

Atti della Società
DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI
IN TORINO

la statica delle costruzioni antisismiche

Conferenza del Socio Ing. Arturo Danusso

Non sto a ripetervi — egregi Colleghi — la storia degli studi sismologici. Dopo l'immane sventura del Dicembre 1908 nessuno di noi è rimasto senza domandare alla scienza una parola di salvezza per l'avvenire. Tutti abbiamo richiamato alla mente le nozioni geologiche e fisiche relative ai terremoti; i più valenti cultori di queste scienze hanno parlato e scritto precisando idee, fatti, conclusioni: in breve, colla rapidità che i mezzi moderni consentono, si è divulgata fra noi la somma delle ipotesi formulate e delle leggi accertate fino ad oggi.

Le ipotesi possono essere molto utili al progresso degli studi, ma non agguangono nulla alle cognizioni reali del presente. Le leggi dei fenomeni sismici — pur onorando altamente chi le ha scoperte — rimangono ancora in un campo generico. Infine gli studi sull'edilizia antisismica hanno condotto finora, eccettuati pochissimi casi, all'espressione di una serie di criteri personali, più o meno empirici, i quali meritano bensì grande rispetto, poichè la buona costruzione poggia per tre quarti sul buon senso e sulla pratica di chi progetta, ma non bastano per risolvere scientificamente ed utilmente il problema che interessa oggi tutti gli Italiani.

Noi sappiamo che alcune fra le case di Messina e di Reggio erano mal costrutte, inaccettabili per regola d'arte persino nei paesi dove il terreno a memoria d'uomo è rimasto stabile. Ma non possiamo logicamente inferire che se fossero state osservate le migliori regole dell'arte oggi note, la rovina non sarebbe avvenuta, poichè ci manca totalmente il *termine di confronto* fra la resistenza dei nostri migliori edifici e le forze da cui essi sono minacciati per effetto delle scosse telluriche.

Prima di riedificare le città distrutte conviene procurarsi questo termine di confronto, con criteri strettamente scientifici, ricercando da una parte le caratteristiche meccaniche dei movimenti sismici, dall'altra l'effetto dinamico da essi prodotto sulle membrature resistenti degli edifici.

E' possibile questa indagine? Ecco una questione di principio che potrebbe trattenerne anche i più volenterosi. In via assoluta essa non è certamente possibile coi mezzi di cui dispone attualmente la scienza. Ma quali problemi affronta in via assoluta la scienza delle costruzioni? Ricordiamo che tutto lo studio dei sistemi elastici discende da ipotesi che per la loro stessa natura sono approssimate, interpretano da vicino la realtà, ma non la esprimono in modo assoluto. Perciò un problema di questo genere si dice risolto, quando si è arrivati a stabilire che il risultato è contenuto entro certi limiti, i quali — data la distanza che corre tra un edificio stabile con sicurezza ed uno prossimo alla rottura — possono anche racchiudere un intervallo abbastanza grande.

Orbene, nello studio delle costruzioni antisismiche non è difficile stabilire il punto di partenza, esprimendo con caratteristiche meccaniche precise una serie di movimenti ondulatori che interpretino con sufficiente approssimazione il movimento sismico. Qualunque moto, anche se molto complesso, può sempre ridursi alla sovrapposizione di moti elementari più semplici; il principio della sovrapposizione degli effetti, da cui la meccanica è governata, varrà dunque a semplificare, sotto questo punto di vista, il problema.

Ciò posto, bisognerà immaginare applicati questi movimenti alla base dell'edificio e cercare le leggi del movimento di tutta la soprastruttura sotto l'azione combinata della scossa, dell'inerzia propria delle masse e dell'elasticità dovuta alla forma del fabbricato ed ai materiali di cui esso è composto.

Dalla conoscenza di questo nuovo movimento si passerà alla ricerca delle forze esterne che insieme coi pesi vengono a sollecitare l'edificio, e quindi finalmente alla ricerca degli sforzi molecolari interni nel materiale resistente.

Questa soluzione matematica del quesito proposto sarà attendibile, per i fini della pratica, soltanto quando sia soddisfatta la seguente condizione: che ad una variazione *notevole* nell'intensità della scossa agente sulle basi di un certo fabbricato, corrisponda una variazione *abbastanza piccola* nel grado di stabilità del fabbricato stesso.

Se a tanto si giunge, tenendo calcolo nei movimenti sismici anche degli urti violenti ed improvvisi, che sembrano essere una delle cause più terribili di rovina, si potrà credere a buon diritto di aver fatto almeno un passo sulla via di queste ricerche.

* * *

Alle considerazioni fin qui esposte ed al programma che ne risulta ho informato lo studio che sto per riferirvi molto brevemente, esponendone i concetti principali e mettendo in luce le conclusioni più importanti, vale a dire quelle che meglio confortano l'intuizione ed il genio pratico del costruttore.

Riportiamoci per un momento alla dolorosa contemplazione delle rovine prodotte da un terremoto in un'agglomerazione di case. I fenomeni più disparati compaiono, senza nesso nè legge, quasi che li avesse prodotti una causa priva di

qualunque ordine e quindi non suscettibile di analisi. Accanto ad una casa coi muri in piedi e le vòlte sprofondate, se ne vede un'altra spogliata di parte dei muri che la racchiudevano e intatta nelle vòlte; accanto ad una colonna ritorta ad elica su sè stessa, si trova un monumento spostato di parecchi metri e rovesciato a terra; lunghi ponti a travate sono contorti quasi che un'onda sismica sia rimasta stampata nel metallo, altre opere sono intatte come se il turbine improvviso le avesse risparmiato.

Per trovare una via attraverso a questo complesso apparentemente caotico di fenomeni, è necessario anteporre due premesse fondamentali. Anzitutto per studiare la stabilità delle costruzioni antisismiche non occorre risalire alle cause geologiche del terremoto. Lasciamo ai sismologi questo difficilissimo compito: a noi basta conoscere il fenomeno sismico quale si presenta alla superficie del suolo, cioè in quella crosta, relativamente sottilissima, in cui gli edifici sono fondati. Il problema subisce in questo modo una prima limitazione e incomincia a diventare accessibile.

La seconda premessa pone un'altra limitazione, distinguendo tra i movimenti tellurici superficiali, quelli che deformano il suolo in modo grave e permanente spostando strati di terreno, provocando fessure, crepacci, avvallamenti; da tutti gli altri movimenti, che pur scuotendo gli elementi superficiali del suolo li abbandonano poi in una posizione identica o prossima a quella che occupavano prima del terremoto.

Il primo tipo di movimenti non accetta rimedio dalla scienza. Voler assicurare contro di esso gli edifici, sarebbe come studiare la sicurezza dei treni contro l'eventuale crollo dei ponti ferroviari.

Invece i movimenti del secondo tipo consentono un'analisi che sarà tanto più precisa, quanto più si perfezioneranno gli apparecchi sismici. A questi movimenti dobbiamo restringere il nostro studio, e non pretendere di contrastare in modo assoluto tutte le violenze della natura, poichè tale pretesa non reggerebbe ad alcuna critica.

Del resto le limitazioni proposte lasciano ancora un largo campo aperto agli studi. I terremoti che per convenzione potremmo chiamare *normali*, cioè quelli che fanno traballare il suolo in qualsiasi modo, senza però squarciarli, basterebbero da soli a rovinare le nostre città. L'esperienza lo ha dimostrato ampiamente, poichè sono caduti moltissimi edifici in località nelle quali il suolo non presentava traccia degli scuotimenti patiti.

Orbene, osserviamo una particella di terreno scossa da un terremoto normale: essa parte dalla posizione di riposo, vi oscilla intorno, irregolarmente quanto si vuole, e poi vi ritorna alla fine della scossa. Riferendo questo moto ad un piano orizzontale e ad un asse verticale lo si può ridurre ad una serie di oscillazioni che rispondono alla comune denominazione rispettiva di terremoti ondulatori e sussultori.

Lasciando questi ultimi, che per un'ossatura bene collegata e priva di elementi spingenti sono assai meno temibili, osserviamo che i primi — gli ondulatori —

come qualunque movimento piano, ammettono la decomposizione in due moti rettilinei su due direzioni normali fra loro, per cui in ultima analisi possiamo ridurre lo studio di un terremoto normale a quello di due ondulazioni rettilinee, l'una verticale, l'altra orizzontale, purchè si ammetta, per quest'ultima, un'orientazione comunque variabile.

