

# UN METODO SEMPLIFICATO PER LA VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO SISMICO DI UNA GALLERIA CIRCOLARE

Giuseppe Lombardi (giuseppe.lombardi@uniroma1.it)  
*Università di Roma "La Sapienza"*

Davide Noè Gorini (davidenogorini@uniroma1.it)  
*Università di Roma "La Sapienza"*

Agnese Manelli (manelli.1825912@studenti.uniroma1.it)  
*Università di Roma "La Sapienza"*

Luigi Callisto (luigi.callisto@uniroma1.it)  
*Università di Roma "La Sapienza"*

## ABSTRACT

Questo articolo illustra un'estensione dell'analisi statica non lineare, comunemente adoperata nell'analisi strutturale, alla valutazione delle sollecitazioni indotte da un evento sismico nel rivestimento di una galleria a sezione circolare. La risposta sismica del sistema galleria-terreno in direzione trasversale è descritta dalla curva di capacità, ottenuta attraverso un'analisi numerica *push-over* di un dominio piano comprendente la galleria e una grande porzione di terreno. La domanda sismica è invece rappresentata attraverso lo spettro elastico di risposta dell'azione considerata. Nell'articolo si illustra la struttura del metodo e se ne validano i risultati attraverso un confronto con le sollecitazioni ottenute svolgendo analisi dinamiche non-lineari in ambiente OpenSees.

## 1. INTRODUZIONE

Nella pratica progettuale le sollecitazioni indotte da un evento sismico nel rivestimento di una galleria vengono valutate attraverso metodi semplificati, nei quali l'interazione tra il terreno e il rivestimento è trascurata, oppure è riprodotta attraverso semplici molle lineari di incerta calibrazione. Ad oggi, un affinamento delle previsioni comporta lo sviluppo di analisi dinamiche nel dominio del tempo su modelli numerici accoppiati: manca quindi un livello di analisi di complessità intermedia, che da un lato risulti di impiego sufficientemente agevole, e dall'altro comporti una rappresentazione realistica dei fenomeni di interazione terreno-struttura.

La procedura illustrata in questo lavoro estende al caso della riposta trasversale di gallerie con sezione circolare il *capacity spectrum method* (Freeman, 2004) utilizzato per l'analisi statica non lineare delle strutture. In questo metodo un sistema a molti gradi di libertà viene ricondotto a un sistema equivalente con un solo grado di libertà (SDOF), caratterizzato da una curva di capacità ottenuta da un'analisi statica incrementale (*push-over*) su un dominio piano galleria-terreno. La domanda sismica è invece rappresentata dallo spettro elastico dell'azione considerata, che contiene le azioni sismiche di base modificate per effetto della risposta sismica locale. Le sollecitazioni nel rivestimento si ottengono rappresentando la curva di capacità e lo spettro elastico di risposta nel piano accelerazione-spostamento (AD) e ricercando, attraverso una procedura iterativa, lo spostamento e l'azione sismica compatibili con la domanda sismica e con la capacità del sistema.

## 2. MODELLO NUMERICO

La Figura 1.a mostra il caso di studio analizzato e la sua discretizzazione agli elementi finiti. Il dominio, sviluppato in condizioni di deformazione piana, ha un'estensione di 80 m × 60 m; la galleria ha un diametro di 7 m e il suo asse è ubicato alla profondità 30 m, mentre il rivestimento in calcestruzzo armato ha uno spessore di 0.5 m.

Il modello numerico è stato creato sviluppando in ambiente Matlab un generatore parametrico di reticoli di elementi finiti. Il reticolo è stato poi importato in OpenSees (McKenna, 1997) per lo svolgimento delle analisi numeriche. Nella discretizzazione del terreno sono stati adoperati elementi finiti quadrangolari a quattro nodi, con integrazione ridotta, caratterizzati da un singolo punto di integrazione nel centro (elementi SSPbrick). Per il rivestimento sono stati impiegati invece elementi lineari elastici a due nodi (elementi ElasticBeamColumn). Il deposito è costituito da uno strato di terreno uniforme il cui comportamento meccanico è stato riprodotto tramite il

legame elasto-plastico incrudente PDMY (Yang et al., 2003). In Figura 1.b è riportata la distribuzione della rigidità a piccole deformazioni del banco al variare della profondità.

