

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Geotecnica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Taratura ed applicazione di un algoritmo genetico mediante modelli numerici, per la determinazione delle spinte del terreno sul rivestimento di gallerie.

Relatori:

Prof. Gabriele Bertagnoli

Prof. Marco Barla

Candidato: Giuseppe Cortese

POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Geotecnica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Taratura ed applicazione di un algoritmo genetico mediante modelli numerici, per la determinazione delle spinte del terreno sul rivestimento di gallerie.

Relatori:

Prof. Gabriele Bertagnoli

Prof. Marco Barla

Candidato: Giuseppe Cortese

S233051

Luglio 2019

*A Mamma, Papà e
Gianluca
perché devo tutto a voi.*

1. Sommario

| | |
|---|----|
| 1. Sommario | 1 |
| 2. Abstract | 7 |
| 3. Introduzione | 8 |
| 4. Progettazione e realizzazione di gallerie..... | 9 |
| Fase conoscitiva e progetto..... | 9 |
| I metodi di scavo..... | 9 |
| Scavo in convenzionale (o tradizionale) | 9 |
| Scavo meccanizzato | 10 |
| Caratterizzazione geologica e geotecnica | 11 |
| Legame costitutivo e criterio di rottura | 14 |
| Metodi numerici nell'ingegneria geotecnica | 16 |
| Observational method | 17 |
| Monitoraggio delle gallerie..... | 18 |
| Introduzione | 18 |
| Scopo ed obiettivo del monitoraggio | 18 |
| Concetti di base..... | 19 |
| Le stazioni di misura | 19 |
| Strumentazione geotecnica | 21 |
| Monitoraggi in corso d'opera..... | 26 |
| Monitoraggio in esercizio | 28 |
| 5. L'algoritmo genetico..... | 30 |
| Introduzione | 30 |
| Modellazione del problema e codifica dell'individuo | 31 |
| Definizione della funzione di fitness e assegnazione del punteggio..... | 34 |
| Criterio di selezione degli individui..... | 35 |
| Meccanismi di riproduzione..... | 36 |
| La convergenza e l'output dell'algoritmo | 37 |
| Modello strutturale del rivestimento della galleria | 37 |
| 6. Codice di calcolo FLAC2D..... | 39 |
| 7. Realizzazione del modello su FLAC2D..... | 41 |
| Fasi di calcolo (stages)..... | 41 |
| Impostazione della geometria | 41 |
| Modello geometrico per gallerie profonde..... | 41 |
| Modello geometrico per gallerie superficiali | 42 |

| | |
|---|----|
| Generazione della mesh..... | 42 |
| Leggi di comportamento del materiale..... | 44 |
| Criterio di rottura di Mohr-Coulomb..... | 44 |
| Criterio di rottura di Hoek-Brown..... | 45 |
| Condizioni al contorno..... | 46 |
| 8. Codice di calcolo Rocscience RS2..... | 47 |
| Simulazione dello scavo di una galleria con RS2..... | 50 |
| Geometria mesh e condizioni al contorno..... | 50 |
| Materiali..... | 50 |
| Stato tensionale in sito..... | 50 |
| Stages..... | 51 |
| Confronto tra RS2 e SAP2000..... | 51 |
| Interazione terreno-struttura..... | 51 |
| Taratura della rigidità delle molle..... | 53 |
| Taratura della rigidità delle molle mediante algoritmo..... | 53 |
| 9. Studio di casi verosimili mediante modelli numerici..... | 55 |
| 10. Modelli geo-meccanici di gallerie profonde..... | 55 |
| Galleria Profonda 1..... | 55 |
| Modello geo-meccanico..... | 55 |
| Modello geo-meccanico su FLAC 2D..... | 57 |
| Risultati analisi con Rocscience RS2 e confronto con Flac2D..... | 59 |
| Taratura delle molle, reazioni vincolari e carico netto..... | 62 |
| Galleria profonda 2..... | 65 |
| Modello geo-meccanico..... | 65 |
| Risultati analisi con Rocscience RS2..... | 66 |
| Taratura delle molle, reazioni vincolari e carico netto..... | 68 |
| Galleria profonda 3..... | 70 |
| Modello geo-meccanico..... | 70 |
| Risultati analisi con Rocscience RS2..... | 71 |
| Taratura delle molle, reazioni vincolari e carico netto..... | 73 |
| Confronto forme di carico..... | 75 |
| 11. Modelli geo-meccanici di gallerie superficiali..... | 76 |
| Tipologie di terreno: leggi di variazione del modulo elastico e proprietà meccaniche..... | 76 |
| Sito 1..... | 76 |
| Sito 2..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| Sito 3 | 78 |
| Sito 4 | 79 |
| Sito 5 | 80 |
| Sito 6 | 81 |
| Elenco modelli | 82 |
| Modelli 1 – 54: Confronto al variare della pendenza del piano campagna | 83 |
| Tensioni radiali e tangenziali allo stage “Relax 60%” | 83 |
| Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni..... | 89 |
| Modelli 1 – 54: Confronto al variare della profondità del piano campagna..... | 108 |
| Tensioni radiali e tangenziali allo stage “Relax 60%” | 108 |
| Caratteristiche della sollecitazione e Rotazioni | 109 |
| Modelli 1 – 54: Confronto al variare della legge di variazione del modulo di Young..... | 127 |
| Tensioni radiali e tangenziali allo stage “Relax 60%” | 127 |
| Caratteristiche della sollecitazione e Rotazioni | 130 |
| Taratura delle molle radiali e tangenziali | 139 |
| Reazioni vincolari e carichi netti | 140 |
| Modello PCH_2D_L1 – Analisi FEM/FDM, taratura molle, reazioni vincolari e carichi netti | 144 |
| Modello geo-meccanico | 144 |
| Modello geo-meccanico su FLAC 2D | 144 |
| Risultati analisi con Rocscience RS2 e confronto con Flac2D | 145 |
| Carichi netti..... | 147 |
| Sforzo normale, momento flettente e rotazione | 149 |
| 12. Modelli elasto-plastici | 165 |
| PCH_3D_L1 – ELPLA..... | 165 |
| Proprietà del materiale | 165 |
| Zone di plasticizzazione..... | 165 |
| Confronto ILE-ELPLA | 166 |
| PCH_3D_L3 – ELPLA..... | 167 |
| Proprietà del materiale | 167 |
| Zone di plasticizzazione..... | 168 |
| Confronto ILE-ELPLA | 168 |
| PCH_3D_L6 – ELPLA..... | 170 |
| Proprietà del materiale | 170 |
| Zone di plasticizzazione..... | 170 |
| Confronto ILE-ELPLA | 171 |

| | |
|--|-----|
| PC20_2D_L1 – ELPLA | 172 |
| Proprietà del materiale | 172 |
| Zone di plasticizzazione | 173 |
| Confronto ILE-ELPLA | 173 |
| PC20_2D_L3 – ELPLA | 175 |
| Proprietà del materiale | 175 |
| Zone di plasticizzazione | 175 |
| Confronto ILE-ELPLA | 176 |
| PC20_2D_L6 – ELPLA | 177 |
| Proprietà del materiale | 177 |
| Zone di plasticizzazione | 178 |
| Confronto ILE-ELPLA | 178 |
| 13. Correzioni all’algoritmo genetico | 181 |
| 14. Analisi con l’algoritmo genetico | 183 |
| Modello Profonda 1 | 183 |
| Forme d’onda della prima generazione | 183 |
| Output analisi..... | 184 |
| Modello Profonda 2..... | 185 |
| Output analisi..... | 185 |
| Modello Profonda 3..... | 186 |
| Output analisi..... | 186 |
| Modello PCH_4D_L4 | 187 |
| Output analisi..... | 187 |
| Modello PC10_2D_L1 | 188 |
| Output analisi..... | 188 |
| Modello PC10_2D_L5 | 189 |
| Output analisi..... | 189 |
| 15. Conclusioni | 190 |
| Potenzialità e limiti di applicabilità..... | 190 |
| Possibili implementazioni future..... | 190 |
| AG implementato per la taratura delle molle | 190 |
| 16. Allegati..... | 192 |
| Sforzo normale, momento flettente e rotazione dei modelli 28 – 54..... | 192 |
| Algoritmo Genetico modificato | 206 |
| Algoritmo (non genetico) per la taratura delle molle | 230 |

| | | |
|-----|--------------------------|-----|
| 17. | Ringraziamenti | 256 |
| 18. | Indice delle figure..... | 258 |
| 19. | Bibliografia..... | 259 |

2. Abstract

Nell'ottica del metodo osservazionale applicato nell'ambito della realizzazione di opere geotecniche complesse, come appunto le gallerie, è fondamentale avere un sistema di elaborazione ed interpretazione dei dati provenienti dal monitoraggio che sia il più efficiente e rapido possibile.

A tale scopo è stato sviluppato, in un precedente lavoro di tesi, e corretto nel presente elaborato, un algoritmo di tipo genetico (AG). Questo, sulla base delle principali grandezze utilizzate nelle verifiche tecniche, partendo dai soli dati del monitoraggio in fase di esercizio, dalla geometria della struttura e da pochi altri parametri necessari per la definizione del problema, è in grado di determinare i carichi sul rivestimento a partire dalle sollecitazioni nello stesso, prescindendo dalle condizioni geotecniche in cui l'opera si colloca.

Il metodo proposto può essere dunque applicato in parallelo ai classici modelli geotecnici, tuttavia per la sua applicazione sono necessari software con un grado di complessità nettamente inferiore, quindi, potrà essere uno strumento di più semplice e rapido impiego.

Lo scopo di questo elaborato è quello di verificare l'applicabilità di tale algoritmo mediante modelli numerici. Questi verranno impiegati per simulare, nella maniera più verosimile, le condizioni di una galleria in fase di scavo ed esercizio al fine di simulare dei target che nella realtà provengono da dati di monitoraggio. Si daranno tali target come dati input al suddetto algoritmo e dopo aver effettuato una taratura, si vedrà il suo comportamento.

3. Introduzione

Con l'avvento della nuova strumentazione sensoristica il monitoraggio delle opere civili ha assunto un ruolo fondamentale sia in fase di realizzazione che in esercizio. Proporzionalmente alla complessità dell'opera è raccolta una mole di dati che, durante le fasi costruttive, consente di controllare la bontà delle assunzioni fatte, tramite il controllo della correttezza delle previsioni ottenute in fase di progetto. Inoltre, la raccolta dei dati continua anche durante l'utilizzo dell'opera, nell'ottica del SHM (Structural Health Monitoring), per capire come evolve il suo comportamento nel tempo per effetto di: comportamento reologico dei materiali, eventuali azioni eccezionali che l'opera subisce, oppure più comunemente, per i fenomeni di degrado che inevitabilmente, con il tempo interessano l'opera.

La mole di dati raccolta deve essere processata in tempi relativamente brevi, specialmente in fase costruttiva e nell'ottica del metodo osservazionale, e pertanto sono necessari metodi di interpretazione speditiva di tali dati. Questo elaborato si inserisce proprio nel contesto del soft computing per l'elaborazione dei dati provenienti dal monitoraggio strutturale. L'algoritmo genetico, oggetto di analisi nel presente elaborato, avvalendosi di un software di calcolo strutturale, sfruttando come target, i dati del monitoraggio tenta di risalire all'andamento dei carichi radiali e tangenziali che agiscono sul rivestimento della galleria. Una particolarità di tale strumento è la semplicità dei software utilizzati, poiché non vengono svolte analisi specifiche e particolarmente complesse, ma soltanto dei procedimenti iterativi e oculati.

In questo lavoro di tesi si intende analizzare e confrontare il comportamento di diverse gallerie al variare delle condizioni geometriche e geotecniche. A tal fine si è creata una casistica con diversi modelli numerici, per avere un quadro ampio delle diverse situazioni che si potrebbero incontrare in fase di realizzazione di una galleria, in termini di carichi radiali e tangenziali sul rivestimento, oltre che sforzo normale, momento flettente e rotazioni.

Aver a disposizione dati relativi a situazioni diverse tra loro consente di capire come, l'algoritmo genetico deve spaziare tra le corrette forme di carico, per trovare quelle che danno il miglior adattamento al target (M, N, R); oltre che capire come varia il target stesso a seconda delle particolari condizioni geotecniche.

Nei primi paragrafi si introducono informazioni su progetto e realizzazione di gallerie: le tecniche di scavo e le tecnologie impiegate. Importante focus sulle fasi di caratterizzazione geologica e geotecnica che precedono la costruzione del modello geo-meccanico. Quindi seguono alcuni paragrafi sulla risoluzione dei problemi geotecnici mediante modelli numerici e sul metodo osservazionale. Segue poi un paragrafo informativo sul monitoraggio.

Il capitolo V è dedicato alla descrizione dell'algoritmo genetico. Mentre i capitoli VI, VII e VIII descrivono i software impiegati per la creazione dei modelli geotecnici.

I capitoli IX, X ed XI espongono i modelli realizzati ed il confronto tra i risultati ottenuti.

Il lavoro si chiude con i capitoli conclusivi in cui si valuta e corregge l'AG; ne si espongono gli attuali limiti di applicabilità, le potenzialità e le possibili implementazioni future.

4. Progettazione e realizzazione di gallerie

Fase conoscitiva e progetto

Lo scavo di gallerie ed in generale, la realizzazione di opere in sotterraneo necessitano di una serie di scelte progettuali che dipendono strettamente dal processo conoscitivo di *Caratterizzazione del Sito* che precede tutte le fasi progettuali. In un'ottica più ampia, allora, il progetto si articola in più fasi.

La prima fase riguarda la definizione dei requisiti funzionali che guideranno la scelta della geometria e della tipologia dell'opera.

La seconda fase, come si è accennato in precedenza, è molto delicata poiché riguarda la caratterizzazione del sito in cui verrà realizzata l'opera al fine di creare il cosiddetto *modello geo-meccanico* che consiste nell'unione delle informazioni provenienti dal modello geometrico e delle caratteristiche meccaniche (geotecniche) dei materiali che sono coinvolti. La fase conoscitiva è molto importante e allo stesso tempo molto difficile da eseguire per opere come le gallerie che coinvolgono porzioni di terreno molto estese, pertanto sarà sull'aspetto geologico-geotecnico che si avranno le maggiori incertezze sui materiali ed il loro comportamento in sito. Un altro obiettivo importante che riguarda la caratterizzazione è quello della definizione dello stato tensionale in sito.

Con il passo successivo può iniziare la *progettazione* vera e propria dell'opera dove: si sceglie la modalità di scavo con cui verrà realizzata l'opera e si procede con la scelta ed il dimensionamento di tutti gli interventi ingegneristici (sostegno/stabilizzazione e rivestimento) necessari a garantire funzionalità e sicurezza dell'opera sia nelle fasi costruttive che in esercizio (ad esempio gli interventi di pre-consolidamento, rivestimenti temporanei ed il rivestimento finale). Il progetto coinvolge l'utilizzo di metodi analitici ma soprattutto *metodi numerici* mediante l'impiego di software sviluppati ad hoc.

Si è già esposto il problema delle molte incertezze che non si riescono ad ottemperare nella fase di caratterizzazione del sito, pertanto in questa tipologia di opere è necessario predisporre un sistema di *monitoraggio* in corso d'opera nell'ottica dell'applicazione del *metodo osservazionale*.

I metodi di scavo

Lo scavo di una galleria può essere eseguito mediante due diverse tecniche.

Scavo in convenzionale (o tradizionale)

La metodologia tradizionale prevede uno scavo mediante macchine di scavo puntuali come: pale meccaniche, frese puntuali, martelloni, etc. Queste consentono la rimozione di materiale in maniera graduale dal fronte di scavo. Un'altra tipologia di avanzamento tradizionale consiste nell'effettuazione di "volate" mediante cariche esplosive (drill & blast) collocate in fori appositamente realizzati da una macchina chiamata Jumbo.

L'avanzamento del fronte di scavo può essere progressivo con la sezione che viene scavata completamente (a sezione piena) oppure a sezione parzializzata. La parzializzazione della sezione può avvenire secondo diverse tecniche:

- Avanzamento con calotta e ribasso;

- Avanzamento ad attacchi laterali (NATM);
- Avanzamento con setti laterali;
- Avanzamento con cunicolo pilota.

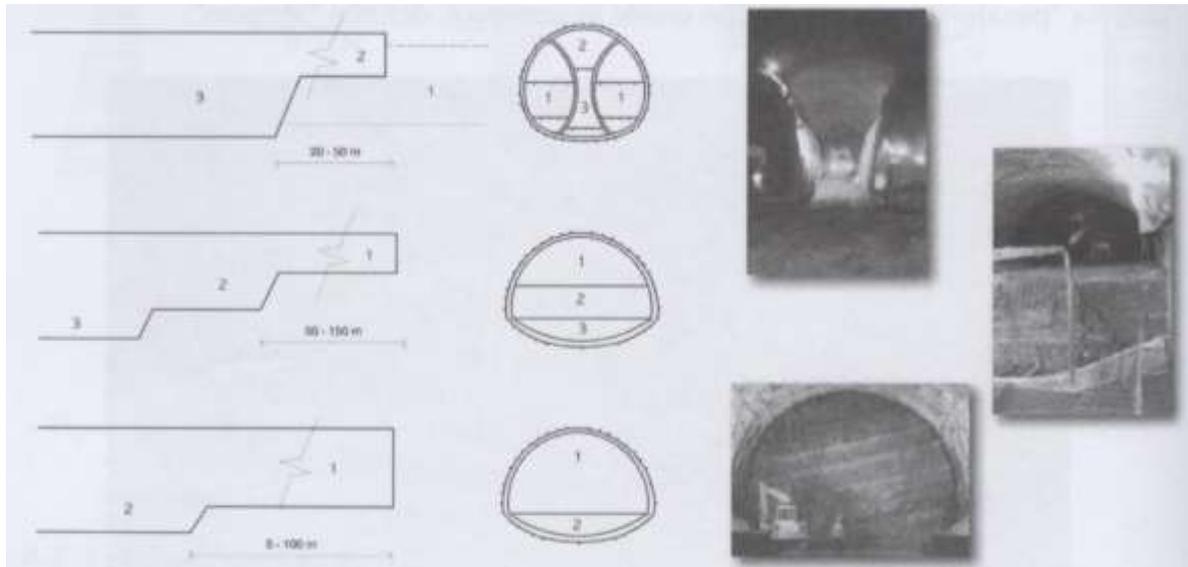


Figura 1 Esempio di scavo a sezione parzializzata

Un aspetto importante dello scavo convenzionale è il consolidamento del *cavo* e del *fronte* durante le fasi di scavo per garantire sicurezza durante l'avanzamento (advancement step) e prima che il rivestimento preliminare sia installato.

Scavo meccanizzato

Lo scavo può avvenire mediante Tunneling Boring Machine (TBM) equipaggiate di una testa fresante caratterizzata da elementi ad alta resistenza, *cutter tools*, che mediante la rotazione della fresa e della spinta applicata dalla TBM, creano tensioni di contatto che provocano la rottura ed il distacco in scaglie della roccia al fronte. Esistono diverse tipologie di TBM. Le Rock TBM, per roccia, le quali sono in grado di installare un pattern di chiodatura ed il rivestimento definitivo o uno strato di calcestruzzo proiettato. Le EPB Shield TBM (Earth Pressure Balance) sono dotate di scudo e vengono impiegate terreni anche sotto falda e sono un'evoluzione delle Slurry Shield TBM. Quest'ultime sono in grado di garantire la stabilità del fronte di scavo, essere completamente chiuse, quindi impermeabili, e consentono l'installazione del rivestimento definitivo in conci prefabbricati che, se necessario, possono garantire anche l'impermeabilizzazione della galleria. Un aspetto critico delle TBM è quello legato al rischio di rimanere intrappolate a seguito di fenomeni che causano una forte convergenza del tunnel.

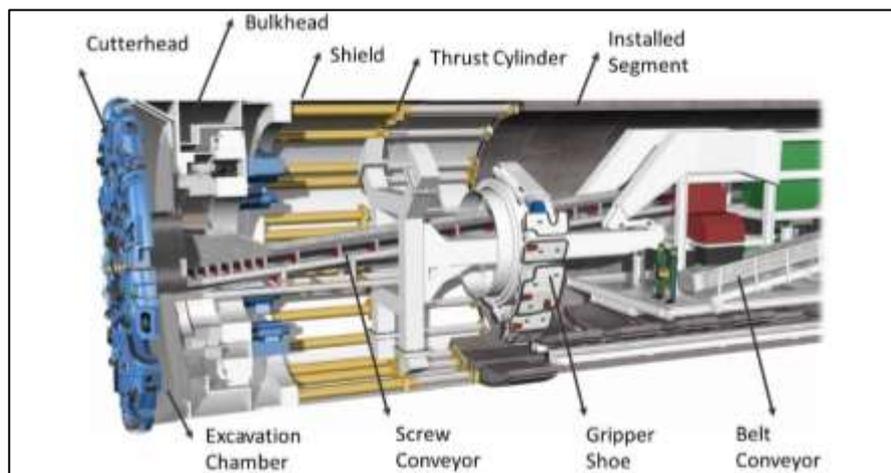


Figura 2 Earth Pressure Balance TBM

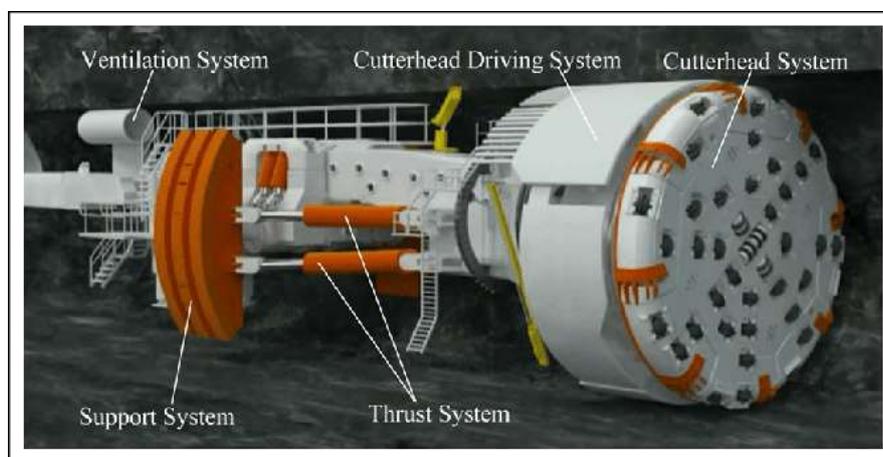


Figura 3 Single Shield Rock TBM

I punti di forza di tale metodologia è la grande velocità di avanzamento del fronte di scavo, (circa 20 m/giorno contro i 7 m/giorno dello scavo tradizionale). La maggiore sicurezza dell'area scavata, in quanto presenta meccanismi di inserimento automatico dei rivestimenti prefabbricati (quest'ultimi dotati spesso di strumenti di misura per il monitoraggio strutturale) che abbate le probabilità di crolli delle pareti del cavo. Infine l'efficienza nello smaltimento dello smarino grazie ad un sistema meccanizzato di nastri trasportatori.

Lo svantaggio principale di questa metodologia è legato all'elevato costo di attuazione, alle condizioni del sito e alla lunghezza del tracciato da realizzare. Inoltre, un ulteriore limite nell'utilizzo di tale macchinario, è dovuto alle caratteristiche del terreno, che in particolari condizioni può determinare forte convergenza ed intrappolare la macchina. Tuttavia anche in caso di qualità molto elevata dell'ammasso roccioso, si può avere maggiore usura dei componenti e quindi un incremento dei costi dovuti alla loro sostituzione ed all'allungamento dei tempi, legati a tale operazione.

Caratterizzazione geologica e geotecnica

Le principali indagini comprendono i rilievi geologici-strutturali di superficie e le perforazioni di sondaggio e carotaggio, che rappresentano i classici rilievi indispensabili per una

caratterizzazione. Tuttavia esistono diversi tipi di sondaggi che possono essere effettuati in casi più particolari come ad esempio:

- Rilievi televisivi in foro, mediante l'utilizzo di microcamere, inserite all'interno del foro che permettono, mediante l'acquisizione delle immagini, di caratterizzare le discontinuità e la loro persistenza;
- Sondaggi orientati e cunicoli pilota che forniscono indicazioni sull'ammasso roccioso che caratterizza il sito;
- Indagini geofisiche per lo studio del comportamento del materiale nel suo complesso.

Una variabile da considerare nelle indagini è rappresentata anche dalla continuità dei parametri del materiale lungo l'intero tracciato della galleria. Ad oggi esistono particolari mezzi di indagini che permettono di caratterizzare geometricamente rocce e terre sul fronte delle gallerie come ad esempio il metodo TSP (Tunnel Seismic Prediction), che grazie alla restituzione di immagini tomografiche tridimensionali, le quali indicano le diverse velocità di propagazione delle onde sismiche all'interno dell'ammasso roccioso, è possibile identificare zone di disturbo/fratturazione in avanzamento.

Oltre ai rilievi e sondaggi, è necessario effettuare un adeguato numero di prove in situ in relazione all'importanza dell'opera e alla complessità dei problemi che caratterizzano l'area interessata alla costruzione. Le principali tipologie di prove in situ mirano ad indentificare i parametri meccanici dell'ammasso roccioso, quindi considerando insieme matrice rocciosa e discontinuità. Le prove più importanti sono le seguenti:

- Prove di carico su piastra, con cicli di carico-scarico a livelli di sollecitazioni crescenti, con la finalità di risalire ad una stima della rigidità, mentre con cicli a carico costante per ottenere indicazioni del comportamento deformativo della roccia nel tempo (creep);
- Martinetti piatti, che possono essere impiegati in diverse configurazioni, per ottenere una stima del modulo di deformazione della matrice rocciosa, che caratterizza la sua risposta elastica, oppure permette di ottenere indicazioni sullo stato tensionale del sito applicando nella nicchia da sonda la pressione idraulica necessaria per l'apertura e/o mantenimento di una fessura nell'ammasso roccioso;
- Prove di permeabilità, che possono essere a piccola o a grande scala.

Tutte queste analisi vanno quindi ripetute più volte in diverse zone dell'ammasso roccioso per ottenere la variabilità spaziale di tutti questi parametri.

Come in ogni opera di una certa rilevanza, oltre alle prove in situ sono necessari ulteriori test svolti in laboratorio. Inizialmente vengono prelevati dal sito dei campioni rappresentativi del materiale, cercando sempre di ottenere provini "indisturbati" per mantenere la loro attendibilità; in seguito, sul materiale roccioso, si definiscono le cosiddette proprietà indice, che determinano le caratteristiche di rigidità, deformabilità e resistenza, e principalmente indicano:

- *Tipo di materiale*: esso è determinato mediante un'analisi mineralogica e petrografica che permette di risalire al tipo di materiale roccioso, al fine di determinare le caratteristiche che condizionano il comportamento del materiale, non visibili attraverso prove macroscopiche;
- *Porosità*: misurata attraverso la densità o il contenuto d'acqua;

- *Peso specifico*: è calcolato in relazione all'unità di volume ed all'unità di volume secco, e generalmente, tali valori, risultano inversamente proporzionali alla porosità;
- *Modulo di Young*;
- *Modulo edometrico*;
- *Coefficiente di Poisson*
- *Resistenza a compressione mono-assiale*;
- *Resistenza a compressione tri-assiale*;
- *Angolo di resistenza a taglio*;
- *Resistenza a trazione*.

Dunque per determinare il comportamento meccanico della roccia, vengono svolte le classiche prove di trazione, diretta ed indiretta, e prove di compressione mono-assiale in cui vengono misurate le deformazioni assiali e diametrali del provino; è utile inoltre sottoporre il materiale anche a compressioni laterali mediante cella triassiale per simulare il confinamento naturale del sito, mentre sulle discontinuità si vanno ad effettuare prove di taglio diretto per valutarne scorrimento e spostamento normale.

Sono necessarie prove più sperimentali nel caso in cui si ha un ammasso roccioso con caratteristiche particolarmente scadenti, con comportamento di tipo rigonfiante (che causa un incremento di volume dipendente dal tempo, dovuto alle reazioni chimico-fisiche con l'acqua di alcuni materiali contenuti nella roccia) oppure con comportamento di tipo spingente dovuto alla variazione dello stato di equilibrio originario, indotta dallo scavo della galleria, ed il relativo incremento delle sollecitazioni sul contorno che possono provocare il raggiungimento dei valori di resistenza dell'ammasso roccioso, con l'insorgere di fenomeni deformativi dipendenti dal tempo (creep).

Una volta effettuate le prove sulla roccia e sulle discontinuità, si passa alla definizione del modello geotecnico che meglio descrive le condizioni reali del materiale nel sito.

Negli ammassi rocciosi si adattano tre principali tipi di modelli: *modelli continui*, *continui equivalenti* e *discontinui*.

Tale differenza è basata sul concetto del R.E.V (Representative Elementary Volume) ossia della grandezza del volume elementare minimo che rappresenta il comportamento del materiale. Se questo volume risulta essere paragonabile alle dimensioni dell'opera allora il comportamento dello stesso può essere generalizzato al comportamento globale dell'ammasso roccioso.

Tuttavia, da come è stato possibile evincere dai paragrafi precedenti, le eventuali discontinuità e la loro frequenza interferiscono molto sul comportamento dell'ammasso e quindi anche del volume rappresentativo. Per visualizzare il concetto è possibile osservare la figura seguente estratta dalla trattazione di Hoek e Brown.

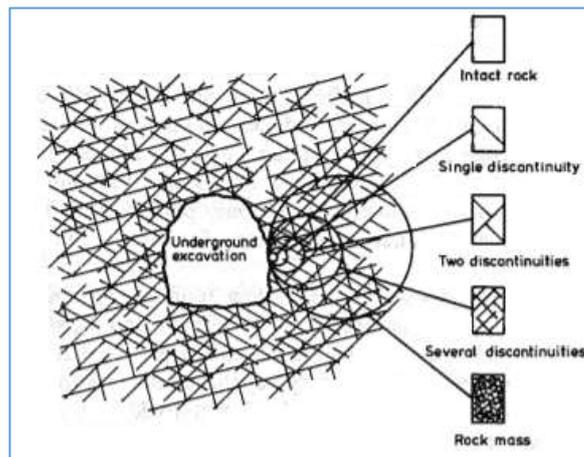


Figura 4 Discontinuità e REV

All'aumentare delle dimensioni del REV, il comportamento è sempre più condizionato dalla presenza delle discontinuità, dunque si passerà da un *modello continuo*, caratterizzato da una condizione di *intact rock*, passando progressivamente ad un *modello continuo equivalente o discontinuo*. In particolare il modello discontinuo è applicato quando l'intersezione fra le varie discontinuità generano un volume dell'ammasso roccioso paragonabile con le dimensioni dello scavo.

Si noti che nel caso in cui si debba ricorrere ad un modello discontinuo è necessario caratterizzare la matrice rocciosa, le discontinuità ed infine, solo mettendo insieme le due cose si caratterizza l'ammasso roccioso. Una volta svolte le prove necessarie per la caratterizzazione della matrice rocciosa e delle discontinuità, si effettua una classificazione dell'ammasso roccioso in funzione delle sue proprietà meccaniche globali.

Tale classificazione si basa su un criterio di indici di riferimento, che descrivono la qualità del materiale; esistono diversi indici, ed ognuno di essi considera parametri e proprietà diverse, ritenuti fondamentali dal sistema di classificazione considerato.

Le principali classificazioni sono:

- RSR (Rock Structure Rating System, Wickham 1972)
- Q (Barton & Grimstad 1993)
- RMR (Rock Mass Rating System, Bieniawsky 1989)
- GSI (Geological Strength Index, Hoek 1998)

Legame costitutivo e criterio di rottura

Per quanto riguarda definizione del legame costitutivo del materiale intatto, che come per tutti i materiali può essere schematizzato con legami di tipo elastico lineare, isotropo, anisotropo, oppure legami di tipo elasto-plastico.

Nei legami lineari permane la classica relazione che lega sforzi e deformazioni, mediante una matrice delle costanti elastiche.

$$\{\sigma\}=[C]\{\varepsilon\}$$

Le costanti da definire sono il coefficiente di Poisson (ν) e il modulo di rigidezza (E) dell'ammasso roccioso; nel caso di anisotropia le costanti elastiche da determinare diventano cinque, associati al piano di isotropia e la direzione ad esso normale.

Per quanto riguarda il legame elasto-plastico, si hanno deformazioni reversibili ed altre irreversibili. Per definire tali leggi bisogna definire inizialmente la legge costitutiva in campo elastico, poi la *legge di plasticizzazione*, ossia la definizione di una superficie nella rappresentazione spaziale delle tensioni, sulla quale si manifestano le deformazioni irreversibili, e dunque la *legge di flusso plastico*.

Le principali legge elasto-plastiche sono le seguenti:

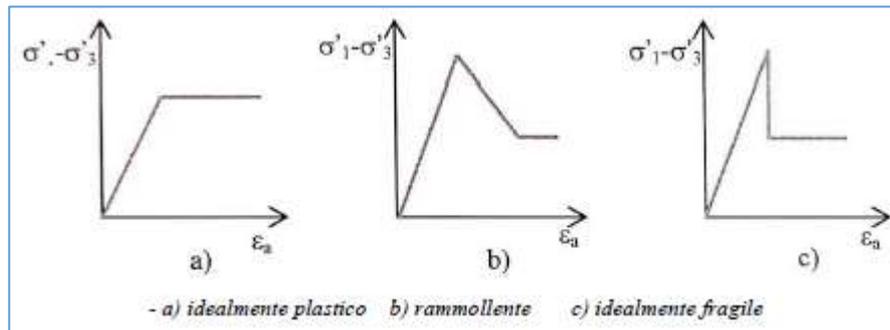


Figura 5 Leggi costitutive elasto-plastiche

La tensione critica che determina il passaggio dal ramo elastico al ramo plastico è determinata secondo criteri di rottura. I più diffusi nella geotecnica sono i seguenti:

- *Criterio di rottura di Hoek e Brown*, utilizzato per le rocce, i cui parametri della legge sono determinati a partire dall'indice GSI;
- *Criterio di Mohr-Coulomb*, in cui c' e ϕ' sono riferiti alla matrice rocciosa o al terreno;
- *Criterio di Barton-Brandis*, per modellare il comportamento delle sole discontinuità.

Generalmente il criterio di Mohr-Coulomb nei materiali rocciosi è ottenuto a partire da una linearizzazione del criterio di Hoek e Brown, effettuando un'interpolazione su 8 valori di σ_3 , limitati in un intervallo compreso tra 0 e il 25/50% della resistenza a compressione mono-assiale.

Nei modelli discontinui si fa dunque riferimento all'ammasso roccioso, in cui si distinguono i blocchi della matrice rocciosa, che possono essere rigidi o deformabili e modellati con Hoek e Brown, separati da sistemi di discontinuità, quest'ultime trattate con il modello di Burton-Brandis.

Ricapitolando, una volta definiti tutti questi aspetti della caratterizzazione geotecnica, l'iter da seguire per stabilire il comportamento tenso-deformativo dell'ammasso roccioso è il seguente:

1. Svolgere indagini geologiche e geotecniche per stabilire il litotipo e le principali famiglie di discontinuità;
2. Effettuare prove in situ sull'ammasso roccioso, e in laboratorio, sulla matrice rocciosa e sulle discontinuità al fine di rilevare i principali parametri meccanici che li caratterizzano;
3. Tramite i dati delle prove, determinare il criterio di rottura della matrice rocciosa e delle discontinuità, seguendo i modelli sopra citati;

4. Attribuire una classe all'ammasso roccioso con una singola discontinuità (in caso di più discontinuità, la classe sarà un valore mediato tra i singoli valori di classe di matrice + discontinuità);
5. Risalire mediante gli indici, al criterio di rottura, e dunque al legame costitutivo di tutto l'ammasso roccioso.

Effettuata la caratterizzazione geotecnica e costruito il modello geo-meccanico, è possibile risolvere il problema tenso-deformativo ricorrendo a dei metodi numerici per calcolare tensioni, deformazioni e spostamenti all'interno del terreno e della roccia della zona modellata.

Metodi numerici nell'ingegneria geotecnica

I metodi numerici sono diversi e si differenziano in base al modello geo-meccanico scelto, che nella quasi totalità dei casi è di tipo continuo equivalente oppure discontinuo, ma tutti hanno in comune una fase preliminare di definizione di alcuni parametri quali geometria, modelli costitutivi e condizioni al contorno.