Ma se a tanta semplicità di concetto può ridursi il fenomeno sismico superficiale, perchè mai esso produce altrettanta varietà di effetti nelle costruzioni? Due ragioni spiegano questo apparente contrasto. La prima sta nella diversità di forma e di struttura delle case, e nella diversità della scossa da zona a zona del suolo. La seconda proviene dalla grande varietà di fenomeni, talvolta abbastanza strani, cui danno luogo le forze agenti con urto. Chi, per esempio, ha assistito ad esperimenti di sostanze esplosive, ricorderà una serie di osservazioni curiose che trovano riscontro in certi effetti del terremoto. Ed è probabile, come ho già accennato, che appunto alle scosse sismiche agenti con urto siano dovuti i disastri più gravi prodotti dai terremoti normali.

E' dunque spianata la via che conduce alla prima parte della risoluzione, cioè alla rappresentazione matematica del terremoto normale. Abbiamo già per questo una serie di documenti e di cifre a cui far capo: voglio dire le classifiche dei terremoti secondo la loro intensità, i diagrammi sismici, e tutto il complesso di osservazioni e di misure che gli scienziati, specialmente italiani, vanno raccogliendo da parecchi anni.

Si tratta ora di valutare l'effetto che una data ondulazione sismica produce sui fabbricati. Come in tutti i problemi costruttivi, bisogna lasciare qui largo il campo all'intuizione, prima di dar corso alle indagini matematiche, per evitare qualunque lavoro teorico che non abbia una diretta utilità pratica.

La scossa tellurica, applicata alle fondamenta del fabbricato, tende a trascinarlo nel suo movimento. Ogni particella del fabbricato ha una certa massa, che per inerzia tende a contrastare quel movimento. Il principio fondamentale della dinamica ci avverte, che non si può immaginare alcun movimento dell'edificio senza che lo accompagni un sistema di forze applicate agli elementi dell'edificio stesso e tali da contrastarne il moto. Ciascuno degli organi costituenti il fabbricato subirà l'azione di una parte di queste forze e tenderà per proprio conto ad oscillare con un moto dipendente dalla sua massa dalle sue proprietà elastiche e dai vincoli che lo collegano coi rimanenti organi.

Quindi la prima norma fondamentale da seguire nel progetto di una casa antisismica sarà il collegamento perfetto delle varie parti. Su questo punto non insisto poichè è l'unico forse che sia universalmente accettato.

Volgiamo piuttosto l'intuizione ad un concetto che domina dall'alto tutto il nostro problema. La scossa tellurica passa sotto l'edificio accompagnata da un'energia talmente grande, che, espressa in unità di lavoro, si tradurrebbe in cifre fantastiche. Di questa energia soltanto una minima frazione si trasmette al fabbricato compromettendone la stabilità. E' chiaro però che la grandezza di questa frazione dipende anche dalla natura del fabbricato e dal modo con cui esso è

fondato. Sembra pertanto che la migliore direttiva verso la soluzione del problema sia rappresentata dal seguente quesito: *Rendere minima, compatibilmente colle esigenze pratiche di una casa, la somma di energia che si trasmette dalla commo- zione tellurica al fabbricato.*

A molti è parso che questo enunciato contenesse non l'inizio ma il termine della soluzione cercata. Essi hanno detto: riformiamo completamente il modo di appoggio dell'edificio sul terreno: anzichè radicarlo su salde fondamenta, liberiamolo in modo che esso poggi come sopra una specie di carrello mobile in tutte le direzioni col minimo possibile attrito. La forza di trascinamento del terremoto tenderà a svanire e l'edificio rimarrà imperturbabile, mentre la scossa infurierà sotto i suoi piedi. Il ragionamento è svelto, elegante e non fa una grinza. Ma, per tradurlo in atto, i proponenti hanno dovuto ricorrere ad una serie di congegni meccanici come rulli, sfere, molle e sospensioni elastiche, congegni che snaturano la casa poichè convertono le fondamenta, che dovrebbero possedere una stabilità secolare, in un sistema metallico che ha bisogno di essere curato, sorvegliato, lubrificato per cinquanta, per cento anni, di generazione in generazione e che alla fine, scosso da un terremoto, con suprema ingratitudine funzionerà male o non funzionerà affatto. Immaginate, per esempio, una delle sfere d'acciaio che per un secolo è stata ferma a sopportare il peso del fabbricato e pensate soltanto all'attrito di primo distacco che essa dovrebbe vincere per mettersi in movimento e liberare la casa dagli effetti della scossa!

Non mi sembra qui il caso di procedere ad una critica severa di questi sistemi meccanici. Chi ha visitato l'esposizione dei lavori presentati al recente concorso di Milano dove tali sistemi apparivano in grande numero con tutto il relativo corredo di modelli e disegni, ha riportato certamente l'impressione della loro insufficienza per i fini della pratica.

Altri hanno pensato di svincolare almeno parzialmente il fabbricato interponendo fra la sua base ed il terreno opportunamente scavato uno strato di sabbia. Io non saprei condannare questo sistema in via assoluta: credo però che esso presenti due gravi pericoli: primo, che la sabbia col tempo tenda ad agglomerarsi e quindi non possa più funzionare secondo le intenzioni del costruttore; — secondo, che la fiducia riposta nello strato di sabbia induca a diminuire le precauzioni statiche nel progetto del fabbricato e quindi a diminuire il suo grado di sicurezza.

Infine, per raccogliere tutte le idee che sono state enunciate autorevolmente in questi ultimi mesi, debbo ricordare un altro modo d'appoggio dei fabbricati antisismici. Si prepara una ottima platea di calcestruzzo perfettamente spianata e vi si posa sopra la casa come si poserebbe un mobile sul pavimento di una stanza, senza attacchi nè legamenti, e poi si confida che in caso di terremoto l'edificio non raccolga l'effetto di scosse superanti una certa intensità, ma che piuttosto, vinto l'attrito, prenda a scorrere leggermente sul piano di posa. Sinceramente io temo che questa previsione non rappresenti altro che una vana speranza, per la ragione, già accennata, dell'attrito di primo distacco.

Sarà dunque necessario prevedere, per sicurezza, una forte resistenza d'attrito tra il suolo e il fabbricato, il che equivale a considerare, per gli effetti dinamici, la loro perfetta unione. E allora sarà meglio prender il partito netto e fondare bene la casa in modo da evitare tutti i pericoli che proverebbero da una fondazione difettosa.

Ma come seguiremo in questo caso il concetto proposto di assorbire dal movimento sismico la minima quantità possibile di energia, se partendo da tale concetto siamo venuti alla conclusione apparentemente contraddittoria di creare una buona unione fra terreno e fabbricato?

All'obbiezione io rispondo, ricordando che i materiali hanno un'elasticità propria della quale noi possiamo trarre partito per smorzare le scosse sismiche, come si adoperano in meccanica le molle dovunque un meccanismo delicato sia soggetto ad urti. Immaginiamo, al limite, una casa di gomma bene incastrata nel terreno, e scossa dal terremoto: essa tradurrà la violenza di qualunque urto in una serie di oscillazioni molto ampie e si raddrizzerà qualche istante dopo la scossa come se nulla fosse stato. Rappresentiamoci invece un fabbricato assolutamente rigido e poniamo che la prima scossa giunga con un urto improvviso: tutte le masse componenti il fabbricato saranno proiettate con uguale violenza d'urto in direzione opposta, e la compagine della costruzione sarà colpita, da un subitaneo schianto, che lascerà poi tracce dolorose.

Tra questi due estremi potremo trovare nella pratica una soluzione attribuendo allo scheletro della casa un conveniente grado di elasticità. Non costruiremo la casa di gomma, nè di giunco, nè la poseremo sulle molle come un'elegante vettura da passeggio, poichè l'eccessiva deformabilità, anche se fosse compatibile colla sicurezza, non potrebbe ammettersi per la stessa concezione che abbiamo della casa.

Andremo cercando invece, sia nelle proprietà di resistenza e di elasticità dei materiali da costruzione normalmente adottabili, sia nella forma e dimensioni dello scheletro del fabbricato, quel grado di flessibilità che si dimostra più conveniente per garantire la solidità e per attenuare in pari tempo nella maggior possibile misura gli urti sismici.

Ecco quanto ha potuto suggerire l'intuizione. E' tempo ora che subentri il calcolo a precisare i rapporti tra la resistenza elastica del fabbricato e l'azione della scossa e che la scienza delle costruzioni — strumento validissimo dell'ingegneria moderna — osi cimentarsi anche contro il problema dell'edilizia antisismica.