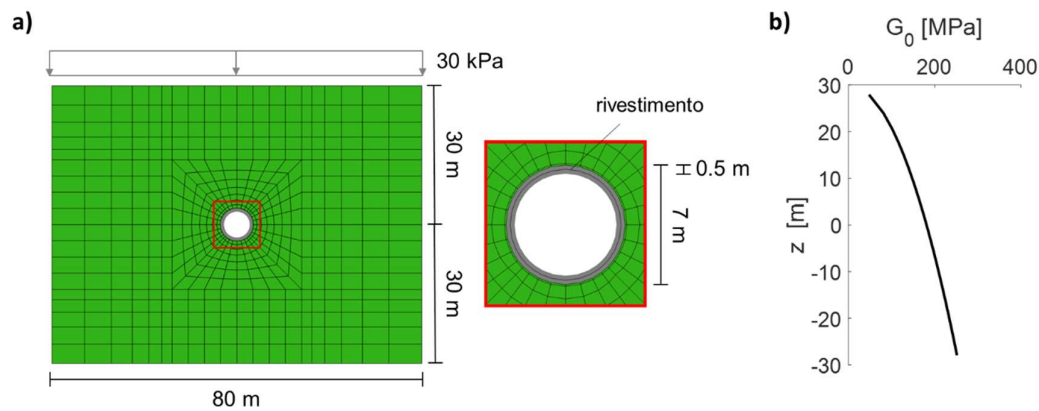


Figura 1: a) dimensioni del modello e discretizzazione agli elementi finiti, b) distribuzione della rigidità a piccole deformazioni con la profondità

## 2. DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI CAPACITÀ

L'analisi di *push-over* è stata svolta successivamente alla simulazione delle fasi costruttive, che per brevità non sono discusse in questo lavoro. Nell'analisi vengono applicate staticamente all'intero sistema forze d'inerzia proporzionali ai pesi, secondo un fattore di proporzionalità (coefficiente sismico  $k_h$ ) che viene incrementato progressivamente fino al raggiungimento della capacità del sistema. La distribuzione di  $k_h$  viene scelta in maniera da simulare i principali caratteri della risposta dinamica del sistema, e in particolare per riprodurre una deformazione simile a quella associata al primo modo di vibrazione, a cui è associata una dominante percentuale di massa partecipante uguale al 79,6%. L'analisi modale del caso in esame è stata svolta in ambiente OpenSees.

La Figura 2 mostra un confronto tra la deformata modale del dominio e la deformata ottenuta applicando una distribuzione triangolare del coefficiente sismico, da cui risulta evidente che la distribuzione scelta per  $k_h$  riproduce correttamente la deformata modale di interesse.

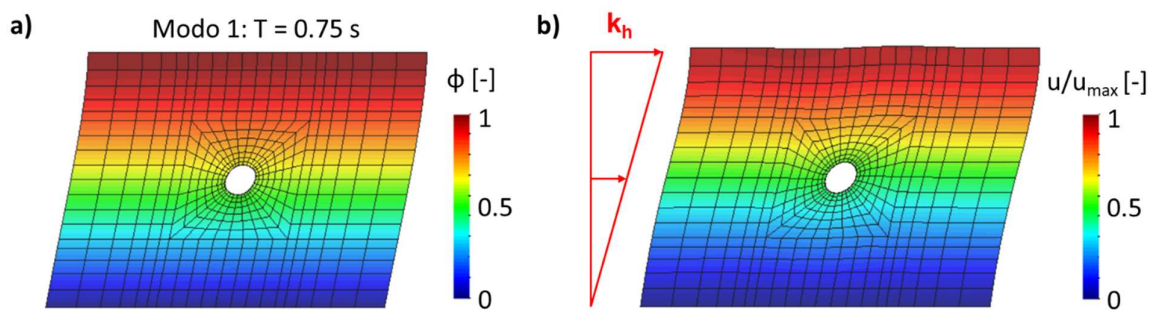


Figura 2: a) deformata modale del dominio relativa al primo modo, b) analisi statica non lineare con distribuzione triangolare di  $k_h$  e relativo campo di spostamento normalizzato

Nell'analisi statica di *push-over*, si incrementano progressivamente i valori di  $k_h$  mantenendo la distribuzione prescelta e si ottengono i corrispondenti valori dello spostamento orizzontale della galleria e delle caratteristiche delle sollecitazioni nel rivestimento. In particolare, la curva di capacità, mostrata in Figura 3.a, rappresenta il legame fra il valore di  $k_h$  applicato alla profondità in corrispondenza dell'asse della galleria e lo spostamento orizzontale del rivestimento. La Figura 3.b mostra, a titolo di esempio, il corrispondente legame, ottenuto dalla stessa analisi, tra  $k_h$  e il momento flettente e tra  $k_h$  e lo sforzo normale nella sezione più sollecitata del rivestimento.