Nel caso di modelli continui o continui equivalenti possono essere usati principalmente i seguenti metodi:

- F.E.M (Finite Elements Methods)
- F.D.M (Finite Difference Methods)
- B.E.M (Boundary Elements Methods)

Il metodo B.E.M è un'analisi lineare che consiste in una discretizzazione delle sole condizioni al contorno dell'ammasso roccioso, e dunque una mesh molto semplice, particolarmente adatto ad ammassi rocciosi il cui comportamento è governato dalle discontinuità insite in esso, tuttavia presenta i limiti di non poter simulare l'eterogeneità del materiale.

I metodi F.E.M ed F.D.M, che oltre agli output di tensioni, deformazioni e spostamenti, consentono, oltre che alla risoluzione del problema tenso-deformativo, l'implementazione del metodo SRM (Strenght Reduction Factor) che permette il calcolo del fattore di sicurezza nei versanti rocciosi e nei pendii, utile a stabilire quindi il fattore di sicurezza nei confronti della stabilità.

Questi metodi, a differenza del B.E.M, permettono l'introduzione di discontinuità all'interno del dominio, tuttavia quando sono presenti più discontinuità, la loro applicazione diventa poco efficiente.

Nel caso di modelli discontinui, vengono utilizzati i seguenti metodi:

- D.E.M (Discrete Elements Methods)
- F.D.E.M (Finite Discrete Elements Methods)
- L.E.M (Limit Equilibrium Methods)

Il DEM trova spazio di applicazione in quei domini che presentano sistemi multipli di discontinuità, poiché consente la definizione di blocchi/volumi separati ma interagenti fra loro, in cui durante l'analisi possono distaccarsi oppure creare nuovi contatti (no nuove fratture).

Alcuni codici che supportano questo tipo di analisi, implementano su di essi metodi statistici o deterministici per la distribuzione e caratterizzazione delle discontinuità.

Il metodo FDEM è la fusione dei metodi FEM e DEM, permette di analizzare l'interazione tra blocchi separati, come nel DEM, inoltre ogni blocco è discretizzato con una mesh e analizzato come nel FEM e si possono riprodurre i fenomeni di rottura progressiva, fratturazione e frammentazione del mezzo roccioso (creazione di nuove discontinuità e formazione di nuovi blocchi).

Infine il metodo L.E.M consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, rappresentato ad esempio dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); attraverso le equazioni di equilibrio, vengono calcolate le tensioni da taglio (τ) e confrontate con la resistenza disponibile (τ_r), valutata secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza.

Observational method

Si è già parlato a proposito dell'alto livello di incertezza che affligge gli aspetti idrogeologici e geotecnici, che coinvolgono la costruzione del modello geo-meccanico, che è alla base del progetto. In sostanza il progetto si basa sulla relazione idrogeologica e sulla relazione geotecnica, queste si fondano sulle indagini in sito e sui test in laboratorio che spesso non sono rappresentativi dell'intero volume di materiale che andrà ad interessare l'opera. Per questo motivo molti aspetti del problema sono assunti, quindi incerti e l'incertezza porta ad assunzioni errate che a loro volta portano ad un progetto errato.

Attraverso il metodo osservazionale, vista la possibilità di effettuare altre investigazioni e monitorare il comportamento della struttura in costruzione si può rivedere e correggere il progetto. In questo modo il metodo osservazionale lo trasforma in un progetto interattivo e dinamico che può correggersi in corso d'opera.

Tale metodo si svolge nelle seguenti fasi:

1. Si progetta l'opera sulla base dei dati disponibili e sulle assunzioni fatte per la costruzione del modello geo-meccanico. Attraverso i modelli numerici si predice il comportamento strutturale sulla base delle assunzioni fatte.
2. Si impostano dei valori limite sui parametri che descrivono il comportamento dell'opera e i possibili range di variazione.
3. Si prevede un piano di monitoraggio per tenere sotto sorveglianza il comportamento dell'opera e controllare se i suddetti limiti sono rispettati.
4. Si fissa un tempo di risposta entro il quale i dati provenienti dal sistema di monitoraggio vengono elaborati, interpretati, e le decisioni siano prese in un tempo sufficientemente breve in accordo con i tempi della possibile evoluzione della situazione critica.
5. Si predispongono già in fase di progetto un set di piani di contenimento dell'emergenza che saranno attuati nel caso in cui i valori di soglia del monitoraggio vengano superati.

Si noti come il monitoraggio assume un ruolo indispensabile in questa nuova tipologia di progetto. Inoltre il monitoraggio consente di attuare la cosiddetta analisi a ritroso (back analysis) che consente di determinare i parametri del materiale partendo dal comportamento dell'opera, con un processo, per l'appunto, a ritroso.

Monitoraggio delle gallerie

Introduzione

Con il passare degli anni si è posta una sempre maggiore attenzione alla *Structural Health Monitoring* (SHM), applicando ogni volta nuove soluzioni, contestualmente allo sviluppo delle tecnologie degli altri settori, come ad esempio strumentazioni avanzate, un tempo inusuali nel campo dell'ingegneria civile, ma proprie di altri settori.

Tale argomento è molto vasto ed in continua espansione, ma tali approcci mirano a sostituire o migliorare l'efficienza, di un'altrettanta vasta strumentazione classica sempre affidabile, che verrà in seguito descritta nel presente paragrafo.

Scopo ed obiettivo del monitoraggio

Quando la fase di progettazione della galleria è ultimata, si passa alla fase di scavo in cui il progettista ha il compito di verificare l'attendibilità delle previsioni fatte, in termini di risposta deformativa dell'ammasso roccioso.

È comunemente noto che la realizzazione di una grande opera va a modificare permanentemente l'ambiente circostante, causando diversi tipi di danni dal punto di vista ambientale, da prevedere e contenere, ma anche complicazioni che possono pregiudicare l'opera stessa.

I problemi legati a tale modifica possono essere diversi, si pensi ad esempio ai cedimenti indotti dallo scavo della galleria sui manufatti in superficie, all'instabilità dei versanti rocciosi e dei pendii in terra dovuta alla costruzione della galleria stessa, oppure ancora alla modifica permanente delle condizioni idro-geologiche del sito.

Per tutte queste ragioni è necessario affiancare al monitoraggio strettamente strutturale dell'opera, un monitoraggio di tipo ambientale del sito in tutte le fasi previste nel progetto.

Lo scopo del monitoraggio strutturale e dei controlli nelle opere in generale, è quello di verificare le ipotesi progettuali mediante il confronto delle stesse previsioni e il comportamento, non solo del terreno ma anche delle strutture di rivestimento e delle operazioni di consolidamento.

Come verrà approfondito più avanti, le operazioni di monitoraggio e controllo sono importanti dunque sia in corso d'opera, ma anche in fase di esercizio per assicurare che l'opera, per la durata di vita di progetto, possa mantenere *sicurezza e funzionalità*.

Il piano di monitoraggio risulta dunque indispensabile per:

- Possibilità di procedere, in fase realizzativa, alla verifica dell'attendibilità delle scelte progettuali operate e alla loro calibrazione in corso d'opera (intensità e distribuzione degli strumenti di stabilizzazione);
- Mettere a disposizione, in sede di collaudo dell'opera, tutti i dati essenziali per valutarne la sicurezza strutturale e l'idoneità alla funzione cui è destinata.
- La fase di collaudo implica infatti la ricostruzione della storia tensionale e deformativa dell'opera, e può essere svolta soltanto attraverso un'analisi approfondita dei dati di monitoraggio e delle indagini mirate condotte eventualmente in situ;
- Agevolare, durante l'esercizio, il controllo dello SHM dell'infrastruttura nel tempo, in funzione anche delle possibili modifiche del comportamento reologico dell'ammasso e della possibile variazione delle condizioni idrogeologiche limitrofe al cavo.

Concetti di base

I metodi di calcolo a disposizione del progettista sono tanti, e se applicati correttamente in relazione al caso, sono in grado di fornire una buona approssimazione sia per la previsione del comportamento tenso-deformativo della galleria, sia del progetto e della verifica delle opere di stabilizzazione scelte.

Tuttavia tutti i metodi hanno in comune alcuni aspetti fondamentali dal quale prescinde la bontà del risultato; in particolare la maggior parte dei metodi applicabili hanno la necessità di una grande mole di dati di input e soprattutto della loro accuratezza.

Risulta dunque fondamentale, ove necessario, tarare i modelli di calcoli utilizzati attraverso il confronto delle misurazioni prese durante l'esecuzione dei lavori e soprattutto dal confronto della risposta deformativa durante gli scavi, con quella ipotizzata inizialmente, procedura chiamata back analysis, al fine di stimare il reale grado di sicurezza dell'opera, anche in fase di esercizio.

I risultati del monitoraggio risultano fondamentali perché possono influire nella variazione della scelta progettuale, portando anche al cambiamento del tipo di sezione fissata in fase di progetto, oppure apportando stabilizzazioni e consolidamenti non preventivati.

Alla luce di questo, la verifica si attua:

- *in corso d'opera:*
 - per il rilevamento, durante l'avanzamento dei lavori, l'evoluzione dei fenomeni deformativi (sotto forma di estrusione del fronte e convergenza dello scavo), delle tensioni e delle deformazioni interne agli interventi di stabilizzazione.
 - per l'interpretazione e confronto delle misurazioni con le ipotesi progettuali adottate.
- *in fase di esercizio:*
 - per il controllo del comportamento dell'opera nel tempo, in modo da programmare conseguentemente gli interventi di manutenzione.

Le stazioni di misura

Per il controllo dello stato deformativo è necessaria l'installazione di alcune stazioni di misura, che devono essere collocate nella galleria con l'obiettivo di trovare un compromesso dei diversi aspetti, tra i quali: la necessità di avere un adeguata conoscenza dello stato tenso-deformativo dell'ammasso, l'esigenza di garantire la sicurezza al personale all'interno della galleria durante lo svolgimento dei lavori, l'obiettivo di economicità e minor intralcio possibile alle operazioni di scavo in corso d'opera e in esercizio.

Stazioni di misura principali

Le stazioni di controllo servono per ottenere una mappa completa dello stato tenso-deformativo al contorno della cavità prima, durante e dopo il passaggio del fronte di scavo attraverso una sezione strumentata, anche in seguito ad interventi di stabilizzazione.

A tale scopo è necessario:

- monitorare e misurare gli assestamenti, le deformazioni e le variazioni delle condizioni idrogeologiche dell'ammasso durante l'avanzamento del fronte;
- misurare le estensioni della zona plasticizzata durante il passaggio del fronte di scavo dalla sezione strumentata;

- valutare gli effetti del pre-consolidamento e del rivestimento nei confronti dello stato tenso-deformativo delle pareti del cavo sia in corso d'opera che in esercizio.

Riveste dunque un ruolo importante una sezione particolare, chiamata appunto *sezione strumentata*, con cui, attraverso la strumentazione apposta su di essa, è possibile misurare e monitorare quanto detto.

Tale strumentazione consiste nell'installazione dal piano campagna di almeno tre estensimetri multibase (il numero delle basi dipende dalla profondità in gioco) e di almeno un inclinometro posto a lato della cavità fino a raggiungere e superare la quota dell'arco rovescio. Se è presente la falda, tale strumentazione dovrà essere associata ad un piezometro per monitorare le variazioni di pressione interstiziale.

Mediante la combinazione di tutte queste misurazioni è possibile risalire allo stato deformativo nelle tre dimensioni dell'ammasso adiacente lo scavo.

Quando il fronte avanza e raggiunge la sezione strumentata, si completa il corredo strumentale con un numero sufficiente di chiodi distometrici per la misura delle convergenze del cavo, da celle di carico e di pressione per misurare le tensioni radiali e tangenziali. Inoltre se in presenza di forti venute d'acqua, si può provvedere all'impermeabilizzazione del contorno del cavo, monitorando, con ulteriori piezometri, l'evoluzione delle pressioni sul rivestimento oppure si potrebbe scegliere di drenare l'acqua evitando che il rivestimento si carichi anche della spinta di quest'ultima.

Stazioni di misura dell'estrusione

Lo scopo di queste stazioni di misura è quello di fornire informazioni sulla deformazione, verso l'interno della cavità del fronte di scavo, al fine di valutarne la sua stabilità.

Andranno quindi a misurare l'ampiezza della zona di rilascio tensionale e i fenomeni deformativi in senso radiale e longitudinale del nucleo di avanzamento.

Per ottenere ciò vengono utilizzati un estensimetro incrementale, posto in un foro sub orizzontale al centro del fronte (per una profondità superiore a due volte il diametro della galleria), e una serie di mire ottiche utilizzate per un rilievo topografico quando non sono in esecuzione i lavori di avanzamento.

Stazioni di controllo

Questa tipologia di stazione trova spazio in quelle sezioni in cui non è possibile inserire stazioni principali nel piano campagna, anche se producono informazioni analoghe a quest'ultime, ma la loro installazione è effettuata dopo il passaggio del fronte di scavo, dunque forniscono dati diversi ma molto utili nel periodo a lungo termine.

In particolare vengono poste a ridosso del fronte al fine di valutare l'importanza delle eventuali zone di plasticizzazione e della loro evoluzione nel tempo.

Anche in questo caso la strumentazione adoperata consiste principalmente nell'uso di estensimetri multibase, posti in opera radialmente, in calotta e nelle reni della cavità in una sezione prescelta, di chiodi distanziometrici per la misurazione di convergenza del cavo, di almeno due celle di carico poste ai piedi delle centine e di alcune celle di pressione per la

registrazione della tensione radiale e tangenziale nei rivestimenti (o in alternativa barrette estensometriche posizionate sotto le ali dei profilati). Se la galleria è al di sotto del livello della falda, anche in questo caso bisogna prevedere impermeabilizzazioni e installazioni di un numero opportuno di piezometri.

Stazioni di misura sistematiche

Questa tipologia di stazione è applicata nei rivestimenti, forniscono misure sulla sola convergenza dello scavo e forniscono informazioni molto utili anche quando sono applicate in prossimità del fronte in fase di avanzamento dei lavori.

La strumentazione associata anche questa volta è composta da chiodi distanziometrici e celle di carico sotto le centine, oppure celle di pressione nei rivestimenti, tuttavia devono fornire con un'elevata cadenza le loro misurazioni.

È possibile anche associare delle mire ottiche per il rilievo topografico, ma si deve effettuare una rete di misurazione pari a quello degli altri strumenti installati.

Strumentazione geotecnica

Negli ultimi anni sono state incrementate e perfezionate le strumentazioni geotecniche, ed hanno permesso di raggiungere livelli di accuratezza molto elevati. Tutti gli strumenti sono però caratterizzati dalla somma di tre componenti fondamentali:

- sensore, che rileva la grandezza per cui è stato progettato.
- conduttore, che trasmette il dato all'unità di lettura.
- unità di lettura, che decodifica il segnale, fornendo una stima della grandezza misurata.

Molti parametri possono essere misurati contemporaneamente e mediante più strumenti, tuttavia per ognuno di essi si utilizza generalmente la strumentazione sintetizzata nella tabella seguente

| Parametro da misurare | Strumentazione |
|---|---|
| Cedimenti e deformazioni in superficie e sui manufatti | Stazione totale e mire ottiche |
| Deformazioni delle pareti della galleria | Stazione di monitoraggio topografico del cavo (misure di convergenza) |
| Deformazione nell'intorno della cavità | Inclinometri, Estensimetri e Assestimetri |
| Pressioni radiali sugli elementi di sostegno | Celle di pressione |
| Carichi assiali sulle centine | Celle di carico |
| Deformazioni assiali sulle centine | Barrette estensimetriche per acciaio |
| Deformazioni e sollecitazioni nel rivestimento definitivo | Barrette estensimetriche per calcestruzzo |
| Misura dei livelli di falda o delle pressioni neutre | Piezometri |

Figura 6 Strumentazione di monitoraggio geotecnico

Di seguito verranno descritti i principali strumenti utilizzati nei monitoraggi assieme al tipo di grandezza che essi misurano.

Monitoraggio topografico con stazione totale e mire ottiche

Nelle gallerie caratterizzate da poca copertura, il primo tipo di controllo consiste nella verifica in superficie del bacino di subsidenza indotto dallo scavo della galleria.

Questo è possibile mediante un monitoraggio topografico, che consente il controllo plano-altimetrico dell'area superficiale potenzialmente interessata dal bacino di subsidenza. Questo avviene mediante una stazione di misura che acquisisce sistematicamente le letture degli eventuali movimenti dei punti di misura (microprismi), preliminarmente disposti lungo sezioni parallele e ortogonali all'asse della galleria.

Gli elementi di tale impianto comprendono:

- una stazione di misura dotata di sistema di puntamento automatico del prisma e misura della distanza con distanziometro elettronico;
- un insieme di microprismi per i punti da monitorare;
- un insieme di prismi per capisaldi;
- software topografico per l'analisi dei dati e per il controllo degli strumenti;
- sistema di alimentazione;
- sistema di collegamento per la trasmissione dei dati;
- stazioni di monitoraggio topografico del cavo.

Le stazioni di monitoraggio topografico del cavo consentono di stimare le deformazioni del cavo della galleria attraverso il rilievo ad alta precisione delle coordinate di più punti di misura disposti lungo il perimetro del cavo stesso.

Le stazioni di misura sono costituite da cinque o sette mire ottiche, inserite sia nel calcestruzzo proiettato che sulle centine, ed una volta installate è necessaria una lettura di riferimento di tali punti (lettura zero).

Vengono posizionate delle stazioni di convergenza secondo diversi criteri e successivamente svolti dei rilevamenti con una frequenza che al minimo dovrà essere:

- n. 1 lettura al giorno durante le fasi di scavo del campo successivo rispetto alla posizione della stazione;
- n. 1 lettura integrativa a fronte fermo successivamente all'esecuzione di lavorazioni quali scavo e getto dell'arco rovescio e/o esecuzione di consolidamenti del nucleo d'avanzamento;
- n. 2 letture settimanali fino ad una distanza dal fronte di circa 3 volte il diametro di scavo;

Il sistema d'acquisizione dei dati è costituito da una stazione totale topografica (teodolite e distanziometro elettronico) che misura la posizione dei punti della stazione rispetto ad un sistema di riferimento tridimensionale, costituito da caposaldi situati in galleria.

Il sistema di elaborazione dei dati deve fornire tabulati numerici in funzione del tempo e della distanza dal fronte, di tutta una serie di parametri come ad esempio spostamenti verticali e orizzontali, velocità di spostamento dei punti di misura etc... Nel caso di impiego delle centine può essere opportuno realizzare delle stazioni di convergenza inserendo le mire ottiche sia direttamente nel calcestruzzo proiettato sia sulle centine per verificare le differenze.

Misurazione di cedimenti e spostamenti

Inclinometri

Gli inclinometri consentono di rilevare all'interno di appositi fori di sondaggio realizzati dalla superficie, gli spostamenti verticali e orizzontali nel terreno.

La distribuzione degli spostamenti orizzontali con la profondità può essere rilevata con la misura delle rotazioni rispetto alla verticale, di un tubo solidale col terreno munito di guide in cui vi trova collocazione (fissa o mobile) l'inclinometro stesso; questa misurazione è la più significativa nel monitoraggio di pendii, perché permette di individuare posizione e spessore della superficie di scivolamento e consente di controllare la stabilità del pendio verificando l'entità e la velocità del movimento.

Dalle misure degli inclinometri è possibile risalire agli spostamenti, mediante integrazione numerica, evidenziando così le zone in movimento nel sottosuolo.

Gli inclinometri hanno altrettanta importanza nel caso di gallerie poco profonde o nelle zone limitrofe all'imbocco di gallerie, poiché, sia lo scavo della galleria, sia gli scavi a cielo aperto per le opere di imbocco, modificano considerevolmente le condizioni morfologiche e geotecniche preesistenti.

Bisogna realizzare sempre una planimetria con l'ubicazione dei sondaggi in cui siano riportati la profondità, il diametro e le coordinate plano-altimetriche della testa di ogni tubo, e per ogni tubo bisogna realizzare anche una stratigrafia geotecnica del terreno.

La strumentazione di base è composta da alcune parti principali:

- Un tubo inclinometrico, realizzato in alluminio, vetro resina o ABS, opportunamente scanalato;
- Sonda inclinometrica, costituita da un corpo metallico (dove trovano posto i sensori di misura) dotato di carrelli che scorrono lungo la scanalatura del tubo
- Cavo di misura, per movimentare la sonda e per effettuare il collegamento elettrico;
- Centralina di misura, per rilevare e trasmettere i valori inclinometrici.

Per quanto concerne le misure da eseguirsi, l'elaborazione dei dati e la presentazione dei risultati si possono fare le seguenti considerazioni:

- La sonda dovrebbe essere controllata in sito all'inizio ed al termine di una sessione giornaliera di misure.
- Diverse letture di zero dovrebbero essere eseguite non appena il cemento abbia fatto presa. La media di queste letture costituirà un riferimento per ogni successiva misura.
- La cadenza delle letture va programmata dal progettista sulla base delle caratteristiche del sito.
- La sonda viene immessa nel tubo con le rotelline inserite in una coppia di guide opposte e calata fino a fondo foro. Procedendo dal fondo foro, verso la superficie, si esegue una serie di misure ad intervalli di profondità regolari lungo tutto il tubo. Durante la misura la sonda viene tenuta ferma e si trascrivono la profondità ed il valore visualizzato sulla centralina. Oltre ai valori misurati va presa nota della data, dell'ora, dell'ubicazione del tubo e della direzione delle guide.

- La sonda viene estratta, ruotata di 180° , immessa di nuovo nel tubo con le rotelline inserite nella stessa coppia di guide e calata fino a fondo foro. Viene eseguita una seconda serie di letture con la stessa procedura riportata al punto precedente, alle stesse profondità. Così facendo si può calcolare il “fuori zero” associato ad una coppia di letture effettuate alla stessa profondità (pari alla somma algebrica tra i valori delle letture a 0° e a 180° che dovrebbe rimanere pressoché costante al variare della profondità. Questo dato costituisce un importante controllo in sito sulla bontà delle misure.

Se richiesto, possono essere realizzate due ulteriori serie di misure secondo le modalità precedentemente esposte inserendo la sonda nell'altra coppia di guide.

Estensimetri

Gli estensimetri consentono di determinare gli spostamenti sia superficiali che profondi ed anche le variazioni dell'apertura delle discontinuità. Le misure di spostamento sono tutte basate sulla misura della posizione relativa del punto da considerare, rispetto ad un riferimento assunto stabile. Lo spostamento del punto nel tempo si ricava dalle variazioni della sua posizione rispetto al riferimento.

Con l'impiego di estensimetri profondi o di sonde estensimetriche si possono determinare gli spostamenti in direzione assiale al foro. Mediante sonde in appositi tubi, si possono determinare gli spostamenti sia in asse foro (cedimenti) che in direzione normale al foro (spostamenti orizzontali).

Nelle gallerie vengono utilizzati in particolare per la misurazione delle deformazioni di estrusione del nucleo e di convergenza del cavo.

Estensimetri da foro

Gli estensimetri da foro possono essere di tipo incrementale oppure di tipo mono o multi base. I primi misurano gli spostamenti relativi in direzione perpendicolare all'asse del foro, di una serie di punti equidistanti, disposti su un tubo inclinometrico che riveste il foro. Mentre i secondi misurano spostamenti subiti in direzione dell'asse della perforazione rispetto ad un riferimento in superficie

Assestimetri

Gli assestimetri vengono adoperati per il monitoraggio delle variazioni di distanza tra due o più punti lungo un asse verticale, con cui è possibile ottenere oltre che gli assestamenti del terreno, anche il valore delle tensioni qualora siano note le proprietà meccaniche del mezzo.

L'assestometro più usualmente impiegato consiste in una serie di punti magnetizzati ad alette sporgenti, ancorati a diverse quote nel terreno di cui si vuole seguire l'assestamento e calzati attorno ad una colonna verticale.

Per rilevare gli assestamenti al di sotto di rilevati su terreni soffici può utilizzarsi l'assestometro a piastra, in cui una piastra in acciaio o cls viene fissata alla base del rilevato prima della sua creazione, ad essa viene attaccato un tubo verticale in acciaio che fuoriesce dal rilevato.

Vengono quindi effettuate misure ottiche di livellazione alla sommità del tubo che forniscono la quota della piastra.

Misurazione dei livelli di falda o delle pressioni interstiziali

Per la misura e il monitoraggio dei livelli di falda e delle pressioni interstiziali vengono utilizzati i piezometri. I più comuni sono quelli chiamati *a tubo aperto*, consistono in un tubo (tubi in PVC o metallo) con tratto finale finestrato, messo in opera in un foro di sondaggio, riempito attorno al tubo con materiale granulare, il tutto sigillato in superficie con cemento e bentonite. Le misure della falda possono essere fatte mediante trasduttori fatti scivolare all'interno del tubo.

Il problema di questi tipi di piezometri sono i lunghi tempi di acquisizione del dato che è funzione della permeabilità del terreno, poiché si deve attendere che la variazione del livello di falda da misurare riempi tutto il foro fino al livello raggiunto dalla falda stessa. Per ovviare a ciò si può utilizzare una variante, chiamato *piezometro di Casagrande*, che è sempre un piezometro a tubo aperto, ma questa volta il tubo è di piccola sezione e collegato direttamente ad una pietra porosa, e consente di poter calcolare anche le pressioni interstiziali in quel punto.

Quando si vuole effettuare un monitoraggio a lungo termine delle pressioni interstiziali, si può utilizzare il *piezometro idraulico a due tubi*, costituito da un elemento filtrante poroso collegato a due tubi in plastica di piccolo diametro, questi tubi sono connessi a strumenti di misura della pressione come ad esempio manometri o trasduttori elettrici.

Misurazione dello stato tensionale e deformativo

La misura dello stato tensionale viene effettuata mediante celle di pressione e celle di carico che forniscono un'indicazione sulla distribuzione, l'intensità e la direzione delle pressioni totali nella roccia, nel terreno, nel calcestruzzo e nell'interfaccia terreno-struttura.

Entrambi i due tipi di celle hanno la stessa funzione, tuttavia le celle di carico sono in grado sostenere carichi maggiori, infatti sono generalmente posti alla base delle centine nelle piastre di giunzione con l'arco rovescio. Mentre celle di pressione vengono annegate nel calcestruzzo del rivestimento preliminare oppure in quello definitivo e possono misurare sia gli sforzi radiali che tangenziali; esistono principalmente due tipi di celle di pressione:

- celle idrauliche
- celle a membrana

Le celle di pressione idrauliche sono costituite da due diaframmi circolari o rettangolari, mutuamente saldati lungo il loro perimetro, con all'interno una cavità satura di un liquido e connessa ad un trasduttore di pressione mediante un tubo di acciaio.

Le celle a membrana sono composte da due membrane flessibili dotate di trasduttori a resistenza elettrica o corda vibrante, che producono un impulso elettrico in uscita proporzionale alla pressione agente. Questi tipi di dispositivi hanno quindi entrambe le superfici attive e sono utili perché forniscono anche un controllo sulla bontà di installazione, anche se sono meno utilizzati perché presentano costi elevati.

Esistono anche delle particolari celle di forma toroidali, installate fra la piastra del chiodo a contatto con l'ammasso e il dado di fissaggio della piastra stessa, forniscono il carico esercitato dall'ammasso sulla testa del bullone.

La misura della pressione totale in un punto all'interno del terreno richiede:

- che la cella non alteri apprezzabilmente lo stato di tensioni all'interno del terreno a causa della sua presenza,
- un'area d'indagine sufficientemente estesa da mediare le discontinuità locali,
- una minima sensibilità della cella alle stratificazioni non uniformi,
- un metodo d'installazione che non modifichi sensibilmente lo stato tensionale.

Tuttavia queste condizioni sono di difficile realizzazione perché si avrà sempre un disturbo delle pressioni dovuto sia alla presenza della cella sia al metodo di installazione.

La misura dello stato deformativo del calcestruzzo del rivestimento, può essere fatta mediante due strumenti:

- *Barretta estensimetrica*, che consiste nel disporre barra di acciaio a sezione quadrata, dei trasduttori elettrici disposti a formare un ponte di Wheatstone, le cui estremità vengono saltate ai ferri di armatura.
- *Estensimetri a corda vibrante*, in cui viene posto all'interno di un tubo ancorato alle due estremità, un filo di acciaio posto in vibrazione da un magnete situato alla mezzeria del tubo; la deformazione indotta tra i due ancoraggi, modifica la lunghezza del filo con conseguente variazione della frequenza di uscita del segnale.

Monitoraggi in corso d'opera

Il monitoraggio in corso d'opera è finalizzato principalmente a valutare gli andamenti dei vari parametri, considerati significativi, in relazione alle fasi costruttive, ai materiali scelti ed alle geometrie che caratterizzano l'opera, con particolare interesse anche alla sicurezza dei lavoratori.

In relazione alla sicurezza, vengono anche predisposti sistemi di monitoraggio ambientale del cavo della galleria, al fine di controllare le percentuali di gas presenti nel sito, che possono causare intossicamento ed esplosione.

La prima problematica da un punto di vista strutturale ed ambientale, da tenere in considerazione all'inizio della costruzione di una galleria è la condizione iniziale del versante, prima della realizzazione dell'imbocco. Mediante un monitoraggio preventivo; in questa fase si acquisiscono i dati ancora prima di iniziare i lavori, in modo da controllare l'evoluzione degli effetti indotti dallo scavo ed intervenire in caso di necessità.

Durante la fase di realizzazione delle opere, si ricorre generalmente ad un monitoraggio di tipo manuale poiché presenta minori problemi rispetto al monitoraggio automatico, in particolare perché la tipologia manuale è caratterizzata da una maggiore rapidità di installazione, dai costi minori e da una limitata interferenza con le operazioni di cantiere.

Le principali problematiche che si possono riscontrare durante lo scavo di una galleria riguardano:

- verifica delle convergenze del cavo, sia sul pre-rivestimento, sia sul rivestimento definitivo della galleria;
- verifica dello stato tenso-deformativo della struttura e delle sue interazioni con l'ammasso roccioso circostante;
- controllo della subsidenza che può essere indotta in superficie in concomitanza con le fasi di avanzamento dello scavo;

- verifica e controllo delle variazioni della superficie piezometrica e dei livelli idrici presenti nei terreni oggetto di scavo.

Per quanto riguarda la stabilità del cavo, possono capitare tre diverse situazioni da monitorare:

1. *nucleo-fronte stabile (comportamento lapideo)*, in questo caso si è in condizioni elastiche e la risposta deformativa nel breve periodo è di valore ridotto. Generalmente in questi casi non sono necessari particolari tipi di controlli, se non in presenza di fenomeni particolari che possono portare a fenomeni di instabilità locale (ad esempio lo scivolamento di cunei di roccia), oppure ai colpi di montagna in quei materiali molto rigidi con piani di discontinuità subparalleli al tracciato.
2. *nucleo-fronte stabile a breve termine (comportamento coesivo)*, in cui il terreno risulta essere in campo elasto-plastico, quindi è necessaria la messa in opera di stazioni di misura dell'estrusione, principali e di controllo (quest'ultime intervallate ogni 20 o 40 m dalle stazioni sistematiche) per valutare il campo deformativo e quindi ottimizzare i processi di stabilizzazione. La frequenza di tutte queste stazioni dipenderà essenzialmente dalle condizioni del materiale nel sito, anche se in queste condizioni è sempre necessario apporre le stazioni di misura dell'estrusione ogni volta che si ferma l'avanzamento dei lavori per un periodo superiore ai sette giorni, in modo da evitare fenomeni di instabilità nel momento di ripresa degli scavi.
3. *nucleo-fronte instabile (comportamento sciolto)*, in questo caso il progettista ha l'obbligo e la necessità di avvalersi di tutte le stazioni di misura possibili in particolare vicinanza al fronte di scavo in quanto le misure di estrusione assumono un ruolo fondamentale per il controllo dell'efficienza degli interventi di stabilizzazione del fronte di scavo.

Esistono poi altre situazioni particolari che necessitano di monitoraggi mirati come ad esempio, quando in sito si ha la presenza di importanti dislocazioni tettoniche, con materiali di diversa natura. In questo caso il comportamento dell'ammasso roccioso è di difficile modellazione, dunque, è importante osservare in situ il comportamento deformativo di tale materiale.

Importante cura devono avere quelle gallerie sotto falda, le cui acque possono essere opportunamente drenate, oppure il rivestimento impermeabilizzato, con misurazione della pressione di falda nella fase conoscitiva pre-progettazione, per la costruzione di un modello idrogeologico il più possibile fedele alla realtà e non sottostimare la spinta dell'acqua sul rivestimento.

Particolare attenzione devono poi avere quelle opere realizzate in ambiente urbano in quanto è necessario i calcoli dei cedimenti, effetto dell'avanzamento degli scavi, che possono influire sulla stabilità dei manufatti in superficie

Nel caso in cui lo scavo sia di tipo meccanizzato, la macchina di scavo (TBM) dovrà essere munita di un opportuno sistema di registrazione dei dati, che permetta il rilievo continuo di tutti quei parametri ritenuti necessari per il corretto monitoraggio dell'avanzamento, come ad esempio:

- lunghezza di perforazione;
- velocità istantanea di avanzamento;
- velocità di rotazione della testa;
- coppia applicata alla testa;

- spinta applicata alla testa.

Inoltre, devono essere acquisiti, i dati relativi agli aspetti costruttivi, quali ad esempio: numero di anelli posati, fermi programmati, fermi dipendenti dalla macchina (guasti, manutenzione, ecc.), fermi dipendenti dall'ammasso scavato (instabilità, venute d'acqua, interferenze non previste, ecc.), fermi dipendenti dal rivestimento (deformazioni, rotture dei conci), fermi per altre cause, e altre informazioni varie inerenti alla costruzione.

Tutti i parametri sopra elencati dovranno essere acquisiti in continuo per consentire una verifica in tempo reale delle condizioni di scavo, e possono esserci ulteriori parametri legati ad una diversa tecnologia della macchina oppure ad aspetti particolari da tenere in osservazione.

Monitoraggio in esercizio

Le operazioni di monitoraggio non si concludono soltanto a rivestimento ultimato, ma assumono un ruolo diverso poiché in questa fase vengono utilizzate per il controllo dello stato di salute della struttura.

Il monitoraggio nella fase di esercizio ha avuto grande sviluppo in tempi recenti con l'ausilio di strumenti in grado di registrare e comunicare in maniera autonoma. Precedentemente per effettuare le rilevazioni erano necessarie interruzioni di servizio dell'infrastruttura per poter ottenere i dati necessari per predisporre le manutenzioni.

Oggi queste attività di misurazione sono divenute molto più efficienti grazie all'uso di strumenti più produttivi, capaci di rilevare dati con un'altissima frequenza ed in grado di comunicare in remoto.

Le finalità di questi tipi di monitoraggi devono essere:

- consentire di verificare il funzionamento dell'opera;
- controllare l'evoluzione della deformazione o spostamenti della struttura nel tempo.

Risulta necessario prevedere una raccolta sistematica di una grande mole di dati, che introduce anche il problema di una corretta gestione di questi ultimi. Per tale ragione vengono progettati sistemi di raccolta e trasmissione che permettono di gestire le informazioni e le letture di ogni strumento posizionato nella galleria.

Un tipico sistema di raccolta e trasmissione dati consisterà in:

- un adeguato numero di *sottosistemi*, per la gestione di una singola stazione di misura, collegate a delle centraline interne alla galleria;
- alcune *unità centrali*, che comandano ed interrogano i vari sottosistemi al fine di eseguire in un'unica soluzione tutte le letture, generalmente posizionate vicino gli imbocchi;
- un'*unità operativa*, che gestisce tutte le unità centrali e controlla con continuità tutte le sezioni strumentate.

Oltre la corretta progettazione di tale sistema, è necessario eseguire una corretta interpretazione dei dati rilevati. Tale operazione non è sempre semplice e scontata perché dipende da diversi fattori, come ad esempio:

- La dispersione dei valori, poiché infatti si avranno tanta misurazione di un singolo valore. Può capitare che non si verifichi un addensamento delle letture attorno ad un valore, e quindi si ha incertezza su quale valore assumere come più rappresentativo e corretto in relazione alla misurazione in esame.
- L'affidabilità degli strumenti, sia a livello tecnologico ma anche a livello di posizionamento stesso, in quanto l'errata messa in opera delle apparecchiature comporta letture sistematicamente errate.
- Influenze esterne, come acqua, temperatura, umidità etc... che possono alterare le misure eseguite o peggio rendere inutile lo strumento stesso, è sempre opportuno prevedere una certa ridondanza degli strumenti in modo da sopperire ad eventuali guasti di alcuni di essi.

