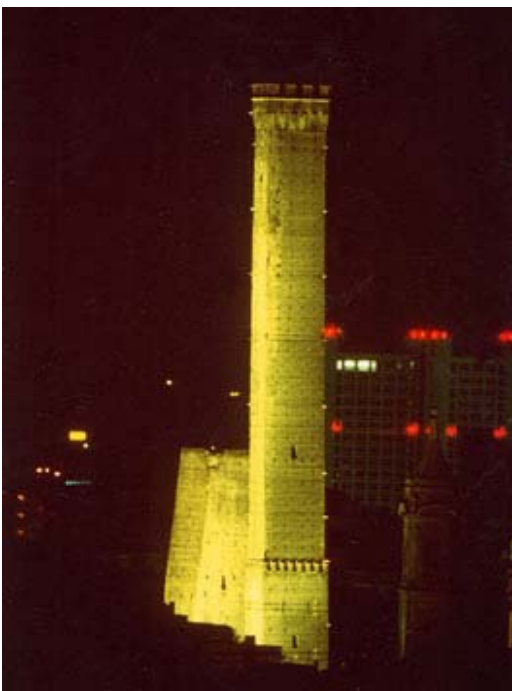




## Studio Propedeutico alle opere provvisionali e di consolidamento della Torre Garisenda a Bologna



### La storia

La torre Garisenda fù costruita contemporaneamente a quella degli Asinelli e probabilmente avrebbe dovuto raggiungere la stessa altezza. Prese il nome dalla famiglia dei Garisendi, che la fece innalzare. Arrivata a 61 metri, la torre cominciò ad inclinarsi per un cedimento del terreno sottostante ed i lavori furono interrotti. Dante Alighieri, allora studente di diritto presso l'Università di Bologna, rimase molto colpito dall'inclinazione della torre, cui dedicò alcuni versi della Divina Commedia, che si possono leggere incisi su una lapide ai piedi della Garisenda.

*"...Qual pare a riguardar la Carisenda,  
Sotto il chinato quando un nuvol vada  
Sovr'essa sì ch'ella in contrario penda:  
Tal parve Anteo a me che stava a bada  
Di vederlo chinare..."*

Per motivi di sicurezza, fra il 1351 e il 1360 Giovanni da Oleggio, che governava la città in nome dei Visconti, fece accorciare di 13 metri la torre, che oggi è alta 48,16 metri. La sua pendenza è di 3,22 metri verso via San Vitale

### Un atto di eroismo

Nel 1306 Bologna era in guerra con Modena. Le scale della torre degli Asinelli erano crollate così che non era possibile salirvi per suonare la campana. Allora un eroico cittadino la scalò aiutandosi solo con due stanghe, vi accese il fuoco e suonò le campane a martello tutta la notte, mentre cadeva la neve.





Su incarico della società Melegari, nel mese di luglio 2000, è stata condotta una campagna di indagini in sito ed in laboratorio per indagare le fondazioni della torre Garisenda.

In particolare sono stati eseguiti i seguenti n° 3 sondaggi verticali e n° 1 sondaggio inclinato di 10° rispetto alla verticale in modo da intercettare interamente la muratura di fondazione e poter caratterizzare i terreni al di sotto della fondazione stessa. Per l'esecuzione dei carotaggi è stata impiegata una sonda a rotazione NENZI-NEKLA costituita da due unità distinte: il gruppo motore montato su un carro gommato autonomo, e la sonda vera e propria installata su un carro cingolato collegata al gruppo motore tramite cavi di alimentazione.

Con tale attrezzatura, pur conservando le caratteristiche di potenza di macchine molto più grandi, siamo stati in grado di muoverci e operare negli spazi ristretti dei vicoli medioevali ove erano state ubicate le indagini.

La perforazione a carotaggio è stata eseguita con metodologie differenti in relazione alle caratteristiche dei materiali incontrati. Nei tratti lapidei costituenti le fondazioni la perforazione è stata eseguita con circolazione di acqua utilizzando un doppio carotiere munito di corona diamantata di tipo incastonato. L'adozione di tale tipo di attrezzatura (in particolare la corona diamantata) ha ridotto al minimo il disturbo delle carote, permettendo la realizzazione dei rilievi geomeccanici (SCR, RQD, Dimensione spezzoni).

