

FEM O DEM: MODELLI NUMERICI A CONFRONTO NELLE DEMOLIZIONI

SIMULAZIONI CON METODI CONTINUI E METODI DISCONTINUI APPLICATI ALLA DEMOLIZIONE PER CROLLO DI DUE PILE DI UN VIADOTTO EVIDENZIANO VANTAGGI E POTENZIALITÀ DI CIASCUN METODO E L'IMPORTANZA DI UN CORRETTO APPROCCIO INGEGNERISTICO PER LAVORAZIONI COMPLESSE

di Vincenzo Doronzo*

L'uso della modellistica è da parecchi anni consolidato nell'ambito dell'ingegneria strutturale mentre nel settore delle demolizioni viene per lo più utilizzata per strutture complesse; tale metodologia può essere intesa come un'evoluzione della già consolidata rappresentazione tridimensionale mediante software CAD. In generale la modellazione 3D di una struttura consiste nella discretizzazione di un assegnato dominio in elementi fra loro connessi in un numero finito di punti (nodi), vertici degli elementi; in corrispondenza dei quali sono valutate le componenti della funzione incognita (campo tensionale o deformativo).

È possibile classificare i metodi numerici di simulazione in due gruppi:

1. metodi al continuo, come ad esempio il metodo FEM, in cui è possibile discretizzare il sistema oggetto di studi con unità elementari di forma geometricamente semplice le quali, deformandosi, rimangono costantemente in contatto attraverso le superfici di separazione;
 2. metodi discontinui DEM, in cui il sistema viene discretizzato con corpi discreti distinti che interagiscono tra di loro in caso di relativo contatto. In questo caso il comportamento meccanico dipende dai punti di contatto dei singoli elementi. Quindi, mentre nei metodi al continuo i contatti fra "unità elementari" rimangono invariati indipendentemente dalla risposta del modello, in quelli discontinui vengono aggiornati a ogni iterazione in base alla posizione e al movimento relativo dei singoli elementi. A differenza dei metodi al continuo, nei metodi discontinui, è ammessa la separazione del dominio in blocchi che continuano a risentire delle sollecitazioni agenti.
- Per un'analisi FEM o DEM la discretizzazione viene realizzata mediante una mesh che consiste in una suddivisione della geometria di partenza in elementi base che costituiscono il punto di appoggio per la risoluzione matematica del problema in esame. La mesh è basata sul concetto di cell decomposition: un oggetto complesso

viene rappresentato da un insieme di elementi geometrici più semplici. Tale fase rappresenta un punto fondamentale, in quanto la qualità della mesh influenza i risultati della modellazione. La trattazione sulla scelta della mesh da adottare risulta molto vasta, ma in generale si può affermare che dove si vuole osservare una variazione del campo tensionale molto accentuata occorre utilizzare una mesh di dimensione minore. Oltre alle tradizionali analisi statiche, con l'ausilio della metodologia DEM, è possibile condurre analisi dinamiche che possono utilizzare algoritmi di calcolo espliciti e impliciti. Con l'utilizzo di algoritmi espliciti non si presentano problemi di non convergenza a una soluzione finita, dato che in questo caso l'analisi non è condizionata da un criterio di convergenza e l'incremento di tempo viene definito all'inizio dell'analisi e rima-

IL CASO STUDIO

Il viadotto Farma, costruito negli anni '80, era situato sulla S.S. 223 "di Pagagnico" (E78 Grosseto-Siena), tra Civitella Pagagnico (GR) e Monticiano (SI) dal km 30+040 al km 41+600. L'intero viadotto è stato oggetto di operazioni di demolizione degli impalcati, mediante utilizzo di carro svaro, e delle pile, mediante tecnica di crollo controllato.

