

Convegno V G R 98

Sessione: Rischio Sismico e da incendi. 8/10/98

Relazione ad invito.

Gli aspetti di rischio di un importante monumento:
la Torre pendente di Pisa.

L. Sanpaolesi

Nell'ambito dell'Ingegneria Civile, cui qui ci vogliamo limitare, la valutazione degli aspetti di rischio delle opere costituisce il punto centrale della progettazione ed è compreso nel più ampio ambito della "sicurezza strutturale" delle opere.

Attualmente nell'Ingegneria civile tutto il processo di realizzazione delle opere, dalla progettazione, ai materiali, alla esecuzione è basato su aspetti probabilistici, aspetti che vengono poi diluiti e semplificati nel passaggio alla concreta realizzazione delle opere da parte dell'Ingegnere, che spesso non ha modo di vedere direttamente l'aspetto statistico del problema, ma si muove entro prescrizioni normative e relativi coefficienti, che ad esso sono correlati.

E la regola generale che si segue nel procedere lungo questo studio trova il suo punto centrale nel confronto tra gli effetti delle azioni da un lato, e la modellazione delle crisi e la capacità resistente dall'altro.

Veniamo ora al Monumento di cui vogliamo parlare, e che, come indicato nel titolo è la Torre pendente di Pisa.

Purtroppo in questo caso tutto è più complesso e non è possibile seguire uno schema preordinato di analisi e successivo confronto, in quanto la maggior parte dei fenomeni sono non lineari, vi sono importanti aspetti viscosi – cioè dipendenti dal tempo – sono in atto fenomeni di instabilità progressiva. Per di più il tutto applicato ad un'opera esistente.

Si può comunque operare una qualche classificazione.

Anzitutto le Azioni che impegnano la Torre:

- Permanenti: peso proprio, pesi in piombo
- Azioni termiche
- Azioni da vento
- Azioni sismiche.

Dall'altro le possibili modalità di crisi:

- Dal lato terreno:
 - cedimento per instabilità progressiva
 - cedimento per superamento della capacità portante.
- Dal lato muratura in elevazione:
 - rottura fragile per cedimento locale della muratura.

Possiamo ora provare ad analizzare i singoli problemi.

Carichi permanenti

Iniziamo con i carichi permanenti, di grande importanza nel nostro caso, sia perché azioni dominanti, sia perché essi governano i fenomeni viscosi.

Orbene il peso proprio della Torre è pari a 14.500 t, il che corrisponde ad una pressione media sul terreno di appoggio delle fondazioni di 5,5 kg/cm², ad una pressione massima dell'ordine di 10÷11 kg/cm², e ad una pressione prossima a zero in sovrappendenza.

Il terreno risente moltissimo del consolidamento delle argille avvenuto progressivamente nei secoli nella porzione di terreno sottostante la Torre.

La modalità di crisi più preoccupante è quella per instabilità progressiva, che deriva cioè da incremento di inclinazione, conseguente incremento di tensioni in sottopendenza, quindi ulteriore incremento di inclinazione, e così via.

Le analisi condotte dagli Studiosi geotecnici, sia con modelli sofisticati (tridimensionali, non lineari, viscosi) sia con indagini sperimentali, mostrano che il coefficiente di sicurezza in queste condizioni è molto basso con valori assolutamente inaccettabili per gli ingegneri.

Il fenomeno di crisi per instabilità progressiva è ritenuto estremamente lento, e comunque quando dovesse iniziarsi, con tempi dell'ordine di giorni o di decine di giorni per prodursi.

La apposizione dei pesi di piombo in sovrappendenza, per complessive 600 + 370 t avvenuta nel periodo 93/94 ha arrestato totalmente l'incremento della inclinazione.

Infatti a parte gli eventi perturbanti che si sono verificati nel Settembre 95, l'analisi del diagramma cedimenti - tempo evidenzia un arresto, praticamente completo, dell'incremento di pendenza.

Ovviamente ciò influenza favorevolmente, anche se in misura assai limitata, la sicurezza nei confronti dell'instabilità progressiva, da un lato perché è arrestato l'incremento dell'inclinazione, dall'altro perché il Momento ribaltante è ora sensibilmente ridotto.

L'apposizione dei pesi ha provocato un incremento di cedimento verticale, ovviamente atteso e prevalutato, non trascurabile, dell'ordine dei 18 mm, ora, dopo tre anni, praticamente esaurito.

Il secondo problema del terreno, cioè la possibilità di crisi per superamento della capacità portante con formazione di una superficie di scorrimento, deve pure essere analizzato.

In proposito si ritiene che i margini di sicurezza esistenti siano sensibilmente maggiori di quelli determinati per crisi da instabilità progressiva, e che, nel dominio N-M, il punto rappresentativo della situazione esistente sia ancora sensibilmente distante dal limite plastico.

Resta ancora, nell'ambito dei carichi permanenti, esaminare le possibilità di crisi della muratura in elevazione.

Anche qui gli studi sono molto approfonditi, sia per quanto concerne la determinazione degli stati tensionali, sia per la conoscenza della organizzazione muraria e delle caratteristiche dei materiali.