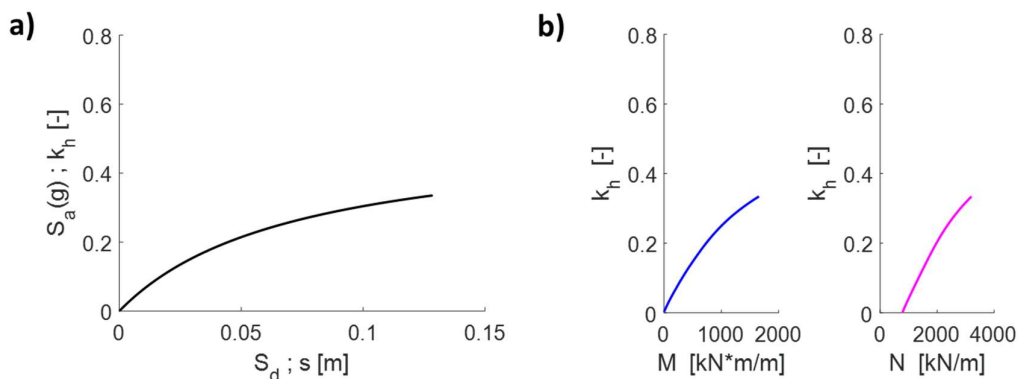


Figura 3: a) curva  $k_h$  - spostamento orizzontale del rivestimento, b) curve  $k_h$  - momento flettente e  $k_h$  - sforzo normale nella sezione più sollecitata del rivestimento

## 2. DOMANDA SIMICA

Nel metodo proposto, la domanda sismica è rappresentata dallo spettro elastico di risposta dell'azione considerata. Ai fini della validazione del modello, questa è stata ricavata, a partire da una specifica registrazione sismica (Yamakoshi, RSN 4868, <https://ngawest2.berkeley.edu/>) attraverso un'analisi di risposta sismica condotta su una colonna di free-field estratta dal modello numerico completo.

In Figura 4 è mostrata la registrazione sismica originaria (Fig. 4.a) e lo spettro elastico di risposta ottenuto dall'analisi alla quota dell'asse della galleria, rappresentato per un rapporto di smorzamento  $\xi$  pari al 5% (Fig. 4.b).

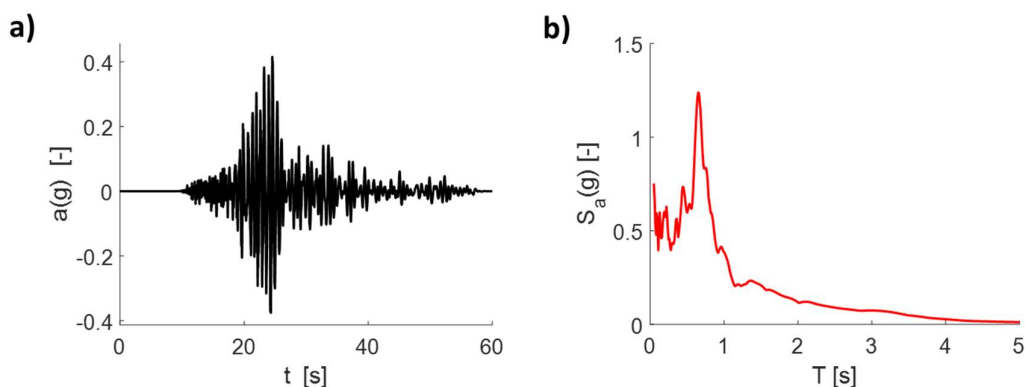


Figura 4: a) accelerogramma di input, b) spettro elastico di risposta alla quota della galleria per  $\xi = 5\%$

## 3. IMPLEMENTAZIONE E VALIDAZIONE DEL METODO

Il metodo proposto consiste nella sovrapposizione della curva di capacità e della domanda sismica nel piano AD, ricercando l'intersezione tra domanda e capacità a parità di rapporto di smorzamento mediante l'implementazione di una procedura iterativa: fissato un valore di tentativo per  $\xi$ , si determina un primo punto di intersezione; applicando la regola di scarico e ricarico di Masing alla curva di capacità a partire dal punto di intersezione si ricava un nuovo valore del rapporto di smorzamento che consente l'aggiornamento dello spettro elastico di risposta e quindi la determinazione di un nuovo punto di intersezione; la procedura si arresta quando i valori di  $\xi$  ottenuti in due iterazioni successive risultano simili. Le sollecitazioni nel rivestimento della galleria sono quelle corrispondenti al coefficiente sismico trovato al termine dell'iterazione (Figura 5).

Con riferimento al caso di studio illustrato in precedenza, la procedura proposta è stata validata confrontandone i risultati con quelli ottenuti in un'analisi dinamica nel dominio del tempo, svolta applicando la registrazione sismica di input (Figura 4.a) alla base del dominio rappresentato in Figura 1.a.