Nei terreni sciolti, di riporto o naturali, la perforazione è stata eseguita a secco, ovvero senza impiego di acqua di circolazione, utilizzando un carotiere semplice di diametro 101 mm munito di corona in widia. Con tale strumento si è evitato qualunque dilavamento di materiale, ottenendo la percentuale di carotaggio ottimale e recuperando tutte le frazioni costituenti il terreno.

Per avere una esatta ricostruzione della successione degli strati e per consentire il prelievo di campioni indisturbati nel terreno sottostante la fondazione, è stato necessario procedere al sostegno delle pareti del foro mediante infissione di rivestimenti metallici provvisori di diametro 127 mm, con circolazione di acqua.

L'esame delle carote di ogni sondaggio, depositate in apposite cassette, ha permesso di definire la tipologia dei materiali costituenti la fondazione e la successione stratigrafica degli strati al di sotto della stessa.

In particolare, la fondazione, rinvenuta nel sondaggio n° 4 sino a 5.90 m di profondità dalla pavimentazione, appare costituita sino a -2,50 m da blocchi di selenite con legante in malta magra intercalata da piccoli strati di mattoni, per passare poi a ciottoli e blocchi di arenaria, siltite e calcare con legante di malta magra.

Al di sotto della fondazione, sino alla profondità indagata (10 m), si incontra uno strato coesivo costituito da argilla debolmente limosa marron-nocciola piuttosto consistente (Pen. = 2,0 - 3,5 Kg/cm<sup>2</sup>). Tale strato è stato riscontrato anche negli altri 3 sondaggi a partire da -3,90 - 4,00 m di profondità.

Oltre alla descrizione dei materiali carotati, limitatamente ai tratti lapidei delle fondazioni, si è provveduto al rilievo geomeccanico dei materiali lapidei costituenti le fondazioni, per valutarne la qualità e lo stato di fratturazione.

In particolare, sono stati rilevati:

- TCR= Percentuale di carotaggio totale, dato dal rapporto percentuale tra la lunghezza delle carote estratte e la lunghezza della manovra di carotaggio.

- SCR= Percentuale di recupero di carote integre, data dal rapporto percentuale tra la sommatoria delle lunghezze degli spezzoni di carota integri (ovvero con circonferenza completa) e la lunghezza della manovra di carotaggio. Nel caso non siano presenti tratti recuperati in frammenti, tale percentuale coincide con la percentuale di carotaggio totale.

- RQD= Percentuale di recupero modificata, definito come il rapporto percentuale tra la sommatoria degli spezzoni di carote aventi lunghezza maggiore o uguale a 10 cm e la lunghezza del tratto di carotaggio considerato.

- Dimensioni degli spezzoni: sono distinte tre classi di lunghezza di spezzoni di carota integra:

<5 cm 5-10 cm > 10 cm.

