DEMOLIZIONE CON ESPLOSIVI DI STRUTTURE SNELLE: PROBLEMI CINEMATICI CONNESSI CON IL CROLLO

Adolfo Bacci[(1)]

[(1)] XI° G.I. Costruzioni e Tecnologie, Accademia Navale, Viale Italia 52, 57100 Livorno;
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Facoltà d'Ingegneria, Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa.

SOMMARIO

In questo lavoro è presentata la soluzione del problema progettuale della demolizione controllata di una struttura snella, ad esempio una ciminiera, le cui macerie sono vincolate a cadere entro un assegnato perimetro di sicurezza. La demolizione si suppone eseguita solo con l'uso d'esplosivi. Lo studio del crollo è affrontato come un problema di dinamica di un sistema articolato di corpi rigidi. Infatti, il moto relativo fra le parti della struttura è permesso dalle sconnessioni causate dalla detonazione delle cariche esplosive. Durante la caduta, il moto dei singoli segmenti di struttura è roto-traslatorio, di conseguenza, nel caso della demolizione controllata e vincolata, la componente verticale della velocità del baricentro deve essere predominante su quella orizzontale. La soluzione formale del progetto della demolizione è ottenuta imponendo opportune condizioni sulla velocità del baricentro d'ogni singolo concio, sulla dimensione della sezione resistente residua dopo ciascuno scoppio e sulla lunghezza totale dei conci stessi.

1. INTRODUZIONE

La demolizione di strutture con l'utilizzo di cariche esplosive è una tecnica quanto mai efficace. Essa unisce in sé quei requisiti di sicurezza, d'economia e di rapidità che raramente si riscontrano nella pratica delle demolizioni con mezzi meccanici. Infatti, la sicurezza è garantita dall'assenza di maestranze in prossimità delle strutture durante il crollo; l'economia è legata al costo contenuto sia delle operazioni di minamento, sia di quello dei materiali usati. Infine, la rapidità d'esecuzione è una chiara conseguenza del metodo. La tecnica però non è indolore, poiché le demolizioni devono essere studiate con accuratezza al fine di evitare crolli mancati o, peggio ancora, danni alle strutture vicine.

Nella necessità di elaborare un progetto che dettagli le varie fasi della demolizione, s'inquadra il seguente problema. Consideriamo la demolizione controllata di una struttura alta e sottile, come una torre, una ciminiera oppure un edificio multipiano con dimensioni in pianta piccole rispetto alla sua altezza, cosicché il metodo d'implosione della struttura su se stessa sia irrealizzabile. Inoltre, si suppone che l'area disponibile per il crollo sia limitata, in altre parole esistano vincoli inderogabili di sicurezza che limitano il perimetro di caduta delle macerie.

Una soluzione accettabile sembra quella di fare crollare la struttura snella segmentandola in un numero sufficiente di parti, così da non superare i limiti dimensionali imposti (cfr. [1]). Ciò apparentemente è un'operazione semplice, ma coinvolge una complessa analisi cinematica della struttura in caduta. Infatti, deve essere scelta opportunamente la lunghezza dei singoli tronchi, per contenere le macerie nella zona fissata. Inoltre, si deve individuare il ritardo di detonazione delle cariche in funzione dell'angolo e del verso della rotazione assunto dai singoli blocchi nella caduta. Infine, è necessario controllare che, in tutte le fasi del crollo, il moto della struttura sia compatibile con i vincoli di sicurezza imposti.

