

# UN MACRO-ELEMENTO POD-TANN PER LA RISPOSTA ORIZZONTALE CICLICA NON DRENATA DI UN MONOPALO IN ARGILLA

Giovanni Piunno (giovanni.piunno@polimi.it)  
Politecnico di Milano

**ABSTRACT.** L'oggetto di questo contributo è l'applicazione di reti neurali artificiali basate sulla termodinamica (TANN) per la realizzazione di un macro-elemento in grado di riprodurre la risposta ciclica non drenata orizzontale di un monopalo in acciaio in uno strato di terreno argilloso saturo. L'addestramento della TANN è basato su un database di simulazioni numeriche agli elementi finiti del sistema in oggetto. La risposta macroscopica monodimensionale in termini di spostamenti è ottenuta per derivazione di una funzione potenziale di energia di Gibbs, i cui dati di ingresso sono la risultante delle forze orizzontali alla testa del palo e un set di variabili interne, ottenute per riduzione della dimensionalità tramite *Proper Orthogonal Decomposition* (POD).

## 1. INTRODUZIONE

Nel contesto dello sviluppo delle energie rinnovabili, l'installazione di ampi parchi eolici offshore rappresenta una soluzione sostenibile per soddisfare la crescente domanda energetica. Le fondazioni delle turbine eoliche offshore possono essere realizzate con diverse tecnologie. Il presente articolo si concentra sulla fondazione a monopalo, la più diffusa in caso di profondità non elevate del fondale marino.

Tradizionalmente, la valutazione della risposta di queste fondazioni viene basata sull'utilizzo di approcci semplificati, come quelli delle curve p-y, e più raramente su complesse analisi numeriche del singolo palo e del terreno di fondazione. Un'alternativa a questi approcci è costituita dai macro-elementi. Quest'ultimi mantengono la semplicità di utilizzo delle curve p-y, ma permettono di considerare in modo diretto aspetti complessi dell'interazione terreno-struttura sulla risposta macroscopica del sistema, come la degradazione progressiva della rigidità del terreno e della sua resistenza, l'attrito tra il palo e il terreno, la risposta smorzante isteretica del terreno.

In questo lavoro, si intende ottenere un macro-elemento in grado di replicare la risposta ciclica non drenata orizzontale in termini di forze-spostamenti di un monopalo in uno strato argilloso saturo. Il macro-elemento non è formulato analiticamente, ma è il risultato dall'addestramento di una rete neurale artificiale basata sulla termodinamica (TANN), (Masi & Stefanou, 2022), su un database numerico ottenuto da simulazioni ad elementi finiti del sistema in studio. In (Piunno, 2023), è proposto un approccio che coniuga le TANN con la *Proper Orthogonal Decomposition* (POD) per l'omogenizzazione di materiali con microstruttura. In questo lavoro, la procedura è applicata ad un sistema geotecnico macroscopico, non a livello del punto materiale. Il sistema 3D studiato viene così condensato in un macro-elemento ad un grado di libertà, lasciando a sviluppi futuri l'elaborazione di un modello più generale.

## 2. INQUADRAMENTO TEORICO

Le TANN sono basate sulla teoria termodinamica delle Variabili di Stato Interne (ISV), (Coleman & Gurtin, 1967). La teoria permette di descrivere lo stato di materiali dipendenti dalla storia di carico mediante un set di variabili atte a tracciarne i processi irreversibili interni. Per i materiali micro-strutturati non è immediato definire tale set di ISV. In (Piunno, 2023), è proposto di ottenere il set macroscopico di variabili interne da un set di dati microscopici. La *Proper Orthogonal Decomposition* è dunque utilizzata come uno strumento di riduzione della dimensionalità per ottenere le ISV da un set di Coordinate Interne (IC), che collezioni tutte le variabili di stato definite alla microscala. Tale procedura permette di ottenere in modo efficiente un set di variabili alla macroscala che sia rappresentativo dei processi microscopici. In riferimento al problema in oggetto, lo stato macroscopico del sistema palo-terreno è definito come  $\mathcal{S} = [F_H, \mathcal{Z}]$ , in cui  $F_H$  è la risultante delle forze orizzontali agenti alla testa del palo e  $\mathcal{Z}$  è un set di variabili di stato interne del sistema macroscopico, da definire sulla base delle IC,  $\xi$ . La Figura 1 mostra una rappresentazione schematica della procedura di seguito esposta. Una rete neurale,  $f^\Phi$ , viene addestrata per imparare la funzione potenziale di energia libera di Gibbs del sistema macroscopico palo-terreno.