Per il contenimento dei costi molto spesso viene riutilizzata la stessa strumentazione adoperata per il monitoraggio in corso d'opera, sfruttando prevalentemente le stazioni di misura delle convergenze e alcune stazioni di misurazione principale come ad esempio piezometri e celle di carico.

Le misure della convergenza del cavo consisteranno essenzialmente nel rilievo del profilo interno del rivestimento. Per fare questo generalmente vengono usati dei distometri, mire ottiche per rilevamento topografico oppure per casi particolari anche rilievi radar.

I piezometri sono utilizzati anche successivamente agli scavi per valutare le eventuali oscillazioni del piano della falda acquifera; particolari accorgimenti vengono fatti quando si hanno condizioni idrodinamiche dell'acquifero, poiché potrebbero provocare possibili fenomeni di subsidenza e quindi di dissesto oppure l'incremento delle spinte sul rivestimento.

Con il monitoraggio in esercizio si possono controllare anche quei fenomeni che possono alterare la risposta deformativa della galleria, come ad esempio gli eventi sismici, che sono anche in grado di innescare fenomeni di instabilità nei versanti in corrispondenza delle sezioni di imbocco. Ma anche i fenomeni di fluage, che mostrano effetti dopo lunghi periodi e che solo attraverso un monitoraggio sistematico in esercizio è possibile valutarne le conseguenze.

5. L'algoritmo genetico

Introduzione

In questo capitolo verrà introdotto l'algoritmo genetico (AG) sviluppato dall'Ing. Francesco Marino durante il suo lavoro di tesi di laurea magistrale al Politecnico di Torino e che sarà oggetto di analisi e test nel presente elaborato.

Gli algoritmi genetici sono una delle metodologie impiegate nell'informatica per lo scopo di ottimizzazione.

Questi tipi di algoritmi, assieme al ragionamento probabilistico, la logica fuzzy e alle reti neurali, rappresentano quelle tecniche di *soft computing* che si prefiggono di valutare, decidere, controllare e calcolare in un ambito impreciso e vago, emulando e utilizzando la capacità degli esseri umani di eseguire le suddette attività sulla base della loro esperienza e rappresentano la base del *machine learning*.

L'evoluzione biologica è stata già da tempo considerata una fonte di ispirazione naturale per affrontare una serie di problemi che spaziano su diversi ambiti, dalla biologia all'ingegneria, dall'informatica fino alla finanza; l'evoluzione infatti può essere considerata come un metodo di ricerca all'interno di un numero molto grande di possibili "soluzioni".

Gli algoritmi genetici seguono proprio il principio della Selezione Naturale Darwiniana, in quanto la soluzione finale sarà ottenuta mediante un processo di sopravvivenza di individui che caratterizzano la popolazione iniziale, nell'ambiente predefinito.

Ogni individuo della popolazione iniziale è identificato da una stringa numerica chiamata *cromosoma*, ogni individuo, quindi ogni cromosoma rappresenta un punto nello spazio di ricerca della soluzione (l'insieme di tutte le possibili soluzioni, teoricamente infinito, che deve quindi essere limitato al fine di arrivare ad una convergenza della soluzione), quindi l'algoritmo genetico modifica la popolazione iniziale di cromosomi creando dei discendenti in ogni era evolutiva e rimpiazzando con essi la popolazione dei genitori.

L'applicazione di un algoritmo genetico per un dato problema da risolvere, coinvolge la definizione di due aspetti principali. Il primo aspetto riguarda il modo in cui il problema deve essere modellato, includendo anche la definizione dello spazio delle soluzioni ammissibili, la forma della funzione di fitness e il modo in cui gli individui devono essere rappresentati come stringhe. Il secondo aspetto consiste nella definizione di parametri dell'algoritmo stesso, che riguardano la dimensione della popolazione, il metodo di riproduzione ed il numero di generazioni.

Partendo quindi da una popolazione, supposta per il momento generata in maniera casuale, bisogna andare a definire i seguenti aspetti per la risoluzione del problema.

La sopravvivenza degli individui con caratteristiche più adatte, significa in realtà la sopravvivenza dei geni più adatti.

I cambiamenti che si verificano tra una generazione e quella successiva possono essere piccoli ma che si accumulano (selezione cumulativa) e, dopo tempi molto lunghi, danno origine a cambiamenti enormi; tuttavia esiste anche un'altra possibilità di evoluzione, secondo cui sarebbe

fortemente influenzata da eventi eccezionali e si avrebbe miglioramento “per salti”. Ciò implica che si possono avere periodi di ristagno, anche molto lunghi, a cui seguono periodi di accelerazione evolutiva relativamente brevi.

Modellazione del problema e codifica dell'individuo

Ogni individuo della popolazione iniziale è identificato da una stringa numerica chiamata *cromosoma*, ogni individuo, quindi ogni cromosoma, rappresenta un punto nello spazio di ricerca della soluzione, l'insieme di tutte le possibili soluzioni.

La modellazione del problema da risolvere è affrontata con la *codifica genetica* che rappresenta il modo in cui la possibile soluzione (individuo) viene rappresentata e riconosciuta dall'algoritmo.

Le codifiche più comuni possono essere di *tipo binario* oppure di *tipo alfanumerico reale*. Quest'ultime, per molte applicazioni, risultano essere più pratiche poiché i cromosomi sono rappresentati, ad esempio, attraverso alfabeto formato da molti caratteri oppure con molti numeri reali. Vi è inoltre una tipologia di codifica ad albero, che viene utilizzata principalmente nell'evoluzione degli algoritmi, in cui le soluzioni che costituiscono le popolazioni sono altri algoritmi che si combinano.

La decisione del tipo di codifica è quindi strettamente correlata al tipo di problema da risolvere, non esiste quindi una codifica che fornisce risultati adeguati in tutti i casi, né esistono regole generali che permettano di stabilire quale possa essere la scelta migliore.

L'individuo come carico sulla struttura

Nel caso in esame, essendo un'applicazione ingegneristica, si useranno numeri reali poiché con altri tipi di codifiche si potrebbe perdere il senso fisico del dato. In particolare il singolo individuo della popolazione rappresenterà il carico da applicare alla struttura.

L'applicazione del carico avverrà direttamente mediante Python sfruttando le API del programma SAP2000, al fine di velocizzare le operazioni.

Se si vuole descrivere l'individuo con la stessa terminologia biologica che caratterizza questi tipi di applicazioni avremo che:

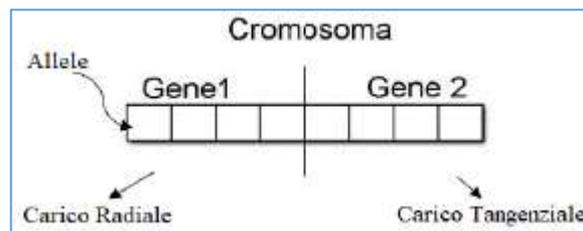


Figura 7 Schema della codifica dell'individuo

Il cromosoma, che per la seguente applicazione è anche indicato con il termine individuo, rappresenta dunque il carico da applicare, mentre i geni che caratterizzano l'individuo rappresentano una parzializzazione del carico stesso, che sarà considerato come la somma di un carico radiale e tangenziale rispetto alla galleria in esame.

I singoli alleli, invece rappresentano le singole caratteristiche rispettivamente del carico radiale e del carico tangenziale, e i loro valori dipendono dal tipo di carico che si vuole applicare.

Per la ricerca dell'obiettivo prefissato sono state fatte diverse modellazioni del carico, con lo scopo di tarare l'algoritmo e di valutare quale poteva essere la approssimazione della forma dei carichi che agiscono in una galleria, con la scelta di applicarli in forma distribuita sulle singole travi (beam elements) che compongono la struttura.

È stata adottata una codifica del carico del tipo sinusoidale, immaginando che il carico possa essere ottenuto dalla somma di più sinusoidi di diversa fase e frequenza.

Con un'ipotesi semplificativa, si è considerato che la galleria fosse soggetto inizialmente al carico geostatico del terreno, presentando quindi la classica variazione lineare funzione del tipo di terreno e della profondità.

Lo stato tensionale a cui essa è soggetto è caratterizzato da una parte idrostatica e da una parte deviatorica, colpevole della variazione di forma della galleria stessa. Il carico dunque è visto come somma di una parte costante, identificata come il valore di tensione associato al centro della galleria, più una parte variabile data dal carico sinusoidale e modificata dall'algoritmo. La parte idrostatica del carico è applicata alla galleria attraverso un carico costante, definito in sede di progetto come il parametro "carico medio" che si è fissato a priori, ma che necessita la sua corretta impostazione per le diverse applicazioni.

Per capire le forme che dovevano avere queste "onde sinusoidali", sono state approfondite le deformazioni che un tunnel può subire in condizioni statiche. Sulla base di queste, sono state impostate le equazioni delle onde sinusoidali. In tali equazioni, è stata altresì considerata la possibilità di eventuali spostamenti in diverse direzioni: in particolare sono stati utilizzati tre sinusoidi o cosinusoidi - sia per il carico radiale che per il carico tangenziale - con l'aggiunta di due carichi localizzati distribuiti radialmente e tangenzialmente al fine di simulare le possibili forze concentrate che agiscono sulla struttura.

Tutte le equazioni di questi carichi adimensionale sono caratterizzate da due parametri:

- φ è la coordinata angolare che definisce la posizione del nodo della galleria;
- θ_0 è la fase iniziale che definisce la direzione degli spostamenti che subisce la galleria.

Queste onde hanno valore unitario, successivamente verranno amplificate da opportuni coefficienti e dalla loro somma si otterrà il valore del carico, e quindi l'individuo della popolazione.

Il carico localizzato, sia radiale che tangenziale, è distribuito con ampiezza costante su una porzione di 20° della circonferenza che definisce la geometria, e servono a simulare incrementi delle tensioni dovuti a zone di contatto puntuali con terreni o rocce sporgenti.

| Carico Radiale | Carico Tangenziale |
|--|--|
| $A = 1 + \cos(\theta + \varphi)$ | $A = \cos(0.5 \cdot (\theta + \varphi))$ |
| $B = 1 - \cos(2 \cdot (\theta + \varphi))$ | $B = \sin(\theta + \varphi)$ |
| $C = \cos(2 \cdot (\theta + \varphi))$ | $C = \sin(2 \cdot (\theta + \varphi))$ |

Figura 8 Forme d'onda dei carichi distribuiti

Il carico totale applicato alla struttura, sarà dunque composto da un'onda radiale, data dalla somma delle tre onde radiali adimensionali, ognuna delle quali avrà un valore di θ diverso, ma interno al range individuato mediante il parametro di direzione (fornito prima dell'analisi) ed amplificato di un coefficiente α , anch'esso variabile in un intervallo stabilito a priori, e che potrà essere positivo oppure nullo.

Analogamente sarà fatto per l'onda tangenziale, che presenterà un coefficiente amplificativo β , che potrà essere nullo, positivo o negativo, per simulare l'inversione delle tensioni tangenziali.

Anche i carichi localizzati presenteranno un coefficiente amplificativo, in particolare il coefficiente del carico localizzato radiale verrà indicato con il simbolo γ , mentre il coefficiente del carico localizzato tangenziale sarà indicato con il simbolo δ . Ognuno di essi sarà inoltre caratterizzato da un valore di fase, che semplicemente indicherà la porzione di anello caricata, in quanto sono semplici carichi distribuiti e non sinusoidi.

Un esempio di individuo è mostrato nella seguente figura:

| ONDA RADIALE | | | | | | ONDA TANGENZIALE | | | | | | LOCALIZZATO RADIALE | | | | LOCALIZZATO TANGENZIALE | | | |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|---------------|
| α_1 | θ_1 | α_2 | θ_2 | α_3 | θ_3 | β_1 | θ_4 | β_2 | θ_5 | β_3 | θ_6 | γ_1 | θ_7 | γ_2 | θ_8 | δ_1 | θ_9 | δ_2 | θ_{10} |
| 24.29 | 300.86 | 107.44 | 82.29 | 89.52 | 170.53 | 58.2 | 6.75 | 58.94 | 7.03 | 0 | 115.84 | 53.03 | 180 | 101.97 | 193.51 | -64.84 | 184.63 | 29 | 148.19 |

Figura 9 Esempio di codifica dell'individuo con parametri

Dove:

- α_1 , α_2 e α_3 sono i coefficienti amplificativi delle tre onde adimensionali radiali, generati casualmente in un intervallo scelto dall'utente proporzionalmente all'ampiezza dei carichi che ci si aspetta;
- θ_1 , θ_2 e θ_3 sono le fasi delle tre onde radiali generate casualmente nel range definito dal parametro di direzione;
- β_1 , β_2 e β_3 sono i coefficienti amplificativi delle tre onde tangenziali, generati casualmente in un intervallo scelto dall'utente proporzionalmente all'ampiezza dei carichi che ci si aspetta;
- θ_4 , θ_5 e θ_6 sono le fasi delle tre onde adimensionali tangenziali, generate casualmente nel range definito dal parametro di direzione;
- γ_1 e γ_2 sono i coefficienti amplificativi del carico radiale localizzato, generati casualmente nello stesso intervallo delle onde radiali;
- θ_7 e θ_8 sono le fasi che indicano la porzione (in termini di coordinata angolare) di anello caricata dal radiale localizzato, generate casualmente nel range definito dal parametro di direzione;
- δ_1 e δ_2 sono i coefficienti amplificativi del carico tangenziale localizzato, generati casualmente nello stesso intervallo delle onde tangenziali;
- θ_9 e θ_{10} sono le fasi che indicano la porzione (in termini di coordinata angolare) di anello caricata dal tangenziale localizzato, generate casualmente nel range definito dal parametro di direzione;

Nella figura che precede è facile osservare le componenti dell'individuo, ma è anche possibile individuare le caratteristiche genetiche che lo caratterizzano, infatti i geni saranno le onde e i carichi localizzati e i singoli alleli saranno le caratteristiche dei carichi quindi fase e coefficiente amplificativo.

È subito intuibile che una codifica così fatta dell'individuo conferisce ai singoli alleli un significato solo se esse si trovano in una posizione fissa all'interno del gene; quest'aspetto è da tenere in considerazione quando avverrà la riproduzione, in quanto uno spostamento di uno di esso potrebbe portare alla definizione di un carico privo di significato.

Occorre osservare che poiché la combinazione dei carichi adimensionali può comportare la definizione di carichi che producono spostamenti irrealizzabili in una galleria, è stato definito come valore di input un "parametro di direzione" (fornito dall'utente) al fine di eliminare tutte quelle possibili combinazioni dei carichi che producono deformazioni incompatibili con il parametro. Tale parametro di direzione va a regolare il range di variazione del parametro θ ovvero la fase iniziale della singola onda.

Definizione della funzione di fitness e assegnazione del punteggio

Il parametro che più influenza gli AG è sicuramente la funzione di "Fitness" che rappresenta il vero legame fra l'algoritmo con la realtà che si vuole simulare e ottimizzare.

Tale funzione serve per giudicare le "prestazioni" di ogni individuo (caratterizzato dal suo cromosoma) fornendo un valore numerico, proporzionale alla bontà della soluzione offerta; l'obiettivo dell'algoritmo è quindi quello di massimizzare (o minimizzare) il valore di questa funzione. La funzione di fitness consentirà di attribuire ad ogni individuo un punteggio che intende, come già detto, esprimere la bontà della soluzione proposta dall'individuo in questione.

Quindi, una volta definita la popolazione di partenza, bisogna definire un criterio di assegnazione della bontà della soluzione fornita da ogni singolo individuo che la caratterizza.

Supponendo dunque di conoscere i valori di momento flettente, sforzo assiale e rotazione in alcuni punti della struttura (*valori di target*), ad esempio, provenienti da un sistema di monitoraggio, è stato pensato di assegnare un punteggio a ciascun individuo a seconda di quanto differiscono le sollecitazioni e spostamenti nei medesimi punti, sotto l'influenza del carico definito dall'individuo stesso (determinate con il software Sap2000).

Attraverso le A.P.I. il carico viene assegnato alla struttura e viene quindi lanciata l'analisi per il calcolo delle sollecitazioni e degli spostamenti; tali valori saranno confrontati con i valori di target con il seguente criterio:

- chiamando $M_{t,i}$ il valore del momento flettente dovuto al carico target (da ricercare) nel punto i , dove il punto i rappresenta la coordinata angolare della galleria in cui si è posto lo strumento di misurazione;
- chiamando con M_i il valore di momento flettente calcolato nel medesimo punto i , definito precedentemente, si calcolano:

$$\text{Errori parziali momento flettente: } e_{M,i} = \left| \frac{M_{t,i} - M_i}{\bar{M}} \right| \quad (1)$$

$$\text{Errori parziali percentuali momento flettente: } e_{M,i} (\%) = \frac{M_{t,i} - M_i}{\bar{M}} * 100 \quad (2)$$

Dove \bar{M} rappresenta la media dei valori assoluti del momento flettente, e viene usato come riferimento per definire se il valore di M_i è prossimo al valore di $M_{t,i}$.

Mentre nella (1) vengono presi i valori in modulo, la (2) servirà per dare un'indicazione grafica della "lontananza" fra i valori del Target e i valori generati dall'individuo.

Viene quindi applicata la (1) per ogni nodo di cui si dispone il valore del Target, e successivamente si effettua la somma di tutti gli errori parziali (n è il numero di nodi strumentati):

$$\text{Errore totale momento flettente: } e_M = \sum_{i=1}^n e_{M,i}$$

Verrà calcolato successivamente *Punteggio del momento flettente* definito come l'inverso dell'errore totale del momento flettente:

$$\text{Punteggio del momento flettente: } P_M = \frac{1}{e_M}$$

Nelle applicazioni di questo algoritmo sono state utilizzati soltanto: momento flettente, sforzo normale e rotazione perché più significative, ma possono essere usate le grandezze che si ritengono più idonee o comunque quelle compatibili con i dati ottenuti mediante un monitoraggio.

In particolare sono stati scelti 12 punti (dunque $n=12$) in cui si conosce il valore delle grandezze associate al Target in modo da avere una maggiore copertura dell'intera struttura.

Ripetendo le stesse formule per lo sforzo assiale e per le rotazioni si ottengono analogamente altri due valori di punteggio, denominati P_N e P_R che forniranno un'indicazione sull'entità del discostamento fra sforzi assiali e rotazioni calcolate, rispetto ai loro corrispettivi valori riferiti al Target.

$$P_M = \frac{1}{e_M}; \quad P_R = \frac{1}{e_R}; \quad P_N = \frac{1}{e_N}$$

Questi valori di punteggio sono soltanto parti del punteggio totale assegnato all'individuo in quanto il punteggio totale P , sarà invece dato dalla relazione:

$$\text{Punteggio totale dell'individuo: } P = \frac{1}{e_N + e_M + e_R}$$

La parzializzazione del punteggio può essere uno strumento importante per una valutazione più critica dell'individuo ai fini della singola grandezza comparate e può essere oggetto di approfondimenti e modifiche future dell'AG ai fini di tale applicazione.

L'obiettivo dell'AG sarà quello di massimizzare il punteggio, ma per ottenere ciò ricoprono un ruolo importante anche le fasi di selezione e riproduzione degli individui.

Criterio di selezione degli individui

La selezione dell'individuo ricopre un ruolo molto importante perché, anche se la casualità è l'essenza degli algoritmi genetici, una scelta guidata esclusivamente dal caso comporterebbe la perdita di individui di alto punteggio che potrebbero concorrere positivamente alla convergenza dell'AG.

Per evitare l'insorgenza di tale problema, è stato necessario applicare il *criterio dell'elitarismo* al fine di tutelare gli individui migliori.

Supponendo dunque di disporre di una popolazione iniziale di 24 individui, essi verranno riordinati in base al loro punteggio dal valore maggiore a quello minore; poiché si è fissato il criterio che tutte le generazioni successive avranno una dimensione uguale a quella iniziale, per ottenere un incremento di punteggio vengono scelti i primi 12 individui a punteggio maggiore che saranno le *madri* degli individui che si generano (ogni individuo madre formerà due famiglie).

Per la creazione della famiglia è tuttavia necessaria la presenza di un altro individuo, che rappresenterà il *padre* dei futuri discendenti. La scelta di questo individuo è affidata al criterio della “roulette Wheel”. Per la selezione verrà mantenuta la gerarchia in base al punteggio della generazione iniziale, in questa maniera gli individui a punteggio più alto competerà una fetta maggiore della roulette. In seguito, viene estratto un numero casuale compreso in un intervallo fra 0 e la somma di tutti i punteggi della popolazione; successivamente partendo dall’individuo a punteggio più alto, si cumulano tutti i punteggi degli individui fino a quando la somma cumulativa non eguaglia o supera il valore casuale generato. L’individuo responsabile di tale superamento sarà scelto come padre per la riproduzione assieme alla madre scelta preliminarmente con l’elitarismo.

Alla fine di queste operazioni si disporranno di 24 combinazioni degli individui, che verranno chiamate *famiglie*, poiché da esse verranno fuori ulteriori individui, tanti quanti i meccanismi di riproduzione definiti.

Meccanismi di riproduzione

Una volta definita la famiglia, si è passata alla definizione dei meccanismi di riproduzione, che necessariamente devono essere collegate al problema fisico in esame.

Fra tutte le tecniche possibili nelle ultime formulazioni dell’algoritmo è stato applicato esclusivamente l’operazione di *cross-over*, tralasciando per varie ragioni altri tipi di meccanismi. Il meccanismo di *cross-over* applicato a questo algoritmo, soffre della condizione della posizione (locus) dell’allele, infatti lo spostamento di un parametro in un’altra posizione, anche in questo caso genererebbe un carico che non avrebbe senso nei casi tipici delle gallerie.

Come già detto in precedenza, quest’operatore genetico è stato l’unico applicato all’algoritmo finale, tuttavia ad esso è stato associato anche ad un altro meccanismo di riproduzione, probabilmente più vicino al concetto di mutazione, rappresentato dall’operatore di media fra le singole variabili.

Questa scelta è stata dettata dall’evidenza dei risultati ottenuti poiché, mediante l’accoppiamento di media e *cross-over*, sono stati riscontrati valori crescenti della funzione di fitness con il passare delle generazioni.

Il numero di riproduzioni ed il tipo di riproduzioni che è stato eseguito è il seguente:

1. Media dei coefficienti amplificativi dell’individuo padre e dell’individuo madre con le fasi dell’individuo madre (*cross-over*);
2. Media dei coefficienti amplificativi dell’individuo padre e dell’individuo madre con le fasi dell’individuo padre (*cross-over*);

3. Coefficienti dell'individuo madre (cross-over) con la media delle fasi dell'individuo padre e dell'individuo madre;
4. Coefficienti dell'individuo padre (cross-over) con la media delle fasi dell'individuo padre e dell'individuo madre;
5. Media ponderata in funzione del punteggio dell'individuo padre e dell'individuo madre sia per i parametri di fase che dei coefficienti amplificativi.

In questa maniera si ottiene una famiglia composta da 8 individui.

La convergenza e l'output dell'algoritmo

Da tutte le famiglie ottenute in una generazione verrà selezionato, in base al punteggio di ogni individuo, quello con il valore maggiore, che diverrà dunque un individuo della generazione successiva. Gli individui delle generazioni successive – i massimi delle famiglie della generazione precedente – saranno soggetti allo stesso ciclo per formare un numero di generazioni future pari a quelle impostate preliminarmente.

È comprensibile come il numero di individui presenti nella generazione, ed anche il numero delle generazioni totali, siano un parametro caratteristico dell'algoritmo, ed una loro modifica porterà sicuramente a risultati differenti.

Alla fine di ogni esecuzione si disporrà quindi dell'andamento dei punteggi, pertanto la fase successiva è quella della valutazione della convergenza della soluzione.

Quando i meccanismi di riproduzione sono terminati, verrà infatti selezionato l'individuo dell'ultima generazione, con il punteggio massimo (è il migliore che è riuscito a trovare) e l'algoritmo attraverso le A.P.I risale al punteggio di questo e saranno generati da Python una serie di grafici che mostreranno visivamente, la bontà dell'individuo rispetto alla soluzione.

Modello strutturale del rivestimento della galleria

La creazione dell'algoritmo è stata sviluppata adoperando il linguaggio di programmazione Python mentre per la modellazione strutturale è stato usato il software SAP2000 v19, pertanto per ottenere una comunicazione dei dati fra il software e la Shell di Python sono state sfruttate le API fornite direttamente dalla casa produttrice del software di calcolo strutturale.

Per le elaborazioni grafiche è stato usato il plottaggio automatico con la scrittura dello script dell'algoritmo, ed anche Microsoft Excel per calcoli e grafici di supporto al modello strutturale e all'algoritmo.

Per la modellazione della galleria è stato scelto un modello piano di una generica sezione, che nello specifico presenta la geometria di un anello circolare, poiché si è supposto che tale galleria sia realizzata con uno scavo meccanizzato.

Sono stati impostati le variabili per definire il modello, quali:

- Sistema di riferimento, impostato con coordinate polari sia per gli elementi nodi, che per gli elementi trave, per ottenere risultati facilmente controllabili;
- Caratteristiche geometriche della struttura, ottenute impostando un arco di circonferenza di raggio pari a 6,85 metri, discretizzato con 72 elementi in modo da posizionare un nodo geometrico ogni 5°.

- Modellazione dell'elemento strutturale, considerato come un elemento beam incastrato alle estremità;
- Geometria della sezione, in cui si è considerata una sezione rettangolare con base unitaria con spessore pari 0,7m;
- Proprietà del materiale, caratterizzato da un legame elastico lineare con i valori classici del calcestruzzo;
- Modellazione della presenza del terreno mediante molle a rigidità trascurabile, poste nella direzione radiale e tangenziale;

La rigidità delle molle è trascurabile ma sono state effettuate diverse analisi al fine di analizzare l'incidenza di tale parametro nel risultato finale e capire se si può davvero trascurare tale rigidità.

Occorre notare che la struttura modellata sul software SAP2000 che riceve gli individui sotto forma di carichi deve essere necessariamente vincolata, pertanto una parte del carico applicato verrà inevitabilmente assorbita dai vincoli (molle) proporzionalmente alla loro rigidità. Questo effetto è dovuto alla nascita di reazioni nodali dovute alle molle, che vincolano la struttura nello spazio, e reagiscono in direzione radiale e tangenziale, opponendosi al carico applicato.

Questo aspetto è molto rilevante, in quanto influisce sia nel range di variazione dei coefficienti di amplificazione delle forme di carico, che dovranno essere opportunamente tarati caso per caso, sia nel valore da impostare come rigidità delle molle.

Una volta realizzato il modello si è passati alla sua taratura per avere la certezza dell'output fornito da quest'ultimo, prendendo in considerazione il solo effetto dovuto al carico esterno, tralasciando quindi gli effetti dovuti al peso proprio, che in questa sede non viene preso in considerazione. Con questa impostazione, il modello utilizzato sarà il seguente:

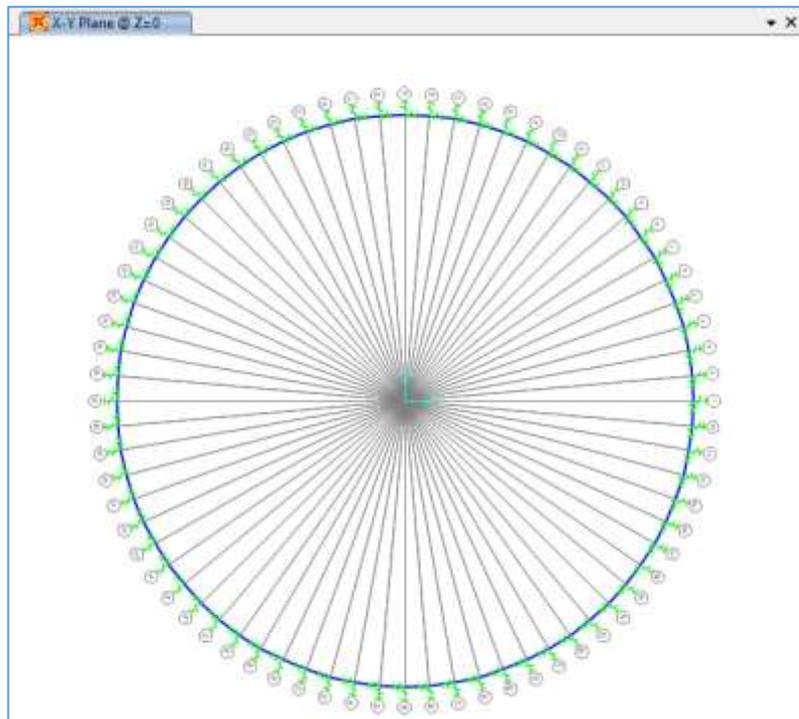


Figura 10 Anello di rivestimento modellato con barre e molle (Sap2000)

6. Codice di calcolo FLAC2D

L'analisi tenso-deformativa presentata nel seguito è stata condotta impiegando il codice di calcolo FLAC2D 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting Group nel 1986. Tale codice consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio bidimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di comportamento, di tipo elastico o plastico, e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite.

Tale metodo si basa sulla discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame, attraverso la sostituzione delle derivate con quozienti di differenze finite. In questo modo, le equazioni differenziali vengono trasformate in equazioni algebriche, da risolversi in successivi passi di calcolo.

L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano denominato “*esplicito per integrazione diretta nel tempo*” (explicit time marking), il quale è in grado di lavorare agevolmente e molto velocemente per sistemi con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità (la possibilità di giungere al collasso non è infatti limitata da problemi di stabilità numerica, quale l'invertibilità di matrici).

L'adattamento del metodo alle differenze finite a casi di griglia di forma qualunque segue l'approccio di Wilkins M.L.. La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata un reticolo, in genere di maglie quadrilatera, in corrispondenza dei cui nodi (gridpoints) sono definite le grandezze in gioco.

È allora possibile approssimare la derivata prima di una funzione rispetto a una variabile indipendente, con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione stessa nel passare da un nodo ad uno contiguo, e la corrispondente variazione della variabile indipendente. Con riferimento alla figura seguente, può assumersi ad un certo istante t una delle seguenti equivalenze:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x}$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i-1,j}^t}{2\Delta x}$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \approx \frac{u_{i,j}^t - u_{i-1,j}^t}{\Delta x}$$

In modo analogo si opera per le derivate rispetto ad y , e per le derivate di ordine superiore.

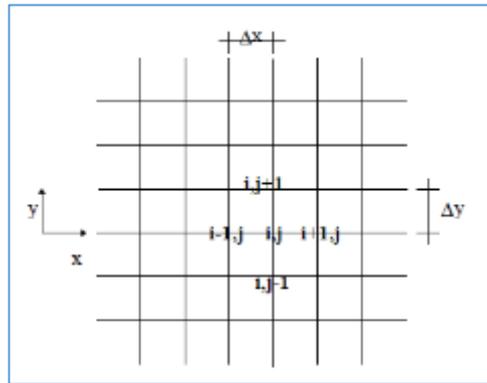


Figura 11 Griglia con “gridpoints” di derivazione (FDM)

La legge costitutiva del materiale viene espressa nella seguente forma:

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \sigma_{i,j}^t = E \cdot \frac{u_{i+1,j}^t - u_{i,j}^t}{\Delta x}$$

- Il codice di calcolo FLAC usa uno schema di soluzione “*esplicito condizionatamente stabile*”, la cui sequenza di calcolo iterativo, illustrata schematicamente nella figura seguente, comprende i seguenti passi:
- per ogni nodo della griglia si valuta la massa m , la risultante delle forze esterne F_e (gravità, carichi esterni ...), la risultante delle forze interne F_i , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso, così che è possibile determinare la forza squilibrata agente sul nodo F_u (unbalanced force $F_u = F_e - F_i$);
- per ogni gridpoint si scrive l’equazione di Newton $F_u = m \cdot a$, tramite la quale è possibile determinare l’accelerazione del nodo in esame; integrando due volte l’accelerazione si ottiene la velocità e lo spostamento incrementale di ogni nodo;
- dal campo di spostamenti incrementali, è possibile risalire al campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, al campo di variazioni degli sforzi nel reticolo;
- la variazione degli sforzi comporta la modifica, per ogni nodo della griglia, della risultante delle forze interne e conseguentemente la necessità di rideterminare la F_u , dando inizio ad un nuovo passo di calcolo.
- Il processo iterativo ha termine qualora si ottenga una forza squilibrata che abbia un valore minore di una tolleranza prestabilita.

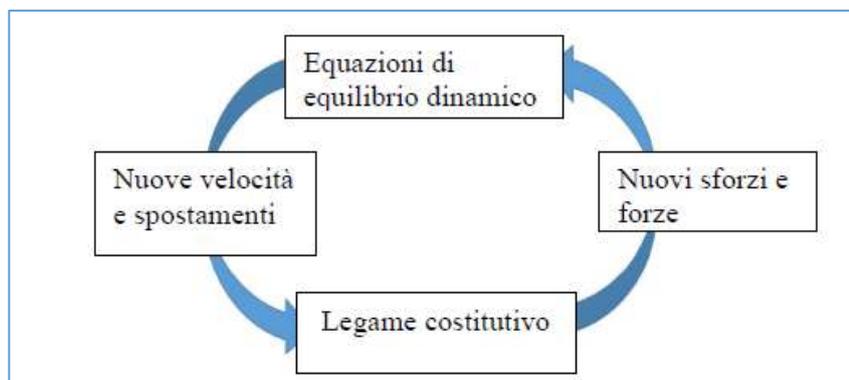


Figura 12 Processo risolutivo FDM

7. Realizzazione del modello su FLAC2D

Nei seguenti paragrafi di questo capitolo si descrive in generale come avviene la costruzione del modello geo-meccanico sul software FLAC2D. Per informazioni specifiche sulla creazione dei modelli numerici che, nello specifico, sono stati oggetto di analisi in questa tesi, si rimanda al capitolo seguente.

Fasi di calcolo (stages)

L'analisi viene modellata ed eseguita in tre stages:

1. *Condizione geostatica iniziale:*

Si rappresenta la fase iniziale nella quale si trova il terreno nelle condizioni indisturbate sotto uno stato tensionale geostatica.

2. *Scavo della sezione e conseguente rilascio tensionale del 60%:*

Simulazione dell'arrivo in sezione del fronte di scavo attraverso un rilascio tensionale. Si simula ciò attraverso l'introduzione di una distribuzione di forze radiali fittizie tali da riprodurre il progressivo rilascio tensionale. In particolare, nella modellazione mediante il codice FLAC ciò può essere eseguito applicando dei vincoli fittizi sui nodi dello scavo e valutando le corrispondenti reazioni ai vincoli. Queste ultime, cambiate di segno, sono applicate al contorno dello scavo e definiscono un sistema di forze radiali che sono progressivamente ridotte durante le diverse fasi di analisi, simulando il rilascio tensionale dovuto all'avanzamento del fronte di scavo.

3. *Installazione del rivestimento ed ulteriore rilascio tensionale:*

Si installa il rivestimento e si completa il rilascio tensionale, questo farà sì che il rivestimento si carichi.

Impostazione della geometria

La definizione della geometria è uno degli aspetti chiave dell'analisi. A seconda se il modello vuole rappresentare una galleria profonda oppure una galleria superficiale, la geometria del modello cambia seguendo le seguenti linee guida.

Si definisce galleria superficiale uno scavo longitudinale in sotterraneo, la cui perturbazione dell'equilibrio nel terreno arriva a coinvolgere il piano campagna, con conseguente perturbazione dello stato tensionale e cedimenti in superficie. Se ciò non avviene allora la galleria può considerarsi profonda, e quindi la superficie non risentirà degli effetti dello scavo. Solitamente si assume che una galleria è profonda se la copertura è maggiore di 5 volte il diametro della galleria.

Modello geometrico per gallerie profonde

Per le gallerie profonde si ricorre ad un dominio quadrato al cui centro si colloca lo scavo. Le dimensioni del modello devono essere tali che la perturbazione per effetto dello scavo non dovrà coinvolgere le frontiere del modello stesso. Pertanto tra il bordo dello scavo e le frontiere del dominio vi deve essere una distanza di almeno 10 volte il diametro.

Modello geometrico per gallerie superficiali

Per le gallerie superficiali si deve tener conto del fatto che le frontiere laterali e quella inferiore del dominio non devono essere raggiunte dalla perturbazione dello scavo pertanto le si collocherà ad una distanza di 10 volte il diametro della galleria. Per quanto riguarda la frontiera superiore, questa rappresenta il piano campagna pertanto sarà collocata ad una distanza realistica dallo scavo, la cosiddetta copertura, in modo tale che rispetto ad essa la galleria sia collocata ad una profondità pari a quella reale.