In questo lavoro si propone un'analisi in cui tutti i segmenti di struttura sono considerati corpi rigidi. I carichi strutturali agenti sulla porzione rimanente si ritengono a portare quest'ultima fino alla rottura, conferendo contemporaneamente al segmento rigido una rotazione di verso opposto rispetto a quella del blocco superiore. Il microritardo fra le detonazioni deve garantire che l'azione ribaltante delle forze trasmesse dai conci superiori è già arrivata alla base di quello in esame, prima dello scoppio delle cariche. In questo modo, l'ampiezza della zona interessata dalla caduta, ad ogni istante di tempo, coincide con la massima fra le dimensioni dei segmenti. Durante la caduta, le macerie hanno un moto roto-traslatorio, di conseguenza, per rispettare i vincoli di progetto, la componente verticale della velocità del baricentro deve predominare su quella orizzontale. Inoltre, se si osserva che il tipo di crollo è individuato dal moto del sistema articolato negli istanti successivi all'esplosione delle cariche, le equazioni differenziali del moto si possono linearizzare e risolvere in forma chiusa. Ciò consente di imporre opportune condizioni sulla velocità del baricentro d'ogni singolo concio e sulla sezione resistente residua dopo ciascuno scoppio. Il progetto della demolizione controllata si riduce così alla soluzione numerica di un sistema d'equazioni, le cui incognite sono il numero e la lunghezza dei segmenti, e le posizioni dei baricentri delle sezioni residue.

2. CONSIDERAZIONI SUL TIPO DI CROLLO

Nel sistema di riferimento $0, y, z$ di Figura 1, si consideri una struttura snella di altezza totale H, la cui sezione trasversale varia lungo l'asse con legge $S = S(z)$ assegnata. Il materiale con cui è costruita la torre è noto, ad esempio muratura di mattoni oppure calcestruzzo armato, così come lo sono i suoi diagrammi sforzo-deformazione a trazione ed a compressione monoassiali. Di conseguenza, il momento di rottura della sezione generica, ovvero di ogni sua qualunque porzione è determinabile. Infine, si indichi con R la dimensione caratteristica della zona disponibile per la caduta in sicurezza delle macerie della torre.

Supponiamo di voler sezionare la torre in un numero di parti, $n>H/R$, in modo tale che ogni segmento non possa uscire dalla zona di sicurezza. Indichiamo, con h_i l'altezza del segmento *i.mo* e, posto γ il peso della struttura per unità di lunghezza, sia $P_i = \int_{h_i}^{h_{i+1}} \gamma S(z) dz$ il peso del concio. I pesi P_i saranno considerati applicati, per ragioni di semplicità di calcolo, nei baricentri dei singoli segmenti. Il metodo con cui viene eseguita l'operazione di segmentazione della struttura consiste nel creare delle sezioni indebolite, mediante l'asportazione di opportune quantità di materiale a seguito dello scoppio di microcariche. La sezione resistente residua della sezione *i.ma* dovrà avere un momento di rottura $M_{rott}^{(i)}$ inferiore a quello prodotto dal peso $\sum_{k=1}^{n} P_k$ della parte sovrastante la sezione indebolita. Il momento prodotto dai carichi è calcolato rispetto al baricentro della sezione residua, la cui coordinata y è d_i dall'asse della struttura. In questo modo si può ritenere, quanto meno negli istanti iniziali del crollo dei singoli pezzi, che dal punto di vista cinematico le sezioni residue si comportino come delle cerniere, con asse di rotazione passante per il baricentro ed ortogonale al piano *y, z*. La struttura risulta così disarticolata iniziando un moto verticale di caduta. L'asse della torre assume durante il crollo una forma tipica a "zig-zag".

E' importante osservare che il crollo della struttura può anche essere diverso da quello previsto. Infatti, se il moto dei singoli segmenti non ha negli istanti iniziali del crollo una componente prevalentemente verticale, la struttura potrebbe ruotare rispetto alla cerniera di base e ribaltarsi globalmente, violando, di conseguenza, il perimetro di sicurezza. Si rende così necessario sia il progetto di un opportuno microritardo fra i tempi di detonazione delle singole cariche per assicurare la rotazione alternata di ciascun segmento, sia la corretta scelta delle altezze dei tronchi e delle distanze dei baricentri delle sezioni residue dall'asse verticale, in modo che il moto del baricentro del singolo segmento, escludendo quello collegato alla cerniera di base, sia solo verticale.