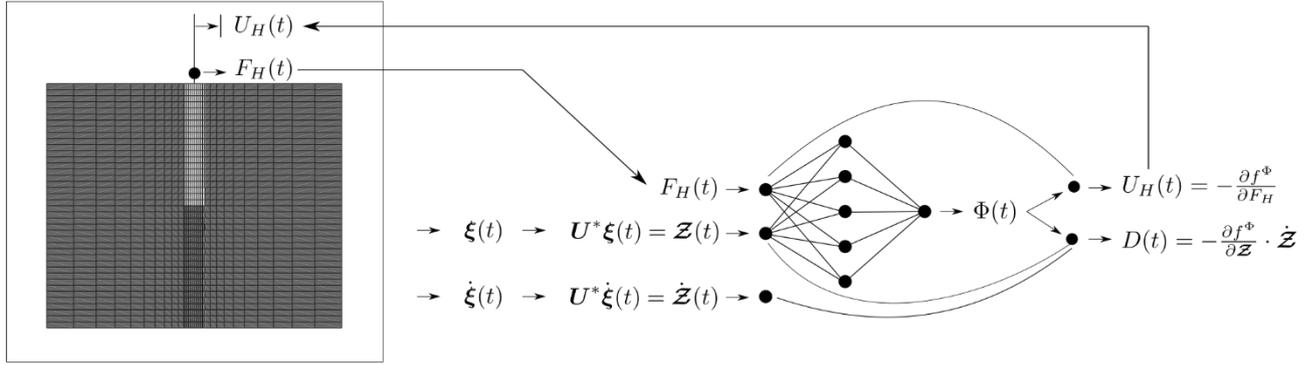


Figure 1: Schema del procedimento di addestramento del macro-elemento POD-TANN.

La rete riceve come input lo stato macroscopico del sistema e ne restituisce come output il valore di energia,  $\Phi$ . Per derivazione parziale di  $f^\Phi$ , due ulteriori quantità sono ottenute: (i) lo spostamento orizzontale,  $U_H = -\frac{\partial f^\Phi}{\partial F_H}$ , coniugato nell'energia alla forza orizzontale,  $F_H$ ; (ii) la potenza dissipata,  $D = -\frac{\partial f^\Phi}{\partial \dot{Z}} \dot{Z}$ . Quest'ultima, per il secondo principio della termodinamica, deve risultare non negativa. L'addestramento della rete neurale si concretizza in un problema di minimizzazione di una funzione di perdita, detta *loss function*, definita in riferimento alla differenza tra gli output della rete e i dati. La *loss function* utilizzata è riportata di seguito:

$$\mathcal{L} = \lambda_U \ell^U + \lambda_R^D \ell_R^D = \lambda_U \frac{1}{N} \sum_i \left\| U_{Hi} - \left( -\frac{\partial f^\Phi}{\partial F_H} \right)_i \right\|_1 + \lambda_R^D \frac{1}{N} \sum_i \left\| \text{Relu} \left\{ -\left( -\frac{\partial f^\Phi}{\partial \dot{Z}} \dot{Z} \right)_i \right\} \right\|_1, \quad (1)$$

in cui  $\lambda_U$  e  $\lambda_R^D$  sono pesi atti a regolare il valore relativo dei due termini nella funzione. La *Rectified Linear Unit* (Relu) è definita come  $\text{Relu}\{x\} = \{x, x > 0; 0, \text{altrimenti}\}$ ;  $\|\cdot\|_1$  indica la norma  $L_1$ ,  $N$  è il numero di campioni utilizzati. Il primo termine della funzione garantisce la corretta riproduzione degli spostamenti, il secondo il soddisfacimento della seconda legge della termodinamica. La prima legge è soddisfatta per costruzione.

Le ISV sono ottenute dalle IC con l'uso della POD. La POD permette di attuare una decomposizione delle IC mediante una combinazione lineare di modi, ovvero di funzioni di forma ortonormali. I coefficienti della combinazione lineare sono dipendenti dalla variabile temporale, mentre le funzioni di forma da quella spaziale. La somma viene troncata ad un numero finito di addendi; dunque, il set di IC viene rappresentato ad ogni istante temporale dalla sovrapposizione di  $n$  modi, modulati nel tempo dai relativi coefficienti. In forma matriciale, la decomposizione è espressa come segue:

$$\xi(x, t) \approx U(x)Z(t) \rightarrow Z(t) = U^*(x)\xi(x, t). \quad (2)$$

L'operatore ortogonale  $U$  colleziona nelle sue colonne i modi considerati e risulta sempre invertibile ( $U^*$  è il trasposto coniugato). Le variabili interne sono dunque ottenute dalla proiezione delle IC sulla base ortonormale definita dai modi POD. L'esistenza di una funzione inversa è un aspetto di notevole utilità nella definizione del macro-elemento. Infatti, tale proprietà pone le basi per attuare la trasformazione inversa di omogeneizzazione (localizzazione), al fine di ricostruire il set di IC da quello delle ISV. Da ciò consegue la possibilità di ricostruire lo stato interno del sistema e, ad esempio, valutare le sollecitazioni e lo stato deformativo degli elementi strutturali.

### 3. MODELLO COMPUTAZIONALE E GENERAZIONE DEL DATABASE

Il modello 3D a elementi finiti è stato realizzato in ABAQUS. Per simulare la risposta non-drenata, il terreno è modellato come un mezzo monofase ( $\rho = \rho_{sat} = 2Mg/m^3$ ) e le analisi condotte in termini di sforzi totali. Per il terreno si utilizza un modello costitutivo elasto-plastico con incrudimento cinematico e criterio di snervamento alla Von-Mises. La resistenza non drenata è posta funzione lineare della coordinata verticale, per mezzo della pressione media efficace geostatica, calcolata assumendo uno materiale normal consolidato:  $S_u(z) = 10 + 0.3p'(z)$ , in  $kPa$ . La legge elastica del terreno è lineare isotropa, con i valori del modulo di Young espressi con la seguente relazione:  $E(z) = E_{ref} \left( \frac{p'(z)}{p'_{ref}} \right)^{0.5}$ , con  $p'_{ref} = 30 kPa$ ,  $E_{ref} = 500 S_{u,ref}$ ,  $S_{u,ref} = 20 kPa$ . Il

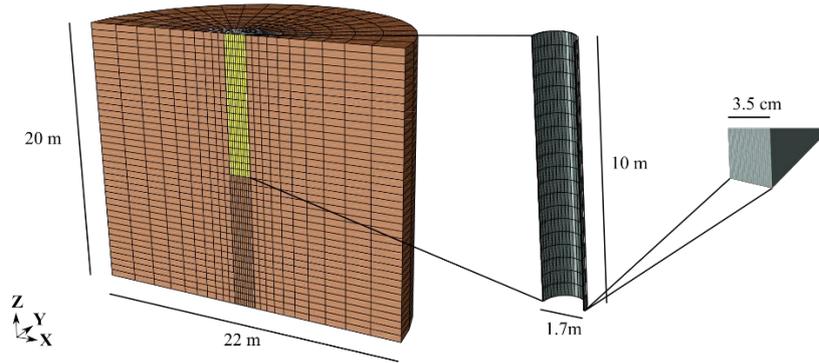


Figure 2: Modello computazionale del terreno e del palo.

coefficiente di Poisson è posto pari a 0.4, per tener conto dell'eventuale presenza di gas disciolto nell'acqua interstiziale del mezzo poroso saturo a ridurre la rigidità volumetrica del monofase equivalente, come nel caso di *gassy soils* (Yang & Bai, 2020). Il palo in acciaio a sezione circolare cava è modellato come elastico lineare isotropo ( $E = 210\text{GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\rho = 7.85\text{Mg/m}^3$ ). Infine, il terreno interno alla cavità del palo è modellato come elastico e non elasto-plastico, con i parametri già riportati, a valle di un'analisi elasto-plastica in cui le deformazioni plastiche del terreno incluso nel palo sono risultate del tutto trascurabili. Tra palo e terreno è modellato un contatto ad attrito, con coefficiente 0.5. In Figura 2 sono riportate le misure del modello computazionale e la rappresentazione della mesh. Il database per l'addestramento della TANN è stato ottenuto assoggettando il palo ad una forza verticale di esercizio considerata pari a 800 kN e a forze orizzontali variabili in segno ed ampiezza campionate da una distribuzione uniforme di ampiezza massima pari a 1MN, come evidenziato dai punti rossi in Figura 3. Il sistema palo-terreno è ridotto a un macro-elemento a un grado di libertà, considerando lo spostamento orizzontale del punto alla testa del palo posizionato sull'asse del palo,  $U_H$ , in funzione della risultante delle forze orizzontali alla testa del palo,  $F_H$ . Le deformazioni elastiche, plastiche e la variabile di incrudimento di ogni punto di Gauss del modello FEM sono state collezionate nel set di IC, poi elaborato tramite POD per ottenere le ISV.