*
* * *

A questo punto, per dar conto esatto del mio studio, dovrei instaurare tutto un organismo di formule, di cui è facile prevedere la complessità, almeno apparente, dato il numero degli elementi che concorrono a formarle e la natura delle operazioni verso cui suole condurre la dinamica dei sistemi elastici. Ma poichè non voglio abusare nè della vostra compiacente bontà di ascoltatori, nè del tempo che mi è concesso, lascerò in pace per ora differenziali ed integrali: dirò soltanto

brevemente della via seguita e dei risultati ottenuti. Aggiungerò in seguito per chi se ne interessi più da vicino uno schema dei calcoli all'uopo istituiti.

Consideriamo dell'edificio antisismico soltanto l'ossatura resistente formata da un complesso di piedritti e di solai piani tutti resistenti ad ogni qualità di sforzi e collegati perfettamente tra di loro. Supponiamo che i muri siano compresi tra le opere di finimento e di chiusura, non tra le opere resistenti, e che siano leggeri. I piedritti resistenti siano ridotti a pilastri di ottimo materiale, il cui peso supporremo, per semplicità, trascurabile di fronte a quello dei solai col relativo carico accidentale. Questa ipotesi mentre si scosta assai poco dal vero, facilita moltissimo i calcoli.

La scossa sismica fa oscillare il fabbricato, al quale durante le considerazioni teoriche daremo il nome di pendolo elastico per l'analogia che passa (come vedremo in breve) tra il moto della nostra ossatura e quello di un pendolo ordinario. Lasciamo da parte i movimenti sussultori che per il nostro edificio sono i meno pericolosi perchè si risolvono in un'azione di martellamento verticale di cui è facile analizzare gli effetti. Consideriamo invece un moto rettilineo, orizzontale in direzione qualunque, applicato al piede del fabbricato. A livello di ciascun solaio si localizza una forza d'inerzia variabile da istante ad istante, sotto la cui azione i piedritti si inflettono. Nessun'altra ipotesi restrittiva ci occorre, all'infuori di quelle solite sull'omogeneità dei materiali e simili, che si fanno in tutti gli studi di questo genere.

Procedendo per gradi, incominciamo dalla casa ad un solo piano. Essa è rappresentabile come un pendolo elastico o come un complesso di pendoli elastici fra loro collegati portanti una sola massa concentrata al vertice.

Per dare alla risoluzione del quesito la massima generalità l'ho posto in questi termini: Dato un movimento rettilineo orizzontale qualunque alla base del pendolo, trovare il movimento che esso produce nel piedritto elastico. La semplice combinazione del principio di D'Alembert colla legge delle deformazioni elastiche di un'asta incastrata ad un estremo, conduce, mediante una equazione differenziale, al risultato.

Per utilizzarlo nei casi concreti, occorre sostituire al movimento generico del piede dell'asta determinati movimenti speciali, che interpretino in qualche modo le ondulazioni sismiche.

Immaginiamo dapprima un movimento fittizio consistente in un urto iniziale con data velocità e in un moto uniforme che prosegue indefinitamente colla stessa velocità. Troviamo allora che il pendolo oscilla regolarmente con periodo costante, dipendente non dalla velocità d'urto (da questa dipende soltanto l'ampiezza di oscillazione), ma soltanto dalle proprietà elastiche dell'asta, cioè dalla natura del materiale di cui è composta, dalla sua forma e dal peso che essa sopporta. E se, per seguire l'analogia con un pendolo composto ordinario, si cerca la *lunghezza ridotta* del pendolo elastico, si riscontra facilmente che essa è uguale alla freccia elastica che farebbe l'asta quando il peso che essa porta in sommità venisse ivi applicato orizzontalmente.

Questi primi risultati bastano da soli a spargere una certa luce sul compor-

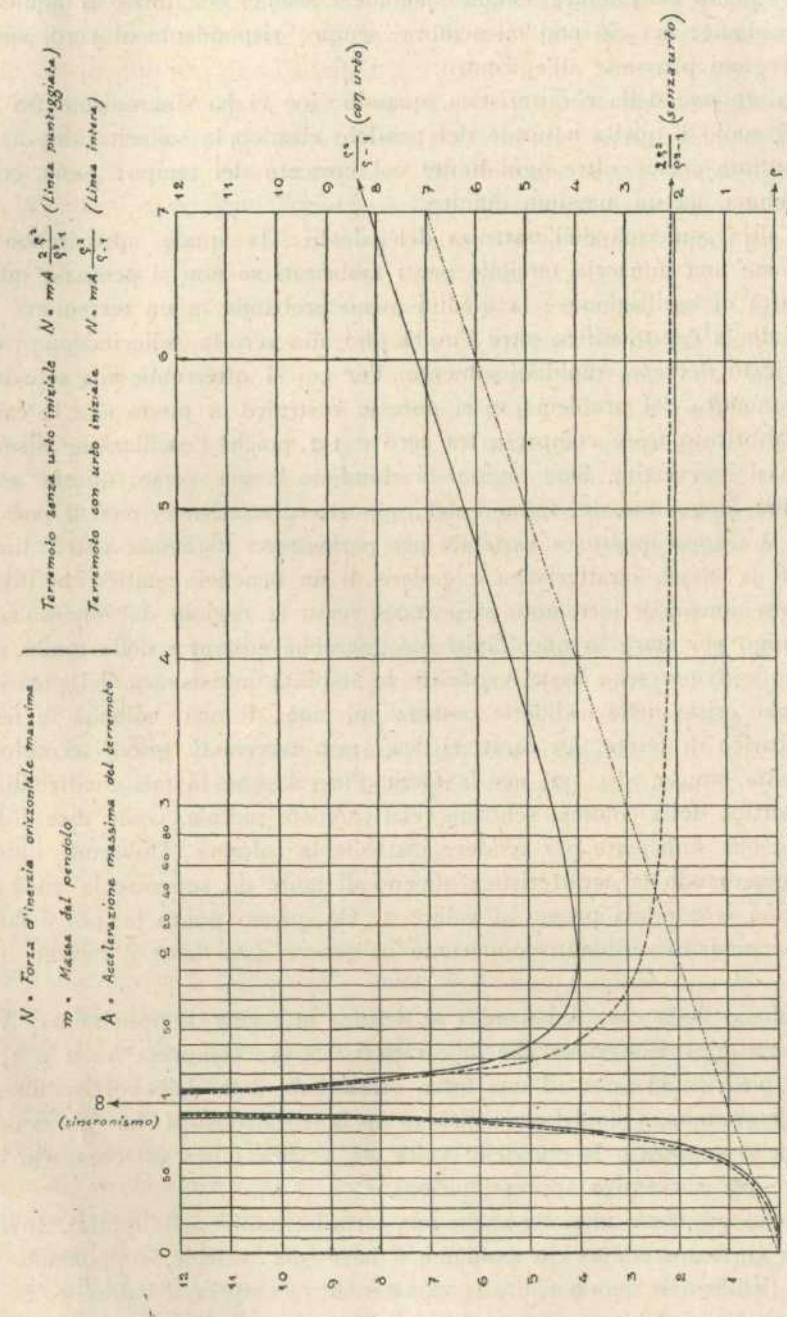
tamento degli edifici soggetti a scosse telluriche. Poichè essi tendono ad un proprio moto pendolare, è facile prevedere che il loro comportamento durante la scossa si ridurrà all'associazione di questo moto con quello del terreno. Infatti se si interpreta il terremoto come un'oscillazione sinusoidale regolare e si applica il calcolo generale suaccennato, si trova che tale associazione è riducibile semplicemente ad una combinazione lineare dei due movimenti. E se infine per interpretare più da vicino il terremoto, si considerano dei movimenti oscillatori crescenti di intensità e successivamente smorzati (sulla falsariga dei più noti diagrammi ricavati dai sismometri) si ottengono ancora per il movimento dell'asta espressioni del tipo di quella ricavata per l'oscillazione regolare precedente.

Ma lo scopo diretto delle nostre ricerche non è tanto il movimento del pendolo, quanto la sua stabilità. Converrà quindi o calcolare l'accelerazione del moto assoluto della massa che il pendolo sopporta, e passare da questa alla forza d'inerzia corrispondente, quindi calcolare per tale sollecitazione l'asta del pendolo; oppure, ciò che torna lo stesso, dal moto dell'asta ricavare la sua freccia elastica nell'istante che si considera e da questa risalire agli sforzi cui l'asta deve resistere.