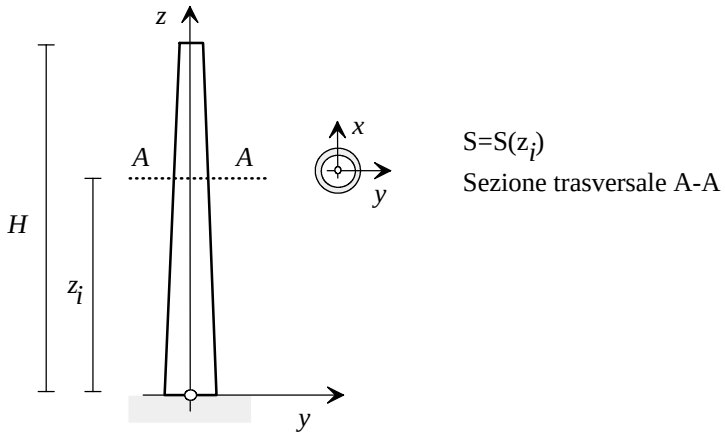

Figura 1. La struttura snella da demolire.

Il ritardo fra le cariche si determina facilmente, perché è legato al tempo necessario per trasferire le reazioni vincolari da una cerniera a quella successiva. Ipotizzando che l'esplosione sia istantanea, la frattura-zione della sezione resistente residua si produce nel tempo $\tau \approx \left[\pi\gamma S(z)/\mu g\right]^{1/2}$. Il trasferimento delle sollecitazioni trasversali lungo l'asse della trave avviene alla velocità delle onde di distorsione, per cui il ritardo fra un'esplosione e l'altra deve essere dell'ordine di $\tau_i \approx \tau + h_i/\left(\mu g/\gamma\right)^{1/2}$. Nelle precedenti relazioni, μ è il modulo di elasticità tangenziale del materiale e g l'accelerazione di gravità.

Infine, nei tempi successivi alla fase iniziale del crollo però non è più lecito considerare le aste collegate fra di loro mediante delle cerniere. Infatti, poiché le grandi rotazioni subite dai segmenti producono deformazioni tali da superare i limiti di resistenza a rottura dei materiali. I vincoli che impediscono gli spostamenti relativi fra le parte sono da considerare annullati ed ogni asta può cadere liberamente, svincolandosi dalle altre.

3. FORMULAZIONE DEL PROBLEMA DINAMICO DEL CROLLO

In base alle precedenti considerazioni, si può istituire un semplice modello meccanico con cui studiare la cinematica delle fasi iniziali del crollo della torre, in modo da assicurare il tipo di caduta voluto. Considerando che la fratturazione parziale delle sezioni, causata dal superamento dal loro momento di rottura per effetto delle coppie flettenti prodotte dai pesi strutturali, sia già avvenuta, la torre viene rappresentata con un sistema articolato composto da *n* aste rigide collegate fra di loro mediante cerniere. La massa di ogni segmento si ritiene concentrata nel baricentro del tronco stesso, che si trova al tempo $t = 0$ sull'asse verticale. Indicando con $\tan\theta_i = [d_i + d_{i+1}]/h_i$, con $L_i = h_i/\cos\theta_i$ e con L_i^G rispettivamente la tangente dell'angolo d'inclinazione, la lunghezza dell'asta compresa fra le sezioni (*i+1*).*ma* ed *i.ma* e la distanza dalla cerniera *i.ma* dal baricentro del segmento *i.mo*, il sistema equivalente alla torre nella situazione di crollo incipiente è riportato in figura 2. In particolare, si usa la convenzione che $\theta_i > 0$ se *i* è pari, mentre $\theta_i < 0$ se *i* è dispari. In queste ipotesi, il parametro indipendente che individua il moto di ogni asta, al tempo $t > 0$, è l'angolo $\varphi_i(t)$ che essa forma con la verticale. Le convenzioni sul segno di $\varphi_i(t)$ si considerano le stesse di quelle adottate per θ_i.