La demolizione delle pile è stata affidata alla società Armofer Cinerari Luigi srl con grande esperienza in lavori complessi di

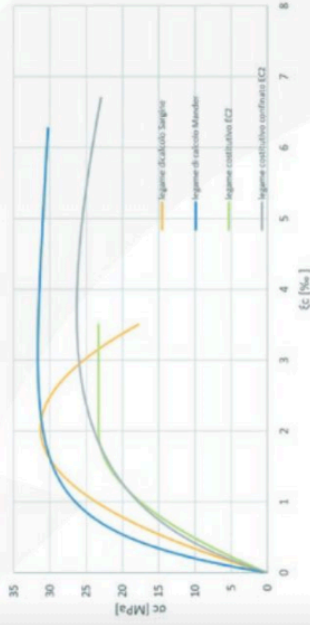


Figura 1. Legami costitutivi analizzati; nel grafico vengono rappresentati i legami costitutivi studiati per l'analisi statica. Si nota come i legami dell'EC2 siano più conservativi rispetto ai legami costitutivi di Sargine (calcestruzzo non confinato) e di Mander (calcestruzzo confinato). Adottando il legame costitutivo di Mander si passa dal classico valore di deformazione ultima del calcestruzzo di 3,5% a 6,3%.

ne costante durante il calcolo. In questo articolo mettiamo a confronto l'approccio FEM e l'approccio DEM cogliendo gli aspetti positivi di entrambi i metodi che sono stati applicati a un interessante caso studio di un cantiere di demolizione di due pile del viadotto Farma.

demolizione civile e industriale, la progettazione dell'intervento è stata eseguita per Armofer da DEAM ingegneria srl.

Per alcune delle pile a maggior altezza del viadotto (P3 - 99 m e P4 - 55 m) è stata prevista la tecnica di demolizione per crollo indotto meccanicamente; in pratica ciascuna pila veniva fatta crollare per ribaltamento sotto l'azione della sola forza peso a seguito della realizzazione di un cuneo di rottura realizzato alla base della pila mediante escavatori a controllo remoto. La realizzazione del cuneo di rottura è avvenuta per step successivi fino a creare la plasticizzazione della sezione resistente lasciata, producendo così un movimento instabilizzante che evolve in crollo. Il lavoro di demolizione è stato particolarmente complesso perché di fianco al vecchio viadotto in demolizione, a pochi metri di distanza, si trovava il nuovo viadotto Farma in esercizio. Non erano ammessi errori nelle trattorie di caduta, pertanto, per simulare il collasso e le geometrie dei cunei da realizzare alla base delle pile, sono state utilizzate tecniche di modellazione complessa con SAP2000 (modello FEM) e ANSYS R3 (modello DEM). Gli obiettivi dello studio erano quelli di confrontare i risultati ottenuti dai programmi di calcolo SAP 2000 e ANSYS R3 e di simulare mediante il programma ANSYS il cinematisimo di collasso e confrontare i risultati analitici.

INSERIMENTO DEI PARAMETRI MECCANICI E GEOMETRICI

I parametri meccanici e geometrici delle pile sono stati desunti da saggi di controllo in campo e da tavole storiche. La sezione trasversale era uguale per entrambe le pile ed era costituita da una geometria scatolare 6,00x8,00 m con pareti spesse 0,60 m e da un setto centrale di dimensioni 4,80x0,30 m.

Per caratterizzare le armature sono state eseguite delle prove magnetometriche. I risultati hanno mostrato che alla base delle pile erano presenti barre verticali $\Phi 20$

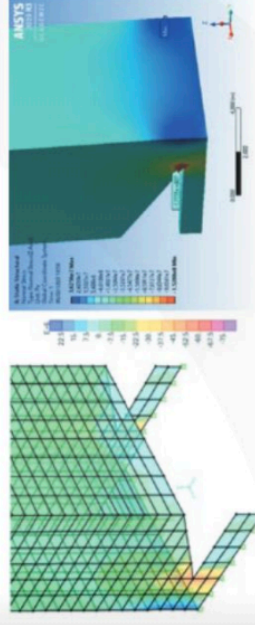


Figura 2. Risultati analisi statica P3; a sinistra i risultati dell'analisi statica condotta con SAP2000; a destra i risultati dell'analisi statica condotta con ANSYS R3. I picchi tensionali in entrambi i casi si registrano nell'apice del cuneo di rottura.