Lo stato tensionale è stato indagato con modelli tridimensionali complessi e verificato con misure sperimentali dirette, a mezzo di martinetti piatti e di dilatometri.

Vi sono tuttavia diversi motivi di incertezza derivanti:

- dalla funzione statica delle colonnine;
- dall'influenza delle numerose sostituzioni fatte nei secoli, di colonnine e bozze murarie;

- dalla collaborazione tra fodera esterna e muratura interna, non sempre chiaramente valutabile;
- dalle recentissime indagini che hanno confermato sempre più la ottima qualità della muratura interna.

Tanto che comincia ad affacciarsi una nuova ipotesi, e cioè che i costruttori non intendessero affidare i carichi prevalentemente alle murature portanti esterne costruite con blocchi di marmo, e poi riempire l'interno con materiale di scarsa qualità, ma che piuttosto, nel progetto dei costruttori si volesse realizzare una struttura circolare cava di muratura in grosso spessore e buona qualità, cui applicare un rivestimento esterno più a fini estetici che portanti.

Anche l'aspetto resistenziale delle murature, paramenti e zona interna, sono stati approfonditamente indagati con estesa sperimentazione non distruttiva e con un limitato numero di sondaggi, utilizzando indagini televisive, prove su carote, sperimentazione con dilatometri e con tecniche di drop-stopper.

In sintesi pur con le incertezze già esposte ne deriva la seguente situazione:

- le tensioni massime attingono i 60-80 kg/cm² nel paramento esterno e i 10-12 kg/cm² nella muratura interna;
- la resistenza a rottura del marmo è dell'ordine dei 1000 kg/cm² e della muratura interna dei 60-80 kg/cm²;
- vi sono zone singolari con elevate concentrazioni di tensioni (tipico il loggiato al 1° ordine in sottopendenza);
- sussiste possibilità di crisi locale per rottura fragile.

Nel complesso la sicurezza strutturale nella parte in elevazione, pur limitata, risulta superiore a quella della crisi del terreno, ma il rischio di rottura fragile locale permane, ed è di più incerta valutazione.

Le Azioni Termiche

La torre risente ovviamente delle azioni termiche cui è sottoposta: in effetti non è significativa la variazione termica dell'aria tra giorno e notte, e tra estate ed inverno, ma piuttosto l'effetto dell'irraggiamento solare che determina significativi movimenti.

I dati più significativi sono i seguenti:

- Temperatura media minima (dell'aria) +2° C

- Temperatura media massima (dell'aria) 30° C
- Temperatura minima della muratura in profondità 9° C
- Temperatura massima della muratura in profondità 26° C
- Variazione massima di inclinazione giornaliera (da punta a punta): 3-4 secondi

Il moto descritto dalla sommità della Torre nel corso di una giornata è approssimativamente una ellisse, con asse maggiore dell'ordine di 1 mm, nel periodo estivo.

I moti dovuti alle azioni termiche non incidono direttamente sulla sicurezza strutturale; tuttavia la lieve variazione ciclica giornaliera dello stato di tensione in fondazione costituisce comunque un continuo modesto tormento geotecnico, e presumibilmente una parte del moto può avere avuto nei secoli carattere irreversibile, incidendo sull'incremento dell'inclinazione.

Inoltre le azioni termiche hanno ovviamente contribuito in misura rilevante al degrado locale delle bozze esterne in pietrame, delle colonnine, del rivestimento in genere.

Le Azioni da vento

Il vento fa parte delle azioni climatiche che si debbono ordinariamente considerare sugli edifici, e per la valutazione vi sono dei procedimenti normalizzati che forniscono risultati, in genere a favore di sicurezza.

Ma nel caso della Torre è sembrato necessario disporre di analisi più affinate, ed è ora agli atti uno studio complesso condotto dai migliori Esperti italiani, che si sono avvalsi tra l'altro della Galleria del Vento a strato limite del Danish Maritime Institute di Copenhagen.

L'analisi è stata sviluppata lungo due fasi, secondo il metodo classico.

Nella 1^a fase è stato valutato, sotto l'aspetto statico l'intensità e la direzione del vento di riferimento ricondotto in corrispondenza dell'anemometro sulla torre, a 57 m di altezza.

Lo studio ha preso le mosse dai dati della velocità di riferimento del vento rilevati all'Aeroporto S. Giusto di Pisa per 40 anni, nel periodo 1951 – 1991, con i metodi di misure standard.

Da qui tenendo conto delle caratteristiche di rugosità del sito aeroportuale sono state ricavate le caratteristiche del vento in quota nella zona della Torre, e infine si è ridiscesi, determinando le caratteristiche del vento in corrispondenza all'anemometro sulla Torre.

Si è ottenuta così la velocità di riferimento del vento a 57 m di altezza, adirezionale, pari a 29 m/sec (105 km/ora) con un tempo di ritorno di 100 anni.

Nella 2^a fase è stato invece studiato l'effetto, sulla Torre, del vento proveniente dalle varie direzioni, tenendo conto delle schermature esistenti avvalendosi essenzialmente degli studi condotti presso il Danish Maritime Institute, e valutando gli effetti dinamici indotti sulla Torre.