Se limitiamo l'analisi alle sole fasi iniziali del moto, cioè quando le aste non si sono ancora separate, le equazioni differenziali del moto possono essere linearizzata ed integrate in modo molto semplice. Infatti, ponendo $\varphi_i/t) = \theta_i + q_i(t)$ con $|qi(t)| << 1$, si ha

$$\cos\varphi_i(t) = \cos\theta_i - q_i\sin\theta_i, \quad \sin\varphi_i(t) = \sin\theta_i + q_i\cos\theta_i. \tag{1}$$

Le componenti orizzontale e verticale della velocità della massa $m_i = P_i/g$ sono

$$\begin{aligned} v_x^{(i)} &= \sum_{k=1}^{i}(-1)^k \dot{q}_k L_{(k-1)}\cos\theta_{(k-1)} + (-1)^{i+1}\dot{q}_i L_i^G\cos\theta_i, \\ v_y^{(i)} &= -\sum_{k=1}^{i}(-1)^k\, \dot{q}_k\, L_{(k-1)}\sin\theta_{(k-1)} - (-1)^{i+1}\dot{q}_i L_i^G\sin\theta_i. \end{aligned} \tag{2}$$

Pertanto, se si pone $\Lambda_k = L_k$, quando $k < i$, e $\Lambda_i = L_i^G$, allora l'energia cinetica e l'energia potenziale della massa m_i sono rispettivamente

$$Ti = \frac{1}{2}m_i\left\{\sum_{r,s=1}^{i}(-1)^{r+s}\Lambda_r\Lambda_s\,\dot{q}_r\;\dot{q}_s\;\cos\left[\theta_r - (-1)^{r+s}\theta_s\right]\right\}, \quad U_i = -m_i g\sum_{k=1}^{i}\Lambda_k q_k\sin\theta_k, \tag{3}$$

per mezzo delle quali si può calcolare la funzione di Lagrange $£ = \sum_i (T_i - U_i)$ del sistema.

Le equazioni del moto sono ottenibili dalle relazioni

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial £}{\partial\dot{q}_i}\right) - \frac{\partial £}{\partial q_i} = 0, \quad (i = 1, 2, ..., n),$$

associate alle condizioni iniziali $q_i(0) = 0,\ \dot{q}_i(0) = 0.$ Si ha così

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}\,\ddot{q}_j = b_i, \quad b_i > 0, \quad i = 1, 2, ..., n. \tag{4}$$

Le equazioni (4) ammettono la semplice soluzione $q_i(t) = A_i t^2$, dove le costanti A_i, che devono essere tutte positive per garantire la rotazione alternata delle singole aste, dipendono dai parametri geometrici del modello e dalle masse strutturali.