Figura 13 Stato tensionale per gallerie superficiali e profonde

Generazione della mesh

La mesh che adotta il software delimita zone quadrangolari, è importante che lo scavo sia discretizzato con un numero preciso di nodi che è 72, e che la mesh sia radiale almeno nelle vicinanze dello scavo e che sia abbastanza fitta.

La mesh viene generata mediante il *Virtual Editor* dell'interfaccia grafica di FLAC. Viene definito virtuale poiché tali input vengono creati in uno spazio diverso da quello rappresentato nel pannello Model; una volta terminata la procedura di definizione della griglia da parte dell'utente sarà quindi necessario premere il pulsante execute, così facendo, quanto disegnato viene riportato nel FLAC. La griglia risulta quindi visibile nel pannello Model, mentre nel pannello Record vengono riassunte le istruzioni che sarebbero state necessarie per costruire la griglia. Nelle figure seguenti vengono riportate le schermate relative al virtual editor.

L'utente può decidere di apportare delle modifiche alla griglia tramite il pulsante Edit (attenzione stiamo ancora nella sezione Virtual, ossia tutto quello che abbiamo creato non è stato inviato al FLAC).

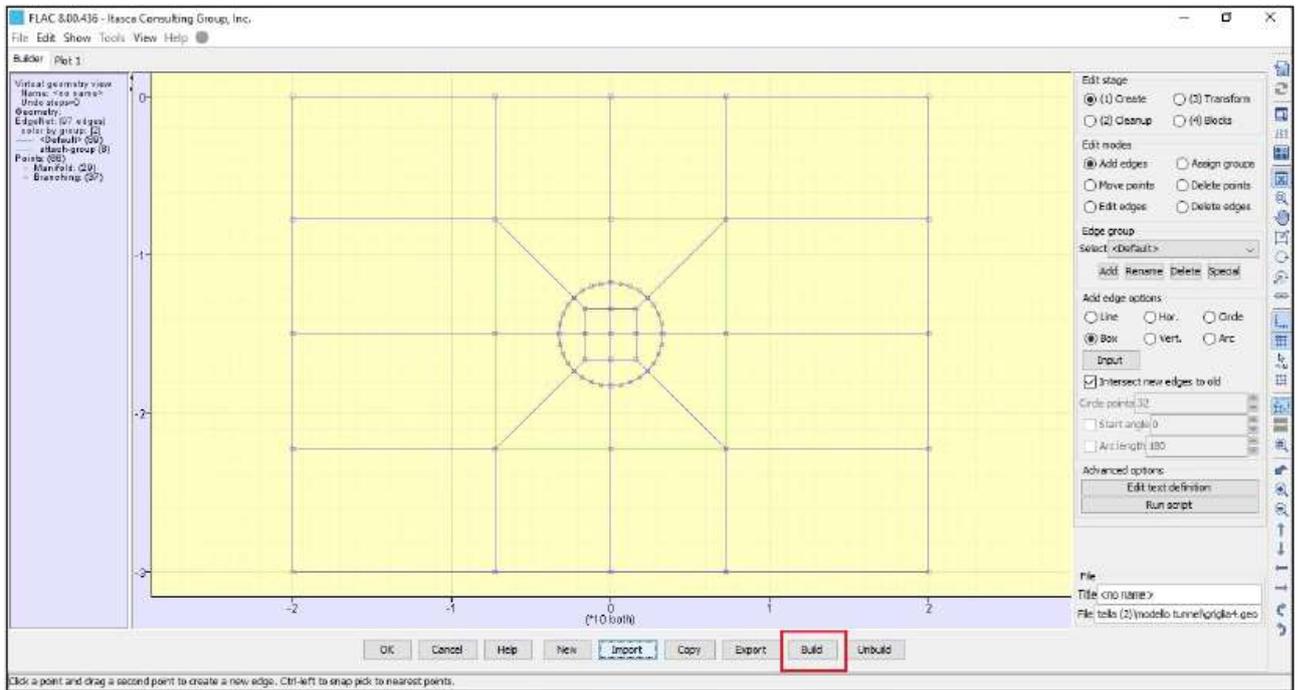


Figura 14 FLAC2D: Virtual editor - Build

Premuto il pulsante Build e quindi il tasto Ok si ottiene la schermata seguente che rappresenta la griglia creata con un grado di infittimento delle mesh che il programma assegna automaticamente. Si apportano modifiche a tale griglia tramite il pulsante Edit (attenzione stiamo ancora nella sezione Virtual, ossia tutto quello che abbiamo creato non è stato inviato al FLAC) in modo da gestire meglio l'infittimento della mesh.

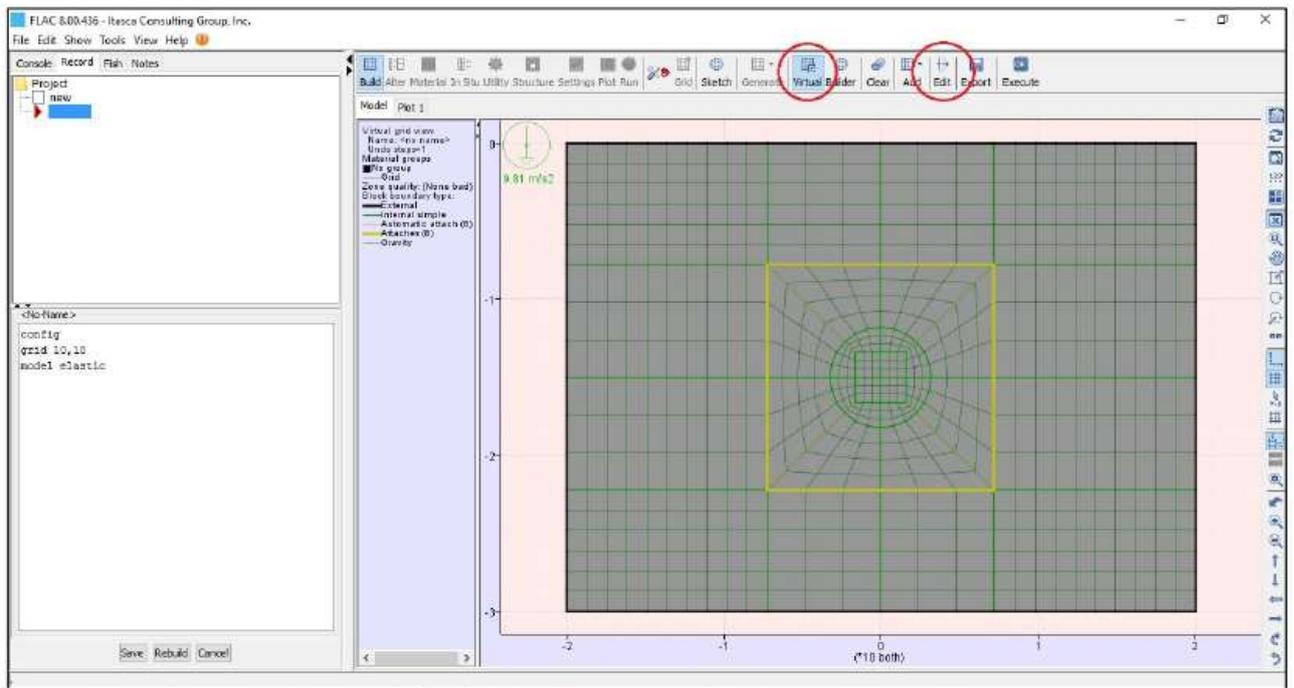


Figura 15 Virtual editor

Una volta eseguite tutte le modifiche del caso viene mandato il tutto al FLAC (tramite il tasto execute) ed è quindi possibile visualizzare la griglia nel pannello Model, ed i relativi comandi nel

pannello Record. Una volta definita la geometria e la mesh del modello si procede alla definizione dei materiali, condizioni al contorno, stato tensionale iniziale, ecc.

Leggi di comportamento del materiale

Nella sezione “Material” dell’interfaccia grafica è possibile creare ed assegnare alla griglia la tipologia di materiale e il modello costitutivo che ne regola il comportamento. Tramite il pulsante Assign si viene reindirizzati ad una finestra in cui si può scegliere se eseguire l’assegnazione della tipologia di materiale su tutta la griglia o soltanto su porzioni di essa. Il materiale “null” viene utilizzato per rappresentare dei fori (p.e. scavi) nella griglia che schematizza il modello di rappresentazione.

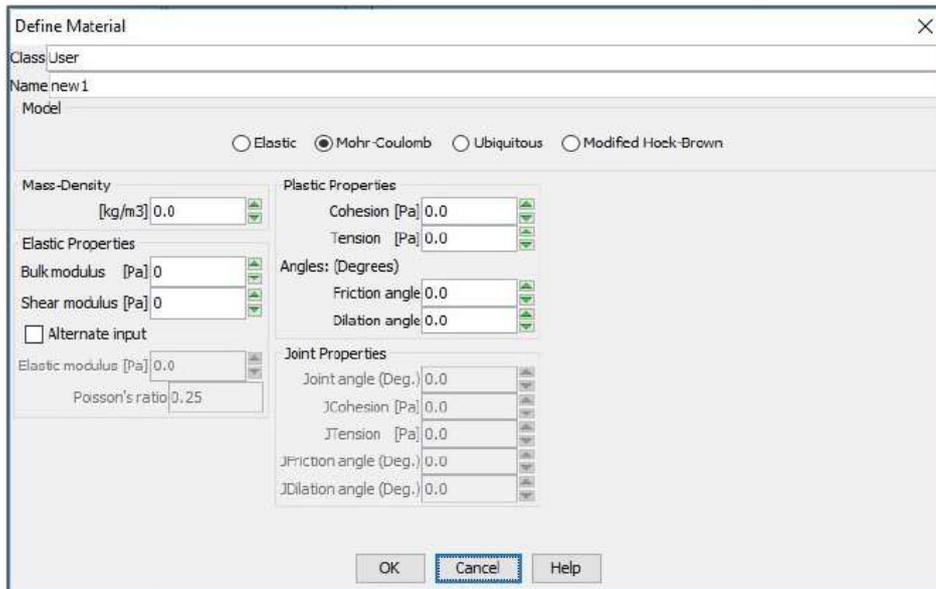


Figura 16 FLAC 2D: Define new material

Criterio di rottura di Mohr-Coulomb

Il codice di calcolo consente di adottare un modello di comportamento del terreno elastico-perfettamente plastico.

Uno dei criteri di rottura adottati è quello di Mohr-Coulomb, con legge di flusso associata e resistenza a trazione $\sigma_t = 0$. La funzione di plasticizzazione, definita dal criterio di rottura, consente di individuare quelle zone di terreno in cui lo stato tensionale ha superato il limite, al di sotto del quale il materiale considerato mantiene un comportamento elastico, e che sono quindi soggette a sollecitazioni tali da comportare deformazioni irreversibili nell’ammasso.

Per un generico stato di sforzo, individuato dalle tensioni principali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è rappresentato dalle seguenti equazioni lineari:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \pm 2 \cdot \left(c' \cdot \cos(\phi') + \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2} \cdot \sin(\phi') \right) \end{aligned}$$

Il criterio di Mohr-Coulomb è rappresentato, nello spazio delle tensioni principali, da una piramide a base esagonale non regolare con la trisettrice nel primo ottante:

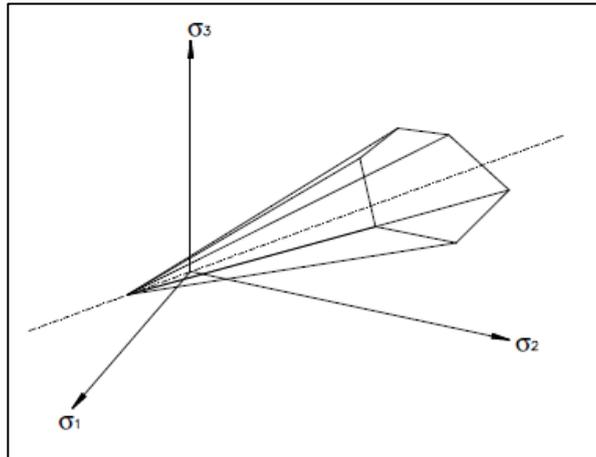


Figura 17 Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nel piano 3D delle tensioni principali

Nel criterio di rottura di Mohr-Coulomb la resistenza al taglio non è influenzata dallo sforzo principale avente intensità intermedia; la resistenza del materiale è variabile in funzione dello stato di sforzo esistente.

Criterio di rottura di Hoek-Brown

La resistenza di un ammasso roccioso è solitamente espressa secondo il criterio di rottura di Hoek-Brown (1980) riportato nella forma generalizzata nell'equazione seguente.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

in cui:

- σ_1 = Massima tensione principale a rottura;
- σ_3 = Minima tensione principale a rottura;
- σ_c = Resistenza a compressione monoassiale della roccia;
- m = Costante empirica legata alla resistenza attritiva;
- s = Costante empirica legata alla resistenza coesiva;
- a = Costante empirica basata sulla qualità dell'ammasso roccioso.

Nel caso in cui l'ammasso roccioso sia di buona qualità, la costante a può essere considerata pari a 0.5, mentre le costanti empiriche m ed s possono essere stimate in base alla qualità dell'ammasso roccioso e della modalità di scavo:

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

in cui:

- m_i = Valore di m per la roccia intatta;
- GSI = Geological Strength Index;

- D = Fattore di disturbo.

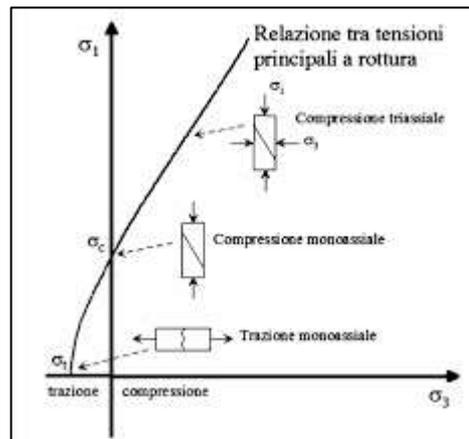


Figura 18 Criterio di rottura di Hoek-Brown

Condizioni al contorno

La costruzione di un modello numerico, basato su una formulazione di tipo geo-meccanico, comporta delle considerazioni aggiuntive non solo dal punto di vista delle proprietà dei materiali, ma anche in termini di condizioni iniziali e al contorno.

Dal punto di vista meccanico sono state imposte le seguenti condizioni di vincolo sul contorno del dominio:

- spostamenti orizzontali nulli in corrispondenza delle frontiere verticali;
- spostamenti verticali nulli lungo le frontiere inferiore e superiore; oppure spostamenti liberi lungo la frontiera superiore se coincidente con il piano campagna (nel caso di gallerie superficiali),
- spostamenti verticali e orizzontali nulli agli spigoli (per le gallerie superficiali si vincolano solo gli spigoli inferiori).

8. Codice di calcolo Rocscience RS2

RS2 anche conosciuto come Phase 2 è un software di analisi agli elementi finiti di modelli bi-dimensionali per applicazioni di meccanica delle terre e meccanica delle rocce. RS2 può essere impiegato per un ampio range di problemi di ingegneria geotecnica, inclusi: scavi, stabilità di pendii, problemi di consolidazione, analisi di scavi in sotterraneo multistage e analisi del rivestimento di gallerie, oltre che problemi di analisi della stabilità in condizioni di moto di filtrazione, analisi probabilistiche e dinamiche.

Possono essere semplicemente modellati e analizzati modelli complessi eseguiti in diverse fasi costruttive, come ad esempio nella modellazione dello scavo di gallerie, caverne in sotterraneo, cave a cielo aperto, pendii, dighe in terra e rilevati.

Può essere riprodotto il meccanismo di rottura progressiva oltre la possibilità di condurre analisi di tipo SSR (Shear Strength Reduction Method) al fine di calcolare il fattore di sicurezza globale. Quest'ultima analisi può essere condotta su una grande varietà di problemi impiegando diversi criteri di rottura per i materiali inclusi Mohr-Coulomb e Hoek-Brown generalizzato. Ciò consente un confronto speditivo tra l'analisi FEM e quella in condizioni di equilibrio limite.

I materiali geotecnici possono essere rappresentati con diversi tipi di leggi costitutive: elastica, elastica perfettamente plastica, elastoplastica incrudente o rammollente. Inoltre possono essere impiegati diversi criteri di rottura: Mohr-Coulomb, Generalized Hoek-Brown e Cam-Clay.

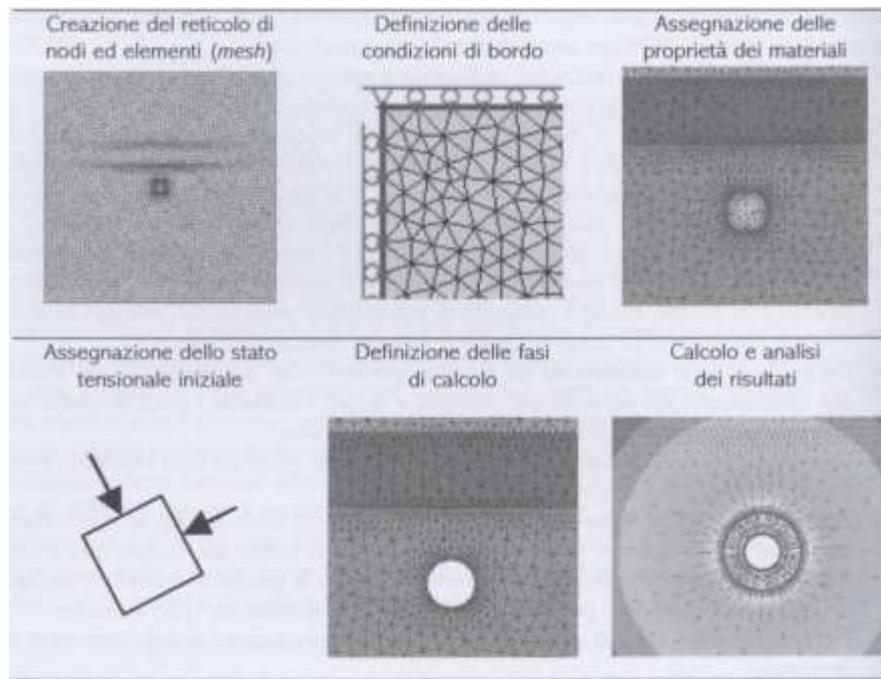


Figura 19 Le fasi di un'analisi in un software FEM

Il metodo degli elementi finiti (FEM, dall'inglese Finite Element Method) è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche.

In generale, il metodo degli elementi finiti è il metodo scelto per tutti i tipi di analisi per la meccanica strutturale (per esempio per calcolare la deformazione e la tensione di corpi rigidi o la dinamica delle strutture).

Il Metodo F.E.M. si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute. Nel continuum, ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee.

La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (mesh) composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata (triangoli e quadrilateri per domini 2D, tetraedri e esaedri per domini 3D). Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è assunta essere espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma (*shape functions*). Da notare che talora la funzione viene approssimata, e non necessariamente saranno i valori esatti della funzione quelli calcolati nei punti della mesh, ma i valori che forniranno il minor errore su tutta la soluzione. In altre parole si cerca la soluzione al problema nei nodi della mesh e la si approssima all'interno degli elementi della mesh stessa.

L'esempio tipico di funzioni di forma, è quello che fa riferimento a funzioni polinomiali, sicché la soluzione complessiva del problema viene approssimata con una funzione polinomiale a pezzi. Il numero di coefficienti che identifica la soluzione su ogni elemento è dunque legato al grado del polinomio scelto. Questo, a sua volta, governa l'accuratezza della soluzione numerica trovata.

Nella sua forma originaria, e tuttora più diffusa, il metodo agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere problemi poggianti su leggi costitutive di tipo lineare. Tipici i problemi di sforzi - deformazioni in campo elastico. Alcune soluzioni più raffinate consentono di esplorare il comportamento dei materiali anche in campo fortemente non lineare, ipotizzando comportamenti di tipo plastico o visco-plastico. Inoltre, si considerano talora problematiche accoppiate, all'interno delle quali si possono risolvere simultaneamente diversi aspetti complementari riconducibili ciascuno per conto proprio ad un'analisi F.E.M. separata. Tipico in questo senso il problema geotecnico del comportamento di un dato terreno (ambito geo-meccanico) in presenza di moti di filtrazione di falda (ambito idrogeologico).

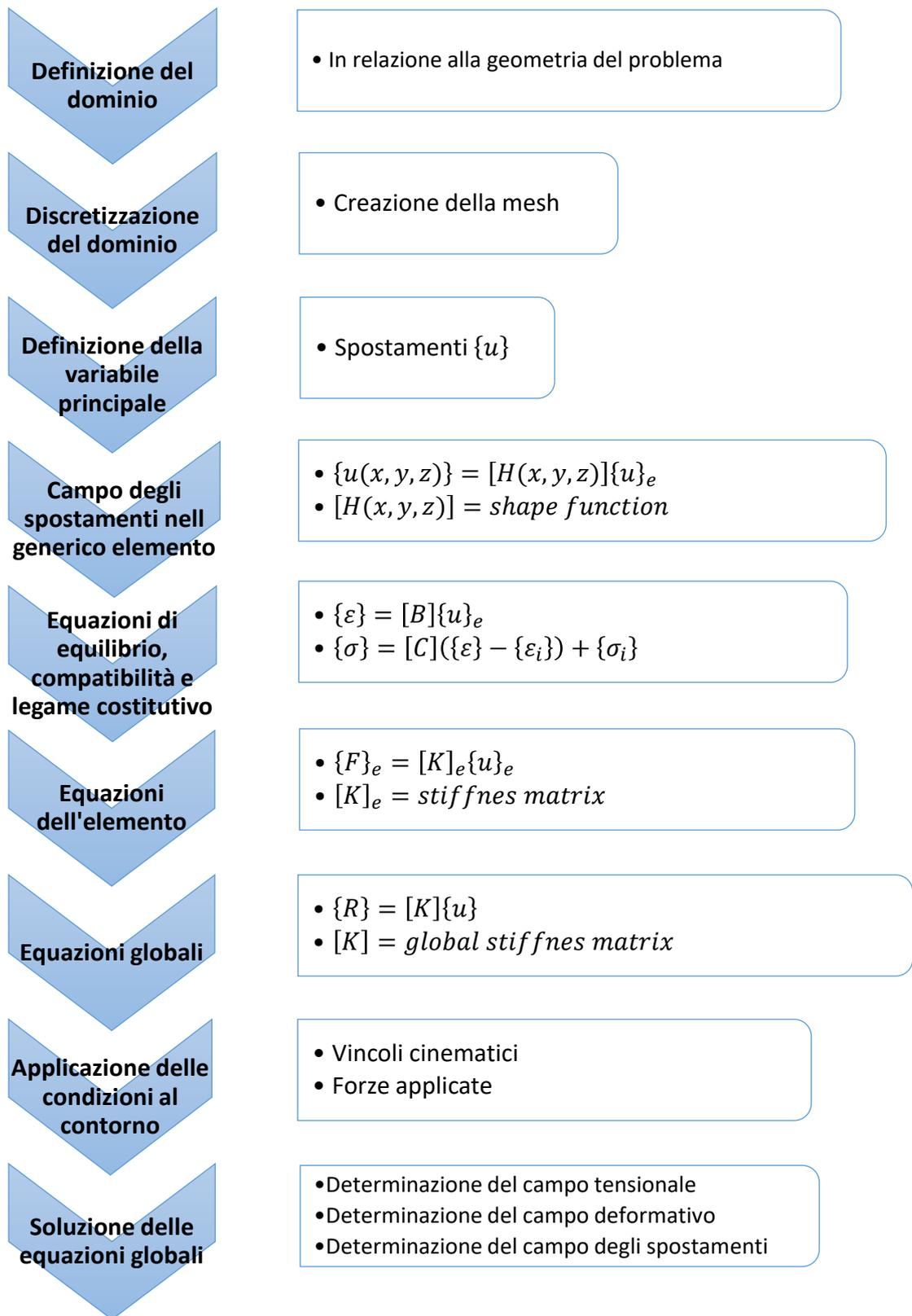


Figura 20 Le fasi risolutive del FEM

Simulazione dello scavo di una galleria con RS2

Geometria mesh e condizioni al contorno

Per i modelli di galleria profonda si adotta un modello di semispazio quadrato che conterrà lo scavo. Le dimensioni del dominio devono essere tali per cui la perturbazione dello stato tensionale, dovuta allo scavo della galleria, non raggiunga i confini del dominio. Pertanto si sceglie di collocare i contorni del dominio ad una distanza dallo scavo di dieci volte il diametro della galleria. I modelli di galleria profonda avranno dimensioni di 425x425 m. Per quanto riguarda le condizioni al contorno si sono adottati vincoli di tipo cinematico andando ad inserire carrelli su tutti e quattro i contorni del modello.

Per i modelli di galleria superficiale sono stati adottati gli stessi criteri dimensionali per il dominio delle gallerie profonde, tuttavia fa eccezione il bordo superiore che è stato fatto coincidere col piano campagna per forma e distanza dallo scavo. Anche in questo caso si sono adottate condizioni al contorno di tipo cinematico con carrelli sui bordi del dominio e cerniere agli spigoli evitando di vincolare il piano campagna.

Per quanto riguarda la mesh, sia per le gallerie profonde che per quelle superficiali si sono adottati elementi di tipo triangolare a tre nodi. La mesh ha un grado di densità variabile con un livello di infittimento maggiore vicino lo scavo.

Materiali

Nei diversi modelli si sono adottate diverse tipologie di materiale geotecnico, ma le analisi sono state svolte con il materiale che rimane sempre in campo elastico.

Il rivestimento è stato modellato con elementi beam allo stesso modo in cui è rappresentato nel software FEM di calcolo strutturale SAP2000. Quindi l'intero anello di rivestimento è discretizzato in 72 elementi beam intervallati da 72 nodi in modo da avere un nodo ogni cinque gradi rispetto al centro della galleria. Per tutti i modelli si è adottato un rivestimento in cemento armato, con spessore pari a 70 cm e con le seguenti proprietà meccaniche:

| <i>E</i> | <i>v</i> |
|-----------------|-----------------|
| <i>[GPa]</i> | <i>[-]</i> |
| 40 | 0,15 |

Anche il rivestimento lavora solo in campo elastico. Il peso proprio non è incluso nell'analisi.

Stato tensionale in sito

Per quanto riguarda i modelli di galleria profonda si è assunta una condizione tensionale geostatica di tipo costante su tutto il dominio, dando al software direttamente il valore delle tensioni principali nel semispazio e le direzioni principali in termini di l'angolo di inclinazione della tensione principale σ_1 rispetto all'asse orizzontale.

Invece, per i modelli di galleria superficiale lo stato tensionale geostatico, di tipo lineare con la profondità, è stato fatto computare al software in funzione della posizione del piano campagna, del peso specifico del terreno e del coefficiente di spinta a riposo k_0 (per la tensione orizzontale geostatica).

Stages

Per tutti i modelli di galleria analizzati sono stati impiegati tre stages, nel primo stage è rappresentata la condizione indisturbata (geostatica) del terreno, nel secondo stage è stato applicato un rilascio tensionale del 60% che simula l'arrivo in sezione del fronte di scavo, quindi prima che sia inserito il rivestimento. Nell'ultimo stage viene inserito il rivestimento definitivo in calcestruzzo armato che si carica della restante porzione di carico.

| | |
|---------------------------------------|--|
| STAGE 1 “Geostatico” | <i>Condizione di terreno indisturbato soggetto ad uno stato tensionale geostatico.</i> |
| STAGE 2 “Relax 60%” | <i>Si simula l'arrivo del fronte di scavo in sezione con un rilascio tensionale del 60%. Si rimuove il materiale all'interno dell'excavation boundary e si inserisce un carico interno pari al 40% dei carichi geostatici.</i> |
| STAGE 3 “Lining” | <i>Si inserisce il rivestimento definitivo e si rimuove il carico applicato allo stage precedente in modo da far avvenire il rimanente 40% di rilascio tensionale che va a caricare il lining.</i> |

Confronto tra RS2 e SAP2000

Interazione terreno-struttura

Affinché l'algoritmo genetico fornisca risultati attendibili vi deve essere una certa corrispondenza tra i due software FEM, ovvero a parità di carichi distribuiti applicati sul rivestimento questi devono restituire diagrammi di sforzo normale, momento flettente e rotazioni comparabili. Questo perché l'algoritmo genetico viene tarato sulla base del carico sul rivestimento letto in RS2.

I carichi radiali e tangenziali al contatto con il rivestimento sono calcolati a partire dalle tensioni σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} lette con una “query” nello stage “Relax_60%”, vengono poi, trasformate in tensioni radiali e tangenziali ai nodi del rivestimento mediante le formule dei cerchi di Mohr con le seguenti convenzioni.

| | |
|-------------------------------|---|
| Convenzione grafica | <i>Si assumono positive le tensioni normali di compressione e le tensioni tangenziali che, sull'elementino, suggeriscono una rotazione anti-oraria.</i> |
| Convenzione matematica | <i>Si assumono positive le tensioni normali di compressione e le tensioni tangenziali che, sulle facce negative dell'elementino, sono rivolte nella direzione positiva all'asse al quale sono parallele</i> |

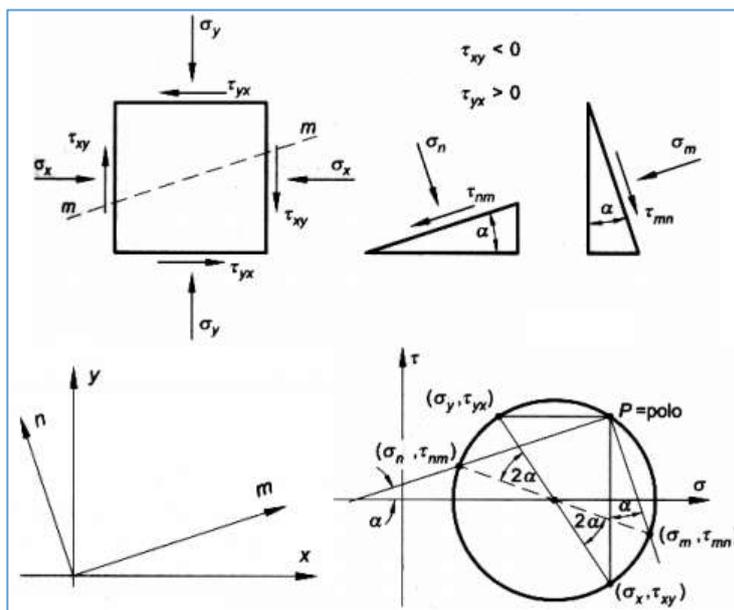


Figura 21 Cerchi di Mohr e convenzioni

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos(2\alpha) + \tau_{xy} \sin(2\alpha)$$

$$\tau_{mn} = -\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin(2\alpha) - \tau_{xy} \cos(2\alpha)$$

Una volta ottenuti tali carichi radiali e tangenziali bisogna notare che: questi non sono unicamente responsabili della deformazione di quest'ultimo ma causano anche una deformazione nei nodi della mesh del terreno.

Ciò significa che il carico effettivo che causa le sollecitazioni nel rivestimento è inferiore a quello così determinato. Se questi venissero applicati in SAP2000, sul modello di rivestimento vincolato da molle tangenziali e radiali di rigidità trascurabile, allora darebbero sollecitazioni e deformata molto maggiori a quelli previsti da RS2.

Il motivo è che essendo il rivestimento, per come è stato modellato, agganciato ai nodi della mesh del terreno, i suddetti carichi in parte deformano il rivestimento stesso ed in parte il terreno che si oppone con la sua rigidità. Il gioco di rigidità tra terreno e rivestimento fa sì che tale carico venga ripartito.

Da questa importante constatazione se ne deduce che, nel modello strutturale del lining, non può essere ignorata la rigidità delle molle e deve essere calibrata per essere il più rappresentativa possibile del comportamento del terreno.

Una volta nota la rigidità delle molle, si ha una certa corrispondenza tra i due software in termini di sollecitazioni e deformata. Inoltre è possibile determinare il carico netto che viene assorbito dal rivestimento sommando al carico applicato (forze nodali concentrate, tangenziali e radiali) le reazioni vincolari delle molle.

L'algoritmo genetico viene sfruttato per cercare i carichi che agiscono sul rivestimento e che generano lo sforzo normale, il momento flettente e le rotazioni derivati dal monitoraggio, trascurando la rigidità delle molle, proprio per evitare la loro considerazione nel modello semplificato di rivestimento.

Pertanto lo scopo dei capitoli che seguiranno sarà creare una casistica di modelli geotecnici per i quali si determineranno anche i carichi netti, passando attraverso la taratura delle molle, affinché si possa provare a far funzionare l'algoritmo genetico, non con le forme di carico radiale e tangenziale fornite dall'analisi FEM bensì con le *forme di carico nette*.

Taratura della rigidità delle molle

Ciò che si sta facendo su SAP2000 è l'analisi strutturale del rivestimento della galleria considerando l'interazione del terreno attraverso delle molle. Tale metodologia è conosciuta anche come Beam-Spring Method.

Il problema di interazione terreno-struttura nel caso di rivestimenti di gallerie in un mezzo isotropo lineare elastico è stato affrontato diverse volte ed esiste una sostanziale bibliografia che fornisce diverse relazioni tra la rigidità delle molle e i parametri di rigidità del terreno.

Di seguito si riportano alcune formulazioni presenti in letteratura.

Formulazioni proposte dall' US ARMY CORP OF ENGINEERS:

$$k_r = \frac{E b \theta}{1 + \nu} \quad - \quad k_t = \frac{0,5 k_r}{1 + \nu}$$

Dove:

- b = lunghezza dell'elemento beam considerato
- θ = angolo (rad) sotteso all'elemento beam
- E = modulo elastico del terreno
- ν = coeff. di Poisson

$$K_n = \frac{E}{R_{eq}(1 + \nu)} \quad - \quad K_t = \frac{1}{3} K_n$$

Formulazione proposta da Pierpaolo Oreste (1999):

$$K_n = (1,33 \div 2) \frac{E}{2 R_{eq}}$$

Si consideri che le molle sono introdotte per simulare il contatto con il materiale, ma l'interfaccia lining-terreno/roccia non può resistere a trazione quindi le molle devono disattivarsi se sollecitate a trazione e opporre una reazione vincolare se sollecitate a compressione.

Taratura della rigidità delle molle mediante algoritmo

Il problema della taratura delle molle è sensibile alla tipologia delle formulazioni impiegate. Infatti capita che formulazioni diverse diano risultati molto diversi con non trascurabile variazione nella soluzione dei modelli. Pertanto le formulazioni espresse in precedenza sono state impiegate per avere un'idea dell'ordine di grandezza delle rigidità.

La taratura di tutti i modelli è stata effettuata impiegando un codice scritto in linguaggio Python, mediante il quale: noti il carico tangenziale e radiale, letti nello stage nel quale si fa avvenire il rilascio tensionale prima dell'inserimento del liner; e presi come target i diagrammi di sforzo normale, momento flettente e rotazione. Si varia in maniera iterativa la rigidezza radiale e tangenziale delle molle del modello FEM in SAP2000 e se ne ricavano rotazioni e caratteristiche della sollecitazione. La rigidezza radiale e quella tangenziale variano in un range che va da 5000 kN/m a 2000000 kN/m.

Un sistema di calcolo dei punteggi analogo a quello adoperato nell'algoritmo genetico fornisce attraverso il calcolo dell'errore ed una stima dell'adattamento dei diagrammi ottenuti con quelli di target.

Pertanto iterativamente si andrà a cercare la combinazione di rigidezze radiali e tangenziali che da l'adattamento migliore.

In allegato il codice di taratura delle molle.

9. Studio di casi verosimili mediante modelli numerici

Lo scopo della seguente analisi è studiare come variano le forme di carico ed i diagrammi di sforzo normale, momento flettente e rotazioni al variare delle condizioni geomeccaniche, oltre che, alle condizioni di profondità dello scavo e di inclinazione del piano campagna.

Si vuole capire quali sono le forme di carico che l'algoritmo genetico deve ricercare e le diverse tipologie di target che potrebbero essere rilevate da strumenti di monitoraggio sull'anello di rivestimento.