Andando ora direttamente alle conclusioni sintetiche, ne risultano i seguenti valori:

per $T_r=100$ anni	$M_{max}= 1.430$ tm (alla base)
	$M_{max p.}= 1.060$ tm (alla base del piano di max pendenza)
per $T_r=500$ anni	$M_{max}= 1.770$ tm
	$M_{max p.}= 1.360$ tm

Mentre il corrispondente spostamento stimato in sommità della Torre per $T_r= 100$ am è pari a $\delta = 3,7$ mm.

In conclusione ne risulta che il Momento max indotto dal vento può raggiungere livelli dell'ordine 1.000-1.300 tm, da correlare con il Momento ribaltante da peso proprio pari a circa 32.000 tm.

L'azione del vento può quindi incrementare l'azione instabilizzante di circa il 3,5%; valore assai contenuto, ma comunque non trascurabile dati i limitati margini di sicurezza esistenti.

Azioni sismiche

E' ben noto che la zona intorno alla città di Pisa, pur non essendo stata sede nei secoli di terremoti distruttivi, è comunque zona con non trascurabile livello di sismicità.

Nè il fatto che la Torre abbia passato indenne 630 anni (dal 1370 ad oggi) può essere sufficiente a farci accantonare questo problema, sia perché in questi sei secoli ci sono stati a Pisa danni da sisma, sia perché l'azione sismica ha carattere statistico.

Quindi anche qui è stato effettuato uno studio molto approfondito, da un Gruppo dei migliori Esperti Italiani, che ha condotto a valutazioni circa la sicurezza del monumento.

Anticipo sin d'ora che i risultati dello studio presentano alcuni aspetti da approfondire e sono attualmente in corso studi in merito.

Trattandosi di uno studio su una costruzione esistente, ciò che interessa determinare è il terremoto di soglia (con intensità e relativo periodo di ritorno) per il quale il monumento raggiunge la situazione limite di crisi incipiente.

Lo studio è stato impostato su tre fasi successive:

- 1) - correlazioni tra intensità e periodo di ritorno;
- 2) - forma dello spettro di risposta;
- 3) - analisi strutturale della Torre sotto azione sismica.

La 1^a fase mira a valutare la pericolosità sismica del sito definendo la correlazione tra intensità e periodo di ritorno.

Lo studio relativo è stato condotto utilizzando svariati metodi di analisi storico-statistica e probabilistica.

Si riporta qui solo qualche indicazione e le conclusioni:

- sono stati ricostruiti, nei limiti in cui ciò è possibile, gli eventi sismici in Pisa negli ultimi 1000 anni;
- in nessun caso si sono avuti in Pisa danni importanti causati da sisma, né tanto meno esistono notizie di danni riguardanti la Torre;
- le intensità ipocentrali in una regione entro circa 100 km da Pisa hanno raggiunto livelli di intensità sismica del X° grado della scala macrosismica MCS;
- in Pisa si sono avuti eventi sismici di grado non superiore al VI° MCS;
- in particolare l'analisi dei 3 eventi importanti: Orciano 1846; Mugello 1919; Garfagnana 1920, in epoca storica più vicina e quindi più accuratamente studiati, confermano le conclusioni già esposte.

La 2^a fase dello studio è rivolta alla definizione degli altri parametri atti a descrivere compiutamente il sisma atteso ai fini delle analisi strutturali.

In sintesi l'aspetto più importante riguarda la definizione dello spettro di risposta, cioè della dipendenza accelerazione – periodo di oscillazione dell'opera.

Infine nella 3^a fase è stato studiato il modello dinamico della Torre per i terremoti attesi e con i parametri definiti, pervenendo a valutazioni in ordine alla sicurezza strutturale della Torre.

Orbene in sintesi si perviene ai seguenti risultati:

- in Pisa sono considerati attesi:
 - sisma VI grado con $T_r = 130$ anni
 - sisma VII grado con $T_r = 520$ anni
 - sisma VIII grado con $T_r > 3.000$ anni
- per un sisma di VI grado ne risultano:
 - M_{max} alla base = 23.000 tm
 - M_{max} al 1° ordine = 15.000 tm

Tali momenti appaiono molto elevati e tali da attingere già per un sisma VI grado le risorse ultime della muratura in elevazione.

Mentre data la natura impulsiva e di breve durata del sisma, non sembra che il pur elevatissimo Momento in fondazione possa costituire elemento di crisi.

D'altronde sismi di VI grado si sono già concretamente prodotti e quindi è mostrata la capacità della Torre di superare indenne un sisma di tale intensità.

Le conclusioni dello studio condurrebbero a ritenere estremamente pericoloso per l'integrità della Torre un sisma di VII grado il cui tempo di ritorno è indicato in 530 anni e quindi con una reale probabilità di verificarsi in tempi non lunghi.

Ciò, mentre da un lato rafforza l'esigenza degli studi in corso per approfondire diversi aspetti del comportamento sismico, evidenzia comunque già sino da ora nella azione sismica l'azione di maggior pericolo, nel tempo, per la Torre.