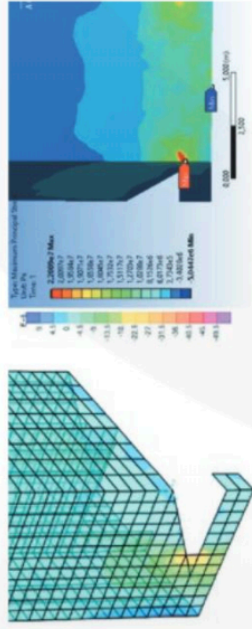


Figura 3. Risultati analisi statica P4, a sinistra i risultati dell'analisi statica condotta con SAP2000, a destra i risultati dell'analisi statica condotta con ANSYS R3. Si nota come i moduli delle tensioni principali coincidano nell'interno del cono di rottura con quelli delle tensioni verticali; ciò indica che tali tensioni hanno le medesime direzioni.

con passo 20 cm e staffe $\phi 12$, con passo 20 cm. Le pile risultavano essere ugualmente armate. Il calcestruzzo delle pile è stato caratterizzato di classe C35/45 mediante prove di tipo non distruttive SONREB. Le non linearità meccaniche del cemento armato sono legate ai legami costitutivi non lineari dei materiali che lo compongono, cioè l'acciaio e il calcestruzzo. Il materiale presenta un comportamento non lineare anche per stati di sollecitazione di compressione pura. Il legame costitutivo risulta influenzato oltre che dalla composizione del conglomerato anche dalla presenza di armatura di contenimento (staffe), quest'ultima in grado di aumentare resistenza e duttilità, in termini di deformazione a rottura, rispetto al caso di elemento non confinato. Alla luce di quest'ultima considerazione per modellare il legame $\sigma-\epsilon$ si utilizza il legame costitutivo di Mander il quale tiene conto della presenza del confinamento offerto dalle staffe [Figura 1]. Tale legame è stato utilizzato in entrambi i software per le analisi statiche. Per quanto riguarda l'analisi dinamica esplicita condotta con il programma di calcolo ANSYS R3, il legame di calcolo utilizzato è il legame parametrico RHT già implementato nel software.

MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI

Essendo le pareti esterne della pila spesse 60 cm e il setto interno 30 cm, la pila nel programma SAP2000 è stata modellata

in entrambi i modelli le pile sono soggette alla sola azione della forza peso.

ANALISI STATICA

L'analisi statica è stata interpretata analizzando gli stati tensionali nell'intorno dell'apice del cono di rottura e gli spostamenti del baricentro della pila per i vari step di demolizione. In tale articolo ci si limiterà a commentare l'ultimo step della demolizione in cui si è completato lo scasso del cono alla base e che coincide con l'istante temporale in cui si verifica la plasticizzazione dell'apice del cono di rottura. Le geometrie del cono di rottura e gli step seguiti per la progettazione della demolizione sono gli stessi per entrambi le pile. Per quanto riguarda la pila P3 il software SAP2000 fornisce una tensione verticale di compressione, nell'ultima fase della demolizione, di circa 82 MPa [Figura 2]. Tali valori sono in linea con quelli forniti dal programma ANSYS R3 il quale fornisce una tensione verticale di circa 77 MPa. Le tensioni sono tali da causare la plasticizzazione del calcestruzzo e quindi la formazione della cerniera cilindrica attorno alla quale avverrà la rotazione della pila. Per avere un'ulteriore evidenza della plasticizzazione del calcestruzzo si può utilizzare come chiave di lettura il criterio di rottura di Von Mises. Le tensioni, secondo tale criterio, sono di 90 MPa per SAP2000 e 91 MPa per ANSYS R3. Tali tensioni risultano superiori alla resistenza del calcestruzzo. Dal punto di vista del campo degli spostamenti, si nota come questo sia interamente governato dallo spostamento nella direzione di ribaltamento mentre sia pressoché nullo nella direzione ortogonale. I valori dello spostamento forniti dal programma SAP2000 nella direzione di ribaltamento sono di 330 mm contro i 450 mm forniti dal programma ANSYS R3. Tale differenza (27%) sembra essere elevata, ma se paragonata all'altezza della pila (99 m) diventa trascurabile. Per la pila P4 il softwa-