Affinché possa essere sfruttato l'algoritmo genetico per ovviare al problema dell'interazione terreno-struttura, quindi evitare di incorrere nell'impiego di molle che simulano il terreno, è necessario correggere l'algoritmo in modo che questo vada a ricercare forme di carico simili a quelle dei carichi netti.

Si chiamano carichi netti quelli responsabili della sola deformazione del rivestimento e nei capitoli che seguono verranno determinati, per ciascuno dei casi analizzati. Questi sono i carichi letti al contatto terreno-rivestimento nello stage precedente a quello dell'inserimento del liner ai quali vengono sottratte le reazioni vincolari delle molle opportunamente tarate.

Pertanto, si mostrerà come variano le forme di carico e quelle di carico netto e gli andamenti di sforzo normale, momento flettente e rotazioni del rivestimento in diversi modelli numerici.

10. Modelli geo-meccanici di gallerie profonde

Galleria Profonda 1

Modello geo-meccanico

Il modello adottato per tale galleria ha forma quadrata di dimensioni pari a 425x425 m. La galleria ha diametro pari a 13,7 m ed il rivestimento è modellato con 72 elementi beam intervallati da 72 nodi, uno ogni 5 gradi.

Si sono adottate su tutti e quattro i lati condizioni al contorno di tipo cinematico che bloccano sia gli spostamenti in direzione orizzontale che quelli in direzione verticale.

Il materiale che costituisce il semi-spazio è isotropo elastico lineare ed ha le seguenti proprietà meccaniche:

| Modulo di Young | Coefficiente di Poisson |
|------------------------|--------------------------------|
| <i>[Mpa]</i> | <i>[-]</i> |
| 6000 | 0,3 |

Lo stato tensionale geostatico è assunto costante in tutto il dominio:

| σ_1 | σ_3 | σ_z | θ |
|--------------|--------------|--------------|------------|
| <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[°]</i> |
| 25 | 12,5 | 11,25 | 90 |

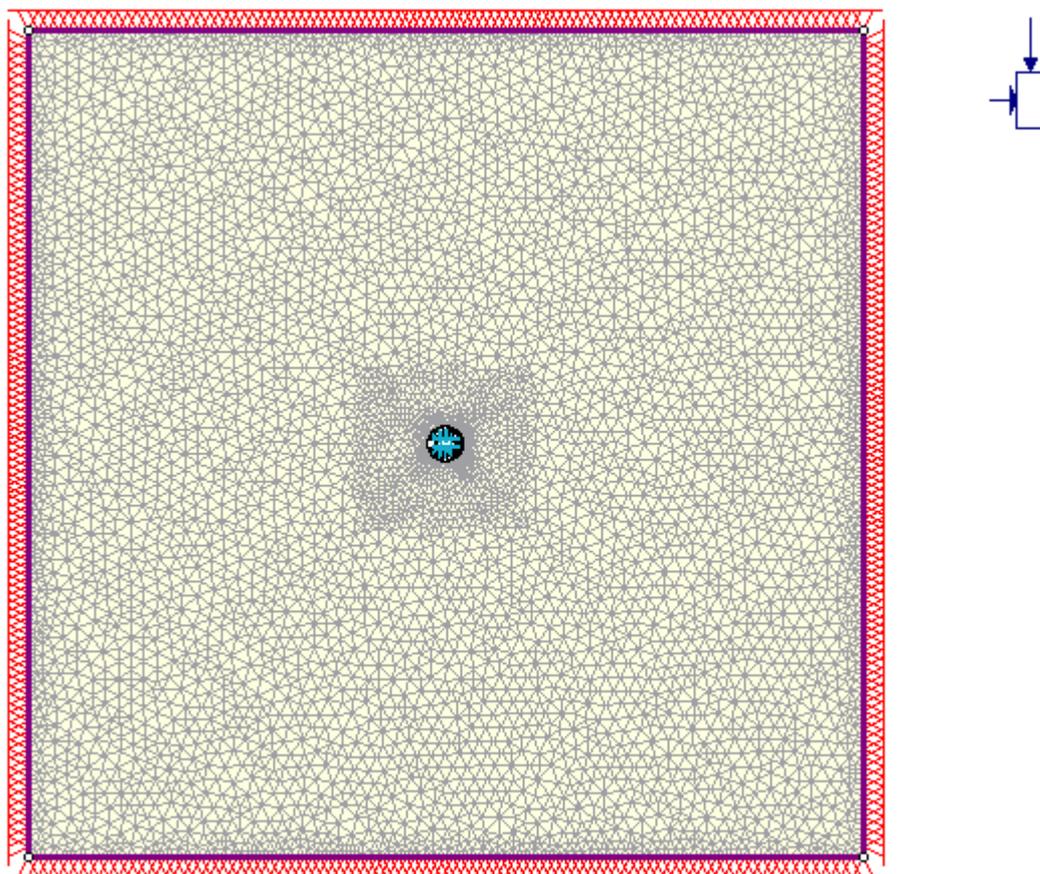


Figura 22 Profonda 1, RS2: Modello geo-meccanico

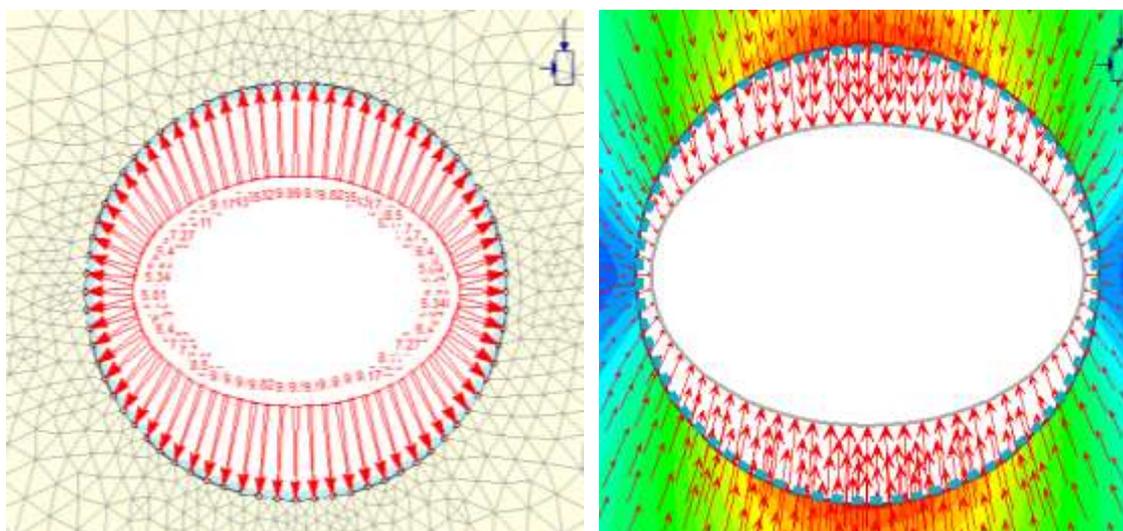


Figura 23 Profonda 1, RS2: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)

Modello geo-meccanico su FLAC 2D

Il modello adottato per tale galleria ha forma quadrata di dimensioni pari a 425x425 m.

Si sono adottate condizioni al contorno di tipo cinematico che bloccano sia gli spostamenti in direzione orizzontale che quelli in direzione verticale nei quattro vertici mentre sono bloccati gli spostamenti verticali sui bonds orizzontali e gli spostamenti orizzontali sui bonds verticali.

Il materiale che costituisce il semi-spazio è isotropo, elastico-lineare ed ha le seguenti proprietà meccaniche:

| Modulo di Young | Coefficiente di Poisson |
|------------------------|--------------------------------|
| <i>[Mpa]</i> | <i>[-]</i> |
| 6000 | 0,3 |

Lo stato tensionale geostatico è assunto costante in tutto il dominio:

| σ_1 | σ_3 | σ_z | θ |
|--------------|--------------|--------------|------------|
| <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[°]</i> |
| 25 | 12,5 | 11,25 | 90 |

La mesh su FLAC è di tipo radiale su tutto il dominio ed è costituita da elementi quadrangolari.

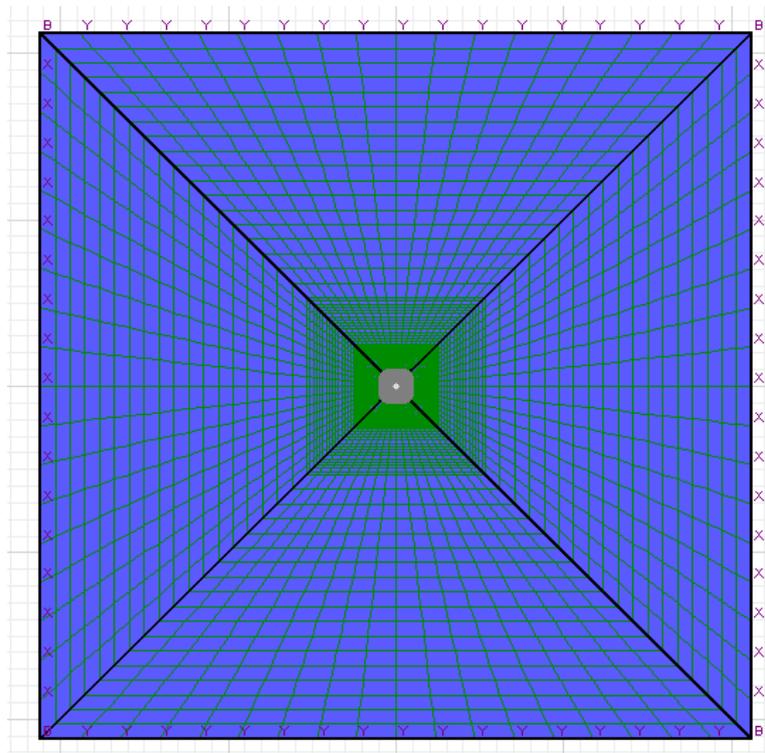


Figura 24 Profonda 1, FLAC2D: Modello geo-meccanico

La galleria ha diametro pari a 13,7 m ed il rivestimento è modellato con 72 elementi beam intervallati da 72 nodi, uno ogni 5 gradi.

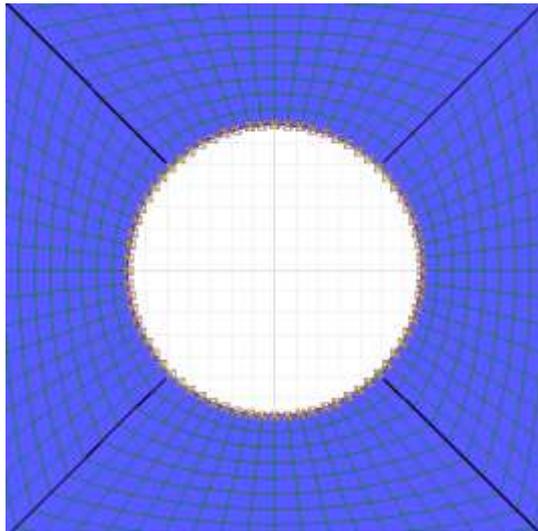


Figura 25 Profonda 1, FLAC2D: Particolare dello scavo

Per simulare il rilascio tensionale che avviene prima dell'installazione del rivestimento, viene impiegata una fish (*relax tractions*), mediante la quale si vincolano i nodi del rivestimento con delle cerniere e si determinano le reazioni. Tali vettori forza vengono applicati sotto forma di trazioni che vengono progressivamente ridotte consentendo la convergenza dello scavo. Nel primo stage non vi è presente nessuno scavo mentre nel secondo stage si riducono gradualmente le trazioni fino ad un valore pari al 40% di quello di partenza (per simulare un rilascio del 60%).

Nel terzo stage si introduce il rivestimento e si continua con il rilascio delle trazioni fino al loro completo annullamento. Questo consente al rivestimento di caricarsi. Nelle seguenti rappresentazioni sono mostrati i vettori forza nel secondo stage ed i vettori spostamento alla fine del terzo stage. È possibile notare l'ovalizzazione del rivestimento.

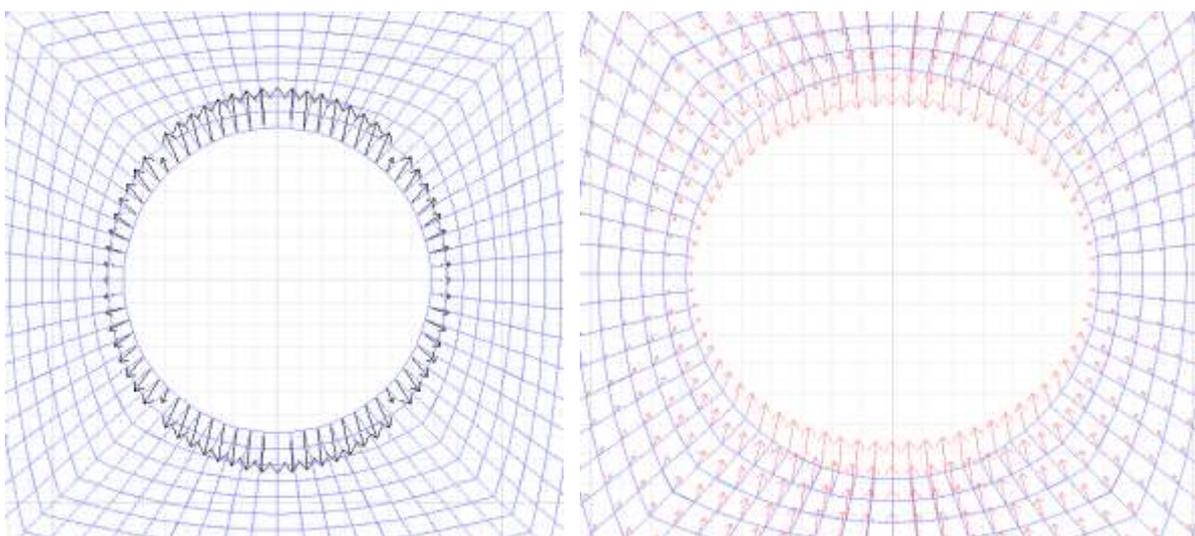
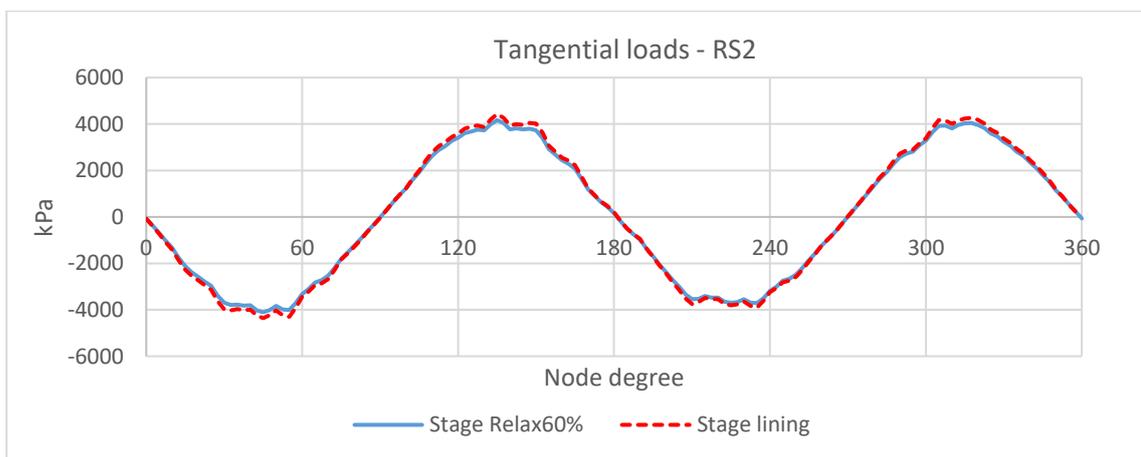
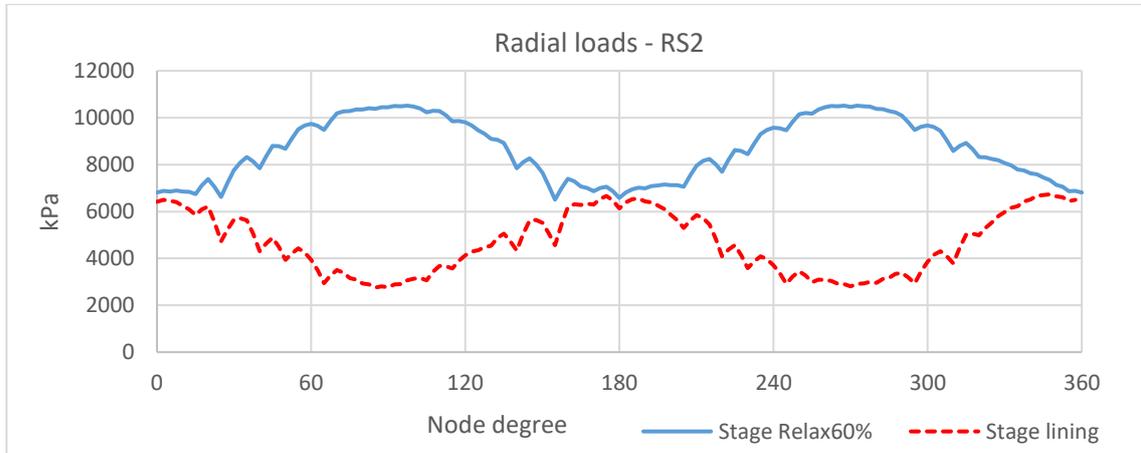


Figura 26 Profonda 1, FLAC: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)

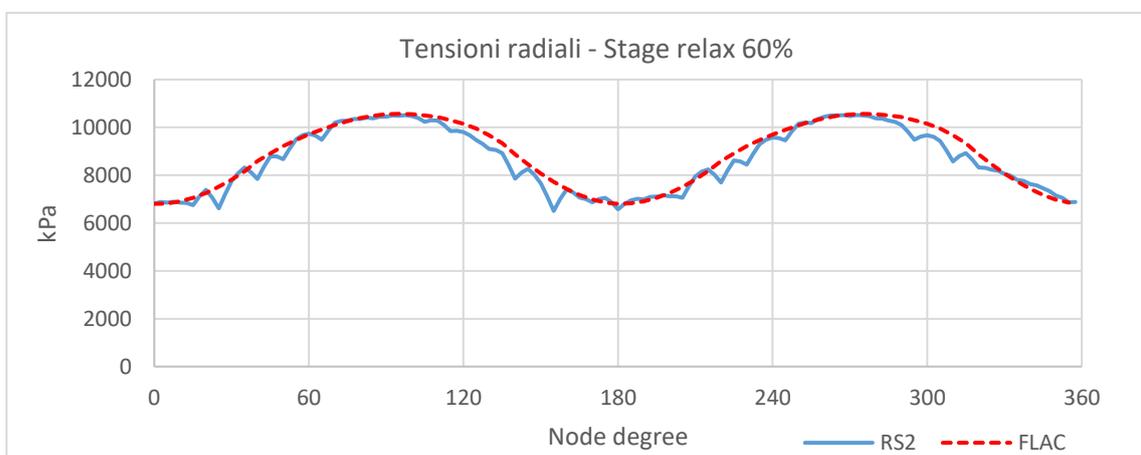
Risultati analisi con Rocscience RS2 e confronto con Flac2D

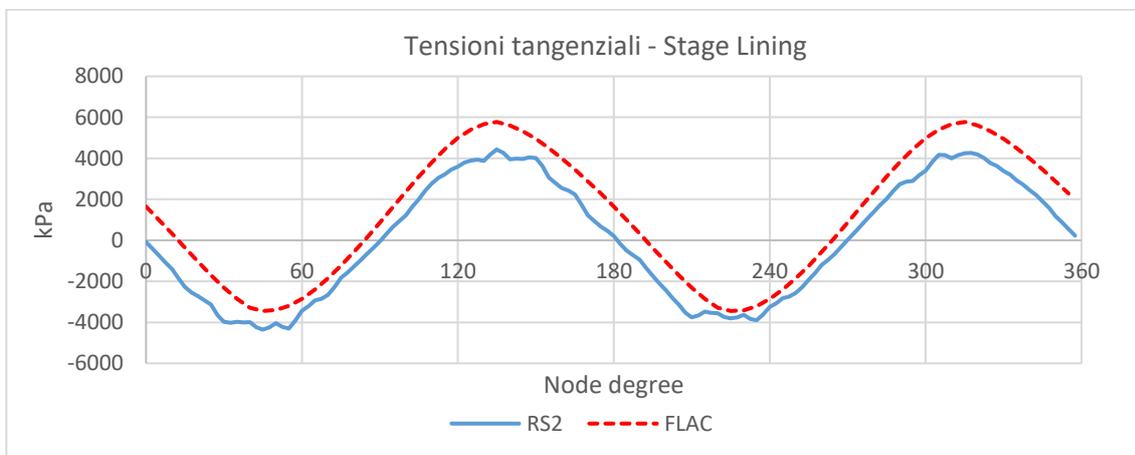
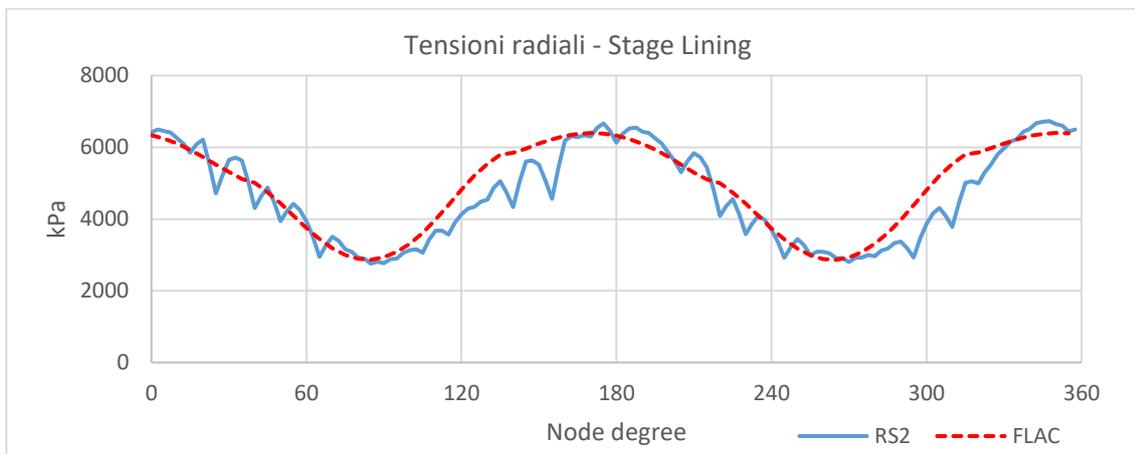
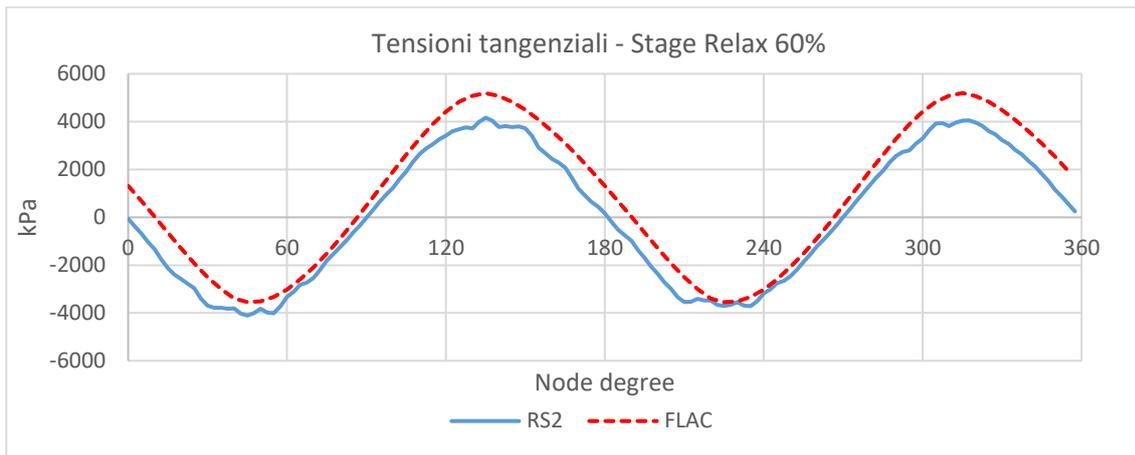
Si sono confrontati i risultati forniti da RS2 e da FLAC per quanto riguarda il presente modello geotecnico ed è facile notare dai seguenti grafici come, seppur lavorando in maniera diversa (FEM ed FDM) i due software forniscono gli stessi risultati.

Tensioni agenti sul contorno dello scavo nei differenti stage



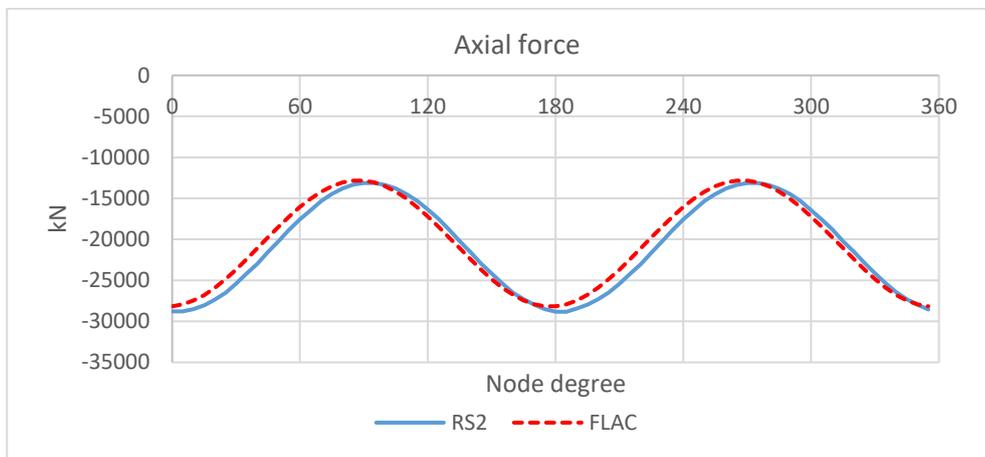
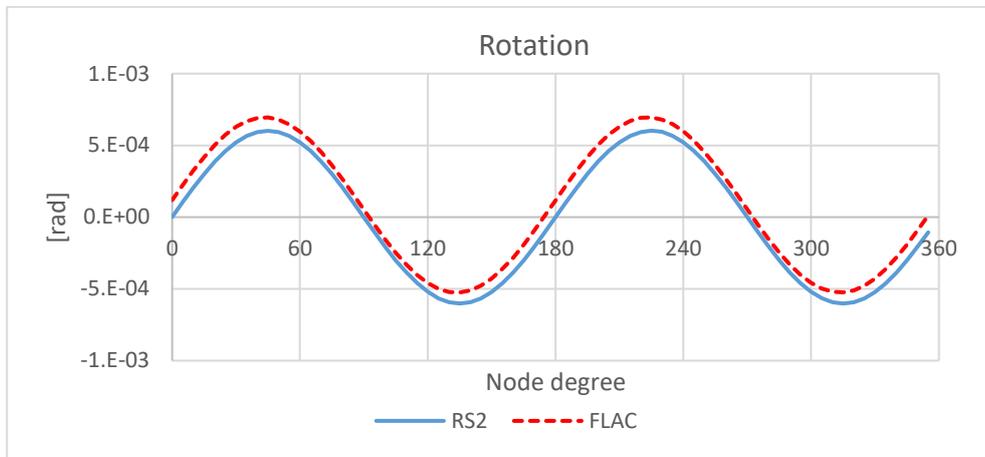
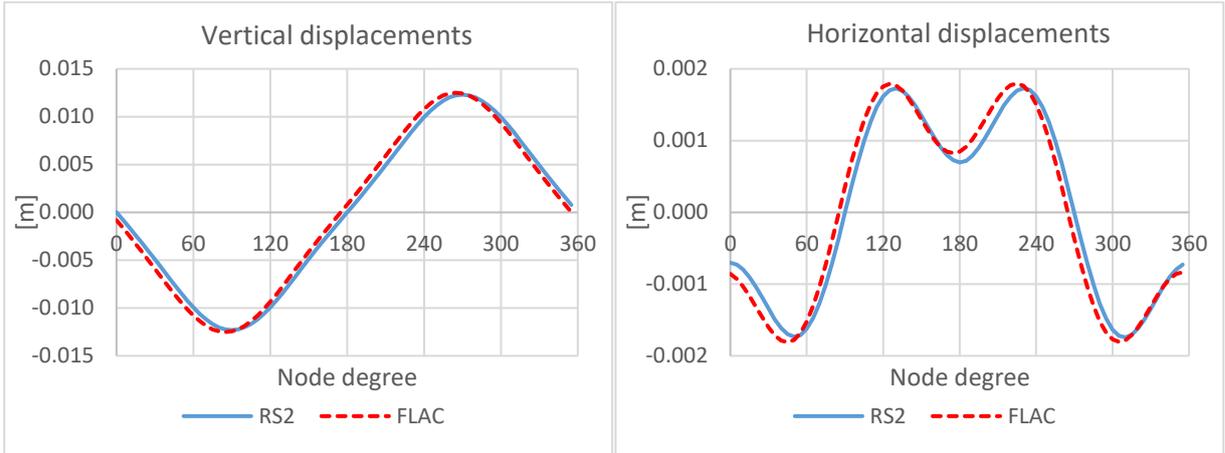
Si osserva come tra lo stage *relax 60%*, nel quale si fa avvenire il rilascio tensionale, e lo stage al quale si inserisce e carica il rivestimento (*stage lining*), vi è un cambio di forma nel carico radiale che diventa speculare nell'ultimo stage. Il carico tangenziale non cambia forma, resta abbastanza invariato.

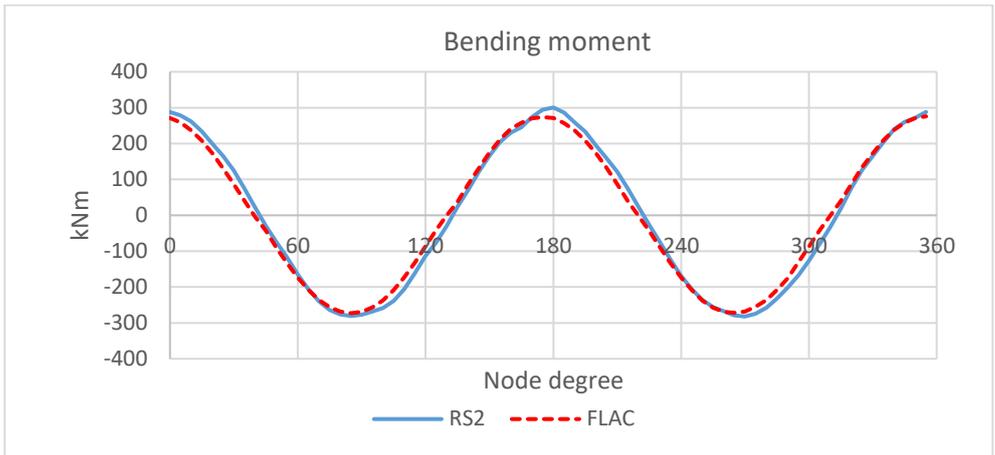




Il confronto tra i due software mostra l'equivalenza dei risultati ottenuti, sia in termini di tensioni che in termini di sollecitazioni e spostamenti.