#### 4. RISULTATI

In Figura 4-a sono riportati i valori singolari ottenuti dalla POD, che permettono di determinare l'importanza relativa dei modi nella decomposizione (2). Vengono considerati i modi (100) per i quali i relativi valori singolari normalizzati siano superiori a  $1e-4$ . Tale valore permette di addestrare la TANN con sufficiente accuratezza (Piuino, 2023). In Figura 4-b sono riportate le curve di apprendimento della TANN, in termini di errore assoluto medio (MAE), in cui si nota il raggiungimento del valore asintotico di circa  $1e-4$  dopo sole 100 *epochs*, cioè passi iterativi di ottimizzazione. In Figura 4-c e -d sono mostrate le risposte in inferenza della TANN addestrata. In particolare, in Fig. 4-c l'ampiezza della sollecitazione subisce un'inversione totale tra -1 e +1 MN. In Fig. 4-d, viene mostrato un ciclo asimmetrico, solo positivo. Infine, in Fig. 4-e è riportato il campo di deformazione elastica ( $\epsilon_{11}^{el}$ ) del palo simulato e ricostruito con l'uso della POD, al termine dell'ultimo ciclo del percorso di carico di Fig. 4-d. L'errore di ricostruzione, espresso in MAE, è dell'ordine di  $1e-6$ . Sfruttando il legame costitutivo noto, il campo di sforzo è ricostruibile e conseguentemente le azioni interne per le verifiche strutturali.

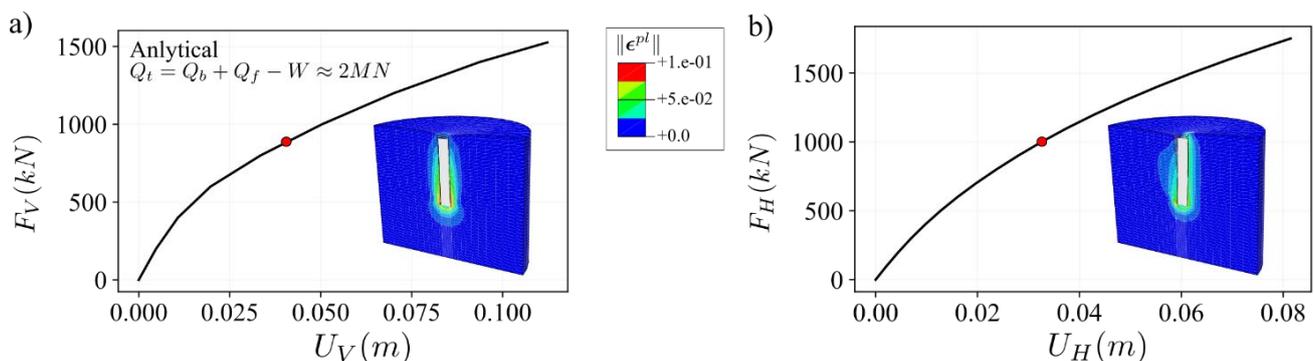


Figure 3: curve monotone di carico per la capacità portante verticale (a) e orizzontale (b).