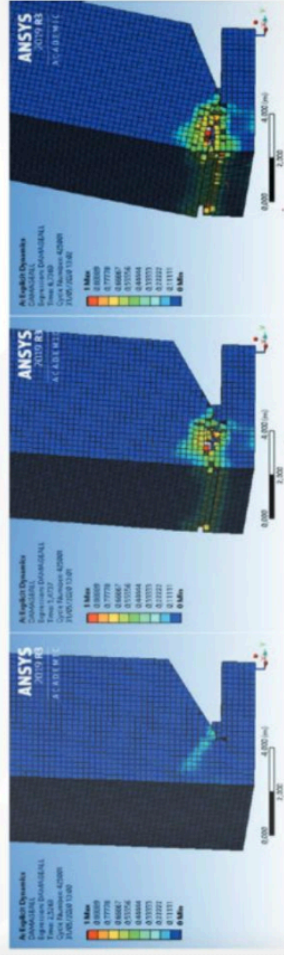


Figura 4. Risultati simulazione analisi dinamica P4; i risultati sono riportati in funzione del parametro di danno D. Nel primo fotogramma si nota come la zona di massimo sfruttamento del materiale parta dall'apice del cono di rottura e si evolve rapidamente. Nel terzo fotogramma la pila crolla senza subire nessuna traslazione verticale.

re SAP2000 fornisce tensioni verticali di 55 MPa mentre il programma ANSYS R3 fornisce tensioni di circa 50 MPa [Figura 3]. Anche in questo caso i valori tensionali risultano simili tra loro e tali da garantire la plasticizzazione del calcestruzzo nella zona d'interesse. Tale evidenza è confermata dal criterio di Von Mises il quale, secondo il programma SAP2000, fornisce valori di 62 MPa mentre secondo il programma ANSYS R3 valori di circa 67 MPa. Lo spostamento registrato in direzione di ribaltamento è di circa 120 mm

ANALISI DINAMICA

Attraverso l'analisi statica è stato possibile progettare il cono di rottura e verificare che il calcestruzzo arrivi nell'ultimo step della demolizione oltre le condizioni plastiche. Si è visto come sia l'approccio FEM sia quello DEM portino a risultati abbastanza simili. Con la sola analisi statica, però, non è possibile simulare in

modo preciso la tipologia di collasso delle pile, mentre l'approccio DEM è in grado di sviluppare un'analisi dinamica in grado di mostrare l'evoluzione del collasso dell'elemento strutturale.

Tale informazione risulta fondamentale per poter operare in sicurezza ed evitare cinematismi inattesi. Grazie al software ANSYS R3 è stata condotta un'analisi statica l'unico parametro che varia è la legge costitutiva del materiale passando dal modello di Mander

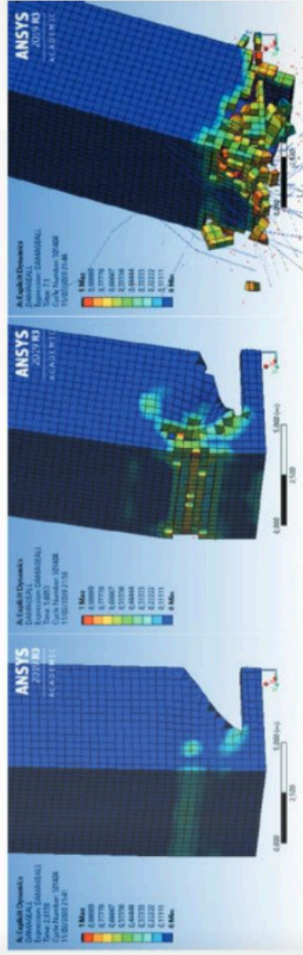


Figura 5. Risultati simulazione analisi dinamica P3 e collasso reale: mettendo a confronto i risultati della simulazione con il collasso reale si nota come l'analisi dinamica sia stata molto aderente alla realtà; nella seconda sequenza le pareti laterali si instabilizzano a causa dell'elevato sforzo normale; nella terza sequenza di fotogrammi si può osservare come la pila trasli rigidamente per poi crollare ribaltandosi.