Spostamenti, rotazioni e caratteristiche della sollecitazione

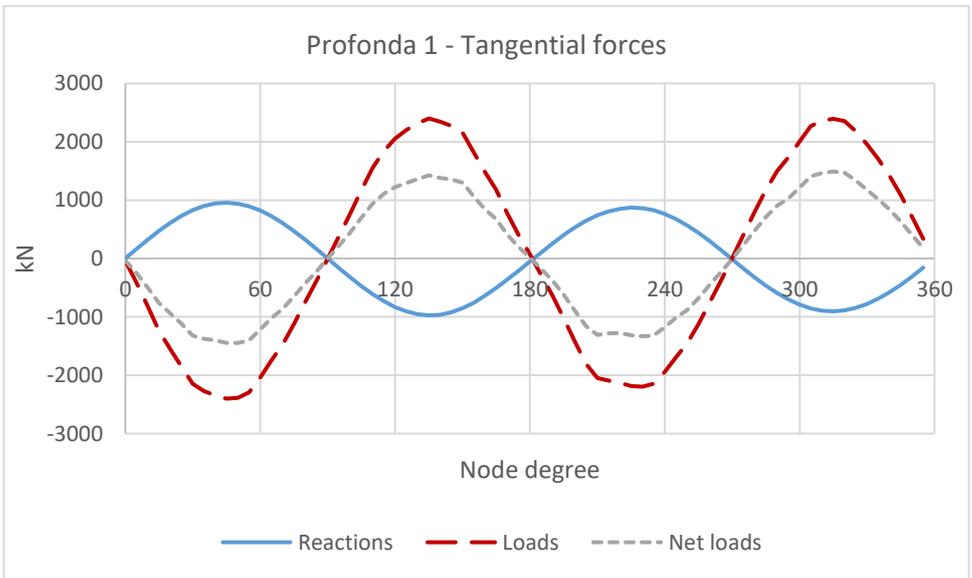
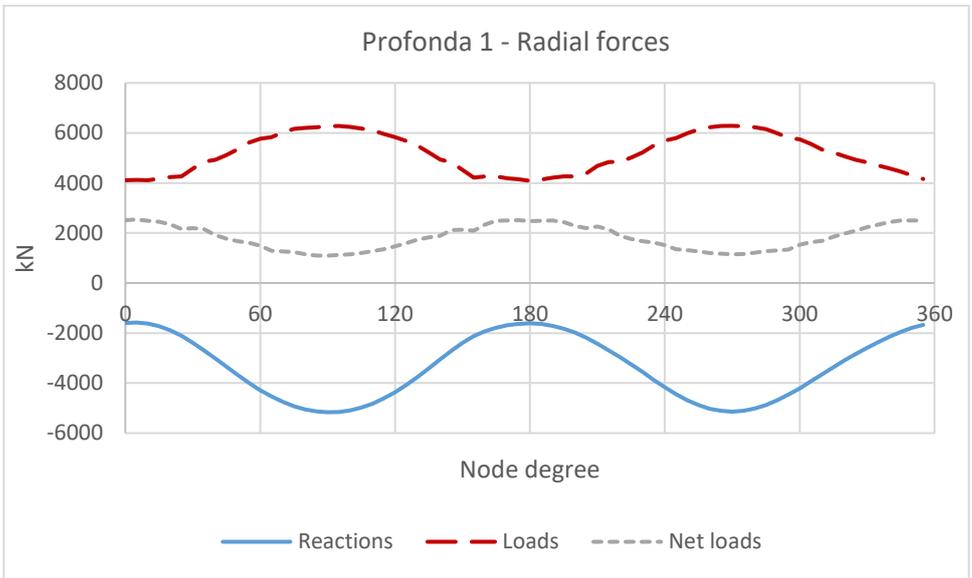




Taratura delle molle, reazioni vincolari e carico netto

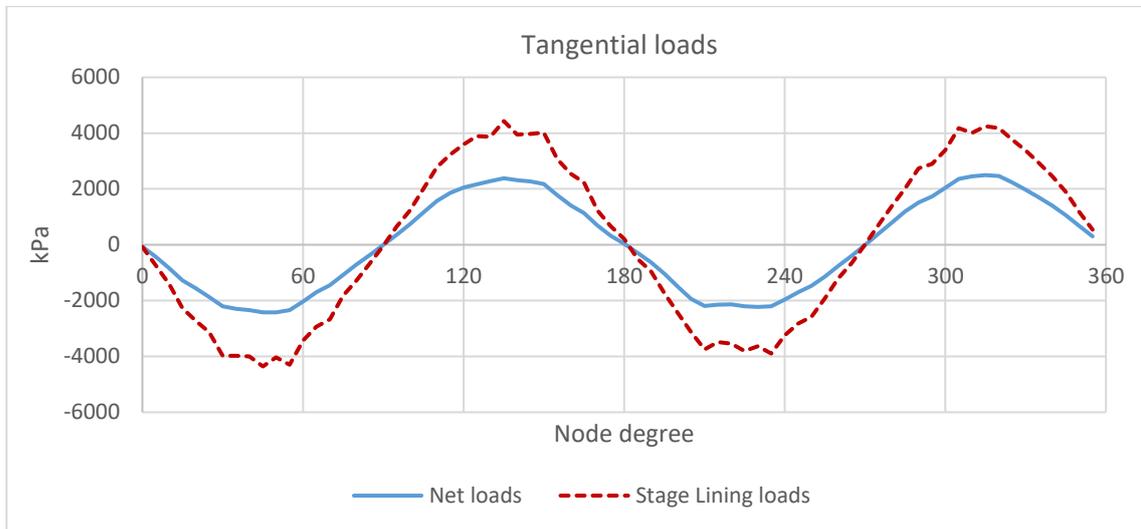
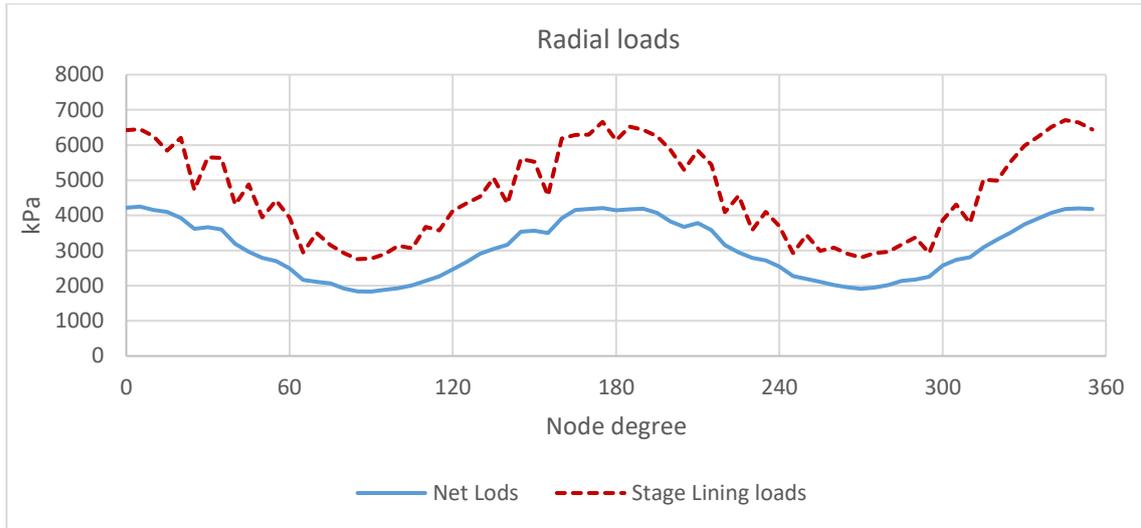
$$k_r = 500000 \text{ kN/m}$$

$$k_t = 300000 \text{ kN/m}$$



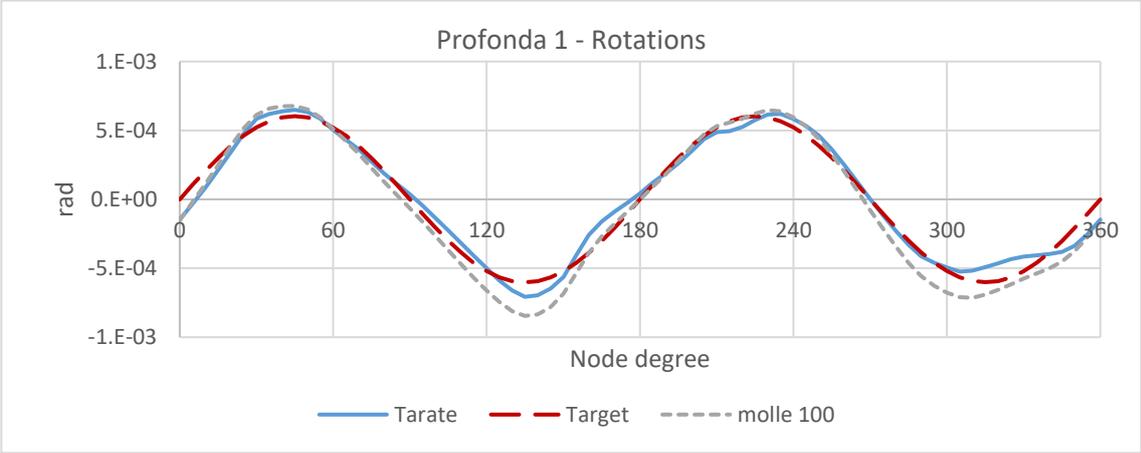
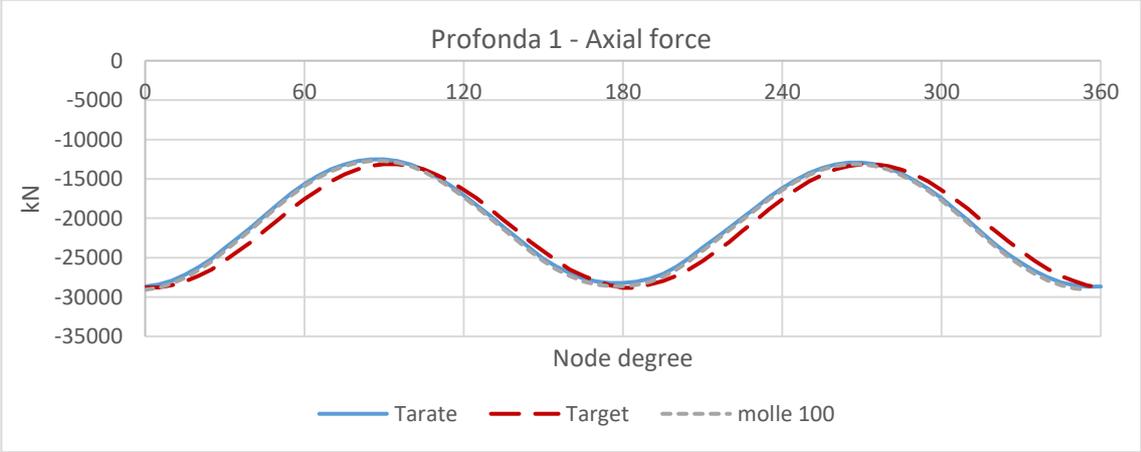
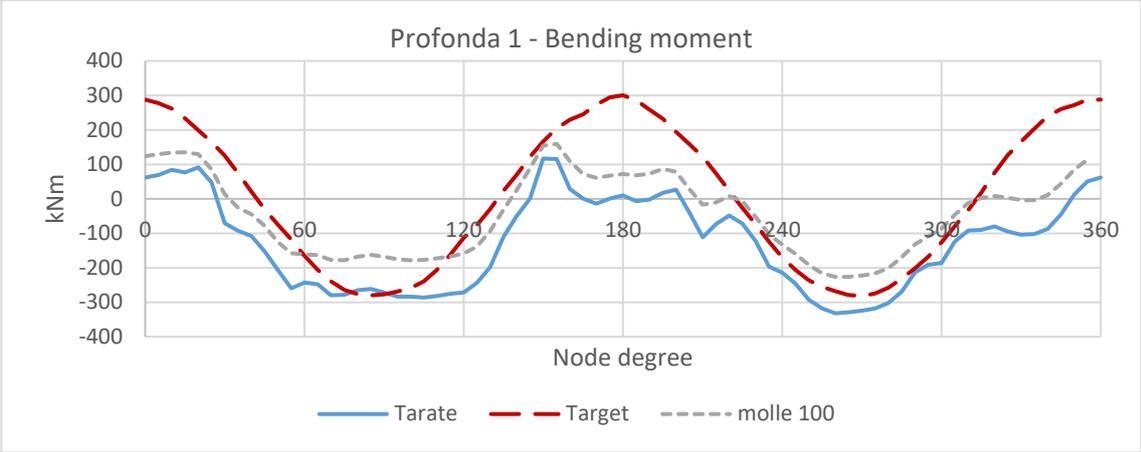
Si noti come i carichi netti siano ridotti in ampiezza rispetto ai carichi lordi. Inoltre, per quanto riguarda il carico radiale, si ha uno sfasamento della curva di circa 90 gradi. Il carico tangenziale resta perfettamente in fase. Questo stesso comportamento si riscontra anche tra i carichi allo stage “Relax 60%” e quelli allo stage “Lining”, come viene mostrato nei grafici precedenti.

Si potrebbe pensare che i carichi netti appena ricavati siano quelli che i software geotecnici forniscono allo stage “Lining”, tuttavia, pur avendo la stessa forma non sono responsabili di sollecitazioni e spostamenti nel rivestimento. Ciò significa che applicando i carichi dello stage “Lining” sul modello in SAP2000 non si hanno i diagrammi di M, N, R che dà il software FEM geotecnico. Si noti questa differenza nei due grafici seguenti.



Si conclude che i carichi dello stage “lining” non sono utili ai fini di questa tesi. Si procede al confronto delle le caratteristiche della sollecitazione e delle rotazioni:

- *Tarate*: Cds e rotazioni ottenuti da Sap2000 con le molle tarate ed i carichi lordi (carichi dello stage relax60%);
- *Target*: Cds e rotazioni forniti in output dal software Rocscience RS2;
- *Molle 100*: Cds e rotazioni ottenuti da Sap2000 con le molle trascurabili (100 kN/m) ed i carichi netti.



Galleria profonda 2

Modello geo-meccanico

Il modello adottato per tale galleria ha forma quadrata di dimensioni pari a 425x425 m. La galleria ha diametro pari a 13,7 m ed il rivestimento è modellato con 72 elementi beam intervallati da 72 nodi, uno ogni 5 gradi. Si sono adottate su tutti e quattro i lati condizioni al contorno di tipo cinematico che bloccano sia gli spostamenti in direzione orizzontale che quelli in direzione verticale. Il materiale che costituisce il semi-spazio è isotropo elastico lineare ed ha le seguenti proprietà meccaniche:

| Modulo di Young | Coefficiente di Poisson |
|------------------------|--------------------------------|
| <i>[Mpa]</i> | <i>[-]</i> |
| 25000 | 0,2 |

Lo stato tensionale geostatico è assunto costante in tutto il dominio:

| σ_1 | σ_3 | σ_z | θ |
|--------------|--------------|--------------|------------|
| <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[°]</i> |
| 25,74 | 6,14 | 6,376 | 75 |

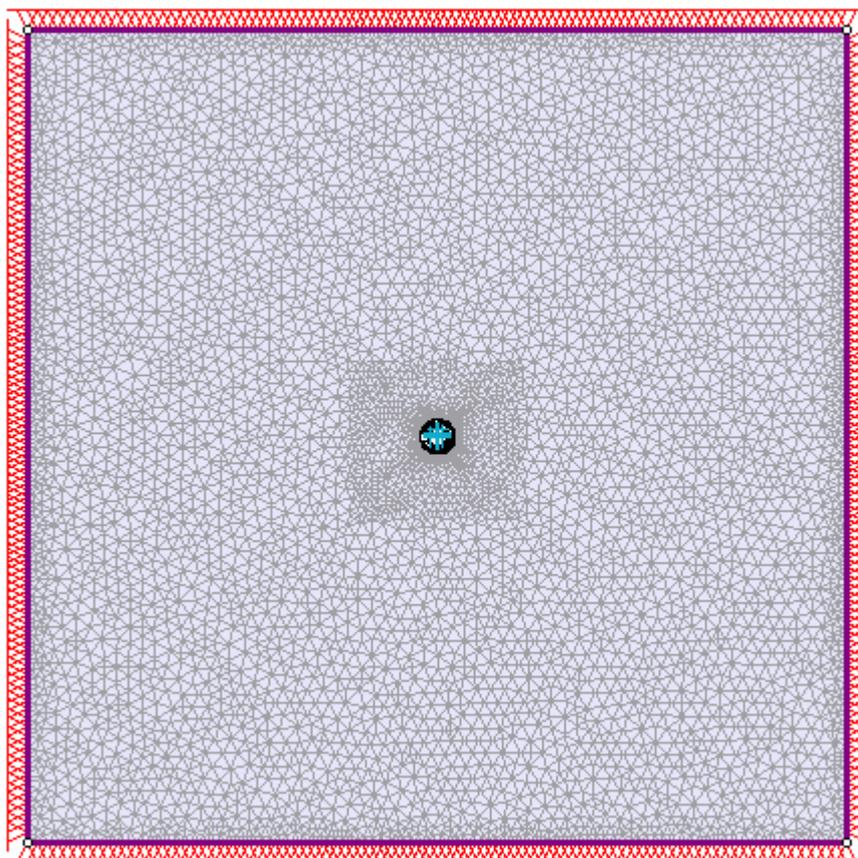


Figura 27 Profonda 2, RS2: Modello geo-meccanico

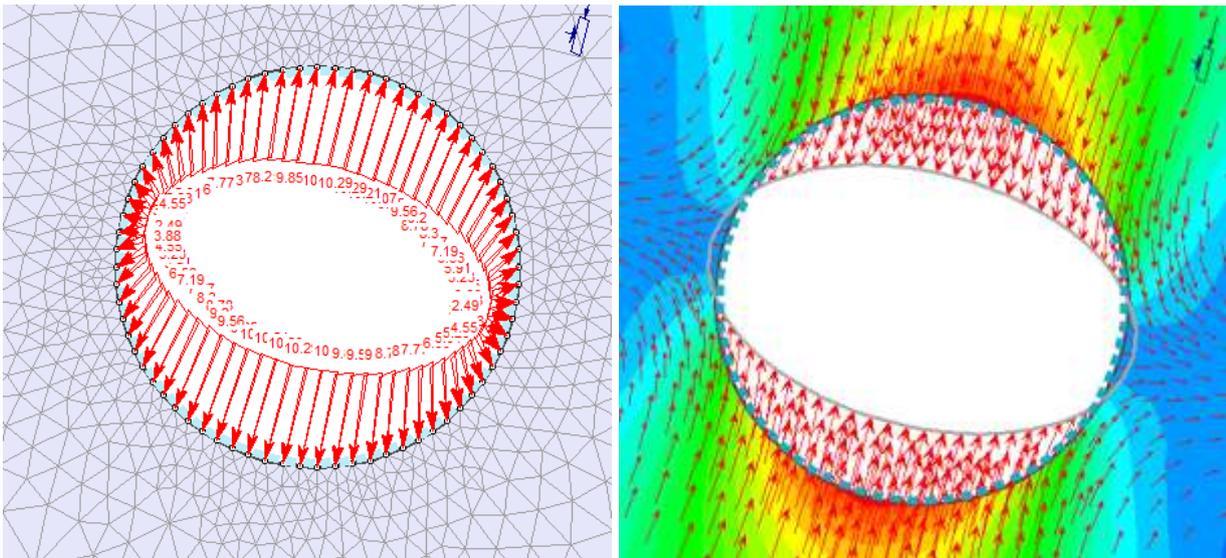
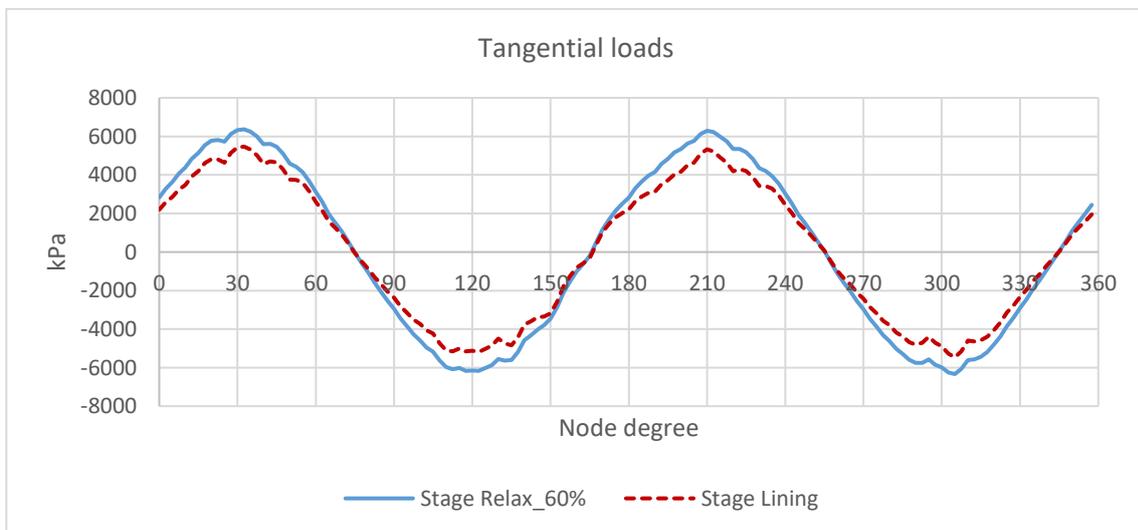
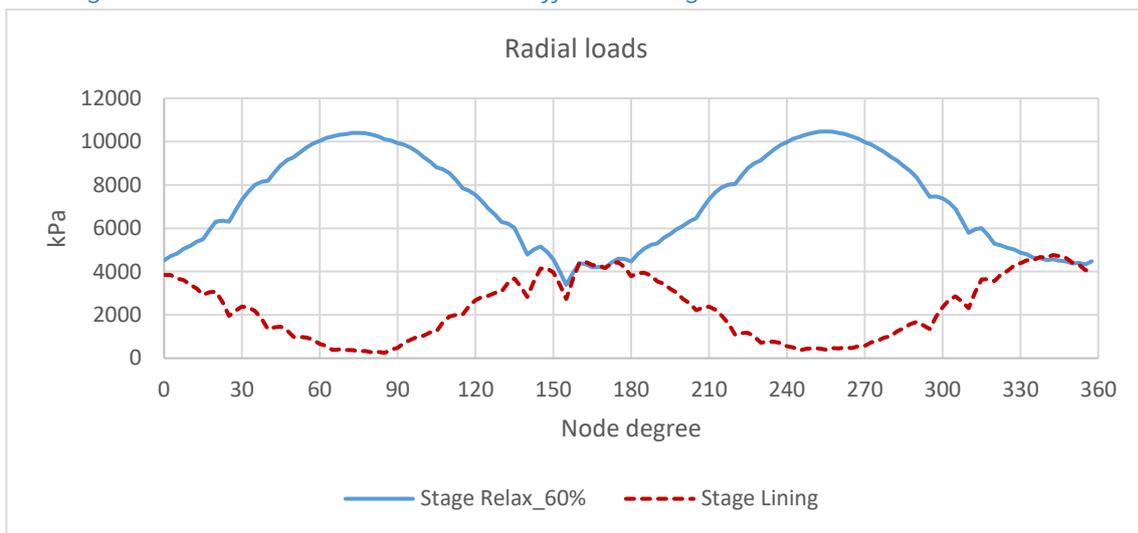


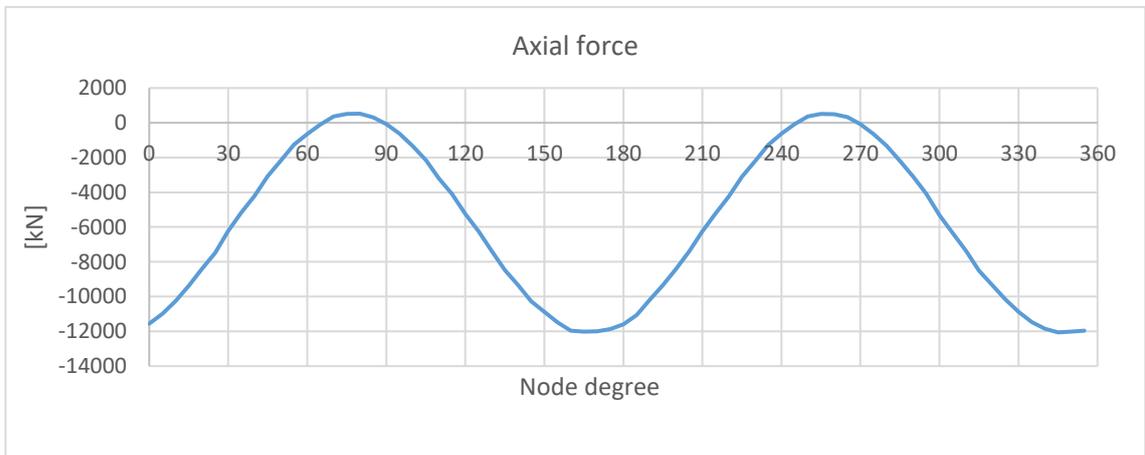
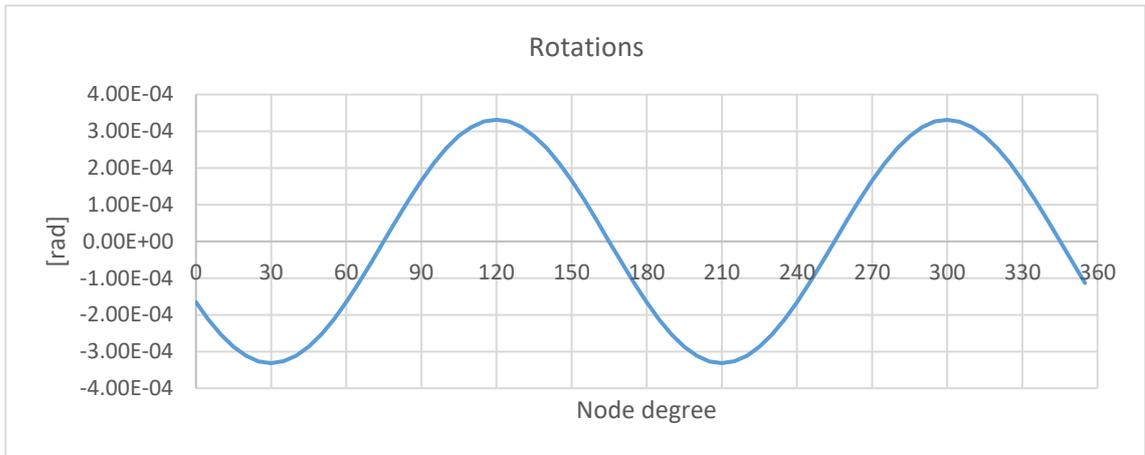
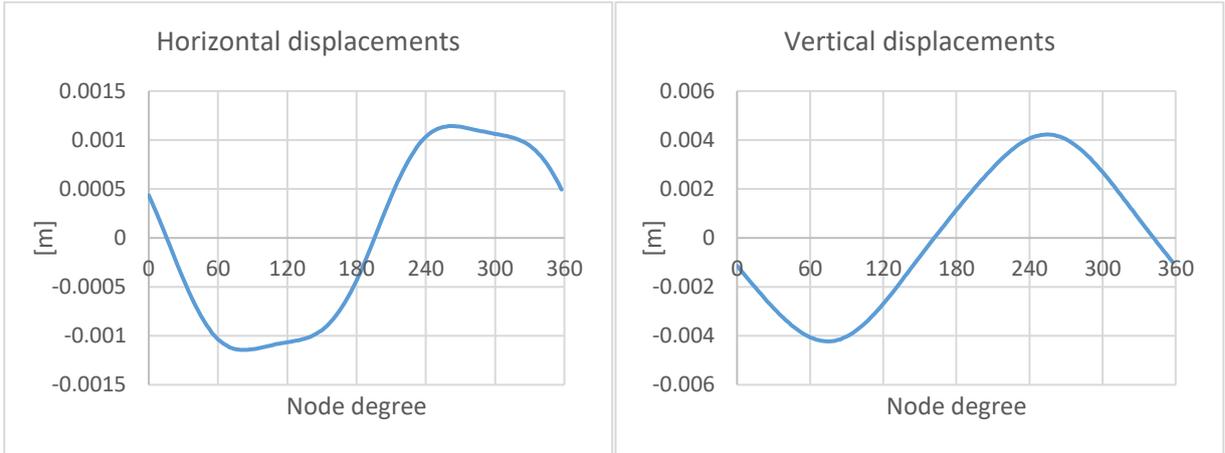
Figura 28 Profonda 2, RS2: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)

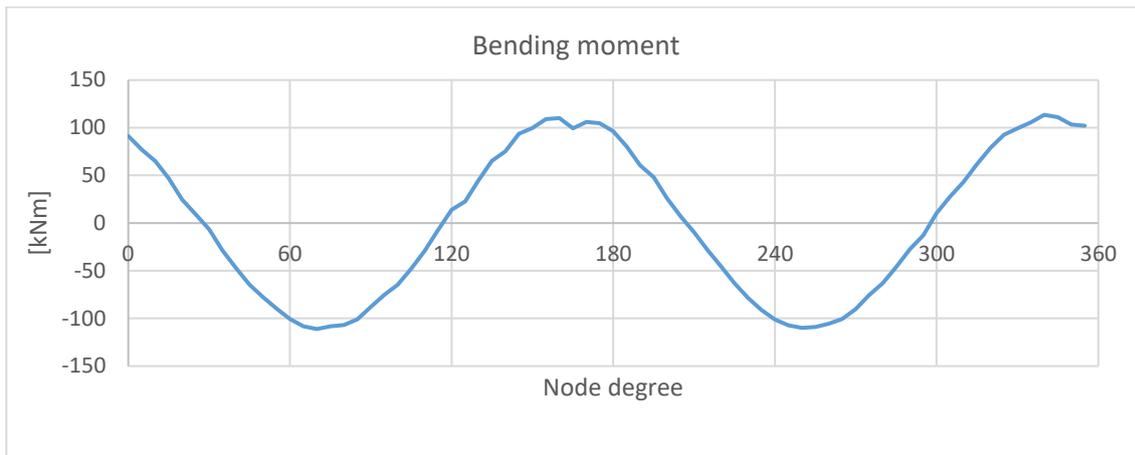
Risultati analisi con Rocscience RS2

Tensioni agenti sul contorno dello scavo nei differenti stage



Spostamenti

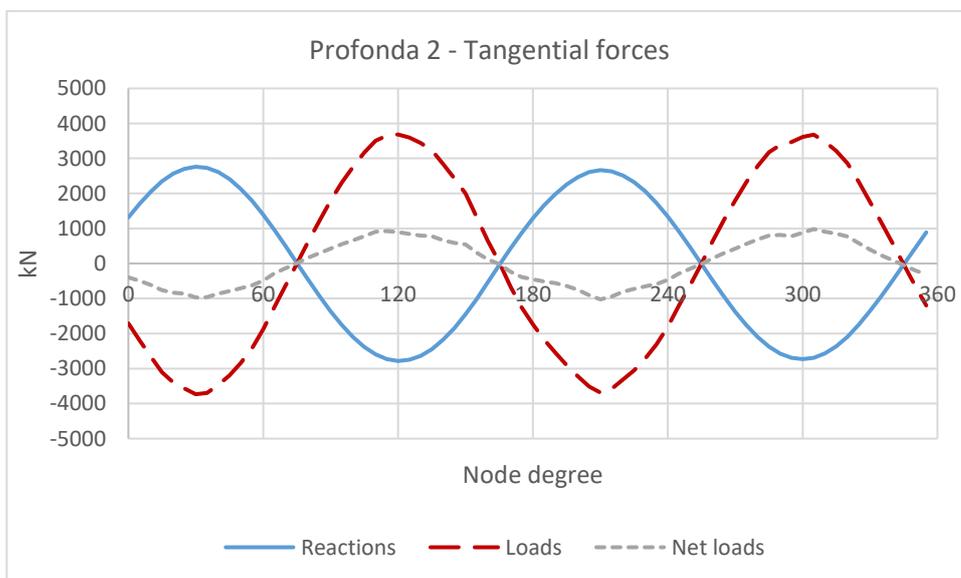
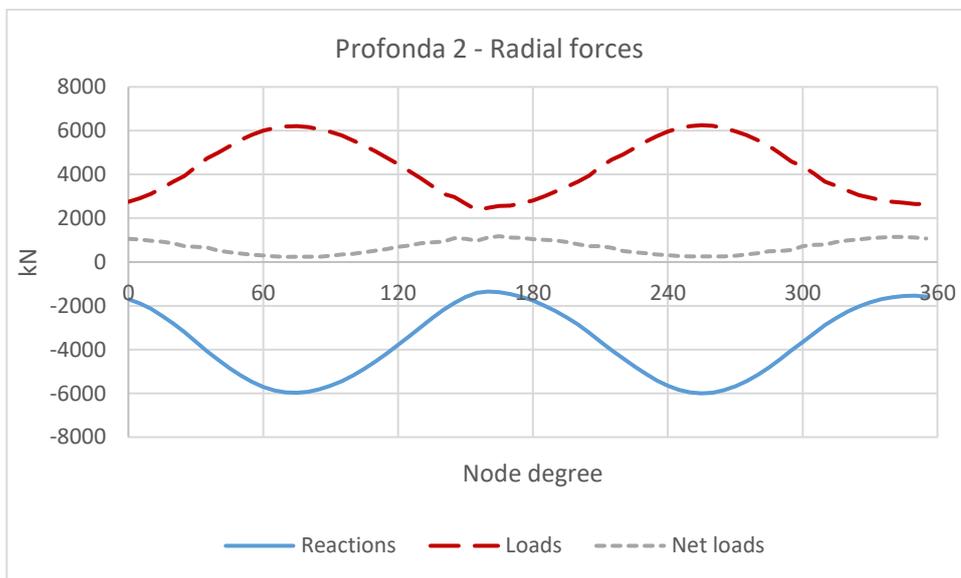


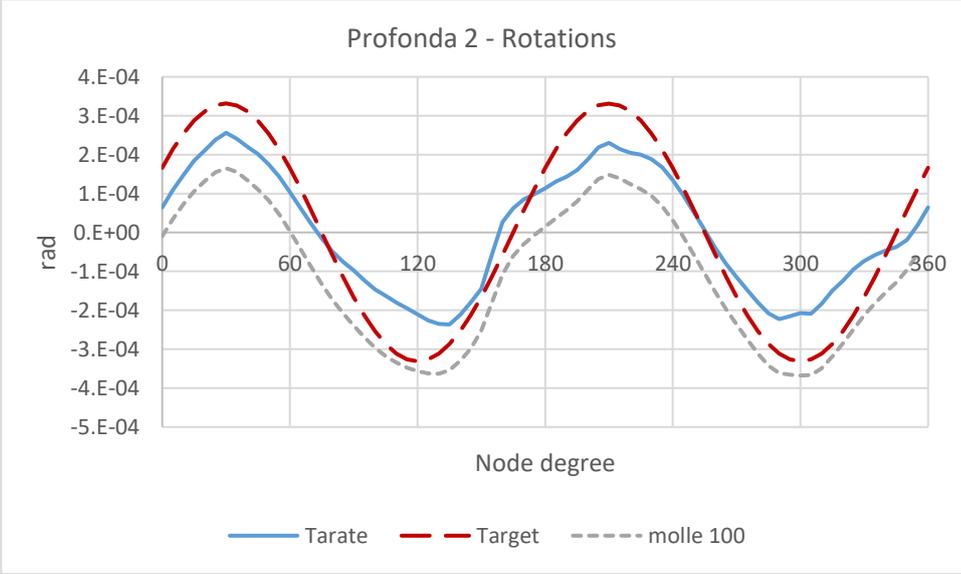
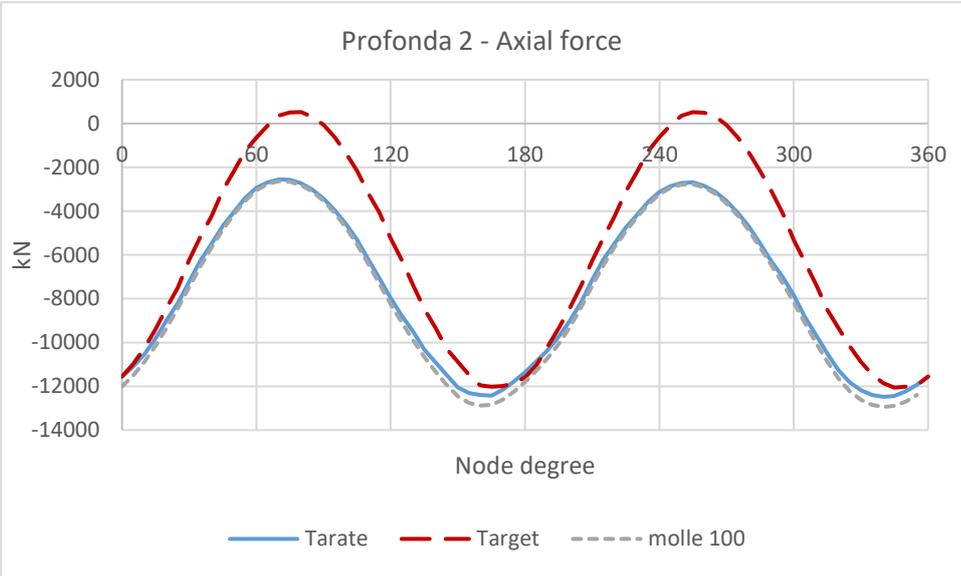
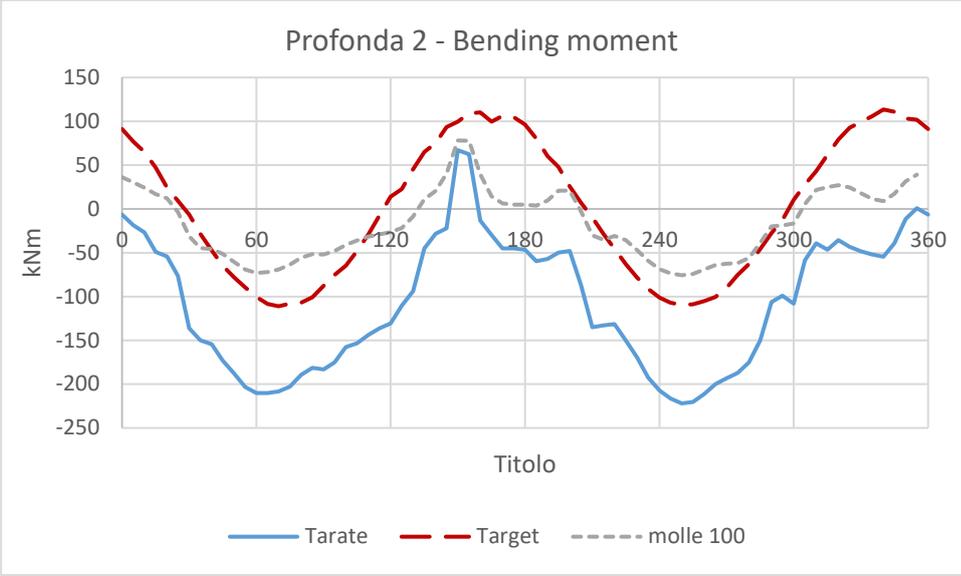


Taratura delle molle, reazioni vincolari e carico netto

$$k_r = 1500000 \text{ kN/m}$$

$$k_t = 1750000 \text{ kN/m}$$





Galleria profonda 3

Modello geo-meccanico

Il modello adottato per tale galleria ha forma quadrata di dimensioni pari a 425x425 m. La galleria ha diametro pari a 13,7 m ed il rivestimento è modellato con 72 elementi beam intervallati da 72 nodi, uno ogni 5 gradi.

Si sono adottate su tutti e quattro i lati condizioni al contorno di tipo cinematico che bloccano sia gli spostamenti in direzione orizzontale che quelli in direzione verticale.