Ricercando in tal modo la massima fra le sollecitazioni istantanee dell'asta durante tutto il movimento, si giunge con formole finali che hanno il pregio di un'estrema semplicità, al seguente notevolissimo risultato: che il rapporto fra la massima accelerazione delle masse costituenti il fabbricato e la massima accelerazione del terremoto è funzione di un solo termine numerico, il quale a sua volta è il rapporto fra il periodo dell'ondulazione sismica e quello naturale di oscillazione del pendolo elastico. A questo termine numerico, per l'importanza che assume nel calcolo delle costruzioni antisismiche, mi è parso conveniente dare il nome di *caratteristica*. Esso riconduce il problema dinamico delle costruzioni antisismiche ad un ordinario calcolo di statica dei sistemi elastici.

Per maggior chiarezza presenterò un diagramma (fig. 1) in cui ho raccolto i risultati di due casi speciali relativi ed uno stesso moto sismico sinusoidale: l'uno con velocità iniziale massima, l'altro senza urto iniziale. Le ascisse rappresentano la caratteristica; le ordinate delle due curve misurano la massima accelerazione temibile nella massa del pendolo elastico. La curva a linea piena si riferisce al movimento sismico con urto iniziale, la linea punteggiata al movimento sismico senza urto iniziale, ossia con velocità iniziale nulla. Si tenga presente, che a parità di terremoto, la caratteristica è tanto più piccola quanto più flessibile è il piedritto oscillante.

Ho espresso poc'anzi il concetto che le case troppo rigide siano meno adatte di quelle flessibili a sostenere le scosse sismiche con urto. Vediamo che cosa dice in proposito il diagramma. Col crescere della caratteristica, ossia coll'aumento di rigidità della casa a parità di scossa, le ordinate della curva piena crescono indefinitamente, mentre quelle della curva punteggiata tendono ad un limite finito. Ciò significa precisamente che il terremoto con urto dirige più violento il suo assalto contro una casa eccessivamente rigida, che non contro una casa moderatamente flessibile. Quindi il concetto di molti, che convenga irrigidire quanto più



□ — DIAGRAMMA DELL'EFFETTO PRODOTTO IN RELAZIONE ALLA FLESSIBILITÀ

Fig. 1.

si può le case per fortificarle contro i terremoti non regge alla critica scientifica. Salvochè si vogliono considerare soltanto fenomeni sismici con inizio tranquillo e incremento graduale: ma ciò non mi sembra sempre rispondente al vero, specie se siamo in regioni prossime all'epicentro.

Per il valore *uno* della caratteristica, quando cioè vi ha sincronismo fra l'oscillazione del suolo e quella naturale del pendolo elastico, la sollecitazione applicata a quest'ultimo cresce oltre ogni limite col crescere del tempo: ossia, come dice il diagramma, ha un massimo infinito.

Ecco un'altra conferma dell'esattezza del calcolo; la quale apparirebbe in pari tempo come una minaccia terribile per i fabbricati se non si pensasse subito che la regolarità di oscillazione è la qualità meno probabile in un terremoto.

Diminuendo la caratteristica oltre l'unità fino allo zero la sollecitazione temibile nel fabbricato decresce rapidissimamente. Per cui si otterrebbe una soluzione idealmente economica del problema, se si potesse costruire in modo che la caratteristica del fabbricato, fosse compresa tra zero e $1/2$, poichè l'oscillazione sismica passerebbe quasi inavvertita. Due ragioni ci chiudono la via verso questa soluzione: in primo luogo uno dei termini del rapporto caratteristico, cioè il periodo del terremoto è troppo incerto e variabile per permetterci di fissare entro limiti troppo ristretti la stessa caratteristica e godere di un beneficio statico che diventerebbe illusorio appena il terremoto si portasse verso la regione del sincronismo. In secondo luogo per stare in quei limiti bisognerebbe costruire delle molle, non delle case. Per convincersene basta verificare la stabilità antisismica del piedritto più flessibile che esista nelle ordinarie costruzioni, cioè di una colonna in ferro calcolata per carico di punta. La caratteristica, per terremoti gravi secondo le classifiche, risulta minore di $1/2$, ma la forza d'inerzia che in tali condizioni va applicata al vertice della colonna sebbene relativamente piccola, come dice il diagramma, è più che sufficiente per rendere instabile la colonna. Dovremo quindi rinforzarla, aumentando la caratteristica almeno di tanto da superare la zona del sincronismo, cioè portandola presso al valore 2. Da questo punto in poi è facile verificare che i piedritti oscillanti sopportano in genere assai bene i carichi loro imposti.

Così il calcolo della casa antisismica si delinea in forma semplicissima. Ammesso per prima approssimazione che la caratteristica sia compresa fra 2 e 3, si calcoleranno i piedritti in base ad una forza orizzontale data dalla corrispondente ordinata del diagramma. Quindi si verificherà se la caratteristica ha un valore prossimo a quello supposto. Il più delle volte ciò avviene; in caso contrario basterà procedere per successive approssimazioni.

La soluzione proposta ammette anche una certa latitudine nelle ipotesi. Invero considerato un certo terremoto che poniamo a base del calcolo, supponiamo di proporzionare l'edificio in modo che alla caratteristica competa il valore 3. Se la rapidità di oscillazione del terremoto raddoppia, la caratteristica scende al valore 1.50, ma la forza d'inerzia temibile rimane quasi la stessa. Per contro se la rapidità di oscillazione diminuisce aumentando corrispondentemente l'ampiezza per modo

che rimanga inalterata l'accelerazione sismica massima (e ciò per poter paragonare i risultati) la caratteristica cresce: ma essa può raggiungere il valore 4 ed anche il valore 5 senza compromettere ancora la stabilità dell'edificio, che sarà stato calcolato col dovuto margine di stabilità.

Per questa latitudine, credo che acquisti praticità la soluzione generale da me proposta. Essa eccede in sicurezza per altre ragioni: prima di tutto perchè considera oscillazioni sismiche regolari di ampiezza costantemente uguale alla massima, mentre i diagrammi sismici rivelano spesso fasi successive di incremento e diminuzione dell'ampiezza, le quali producono un effetto valutabile grossolanamente come la metà di quello segnato nel diagramma.

Poi perchè pare che i sismogrammi rivelino talvolta, nella variabilità delle onde successive di uno stesso terremoto, incrementi all'incirca proporzionali dell'ampiezza e del periodo. Ora è facile dimostrare nel calcolo che appunto al rapporto tra l'ampiezza e il periodo è proporzionale la sollecitazione tanto temuta nei fabbricati e che perciò in molti casi all'aumento apparente di intensità della scossa non corrisponde un incremento de' suoi effetti.

In ogni modo importa mantenere bene in luce questi tre punti:

1° Che l'accelerazione delle masse costituenti il fabbricato è ben diversa da quella del movimento sismico;

2° Che il concetto di rinforzare quanto più è possibile il fabbricato, senza altro criterio, è contrario alla stabilità generale dell'edificio e in ogni caso rappresenta un impiego inutile di materiali e quindi un errore economico;

3° Che la soluzione proposta risponde bene all'intuizione, ammette una notevole latitudine di valutazioni e di ipotesi e si traduce in formule estremamente semplici per quanto eccede i confini degli ordinari calcoli statici.

*
**

Vediamo ora brevemente come s'imposta la teoria delle costruzioni antisismiche la cui base è rigidamente unita al terreno, poichè questa condizione io credo sia voluta assolutamente dalla pratica del costruire. Cercherò con poche formole fondamentali di dar conto esatto degli elementi costitutivi della soluzione proposta.

Dissi che consideravo l'ossatura resistente di un edificio antisismico come un sistema di masse concentrate alle altezze dei diversi piani e che ritenevo trascurabile la massa dei piedritti fra piano e piano in confronto con quella dei solai e dei sovrapposti carichi accidentali. Questo è lecito sia perchè i muri di riempimento e di chiusura devono essere leggeri quanto più è possibile, collegati in sè stessi ed ai solai; — sia perchè, qualora si voglia essere più severi, si può sempre aumentare il peso dei solai di una conveniente frazione del peso dei piedritti, poichè si ha di mira in definitiva non tanto un esame matematico, quanto piuttosto un problema statico, per il quale diverse condizioni di carico possono ridursi ad equivalenza di risultato nella ricerca dei massimi sforzi.