al modello RHT. Tale simulazione mostra come, mentre per la P4 si arrivi al crollo con un meccanismo duttile (con una rotazione attorno alla cerniera plastica) che evolve in crollo [Figura 4], per la P3 il meccanismo di rottura è di tipo fragile.

Infatti, nei primi istanti della simulazione la zona alla base della pila preservata dalla demolizione sembra plasticizzarsi ma a causa dell'elevato sforzo di compressione si perviene a una rottura di schianto del calcestruzzo con una traslazione rigida verticale [Figura 5]. Tali risultati sono confermati dalla trattazione analitica delle sezioni in calcestruzzo armato.

Infatti, da una valutazione analitica si nota come la P3 collassi in campo 4 (rottura fragile per superamento della deformazione ultima del calcestruzzo) mentre la P4 collassi in campo 3 (rottura duttile per superamento della deformazione ultima dell'acciaio).

FEM O DEM?

È evidente come la sola analisi statica non riesca a fornire un quadro completo del fenomeno di collasso che per definizione è un fenomeno cinematico. Tuttavia tale modalità di analizzare la statica degli elementi può risultare esaustiva in trattazioni in cui non sono coinvolti processi cinematici. Nella trattazione in esame l'analisi dinamica è risultata di fondamentale importanza e ha permesso di conoscere la tipologia di cinematicismo che si è instaurato nelle pile. Si può affermare quindi, che nel caso in esame l'analisi dinamica è complementare e non subalterna all'analisi statica. Infatti, l'analisi statica risulta molto efficiente nella fase preliminare della progettazione poiché i tempi computazionali sono estremamente ridotti (circa qualche secondo) sia che venga condotta con l'approccio FEM sia che venga condotta con l'approccio DEM. L'analisi dinamica invece, che può essere

condotta solo con l'approccio DEM, richiede tempi computazionali molto più lunghi (nell'ordine di ore o addirittura giorni) che variano a seconda del dettaglio del modello costruito e che possono essere ridotti in parte grazie all'ausilio di un computer di buone prestazioni. Inoltre, l'attendibilità dell'analisi dinamica è influenzata notevolmente dall'accuratezza con la quale viene creato il modello e dalle condizioni al contorno (errori grossolani comportano la riesecuzione dell'analisi e quindi un grande dispendio in termini di tempo). L'approccio FEM unito alle potenzialità dell'approccio DEM può aiutare notevolmente il progettista nel compiere valutazioni accurate in lavori complessi. Occorre precisare che i risultati forniti dal software, per quanto precisi, non tengono conto dell'aleatorietà del materiale e delle condizioni al contorno che vengono semplificate nella teoria.

*Ingegnere strutturista, DEAM ingegneria srl

WASTE TO ENERGY IL BIOMETANO È LA NUOVA FRONTIERA

Impianti chiavi in mano
per il trattamento dei rifiuti
e la produzione di BIOMETANO

IESWASTE
Organic & Unsorted

Made in Italy
Efficienze da record
Tecnologie all'avanguardia
Impianti su misura e chiavi in mano
Garanzia di buona esecuzione dell'impianto

IES BIOGAS, PARTNER IDEALE PER IL TUO IMPIANTO

- Studi di fattibilità
- Progettazione preliminare ed esecutiva
- General contractor
- EPC (engineering, procurement and construction)
- EPCM (engineering, procurement, construction and management)
- Service e assistenza 24/7
- Software in house



IESAGRIFARM

IESWASTE

IESFOODINDUSTRY

biogas24

IESBIOGAS
a Snam company

IES BIOGAS srl _ via T. DONADON 4 _ 33170 PORDENONE _ www.iesbiogas.it