Il materiale che costituisce il semi-spazio è isotropo elastico lineare ed ha le seguenti proprietà meccaniche:

| Modulo di Young | Coefficiente di Poisson |
|------------------------|--------------------------------|
| <i>[Mpa]</i> | <i>[-]</i> |
| 3500 | 0,3 |

Lo stato tensionale geostatico è assunto costante in tutto il dominio:

| σ_1 | σ_3 | σ_z | θ |
|--------------|--------------|--------------|------------|
| <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[MPa]</i> | <i>[°]</i> |
| 25 | 12,5 | 11,25 | 0 |

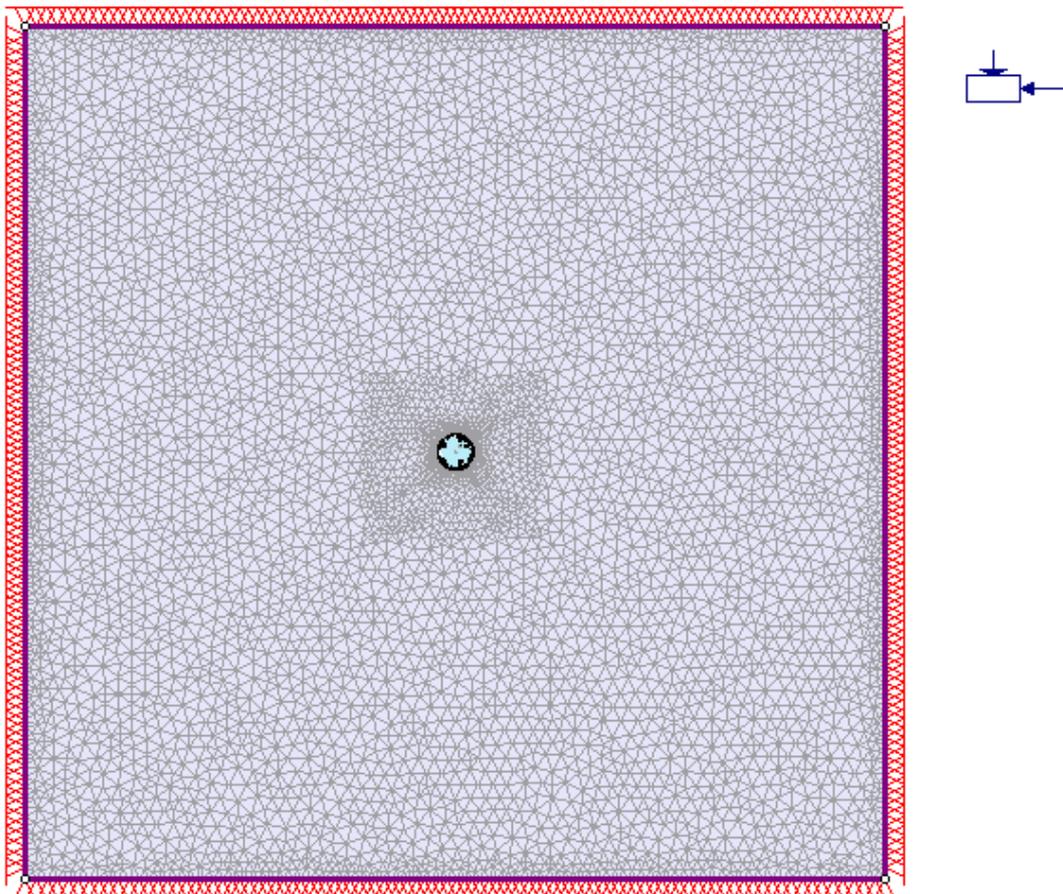


Figura 29 Profonda 3, RS2: Modello geo-meccanico

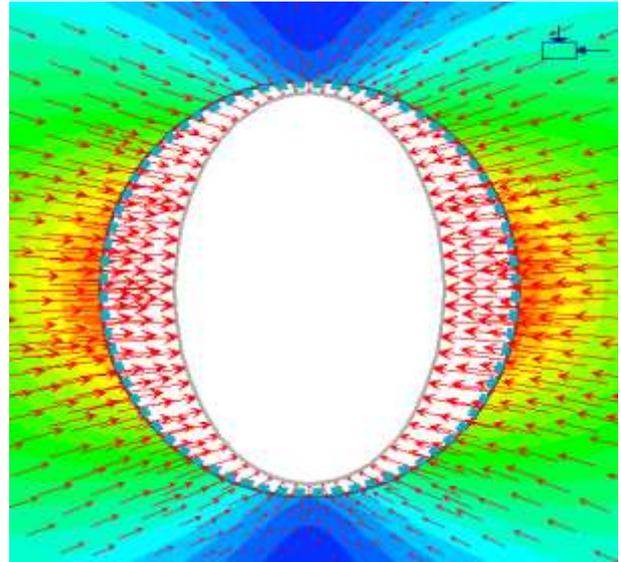
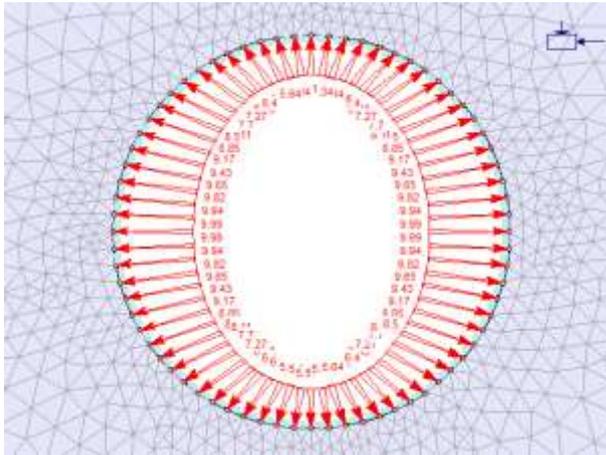
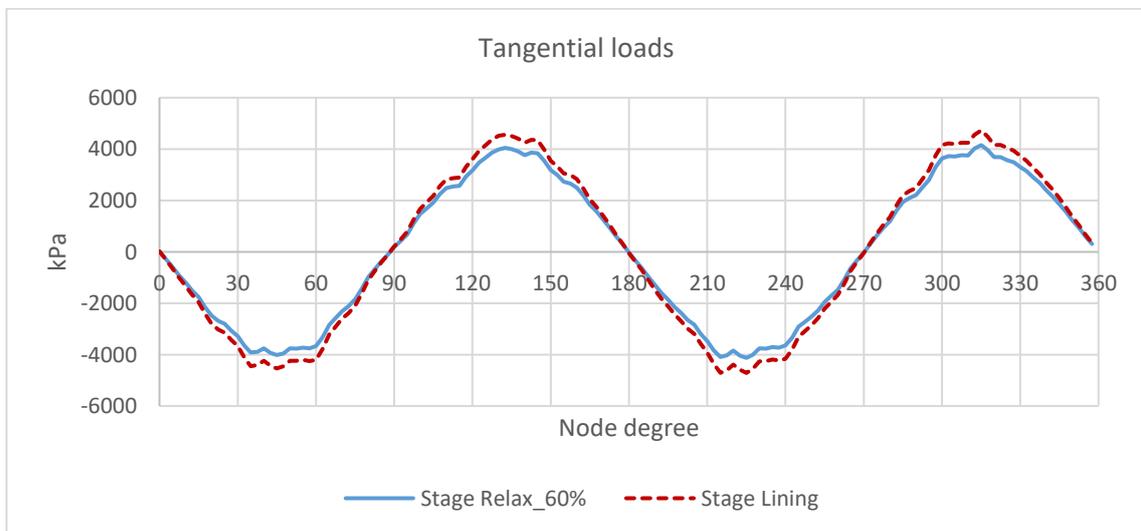
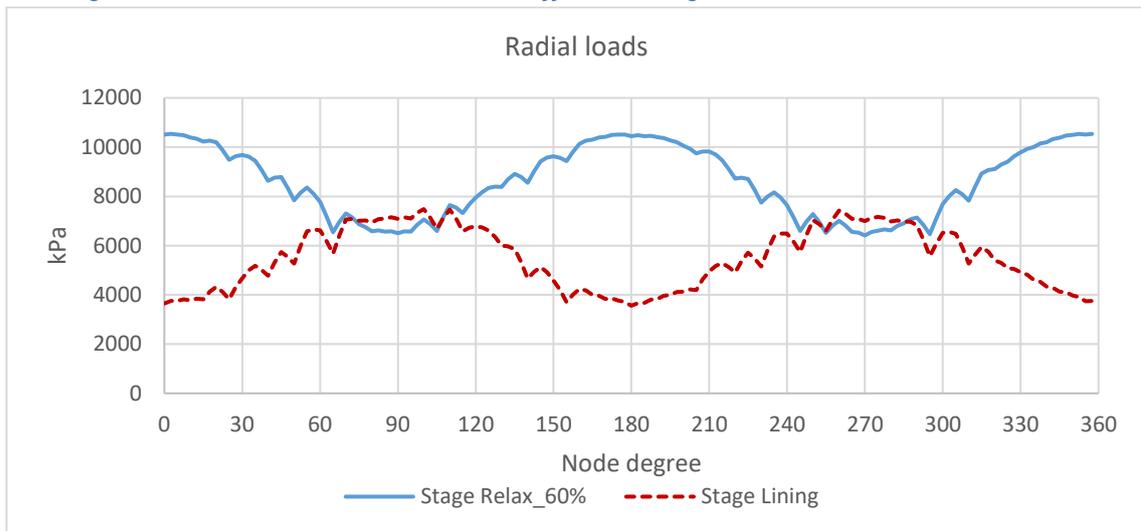
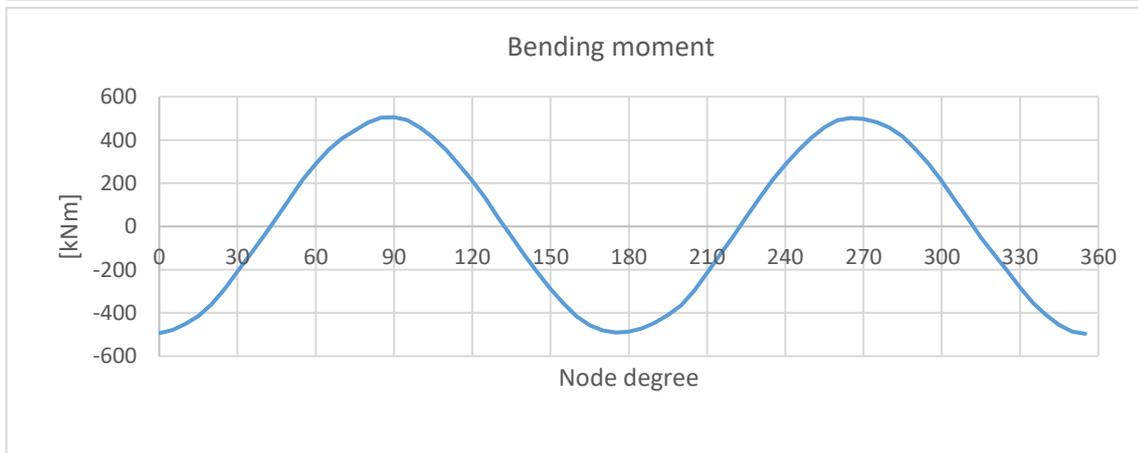
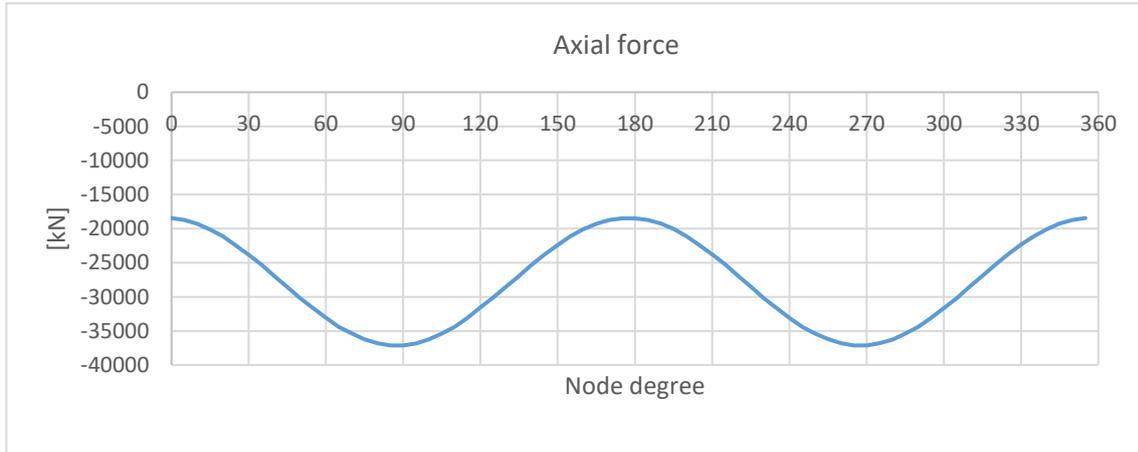
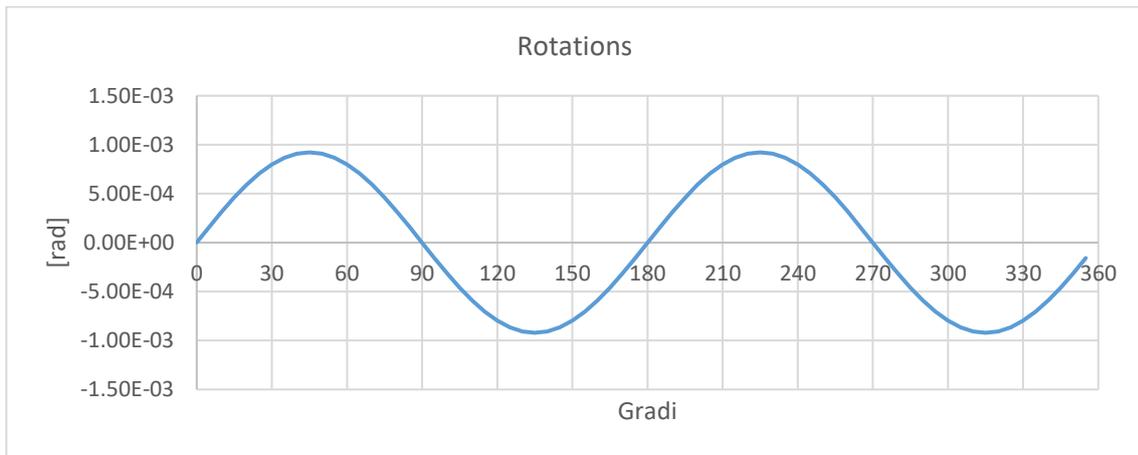
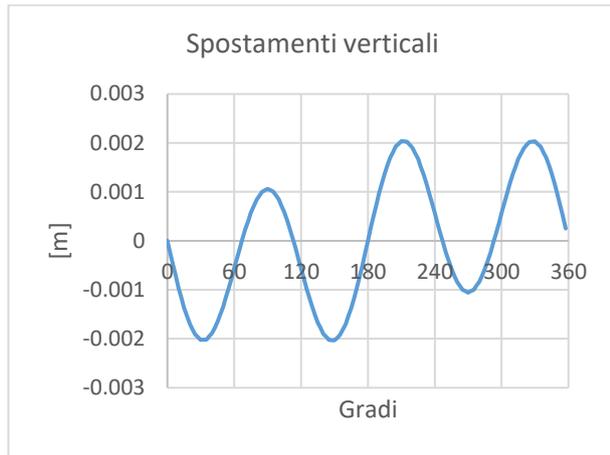
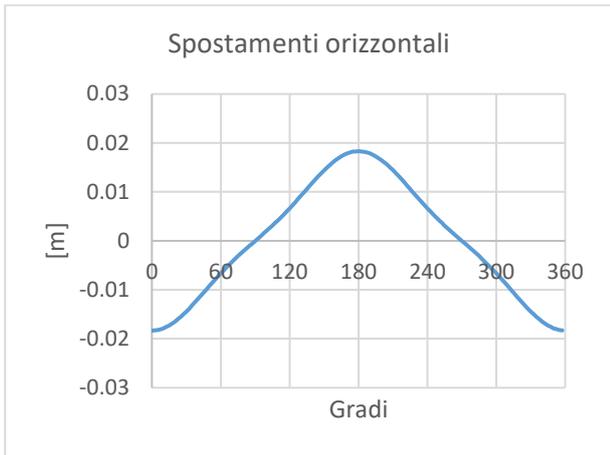


Figura 30 Profonda 3, RS2: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)

Risultati analisi con Rocscience RS2

Tensioni agenti sul contorno dello scavo nei differenti stage

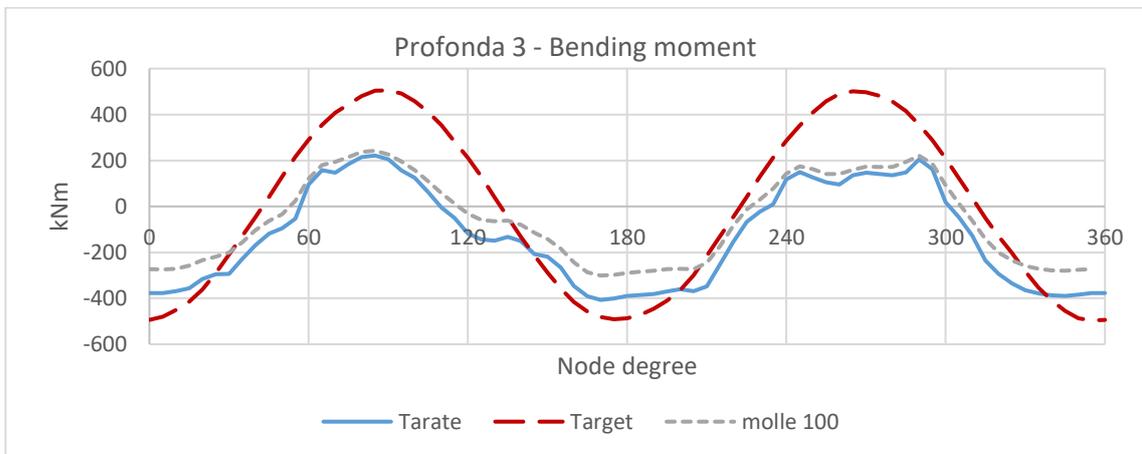
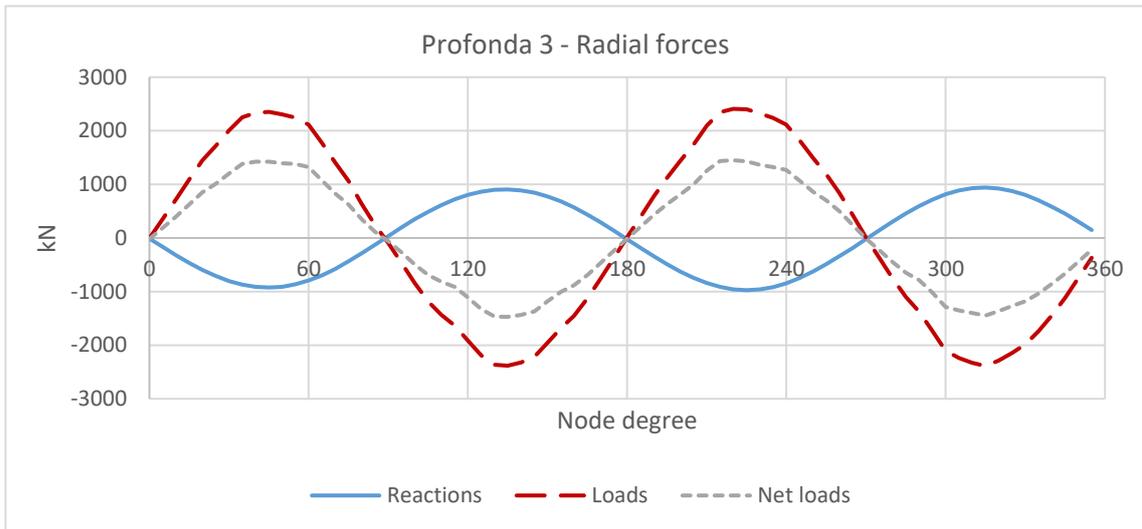
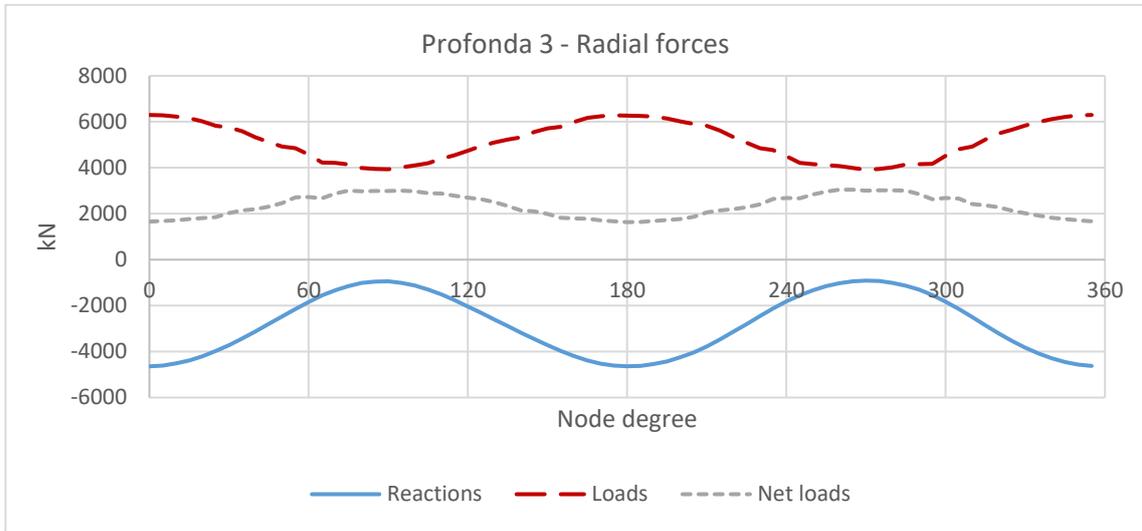


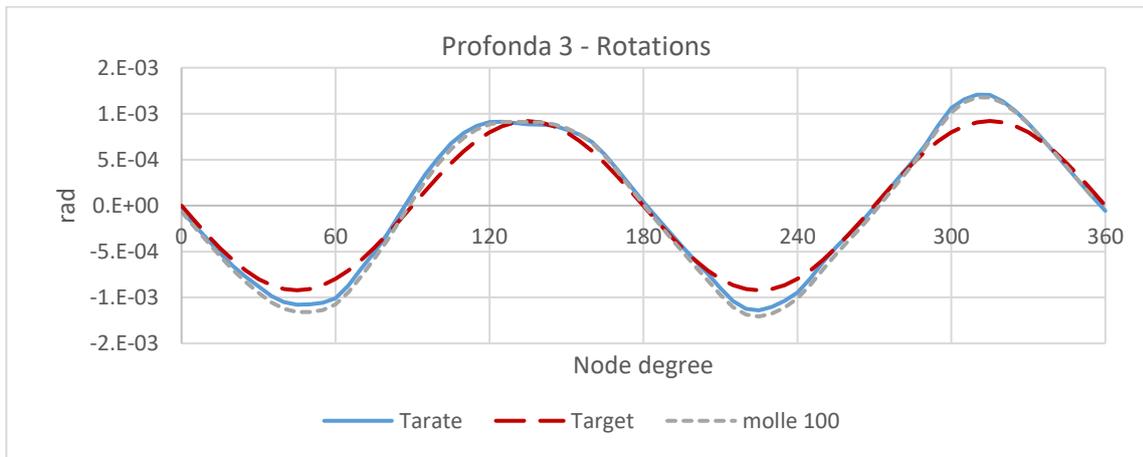
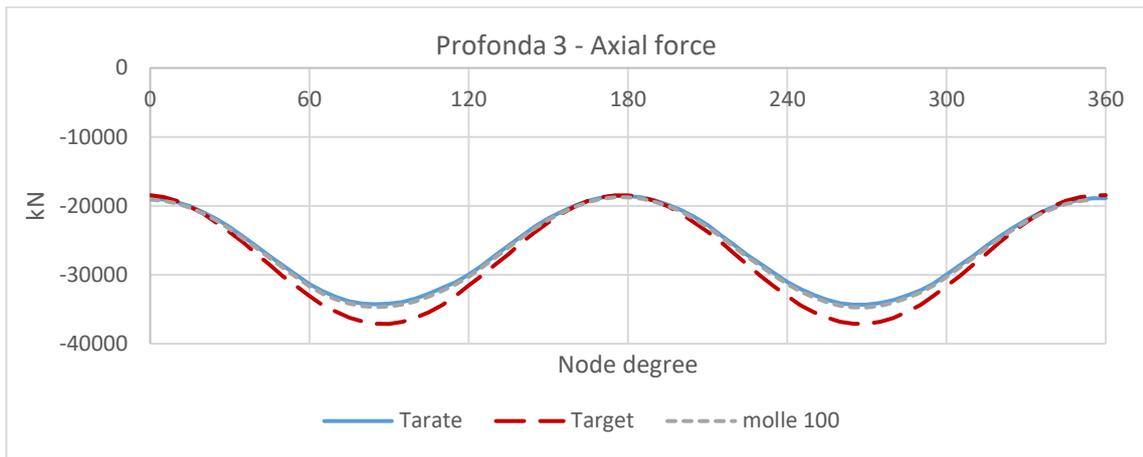


Taratura delle molle, reazioni vincolari e carico netto

$$k_r = 325000 \text{ kN/m}$$

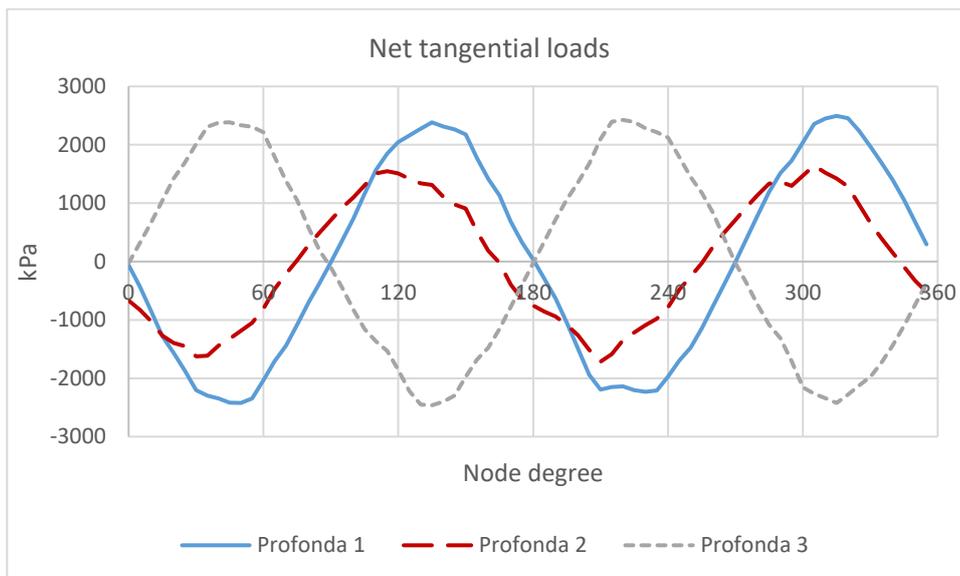
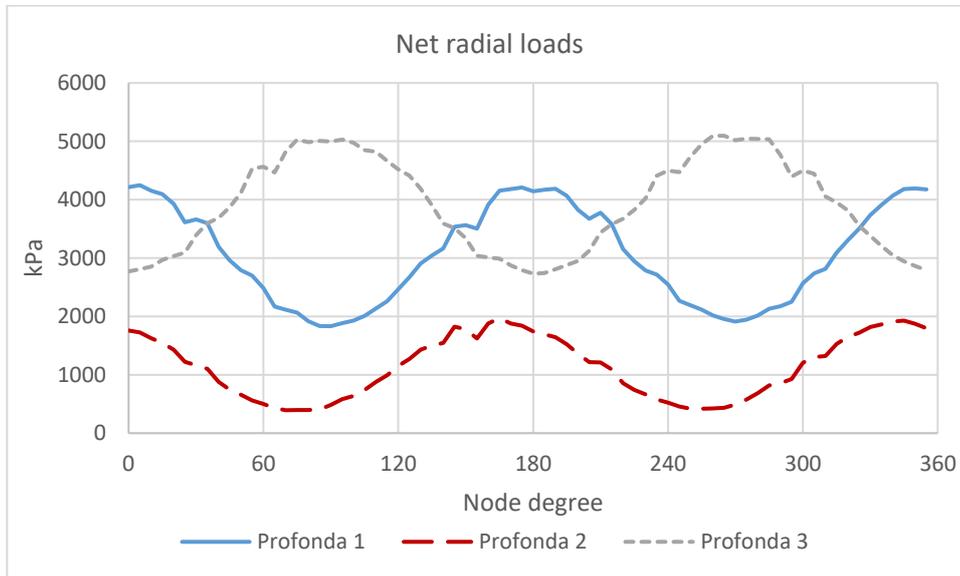
$$k_t = 225000 \text{ kN/m}$$





Confronto forme di carico

Dall'analisi appena svolta su questi tre modelli si nota come le forme di carico siano delle sinusoidi che possono avere un certo sfasamento. L'algoritmo genetico deve essere corretto in modo tale che le sue forme di carico radiale e tangenziale riescano a raggiungere queste forme.



11. Modelli geo-meccanici di gallerie superficiali

Per la costruzione dei seguenti modelli si sono presi in considerazione sei tipologie di terreno, le cui informazioni provengono dal database Itaca dell'INGV; tre condizioni di piano campagna (orizzontale, 10°, 20°) e tre condizioni di profondità (2D, 3D, 4D).

Tipologie di terreno: leggi di variazione del modulo elastico e proprietà meccaniche

Sito 1

Nome stazione: Cirò

Luogo: Loc. Cozzo Leone, 88813 Cirò (KR), Italia

Categoria terreno (EC8): B

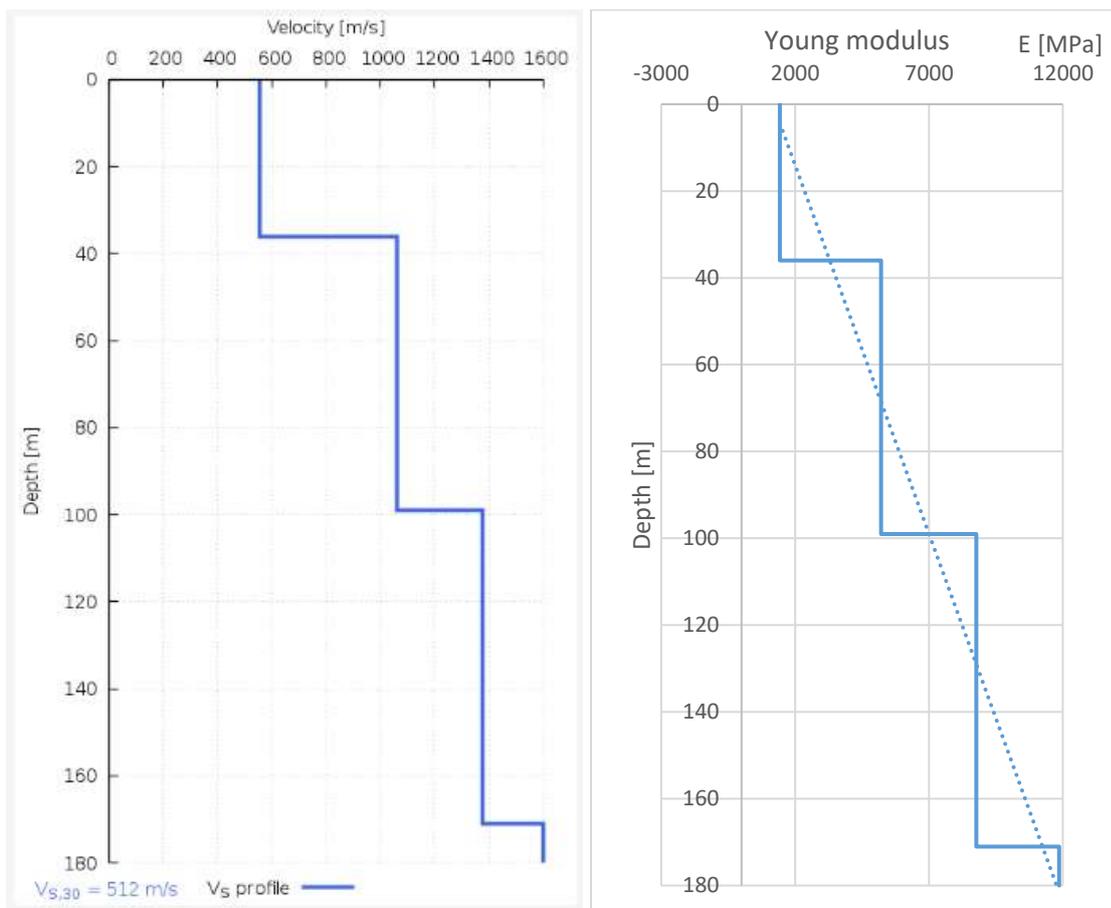
Stratigrafia:

- Sabbie cementate marroni del pliocene superiore.
- Limi argillosi e limi con leggere presenze arenacee del miocene superiore.