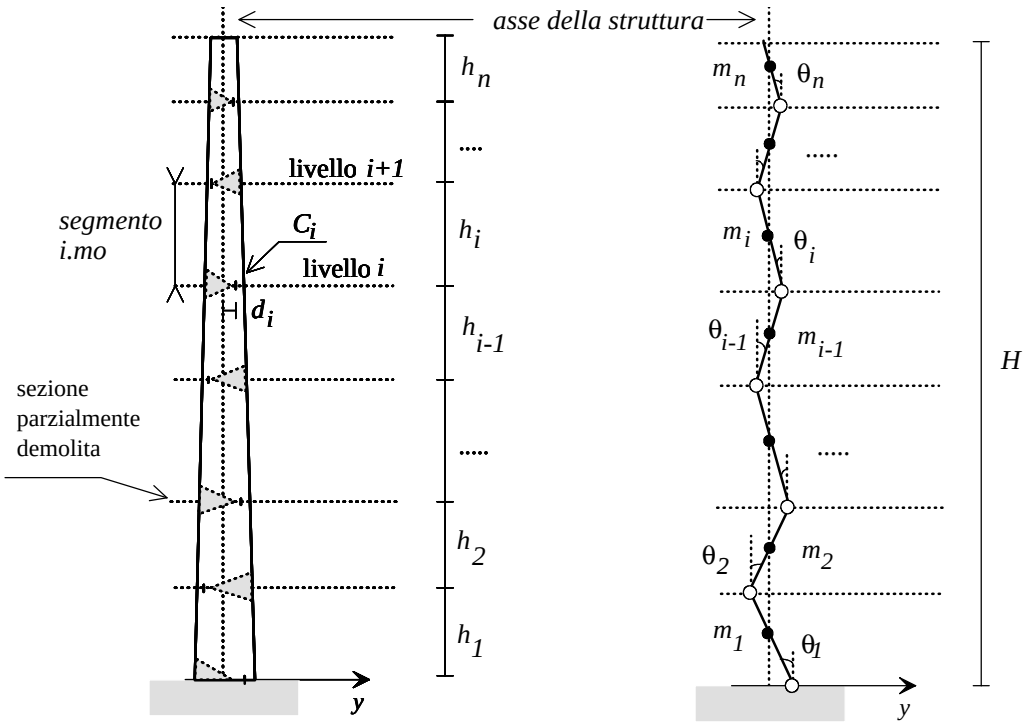

Figura 2. Schema cinematico della torre nelle prime fasi della caduta.

4. DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI h_i E q_i

Il progetto della demolizione consiste nel determinare le lunghezze $h_1, h_2, ..., h_n$ delle aste e i loro angoli $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_n$ di inclinazione iniziale. Il totale delle incognite è 2*n*. A tale scopo, devono essere imposte 2*n* condizioni per poter risolvere univocamente il problema.

Innanzitutto, per ottenere un moto prevalentemente verticale, che garantisca la caduta a "zig-zag" dell'asse della torre, è necessario richiedere che la componente orizzontale della velocità del baricentro di ogni asta, nell'ambito di validità delle equazioni (4), sia nulla. Ricordando le equazioni (2.a), si ricavano le *n-1* condizioni

$$\sum_{k=1}^{i}(-1)^k A_k \Lambda_k \cos\theta_k = 0, \quad i = 2, 3, ..., n. \tag{5}$$

poiché il primo segmento i =1, che ruota attorno alla cerniera di base, non può avere velocità orizzontale nulla.

Inoltre, la richiesta che si formino cerniere all'estremità dei segmenti, implica che il momento prodotto dai pesi strutturali, calcolato rispetto al baricentro della sezione residua, supera il momento di rottura $M_{rott}^{(i)}(d_i, z_i)$ della sezione resistente, rimasta dopo lo scoppio all'ascissa z_i. Ciò si traduce nelle *n* relazioni

$$d_i \sum_{k=i}^{n} P_k = \alpha M_r^{(i)}(z_i, d_i), \quad i = 1, 2, ..., n, \tag{6}$$

dove la costante a, da porre maggiore dell'unità, è un fattore di sicurezza necessario per garantire la sicurezza della rottura della sezione generica.

Infine, l'ulteriore equazione che rende determinato il problema della demolizione è

$$\sum_{k=1}^{n} h_i = H. \tag{7}$$

Le equazioni (5), (6) e (7) formano un sistema di *2n* equazioni in 2*n* incognite, la cui soluzione, deve soddisfare anche le disuguaglianze

$$2R > \max\{h_1, h_2, ..., h_n\}, \quad A_1 > 0, A_2 > 0, ..., A_n > 0. \tag{8}$$

Il rispetto simultaneo delle relazioni (5), (6), (7) e (8) assicura che il progetto della demolizione controllata della struttura snella rispetta i vincoli di sicurezza imposti sul crollo. In particolare, se, dopo aver soddisfatto le (5), (6) e (7), le disuguaglianze (8) sono violate, deve essere aumentato il numero dei segmenti e ripetuto il procedimento fino al rispetto di tutte le relazioni. La ricerca della soluzione nei casi tecnici richiede l'utilizzo di metodi numerici iterativi, affrontabili con efficacia con qualunque elaboratore elettronico, rendendo agevole la progettazione di qualunque tipologia di struttura snella.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] D. Hartmann, M. Breidt, Computerbasierte Projektierung von Bauverk-Sprengungen - Teil 1: Sprengung turmartiger Bauwerke, *Bautechnik*, Vol. 74, pp. 684-697 (1997).