Un piedritto colla porzione di peso che gli compete per ciascun piano di casa si ridurrà dunque, nella teoria, ad un'asta priva di massa, incastrata alla base e vincolata elasticamente coi solai in misura nota; lungo la quale asta si concentrano a distanza variabile diverse masse. Per ragioni di chiarezza non partiremo dal caso generale per trame conseguenze particolari, ma faremo il cammino opposto.

Incominceremo quindi dalla casa ad un sol piano, cioè da un'asta incastrata perfettamente al piede nel terreno e parzialmente in un solaio la cui massa si trova concentrata al sommo dell'asta, e chiameremo *pendolo semplice* questo sistema.

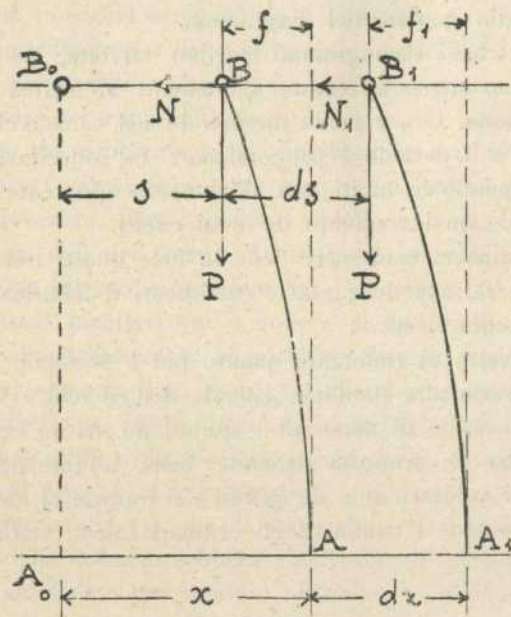


Fig. 2.

Sia $A_0 B_0$ (fig. 2) la posizione iniziale dell'asta verticale portante in sommità la massa m . Dopo il tempo t supponiamo che il piede dell'asta abbia percorso uno spazio rettilineo

$$x = f(t),$$

essendo $f(t)$ una qualunque funzione del tempo. La massa m trascinata dall'asta elastica e trattenuta insieme dall'inerzia propria avrà percorso nello stesso tempo uno spazio $B_0 B$ diverso in generale da x , mentre l'asta, inflettendosi, avrà raggiunto nell'istante t la freccia elastica f .

Per mettere in equazione il problema partiamo dalla posizione $A B$ dell'asta e seguiamola per un tempo brevissimo dt : essa andrà in $A_1 B_1$ essendo:

$$A A_1 = dx$$

$$B B_1 = ds.$$

La deformazione elastica dell'asta è dovuta in piccola parte al peso

$$P = mg$$

corrispondente alla massa m ed in maggior parte alla forza d'inerzia orizzontale N .

Qualunque sia il vincolo esistente all'estremo B , si può sempre calcolare, col sussidio della teoria dell'elasticità, una costante k che stabilisca il rapporto tra la freccia f e la forza N che nello stesso istante sollecita l'asta:

$$[1] \quad f = kN.$$

La forza N è il prodotto della massa m per l'accelerazione di cui è dotata la stessa massa nel suo proprio moto; onde

$$[2] \quad N = m \frac{d^2 s}{dt^2}.$$

Dalla figura 2 si ha geometricamente:

$$ds + (f_1 - f) = dx = ds + df$$

Tenendo presenti la (1) e la (2) ed integrando si ottiene

$$[3] \quad km \frac{d^2 s}{dt^2} + s = f(t).$$

Poichè la s è funzione del tempo, la (3) è un'equazione differenziale che si integra facilmente col metodo di variazione delle costanti.

Dette A e B due costanti arbitrarie l'integrale generale della (3) prende la forma:

$$[4] \quad s = -\omega \cos \omega t \left[A + \int f(t) \sin \omega t dt \right] + \omega \sin \omega t \left[B + \int f(t) \cos \omega t dt \right]$$

dove

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{km}} \quad (= \text{costante elastica}).$$

Le condizioni che determinano le costanti A e B si hanno osservando che all'inizio del terremoto lo spazio s e la velocità $\frac{ds}{dt}$ relativi alla massa m sono nulli. Si ha allora più semplicemente:

$$[5] \quad s = -\omega \cos \omega t \int_0^t f(t) \sin \omega t dt + \omega \sin \omega t \int_0^t f(t) \cos \omega t dt.$$

La (5) risolve in termini finiti il problema del pendolo semplice nel caso più generale di un moto qualsiasi al piede dell'asta.

Infatti qualunque movimento orizzontale del piede può scomporsi in due movimenti rettilinei i cui effetti sull'asta si potranno sommare geometricamente.

Per i movimenti sussultori, come dissi già altra volta, non credo sia il caso di ricorrere a teorie speciali. Ho sentito obbiettarmi che io trascuro questi movimenti, mentre essi hanno un'importanza molto grave.

Rispondo che importanza grave l'hanno avuta nei fabbricati costruiti senza cure speciali, mal collegati e coperti a vòlte, più di quanto potranno averla contro ossature monolitiche con solai piani. Tuttavia io li ho lasciati da parte soltanto perchè mi son preoccupato dello studio più urgente e più nuovo dei moti orizzontali. Contro questi la scienza delle costruzioni non era preparata, e bisognava trovare l'anello di congiunzione tra i suoi metodi già noti e i risultati della sismologia. Questo io ho cercato di fare attraverso ad uno studio dinamico.

I moti sussultori non fanno che alleggerire e ricaricare successivamente ed improvvisamente pilastri e solai; per calcolarli non si avrà da far altro che ricorrere alle leggi ed ai metodi noti per le sollecitazioni ripetute e dinamiche. Passando alle applicazioni bisognerà certamente tenerne conto sia per l'inversione che essi provocano negli sforzi dei solai, sia per l'aumento da attribuire ai carichi agenti dinamicamente e ripetutamente sui solai e sui piedritti.

La differenza capitale per cui si distingue la trattazione dei moti verticali da quella dei moti orizzontali sta in questo: che le forze esterne colle quali un terremoto di data forma viene indirettamente ad agire sulle masse di un fabbricato sono note senz'altro se il terremoto è sussultorio, ignote se è ondulatorio. La scienza delle costruzioni ha bisogno di conoscere come dato di partenza il sistema delle forze esterne applicate: bisogna dunque render noto questo sistema, prima di adottare i numerosi e geniali metodi di cui essa è ricca oggi giorno.

Perciò tra la sismologia, che cerca la forma dei terremoti e le loro caratteristiche meccaniche, e la scienza delle costruzioni era necessario inserire una teoria di collegamento del tipo di quella da me proposta. E poichè non intendo ripetere cose viete, a questa teoria e quindi ai moti orizzontali, che soli la rendono necessaria, ho ristretto la mia trattazione.

Ciò posto ritorniamo all'espressione (5). Per utilizzarla bisogna conoscere una funzione $f(t)$ che rappresenti con sufficiente approssimazione la proiezione del moto tellurico sugli assi coordinati. Se proviamo a ricavare tali proiezioni dai diagrammi sismici forniti dagli Osservatorj, troviamo dei moti oscillatori di periodi ed ampiezze variabili con fasi successive di incremento e di diminuzione, la cui forma difficilmente s'interpreterebbe con un'equazione.

Proviamo ancora ad incominciare con casi semplici, supponendo anzitutto che la funzione $f(t)$ sia sinusoidale, e distinguiamo due casi:

1° Il terremoto incomincia con velocità nulla (senza urto);

2° Il terremoto incomincia con velocità uguale alla massima fra quelle che si verificano durante un'intera onda (con urto).

Nei cenni precedenti io ho distinto questi due casi ed ho riferito i risultati del calcolo, cioè che il terremoto con urto è assai più temibile di quello senza urto iniziale e che il fabbricato sente tanto più gli effetti dell'urto, quanto maggiore è la sua rigidità.

Vediamo ora brevemente le foratole giustificative.

1°. *Terremoto senza urto iniziale.*

Si può porre $f(t) = r(1 - \cos \alpha t)$

dover ed α sono costanti: r indica la semiampiezza di oscillazione e $\frac{2\pi}{\alpha}$ il periodo.

La velocità in un istante qualunque è data da

$$\frac{df(t)}{dt} = r\alpha \sin \alpha t.$$

quindi si annulla al principio del moto, quando $t = 0$.