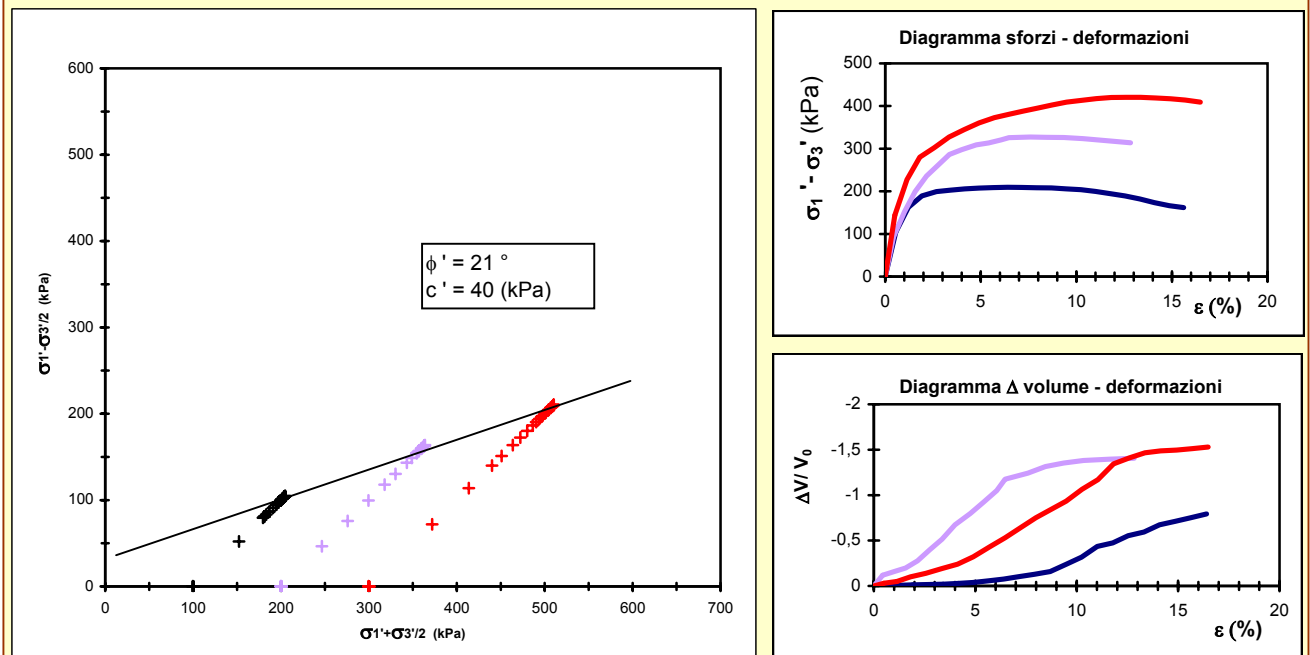


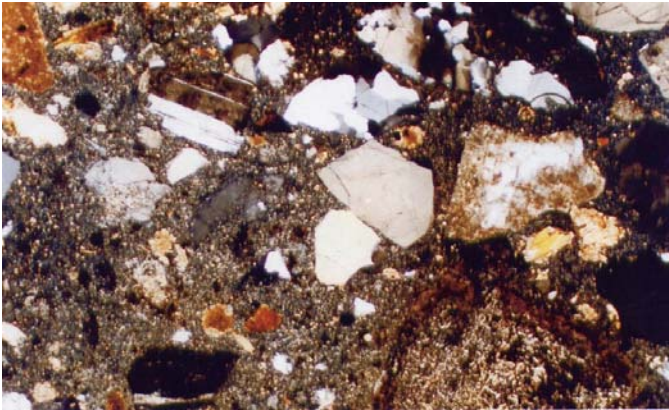
Durante i sondaggi sono stati prelevati dei campioni indisturbati, rappresentativi degli strati incontrati durante la perforazione. Il prelievo è avvenuto a varie profondità, in modo da avere una caratterizzazione completa dei livelli coesivi immediatamente al di sotto delle fondazioni della torre.

Su tali campioni, in accordo con il programma concordato con la Committente, sono state condotte le seguenti prove geotecniche di laboratorio:

- apertura della fustella, estrazione della carota e successiva descrizione geotecnica visivo-manuale, in accordo alla normativa standard ASTM D2488. Quando possibile si è proceduto alla determinazione speditiva dello stato di consistenza del materiale campionato, con penetrometro e scissometro tascabile;
- determinazione del contenuto naturale d'acqua secondo la norma ASTM D 4318;
- determinazione della massa volumica apparente o peso dell'unità di volume naturale;
- determinazione dei limiti di consistenza – limite di liquidità, limite di plasticità e indicazione dell'indice di plasticità – in accordo alle metodologie standard previste dalla norma ASTM D 4318;
- analisi granulometrica per vagliatura meccanica con setacci della serie ASTM condotta secondo la norma CNR B.U. n° 23;
- analisi granulometrica per sedimentazione sulla frazione passante al setaccio ASTM n° 200 con l'utilizzo di un densimetro normalizzato e opportunamente tarato, e di un agente disperdente costituito da una soluzione di esametafosfato di sodio e carbonato di sodio, come previsto dalla norma ASTM D 422;
- determinazione della massa volumica reale o peso specifico assoluto dei grani in accordo allo standard CNR UNI 10013;
- determinazione dell'indice dei vuoti e della porosità;
- prova di taglio diretto a velocità di scorrimento costante su provini a sezione quadrata aventi lato pari a 60 mm e altezza iniziale pari a 20 mm, condotta secondo la norma ASTM D 3080;
- prova di compressione edometrica ad incrementi di carico controllati (IL) su provini cilindrici aventi diametro pari a 70 mm e altezza iniziale pari a 20 mm, condotta secondo quanto previsto dalla norma ASTM D 2435. Per ogni gradino di carico sono inoltre state rilevate le rispettive deformazioni al fine di poter individuare correttamente il tempo di fine consolidazione;
- prova di compressione triassiale non consolidata – non drenata (Tx UU) su provini cilindrici aventi diametro non inferiore a 35 mm e rapporto altezza/diametro compreso tra 2 e 2.5 in accordo con la norma ASTM D 2850;
- prova di compressione triassiale consolidata drenata (Tx CID) su provini cilindrici aventi diametro non inferiore a 35 mm e rapporto altezza/diametro compreso tra 2 e 2.5 in accordo con le Raccomandazioni AGI (1977).

### Prova triassiale consolidata e drenata (Tx CID)





Per una corretta interpretazione dello stato attuale della fondazione e per una futura simulazione numerica del solido murario, accanto alle prove prove in sito ed alle prove geotecniche di laboratorio, si è reso necessario sottoporre alcuni spezzoni di carota rappresentativi dei litotipi costituenti la fondazione della torre ad una attenta caratterizzazione petrografica e meccanica.

In particolare sono state eseguite le seguenti analisi

- Analisi diffrattometrica XRD eseguita su polveri di macinazione rappresentativi dei campioni.
- Analisi dei sali solubili mediante cromatografia ionica HPLC.
- Descrizione macroscopica dei campioni.
- Descrizione microstrutturale in sezione sottile al microscopio ottico in luce trasmessa, con eventuale stima comparativa dei cristalli e costituenti presenti.
- Analisi modale dei costituenti, in termini di minerali (quando presenti) e/o frammenti rocciosi.
- Classificazione petrografica, sulla base delle considerazioni precedenti.

Si fa notare che l'analisi modale (quantitativa) dei costituenti risulta dalla combinazione delle osservazioni diffrattometriche e microscopiche.

L'analisi diffrattometrica delle polveri ha permesso l'identificazione delle fasi mineralogiche presenti, attraverso dei picchi di intensità adimensionali caratteristici di ogni minerale.

L'analisi al microscopio, eseguita sulle sezioni sottili, ha

Sempre su spezzoni lapidei costituenti la fondazione sono state inoltre condotte delle prove di compressione monoassiale su provini cilindrici, con calcolo dei moduli elastici tangenziali (moduli di Young) durante la fase di carico.

Le prove sono state eseguite in accordo con le raccomandazioni ISRM (Suggested methods for determining the Uniaxial Compressive Strength and deformability of rock materials - 1972).

I campioni di prova utilizzati sono stati ottenuti direttamente dagli spezzoni di carota prelevati dalle casse catalogatrici.

Ogni provino, avente diametro medio di 8.3 cm, è stato tagliato e spianato in modo da garantire rapporto altezza/diametro pari a circa 1.5, e un parallelismo delle basi conforme alla normativa (scostamento inferiore a 0.02 mm).

Le prove sono state eseguite a controllo di carico, applicando un gradiente medio pari a 0.5 MPa/s. Il carico agente sui campioni, fino alla rottura, è stato registrato con l'accuratezza dell' 1%.

La misura delle deformazioni è avvenuta tramite estensimetri HBM di lunghezza pari a 50 mm, incollati longitudinalmente lungo la superficie laterale dei provini, secondo una disposizione a 120°. Il valore di deformazione ottenuto è stato mediato in fase di restituzione dei dati.

I moduli elastici tangenziali sono stati calcolati nei tratti della rampa di carico caratterizzati da una curva sforzo-deformazioni lineare, esente da problemi di plasticizzazione e/o da effetti di assestamento iniziale.