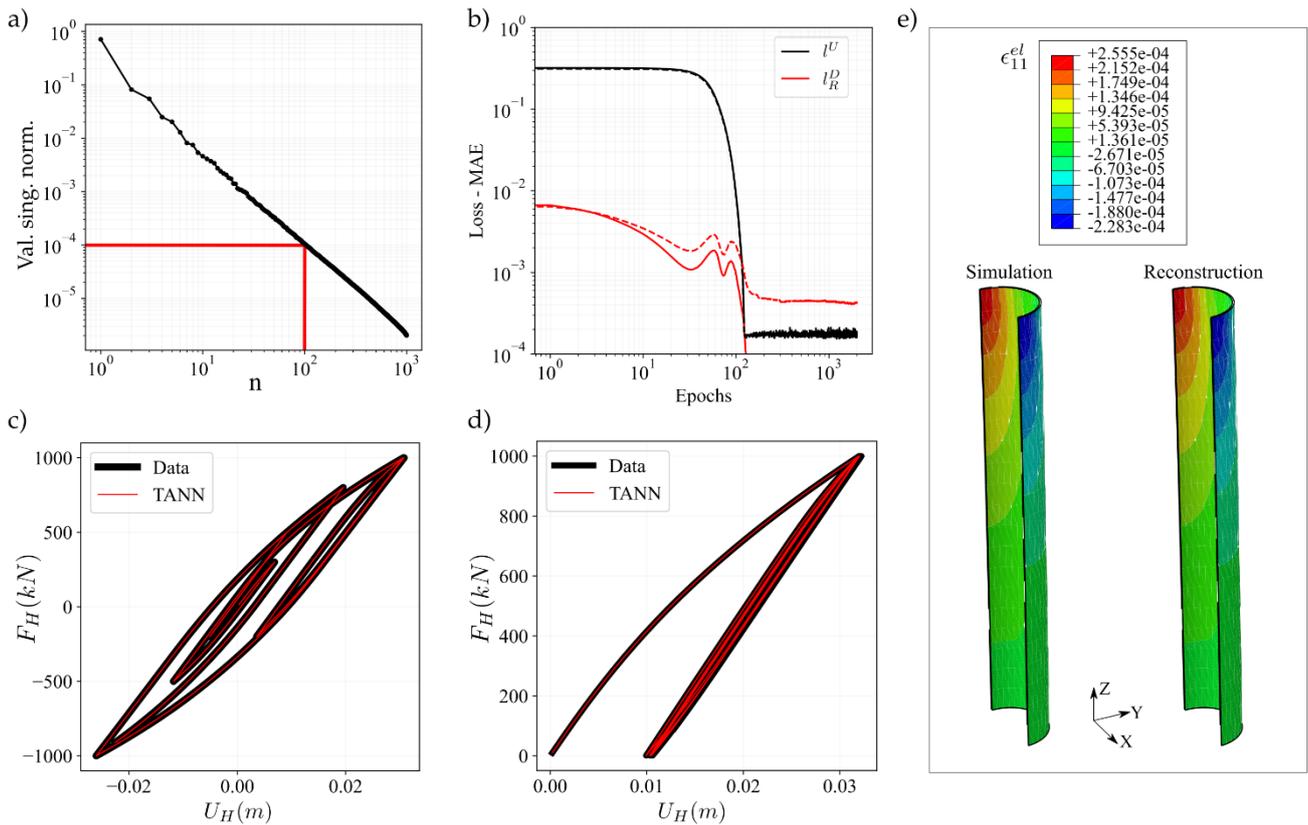


Figure 4: a) Valori singolari normalizzati ottenuti tramite POD dal set di IC. b) Curve di addestramento della TANN. Le linee solide sono relative al set di addestramento mentre quelle tratteggiate al set di validazione, utilizzato per evitare fenomeni di over-fitting. c) e d) Predizioni della TANN in inferenza su un set di dati fuori dal set di addestramento per cicli di ampiezza positiva e negativa (c) e cicli asimmetrici (d). e) Confronto tra il campo di deformazioni  $\epsilon_{11}^{el}$  del palo ottenuto dalle simulazioni numeriche e ricostruito tramite POD.

## 5. CONCLUSIONI

In questo lavoro viene mostrata l'integrazione della *Proper Orthogonal Decomposition* (POD) alle reti neurali basate sulla termodinamica (TANN) per l'apprendimento della risposta non drenata ciclica di un monopalo in uno strato di argilla. Ne deriva un macro-elemento monodimensionale, ottenuto dall'addestramento di una TANN su un database di simulazioni agli elementi finiti del sistema indagato. Il modello FEM tiene conto della natura elasto-plastica inelastica del terreno e dell'attrito palo-terreno. La POD trova duplice impiego:

- è utilizzata per ottenere un set di variabili interne per il macro-elemento. Le ISV, insieme alla risultante delle forze orizzontali alla testa del palo, sono date in input alla rete neurale di energia di Gibbs. La risposta ottenuta, in termini di spostamento orizzontale, è accurata e termodinamicamente compatibile.
- La POD è utilizzata per ricostruire il set di coordinate interne da quello delle ISV. Risulta dunque possibile ricostruire il campo deformativo del sistema e valutare le sollecitazioni agenti sugli elementi strutturali.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- Masi, F., Stefanou, I. (2023). Evolution TANN and the identification of internal variables and evolution equations in solid mechanics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 174, 105245.
- Piunno, G. (2023) Homogenization of microstructured materials using Thermodynamics Based Artificial Neural Networks and dimensionality reduction techniques. *Tesi di dottorato*.
- Coleman, B. D., Gurtin, M. E. (1967). Thermodynamics with internal state variables. *The journal of chemical physics*, 47(2), 597-613.
- Yang, G., Bai, B. (2020). A thermodynamic model to simulate the thermo-mechanical behavior of fine-grained gassy soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 2325-2339.