Poniamo

$$\rho = \frac{\omega}{\alpha} = \text{caratteristica}$$

e sostituiamo nella (5) il valore di $f(t)$. Eseguendo gli integrali e semplificando si ottiene

$$[6] \quad s = r \left[1 + \frac{\cos \omega t - \rho^2 \cos \alpha t}{\rho^2 - 1} \right].$$

L'accelerazione istantanea della massa pendolare si esprime quindi con

$$[7] \quad \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{r\omega^2}{\rho^2 - 1} (\cos \alpha t - \cos \omega t).$$

Di questa accelerazione importa conoscere il valore massimo assoluto il quale dipende da ω e da α . Per semplificare il calcolo ed operare in favore della stabilità, supponiamo che si abbia contemporaneamente:

$$\cos \alpha t_1 = 1; \quad \cos \omega t_1 = -1$$

in un certo istante t_1 si potrà scrivere allora

$$[8] \quad \max \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{2\rho^2}{\rho^2 - 1} r\alpha^2.$$

Ora $r\alpha^2$ rappresenta per noi la massima accelerazione sismica; quindi il termine.

$$\mu = \frac{2\rho^2}{\rho^2 - 1}$$

esprime il rapporto fra la massima accelerazione della massa pendolare e l'accelerazione sismica. La quantità ρ si chiama caratteristica appunto perchè di essa soltanto è funzione questo rapporto.

2°. *Terremoto con urto iniziale massimo.*

Si ha

$$f(t) = r \sin \alpha t$$

e procedendo come nel caso precedente si ricava

$$[9] \quad s = \frac{r\omega}{\omega^2 - \alpha^2} (-\alpha \sin \omega t + \omega \sin \alpha t)$$

$$[10] \quad \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{r\alpha\omega^2}{\omega^2 - \alpha^2} (\omega \sin \omega t - \alpha \sin \alpha t)$$

$$[11] \quad \max \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{\rho^2}{\rho - 1} r \alpha^2.$$

Il rapporto μ vale in questo caso:

$$\mu = \frac{\rho^2}{\rho - 1}.$$

Il diagramma che abbiamo già riprodotto (fig. 1) dà i valori del rapporto μ nei due casi ora esaminati. Le considerazioni allora svolte su questo diagramma mi dispensano da ogni ulteriore commento.

**

La soluzione del problema si presenta ora in forma semplicissima. Invero poniamo di voler cercare l'effetto massimo prodotto da un terremoto di cui gli apparecchi sismici hanno raccolto il grafico. Sia disegnata la traiettoria della base dell'asta nel piano orizzontale: proiettiamola su due assi ottagonali spostandoli nel medesimo tempo parallelamente a sè stessi con moto uniforme. Otterremo due diagrammi formati ciascuno da una successione di onde irregolari ora ampie, ora ristrette, svolgentisi con maggiore o minore rapidità.

Ciascuna onda potrà considerarsi con grande approssimazione come sinusoidale. L'onda r^{ma} ad esempio avrà per equazione:

$$f_r(t) = r_r \text{sen } \alpha_r t.$$

Applicando le formule generali e mantenendo in evidenza le costanti d'integrazione A e B si trova per lo spazio percorso dalla massa m durante l'onda r^{ma} l'espressione:

$$[12] \quad s_r = -A_r \omega \cos \omega t + B_r \omega \text{sen } \omega t + \frac{r_r \omega^2}{\omega^2 - \alpha_r^2} \text{sen } \alpha_r t.$$

Le costanti A_r e B_r devono determinarsi in modo che lo spazio s e la velocità della massa m alla fine dell'onda $(r-1)^{ma}$ siano uguali alle stesse quantità al principio dell'onda r^{ma} .

Bisognerà dunque partire dalla prima onda, durante la quale l'equazione del moto della massa pendolare si ottiene dall'applicazione diretta della (9), per cui si ha:

$$[13] \quad s_1 = \frac{r_1 \omega^2}{\omega^2 - \alpha_1^2} (\text{sen } \alpha_1 t - \frac{\alpha_1}{\omega} \text{sen } \omega t).$$

Alla fine della prima onda lo spazio $s = S_1$ è la velocità $\frac{ds}{dt} = V_1$ valgono rispettivamente:

$$[14] \quad \left\{ \begin{aligned} S_1 &= -\frac{r_1 \omega^2}{\omega^2 - \alpha_1^2} \frac{\alpha_1}{\omega} \text{sen } 2\pi \frac{\omega}{\alpha_1} \\ V_1 &= \frac{r_1 \omega^2 \alpha_1}{\omega^2 - \alpha_1^2} (1 - \cos 2\pi \frac{\omega}{\alpha_1}). \end{aligned} \right.$$

Per semplicità di espressioni conviene riprendere una nuova origine dei tempi all'inizio di ciascuna onda. Applicando la (12) si ha l'equazione del moto pendolare durante la seconda onda e le costanti A_2 e B_2 si deducono dalle seguenti equazioni di condizione;

$$\left\{ \begin{aligned} -A_2 \omega &= S_1 \\ B_2 \omega &= \frac{1}{\omega} \left[V_1 - \frac{r_1 \omega^2}{\omega^2 - \alpha_1^2} \alpha_1 \right]. \end{aligned} \right.$$

Ricavando da queste le costanti A_2 e B_2 si può scrivere in forma definita l'equazione del moto pendolare corrispondente all'onda seconda: — in modo analogo si passa all'onda terza, e così via.

Non è difficile, caso per caso, trovare la massima accelerazione temibile nella massa pendolare. È invece impossibile trarre conclusioni generali, poichè si tratta di un metodo di calcolo svolto su risultati sperimentali che possono mutare volta per volta.

Ho pensato piuttosto di studiare qualche movimento oscillatorio ad onde variabili, esprimibile con equazioni abbastanza semplici, applicando sempre la (5) e riferendomi alla trattazione già accennata dei due primi casi. Mi dispenso, poichè è breve lo spazio concessomi, dal dare nuove formule che del resto si possono dedurre con un po' di pazienza, ma senza difficoltà. Dirò soltanto che un moto oscillatorio di intensità crescente produce sul fabbricato un effetto minore di quello che produrrebbe un moto sinusoidale di intensità costantemente uguale alla massima sviluppata nel moto precedente: — e che un moto d'intensità decrescente, o smorzato, produce un effetto non superiore e talvolta uguale a quello del moto sinusoidale di intensità costantemente uguale alla massima.

Prima di concludere dirò che cosa io intendo per *intensità* di un'onda, in questo caso.

Osservando il diagramma (fig. 1) si vede che per il moto sinusoidale

$$f(t) = r \text{sen } \alpha t$$

la forza d'inerzia massima che sollecita il pendolo è proporzionale al termine

$$\mu = \frac{\rho^2}{\rho - 1}$$

e che per valori pratici della caratteristica, cioè superiori a 2, detta forza cresce all'incirca proporzionalmente a r . Quindi l'accelerazione della massa pendolare varia proporzionalmente al prodotto.

$$\text{Essendo} \quad \rho = \frac{\omega}{\alpha}; \quad \alpha = \frac{2\pi}{T} \quad (T = \text{periodo})$$

tale prodotto si trasforma nel rapporto:

$$\frac{r}{T}.$$

Ossia un'onda sismica è tanto più pericolosa quanto maggiore è in essa il rapporto tra l'ampiezza e il periodo.

A questo rapporto ho dato il nome di intensità.

Orbene, poichè un diagramma sismico qualunque si risolve in una successione di onde d'intensità ora crescente ora decrescente, tenendo conto di quanto ho detto è logico che il calcolo della costruzione antisismica ad un sol piano, di fronte ad un certo terremoto, debba svolgersi in base ai risultati raccolti nel diagramma della fig. 1, ponendo:

$$f(t) = r \operatorname{sen} \alpha t$$

e sostituendo ad r e ad α i valori corrispondenti all'onda di massima intensità riscontrata nel diagramma sismico.

D'accordo coi sismologi dovrà il progettista raccogliere i sismogrammi relativi alla regione su cui si deve costruire e scegliere in essi, con giusto criterio, l'onda di massima intensità sulla quale i calcoli dovranno basarsi.

Cerchiamo ora di spingere innanzi la teoria verso l'edificio a più piani, e per semplicità seguiamo dapprima il caso del fabbricato a due piani, quello che dovrà prevalere se si seguiranno criteri di sana prudenza. I casi più generali si dedurranno con perfetta analogia nel metodo e nelle conclusioni.

