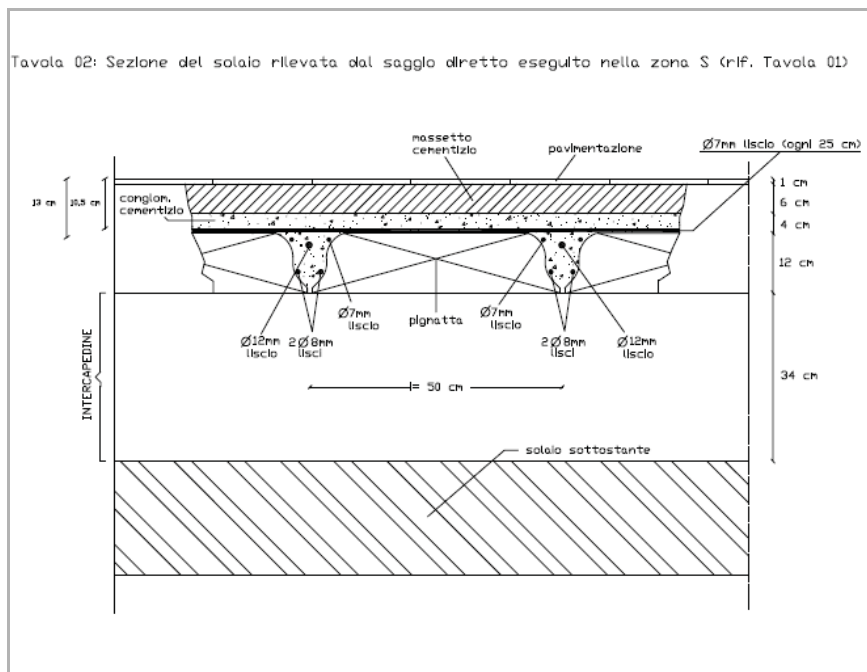


Figura 3.11



a) Esecuzione indagine magnetometrica all'intradosso di un solaio



b) Esecuzione di tomografia endoscopica su solaio