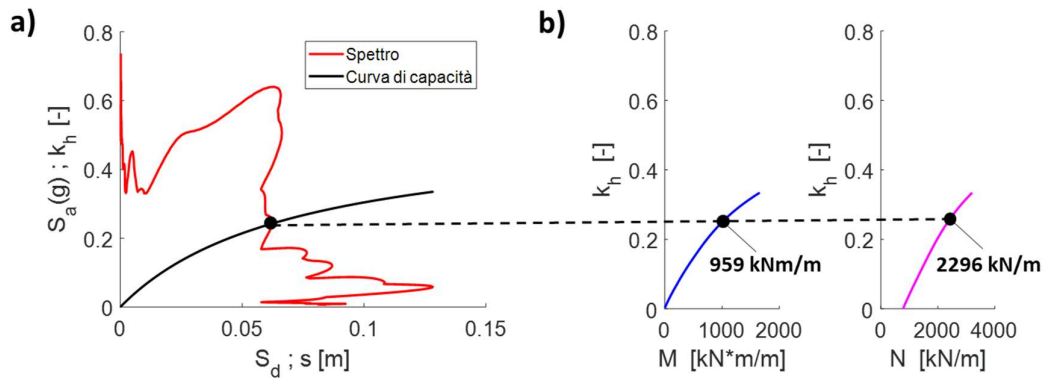


Figura 5: a) punto di intersezione tra capacità e domanda all'ultima iterazione della procedura, b) corrispondenti valori di momento flettente e sforzo normale nella sezione più sollecitata del rivestimento

A titolo di esempio, la Figura 6 mostra le storie temporali del momento flettente  $M$  e dello sforzo normale  $N$  agenti nella zona più sollecitata del rivestimento. Si osserva come la procedura semplificata sovrastima del 10% il massimo valore istantaneo di  $M$  ottenuto dall'analisi dinamica, mentre  $N$  viene sottostimato di circa il 20%. L'accordo fra il metodo semplificato e i risultati delle analisi dinamiche appare quindi soddisfacente.

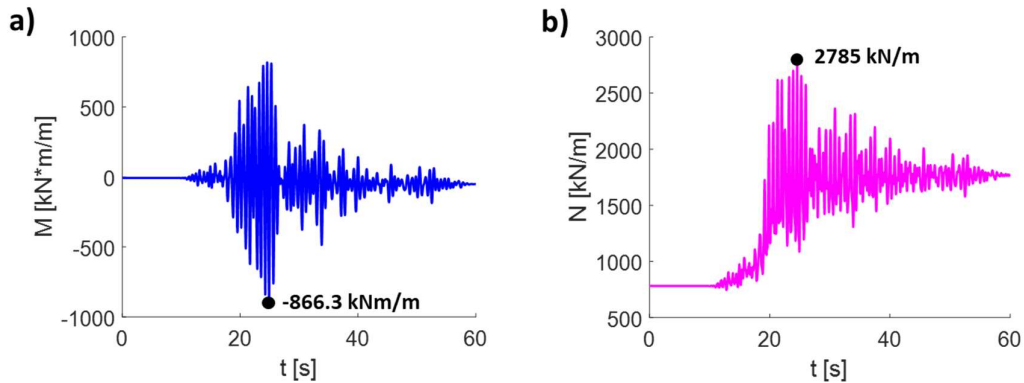


Figura 6: a) storia temporale del momento flettente e b) storia temporale dello sforzo normale agenti nella sezione più sollecitata del rivestimento

### 3. CONCLUSIONI

Il progetto di una galleria per azioni statiche si basa quasi sempre su un'analisi numerica di interazione fra terreno e rivestimento, svolta in condizioni di deformazione piana. Il metodo proposto per la valutazione delle sollecitazioni sismiche non richiede lo svolgimento di analisi dinamiche, ma una semplice estensione delle analisi di progetto, in cui allo stesso modello si applichino staticamente forze d'inerzia crescenti, distribuite secondo il profilo mostrato in Figura 2.b. Il confronto mostrato nel paragrafo precedente appare promettente. Ulteriori analisi consentiranno la validazione del metodo e il suo impiego pratico, nel quale la domanda sismica sia definita attraverso spettri elastici di risposta di progetto.

### 3. BIBLIOGRAFIA

- Freeman, S. A. (2004). Review of the development of the capacity spectrum method. *ISCT Journal of Earthquake Technology*, 41(1), 1-13.
- McKenna, F. T. (1997). *Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing*. University of California, Berkeley.
- Yang, Z., Elgamal, A., & Parra, E. (2003). Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1119-1127.