Sia un pendolo elastico a due masse m_1 ed m_2 concentrate rispettivamente nei punti A e B dell'asta (fig. 3). Qualunque sia il grado d'incastro fornito all'asta nei punti A e B (grado che si determina colla teoria dei lavori virtuali o del-

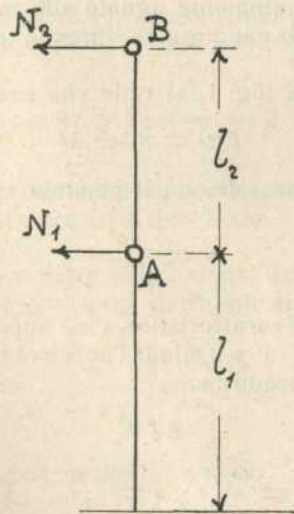


Fig. 3.

l'elisse di elasticità quando siano date le dimensioni dei piedritti e dei solai), gli spostamenti orizzontali f_A ed f_B dei punti A e B sotto l'azione di date forze N_1 ed N_2 , si possono sempre esprimere con:

$$[15] \quad \begin{cases} f_A = k_1 N_1 + k_2 N_2 \\ f_B = k_2 N_1 + k_3 N_2 \end{cases}$$

quando k_1, k_2, k_3 siano costanti da determinare colle teorie anzidette e quando si tenga presente la legge di reciprocità.

Dette rispettivamente s_A, s_B la distanza dei punti A e B dalla posizione iniziale in un istante qualunque, si avrà

$$[16] \quad \begin{cases} f_A + s_A = f(t) \\ f_B + s_B = f(t) \end{cases}$$

ed

$$[17] \quad \begin{cases} N_1 = m_1 \frac{d s_A}{d t} \\ N_2 = m_2 \frac{d s_B}{d t} \end{cases}$$

Combinando fra loro le (15), (16) e (17) si ottengono le due equazioni differenziali seguenti:

$$[18] \quad \begin{cases} k_1 m_1 \frac{d^2 s_A}{d t^2} + k_2 m_2 \frac{d^2 s_B}{d t^2} + s_A = f(t) \\ k_2 m_1 \frac{d^2 s_A}{d t^2} + k_3 m_2 \frac{d^2 s_B}{d t^2} + s_B = f(t) \end{cases}$$

alle quali è affidata la soluzione del problema.

L'integrazione di queste due equazioni è relativamente complessa, ma il risultato cui si giunge ammette grandi semplificazioni. Mi limiterò ad accennare questo risultato. Si ponga per brevità:

$$[19] \quad \begin{cases} A = m_1 m_2 (k_1 k_3 - k_2^2) \\ B = k_1 m_1 + k_3 m_2 \end{cases}$$

e si calcolino le costanti

$$[20] \quad \begin{cases} \xi^2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \\ \eta^2 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4A}}{2A} \end{cases}$$

Si considerino poi due pendoli semplici le cui costanti elastiche (simili alla w) siano

$$\xi \text{ ed } \eta$$

e si supponga che essi subiscano l'azione di due terremoti diversi F_1 e F_2 tali che

$$[21] \quad \begin{cases} F_1(t) = \frac{1}{A} \left[1 - \xi^2 m_2 (k_3 - k_2) \right] f(t) \\ F_2(t) = \frac{1}{A} \left[1 - \eta^2 m_2 (k_3 - k_2) \right] f(t) \end{cases}$$

e si indichino con (R_A) ed (S_A) rispettivamente le espressioni della distanza delle loro masse pendolari dalla posizione iniziale in un istante qualunque. Dette espres-

sioni si calcolano colle formole del pendolo semplice e in generale prendono la forma:

$$\begin{aligned}
 (R_A) &= -\xi \cos \xi t \int_0^t F_1(t) \sin \xi t dt + \\
 &+ \xi \sin \xi t \int_0^t F_1(t) \cos \xi t dt \\
 (S_A) &= -\eta \cos \eta t \int_0^t F_2(t) \sin \eta t dt + \\
 &+ \eta \sin \eta t \int_0^t F_2(t) \cos \eta t dt.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Ciò posto, le due funzioni s_A ed s_B si esprimono in termini finiti come segue:

$$s_A = \frac{1}{\eta^2 - \xi^2} \left[\frac{(R_A)}{\xi^2} - \frac{(S_A)}{\eta^2} \right]
 \tag{23}$$

$$s_B = \frac{1}{k_2 m_2 (\eta^2 - \xi^2)} \left[(m_2 k_3 - \frac{1}{\eta^2}) \frac{(R_A)}{\xi^2} + (\frac{1}{\xi^2} - m_2 k_3) \frac{(S_A)}{\eta^2} \right].
 \tag{24}$$

La conclusione è questa: *Il moto di ciascuna delle due masse del pendolo doppio si può ridurre ad una combinazione lineare dei moti delle masse di due pendoli semplici ideali soggetti a dati movimenti alla base e dotati di speciali costanti elastiche.*

Non aggiungo la trattazione di casi speciali che ormai si può rinnovare sulla falsariga di quelli studiati nel caso del pendolo semplice. Dirò soltanto che ho svolto direttamente parecchi casi ed ho trovato diagrammi simili a quello del pendolo semplice, nei quali il sincronismo si verifica per due valori dell'ascissa com'è prevedibile. Al di là della zona dei sincronismi le curve delle massime accelerazioni delle masse m_1 e m_2 raggiungono un minimo relativo e poi risalgono lentamente, lasciando al progettista di case a due piani quella latitudine che abbiamo fin da principio invocata.

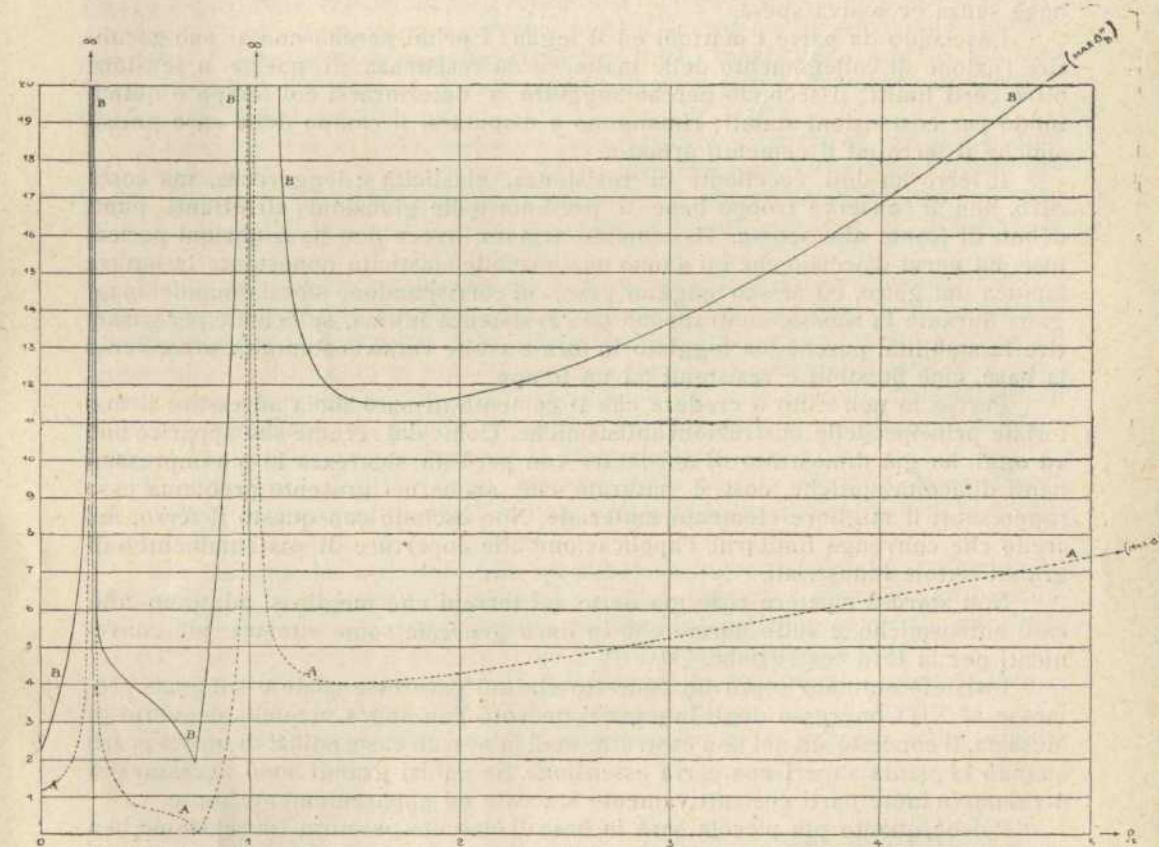
La fig. 4 dà un esempio di questi diagrammi nei quali, per le considerazioni prima svolte, abbiamo contemplato soltanto il caso del terremoto sinusoidale regolare con urto iniziale massimo.

Inutile oramai ripetere che analoghe conclusioni si possono trarre per case con qualsivoglia numero di piani. Le quali però non sono consigliabili nè per giusta prudenza di fronte alle incerte ipotesi che siamo costretti a fare sui terremoti, nè per il costo loro di fronte alle gravi esigenze statiche che i calcoli ci imporrebbero. Del resto, anche se i calcoli avessero già ricevuto una buona sanzione dall'esperienza, non converrebbe mai fidare troppo nè sulla natura dei terremoti avvenire, nè sulla virtù della scienza, cui il progetto s'informa. Troppe ipotesi restrittive ingombrano il cammino degli studi statici, troppe incertezze regnano nella nozione dei terremoti, per poter orgogliosamente levare dei monumenti quasi a sfida contro un elemento, che, raccolta nel segreto la sua potenza, infuria subitaneo, proditoriamente ci assale nella tranquillità della casa e ci trae in un istante a rovina.

Accontentiamoci umilmente di un piano terreno e di un primo piano. Dopo tutto, una città costituita da casette di questo tipo, convenientemente spaziate, con

interposti giardini, rappresenterebbe un'ideale di igiene e di tranquillità. Neanche l'economia ne soffrirebbe, purchè fosse bandita la concorrenza alla speculazione con leggi severissime sull'occupazione dei terreni e sulla forma delle case.

Come ognuno vede, dal vasto ed interessante problema che riguarda la sistemazione generale delle città da ricostruire, io ho voluto affrontare soltanto la parte più urgente e tecnicamente più discussa: quella da cui dipende più direttamente la vita dei cittadini. Ed ho tentato di risolverla seguendo un cammino razionale ed intuitivo ad un tempo.



EFFETTO DELLA SCOSSA SISMICA ORIZZONTALE SOPRA UN PENDOLO ELASTICO A DUE MASSE ..

Fig. 4.

Certamente a questa, come a tutte le indagini nuove, manca ancora, per quanto io conosco, il conforto dell'esperienza, conforto che sarebbe desiderabile per controllare e correggere i risultati del calcolo. Certo non possiamo sperimentare su saggi al vero; ma basterebbe la prova all'oscillazione di verghe metalliche verticali, caricate da un peso in sommità, incastrate e scosse al piede per

trarre utili conclusioni in confronto colla teoria esposta. Basti ricordare l'esempio del P. Alfani, che studiando le vibrazioni della torre di Palazzo Vecchio a Firenze, prodotte dal rombo del cannone di mezzodì e dal movimento della campana immediatamente seguente, trovò verificate su quella grande costruzione tutte le leggi enunciate dal Wertheim sulla vibrazione delle aste elastiche.

Venendo al lato pratico della questione osserviamo che fortunatamente i materiali migliori per costruire case ben collegate e stabili soddisfano egregiamente colle loro proprietà alle esigenze della teoria, cioè permettono di costruire bene senza eccessiva spesa.

Lasciando da parte i mattoni ed il legno; i primi perchè non si può garantire l'azione di collegamento delle malte, nè la resistenza di queste a tensione oltre certi limiti; il secondo perchè soggetto a deteriorarsi col tempo e quindi infido per costruzioni stabili; rimangono a disputarsi il campo delle case antisismiche il ferro ed il cemento armato.

Il ferro ha doti eccellenti di resistenza, elasticità e leggerezza, ma costa caro, non si conserva troppo bene e presenta nelle giunzioni altrettanti punti deboli di fronte alle scosse. Il cemento armato invece non ha giunzioni pericolose, ha nervi d'acciaio che gli danno una mirabile elasticità nonostante la natura lapidea del getto, ed al suo maggior peso, cui corrispondono sforzi dinamici maggiori durante la scossa, contrappone una resistenza intima, sufficiente per garantire la stabilità, purchè sia foggiato in forme svelte verso la sommità, tozze verso la base, cioè flessibili e resistenti ad un tempo.

Perciò io non esito a credere che il cemento armato abbia ad essere il materiale principe delle costruzioni antisismiche. Come dal recente suo apparire fino ad oggi, ha già dimostrato di affrontare con perfetta sicurezza le più impressionanti difficoltà statiche, così è naturale che anche nel presente problema esso rappresenti il migliore elemento materiale. Non escludo con questo il ferro, ma credo che convenga limitarne l'applicazione alle coperture di vasti ambienti o di grandi tettoie industriali.

Non starò a ripetere cose già dette sui terreni che meglio si adattano alle case antisismiche, e sulle norme che in linea generale sono ritenute più convenienti per la loro costruzione.

Insisterò soltanto sopra un concetto che mi pare essenziale e sul quale promosse al XII Congresso degli Ingegneri un voto l'on. ing. Cutrufelli, deputato di Messina. Il concetto sta nel non costruire mai, in nessun caso, edifici di un sol pezzo quando la pianta superi una certa estensione. Se edifici grandi sono necessari, si dividano in tante parti costruttivamente staccate ed apparentemente unite.

Poichè, quanto più piccola sarà la base di ciascuna ossatura (in relazione, ben s'intende, colla sua altezza) tanto minore sarà il pericolo che in due punti opposti di essa il suolo vibri in modo differente, mettendo in serio pericolo l'integrità della piastra di fondazione e quindi la stabilità del fabbricato. Basti ricordare l'osservazione più volte ripetuta di case uguali e vicine molto diversamente danneggiate dal terremoto, appunto perchè le loro fondamenta erano state scosse da vibrazioni diverse.

Aggiungerò infine, che, sebbene la casa antisismica ben fatta richieda precauzioni statiche infinitamente maggiori della casa ordinaria, pure può disporsi in modo tale da soddisfare ai criteri di una relativa e bene intesa economia. Infatti la valutazione di un tipo di casa d'abitazione da me proposto come esempio,

completa nell'organismo costruttivo e finita con decorazioni semplici, ha condotto ad un preventivo di circa 18 lire per metro cubo di fabbricato. Io credo che garantire a questo prezzo un alto grado di incolumità significhi, oltre tutto, realizzare anche un saggio concetto economico.

Ed ora io pongo termine a questi brevissimi cenni. La sventura calabro-sicula è sventura nazionale. Lo ha proclamato il Parlamento, lo ha affermato solennemente uno slancio concorde e mirabile di carità, lo abbiamo sentito tutti nel nostro cuore di italiani. Rientrata in breve la calma sapiente che osserva, misura e provvede, si è levato alto sopra tutti il problema della salvezza avvenire.

Poichè, qualunque siano le private opinioni, le città colpite devono fatalmente risorgere, è necessario ed urgente rivolgere tutti i mezzi della scienza ad uno sforzo concorde per dare, a chi ama quelle terre e perciò ha diritto di abitarle, la sicurezza della vita.

Il Governo con lodevole premura ha provocato il parere di una dotta Commissione e sancito delle norme statiche ed igieniche: ma tali norme richieste in fretta, quando di questi studi quasi nessuno si era ancora occupato, non potevano riuscire altrimenti che manchevoli, almeno per quanto riguarda le prescrizioni statiche.

Perciò mi è parso utile proporre al Congresso di Firenze un voto: cioè che il Governo nomini una Commissione permanente di sismologi e di ingegneri sperimentati, la quale svolga uno studio teorico-pratico continuato sull'edilizia antisismica, coordinando in un solo sistema tutto il contributo di studi e di esperienze che sarà prodotto dal mondo tecnico, e in pari tempo abbia facoltà di discutere, modificare e quindi approvare rapidamente e con unità di criteri i progetti che saranno presentati per la ricostruzione.

E' necessario che il Governo, memore della passata sventura, faccia tesoro dei migliori accertamenti scientifici e ne pretenda l'applicazione severa con tutti i mezzi di cui dispone la sua autorità.

Non bisogna dar quartiere alla speculazione ingorda, la quale, scorgendo innanzi a sè un largo campo da mietere, sta alle vedette ed approfitta di ogni debolezza per insinuarsi e rovinare colla simulazione, col raggirò e colla mala fede tutta l'opera di energia e di carità cui la ricostruzione sarà dovuta.

Tutto il mondo civile, che a quest'opera ha nobilmente concorso, ora ci guarda e ne attende a buon diritto il risultato.

Provvedere seriamente: ecco il dovere che ci è imposto dalla dignità nazionale.

Torino, Ottobre 1909.

Ing. A. DANUSSO.