Profilo di Vs30 e modulo di rigidità:

$$G [Pa] = \rho * Vs^2 \left[\frac{kg}{m^3} * \frac{m^2}{s^2} \right]$$

$$E [Pa] = 2 * G * (1 + \nu)$$



Legge 1: $E(z) = 1000 + 57,5 * z$ [MPa]

Sito 2

Nome stazione: BORGO OTTOMILA - 2 (CELANO)

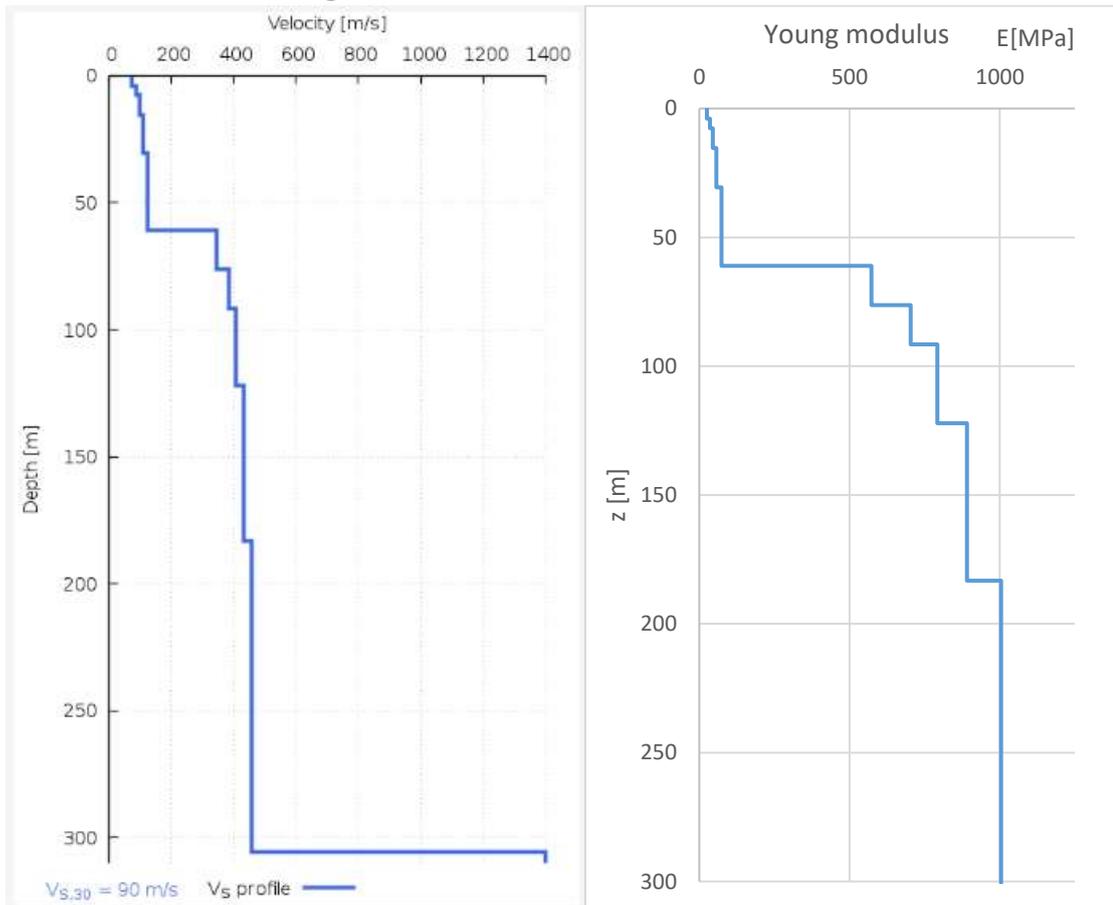
Luogo: Via Collelongo, 28B, 67043 Borgo Ottomila (AQ), Italia

Categoria terreno (EC8): D

Stratigrafia:

- Depositi alluvionali limo-argillosi attuali
- Limi, limi-argillosi, limi-torbosi
- Argille, argille sabbiose, limi lacustri
- Sedimenti neritici, carbonatici
- Bedrock: calcari

Profilo di Vs30 e modulo di rigidità:



Legge 2: $E(z) = 95 + 4,4 * z$ [MPa]

Sito 3

Nome stazione: Monselice

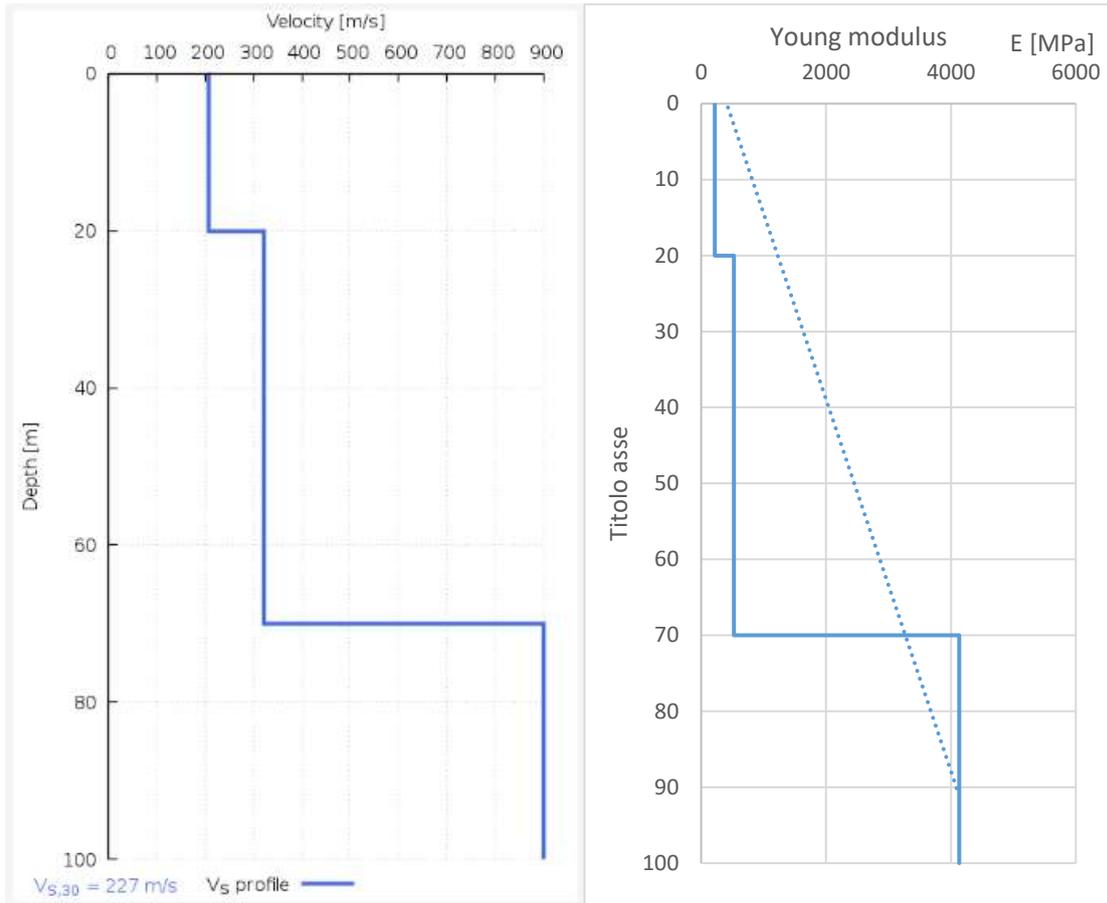
Luogo: Via Chiaviche, 23, 35032 Arquà Petrarca (PD), Italia

Categoria terreno (EC8): C

Stratigrafia:

- Strato superiore - *calcari debolmente marnosi*
- Strato intermedio - *calcari micritici*
- Substrato - *calcari micritici*

Profilo di Vs30 e modulo di rigidezza:



Legge 3: $E(z) = 200 + 34 * z$ [MPa]

Sito 4

Nome stazione: Langhirano

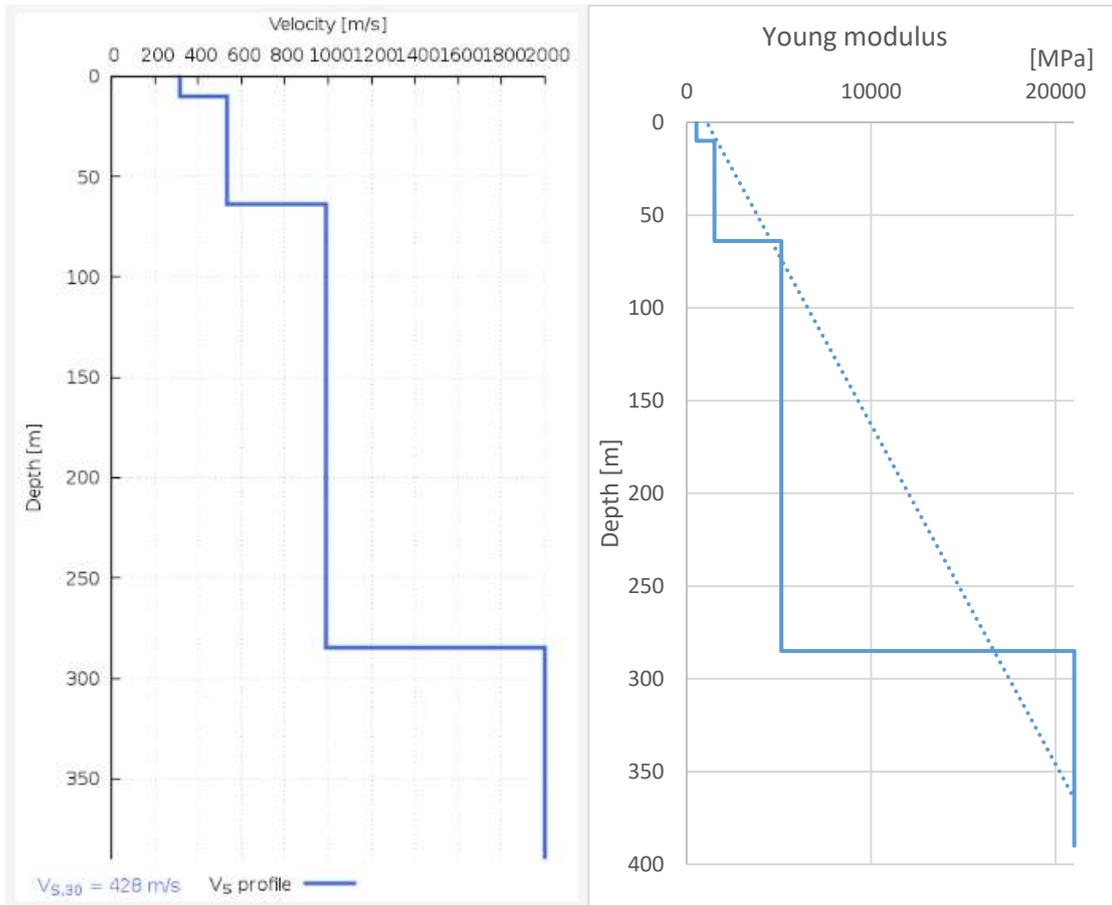
Luogo: Via Molinazzo, 1, 43037 Santa Maria del Piano (PR), Italia

Categoria terreno (EC8): B

Stratigrafia:

- Deposito alluvionale recente, ghiaioso sabbioso a suolo argilloso

Profilo di Vs30 e modulo di rigidità:



Legge 4: $E(z) = 500 + 48 * z$ [MPa]

Sito 5

Nome stazione: MERCATO S. SEVERINO

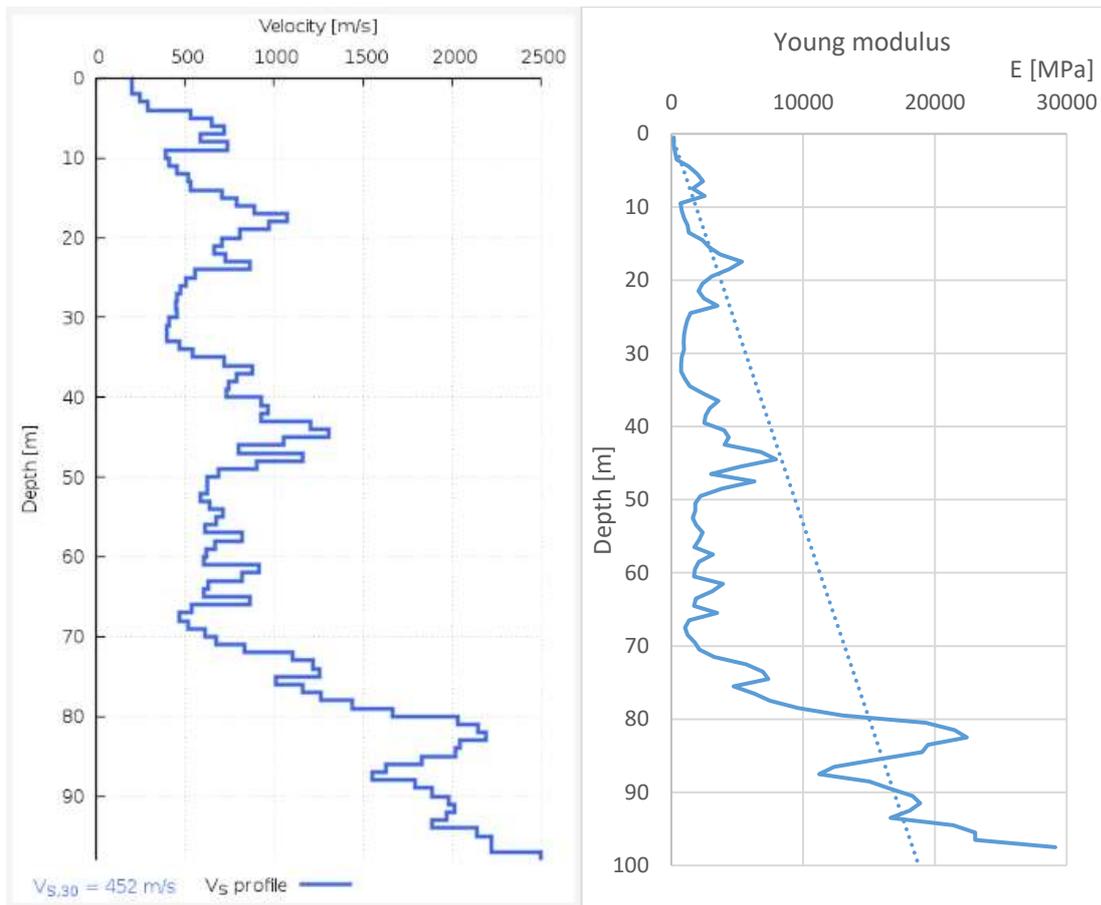
Luogo: 84085 Mercato San Severino (SA), Italia

Categoria terreno (EC8): B

Stratigrafia:

- Riporti antropici
- Sabbie siltose, misture di sabbia e silt
- Ghiaie siltose, misture di ghiaia-sabbia-silt
- Sabbie siltose, misture di sabbia e silt
- Roccia
- Ghiaie siltose, misture di ghiaia-sabbia-silt
- Silt inorganico e sabbia molto fine, roccia polverizzata, sabbie fini siltoso-argillose o silt argilloso a bassa plasticità
- Ghiaie siltose, misture di ghiaia-sabbia-silt
- Roccia

Profilo di Vs30 e modulo di rigidezza:



Legge 5: $E(z) = 185 + 130,3 * z$ [MPa]

Sito 6

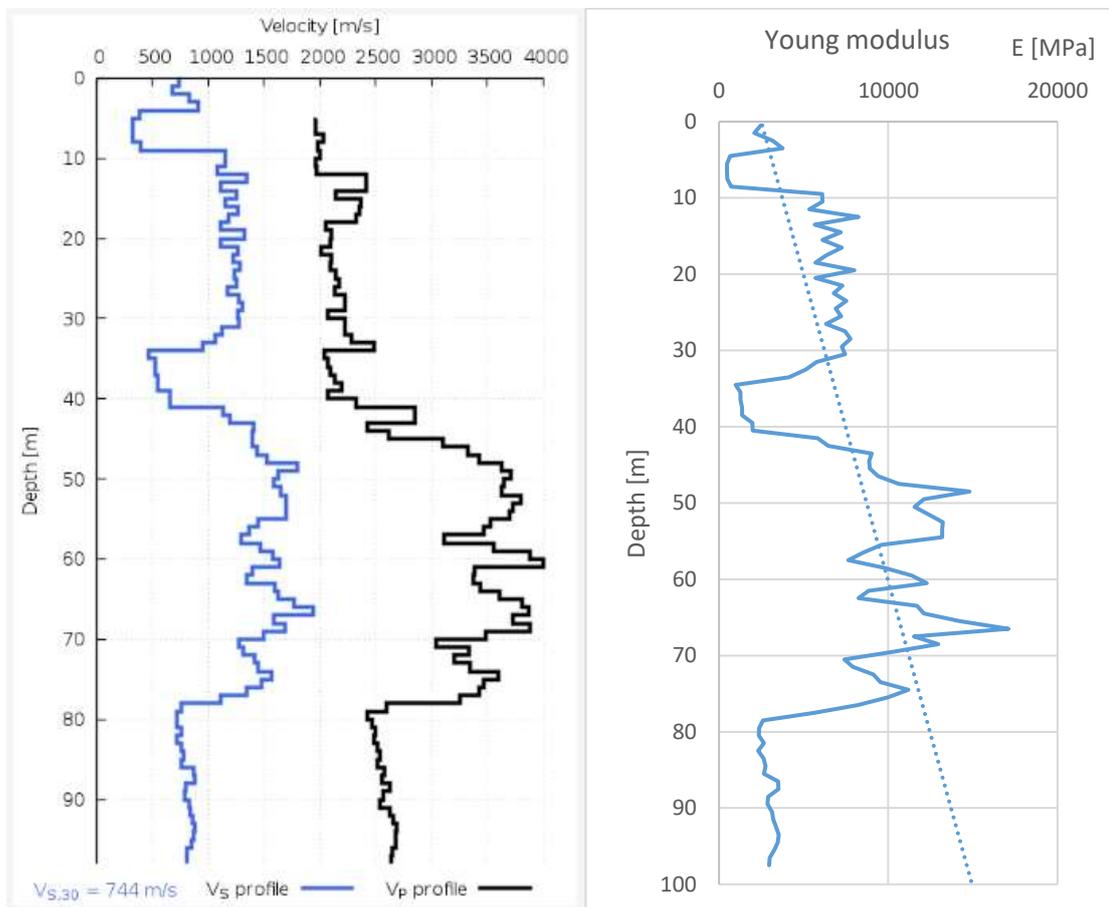
Nome stazione: BENEVENTO

Luogo: Via Roberto Ruffilli, 24, 82100 Benevento BN, Italia

Categoria terreno (EC8): B

Stratigrafia:

- Ghiaie siltose, misture di ghiaia-sabbia-silt
- Silt inorganico e sabbia molto fine, roccia polverizzata, sabbie fini siltoso-argillose o silt argilloso a bassa plasticità
- Ghiaie argillose, misture di ghiaia-sabbia-argilla
- Silt inorganico e sabbia molto fine, roccia polverizzata, sabbie fini siltoso-argillose o silt argilloso a bassa plasticità
- Ghiaie siltose, misture di ghiaia-sabbia-silt
- Silt inorganico e sabbia molto fine, roccia polverizzata, sabbie fini siltoso-argillose o silt argilloso a bassa plasticità



Legge 6: $E(z) = 2466 + 64,5 * z$ [MPa]

Elenco modelli

| Numero | Piano campagna | Profondità | Legge Young |
|--------|----------------|------------|-------------|
| 1 | PC_H | 2D | L_1 |
| 2 | PC_H | 3D | L_1 |
| 3 | PC_H | 4D | L_1 |
| 4 | PC_H | 2D | L_3 |
| 5 | PC_H | 3D | L_3 |
| 6 | PC_H | 4D | L_3 |
| 7 | PC_H | 2D | L_4 |
| 8 | PC_H | 3D | L_4 |
| 9 | PC_H | 4D | L_4 |
| 10 | PC_10° | 2D | L_1 |
| 11 | PC_10° | 3D | L_1 |
| 12 | PC_10° | 4D | L_1 |
| 13 | PC_10° | 2D | L_3 |
| 14 | PC_10° | 3D | L_3 |
| 15 | PC_10° | 4D | L_3 |
| 16 | PC_10° | 2D | L_4 |
| 17 | PC_10° | 3D | L_4 |
| 18 | PC_10° | 4D | L_4 |
| 19 | PC_20° | 2D | L_1 |
| 20 | PC_20° | 3D | L_1 |
| 21 | PC_20° | 4D | L_1 |
| 22 | PC_20° | 2D | L_3 |
| 23 | PC_20° | 3D | L_3 |
| 24 | PC_20° | 4D | L_3 |
| 25 | PC_20° | 2D | L_4 |
| 26 | PC_20° | 3D | L_4 |
| 27 | PC_20° | 4D | L_4 |
| 28 | PC_H | 2D | L_2 |
| 29 | PC_H | 3D | L_2 |
| 30 | PC_H | 4D | L_2 |
| 31 | PC_H | 2D | L_5 |
| 32 | PC_H | 3D | L_5 |
| 33 | PC_H | 4D | L_5 |
| 34 | PC_H | 2D | L_6 |
| 35 | PC_H | 3D | L_6 |
| 36 | PC_H | 4D | L_6 |
| 37 | PC_10° | 2D | L_2 |
| 38 | PC_10° | 3D | L_2 |
| 39 | PC_10° | 4D | L_2 |
| 40 | PC_10° | 2D | L_5 |
| 41 | PC_10° | 3D | L_5 |
| 42 | PC_10° | 4D | L_5 |
| 43 | PC_10° | 2D | L_6 |
| 44 | PC_10° | 3D | L_6 |
| 45 | PC_10° | 4D | L_6 |
| 46 | PC_20° | 2D | L_2 |
| 47 | PC_20° | 3D | L_2 |
| 48 | PC_20° | 4D | L_2 |
| 49 | PC_20° | 2D | L_5 |
| 50 | PC_20° | 3D | L_5 |
| 51 | PC_20° | 4D | L_5 |
| 52 | PC_20° | 2D | L_6 |
| 53 | PC_20° | 3D | L_6 |
| 54 | PC_20° | 4D | L_6 |

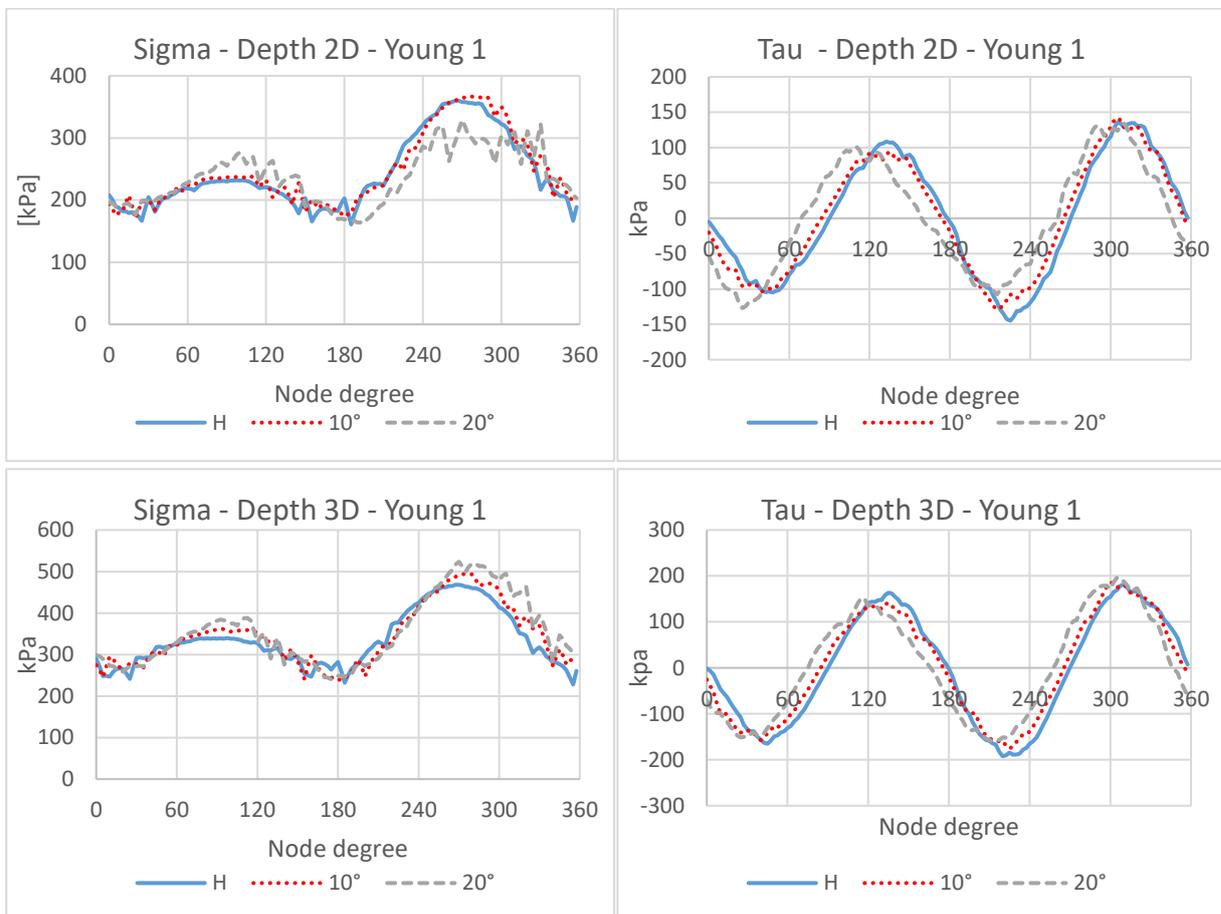
Modelli 1 – 54: Confronto al variare della pendenza del piano campagna

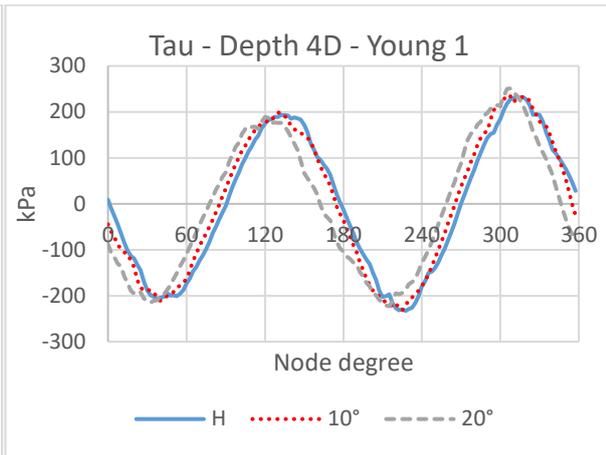
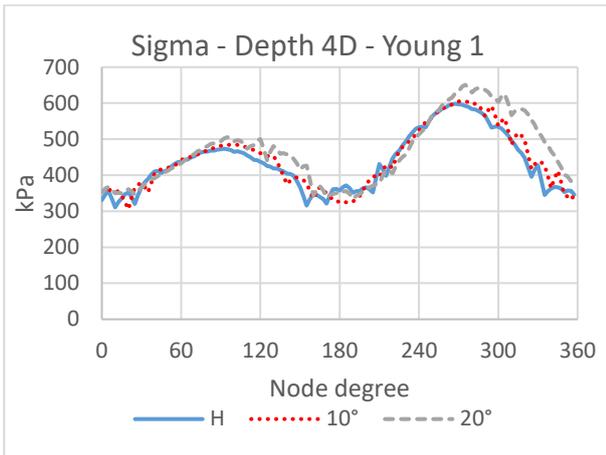
Dai seguenti grafici si evince che: al variare della pendenza del piano campagna non vi sono particolari differenze nei carichi radiali, mentre, si nota una leggera traslazione laterale dei diagrammi di carico tangenziale. Nei diagrammi di momento flettente e sforzo normale non si nota una particolare variazione dovuta alla pendenza del piano campagna. Per quanto riguarda la rotazione si nota, all'aumentare dell'inclinazione del piano campagna, una riduzione di ampiezza in corrispondenza del nodo a 60° (primo picco positivo) e un aumento di ampiezza in corrispondenza del nodo a 220°.

Nei diagrammi N, M, ed R con copertura pari a due volte il diametro, si riscontrano irregolarità dovute alla vicinanza del piano campagna.

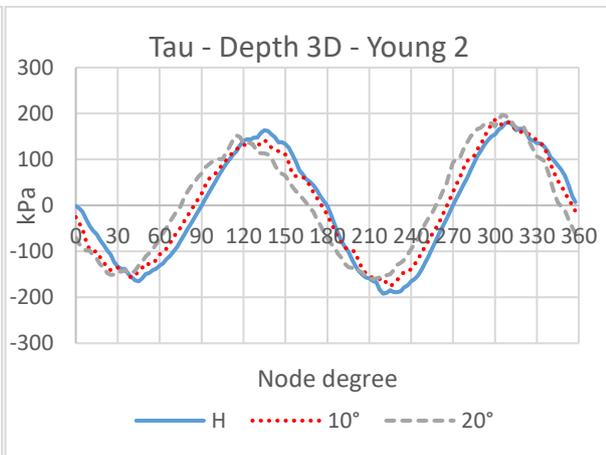
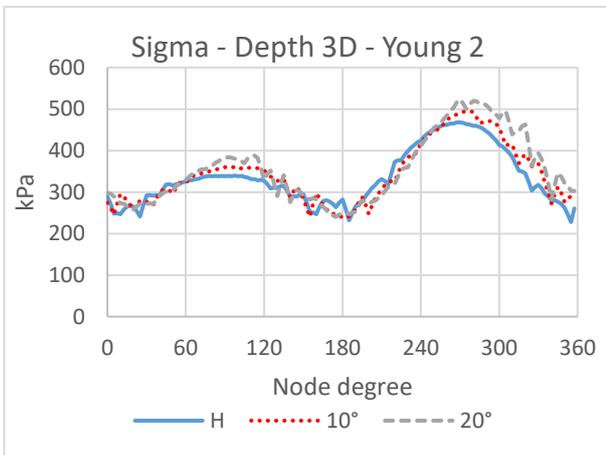
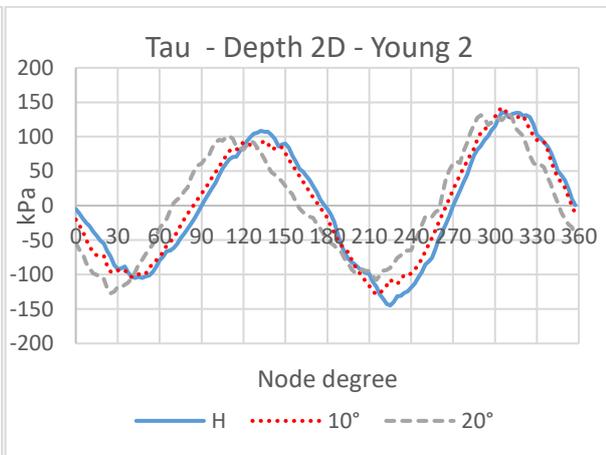
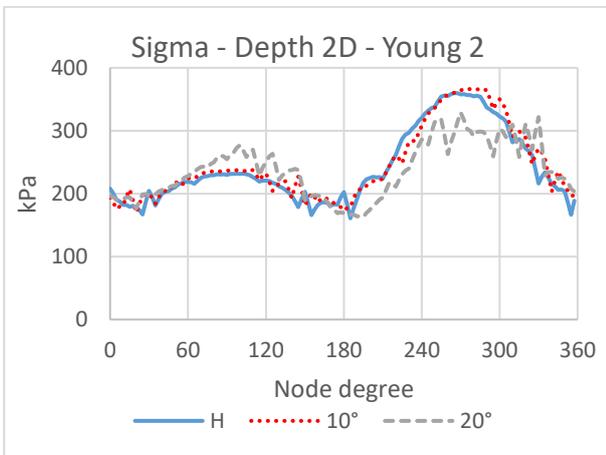
Tensioni radiali e tangenziali allo stage "Relax 60%"

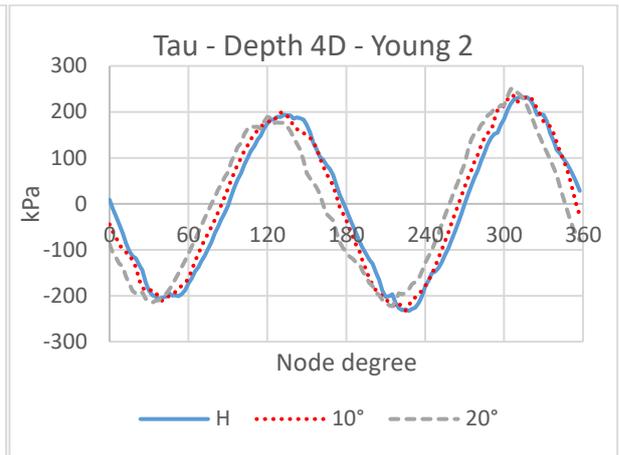
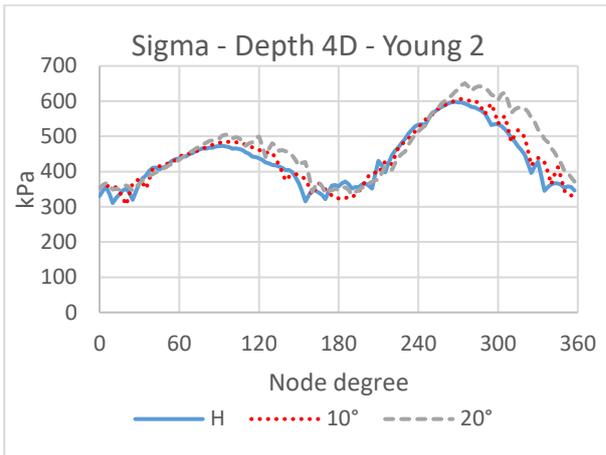
Sito 1



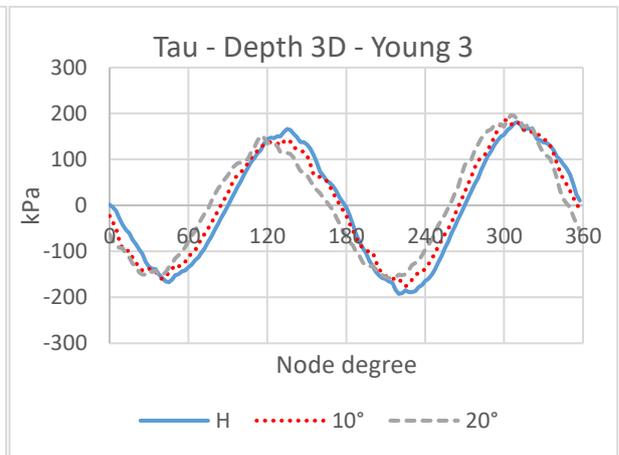
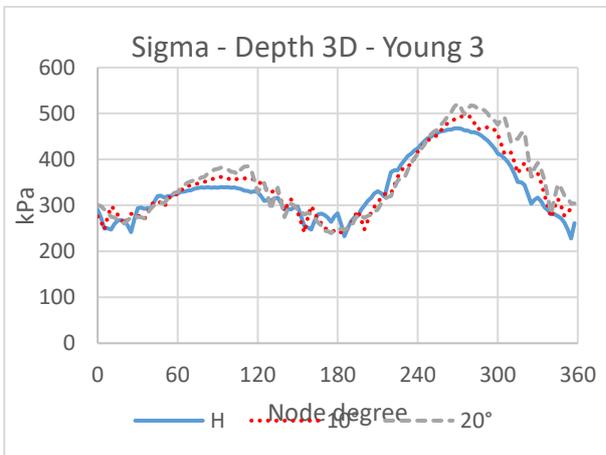
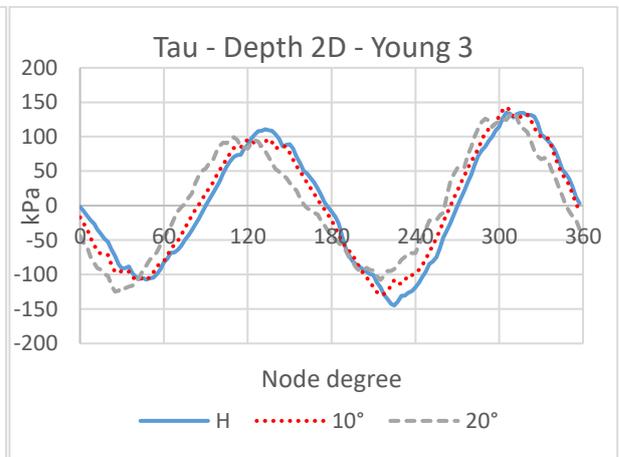
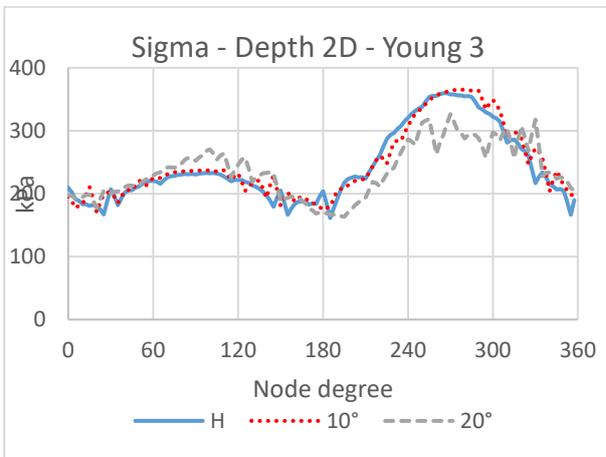


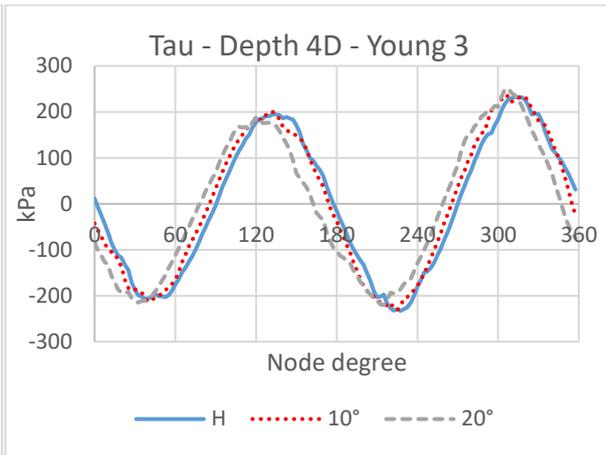
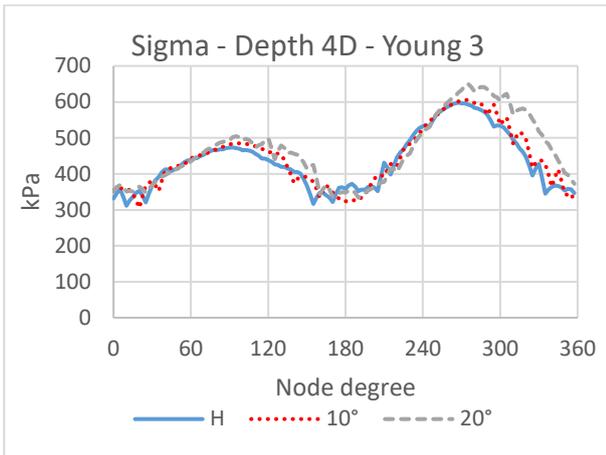
Sito 2



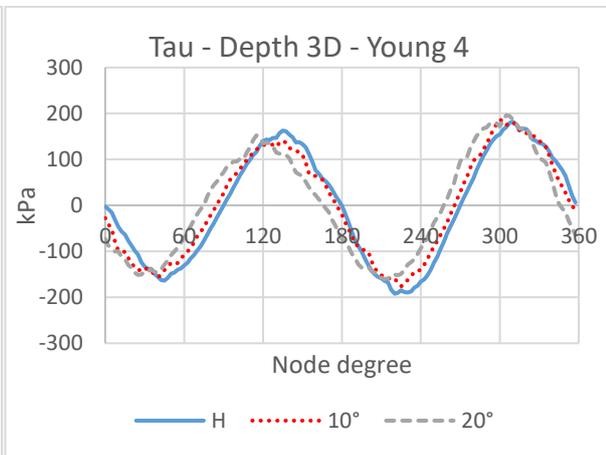
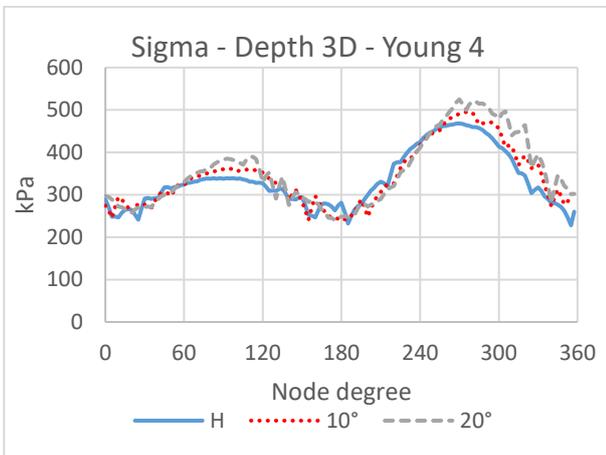
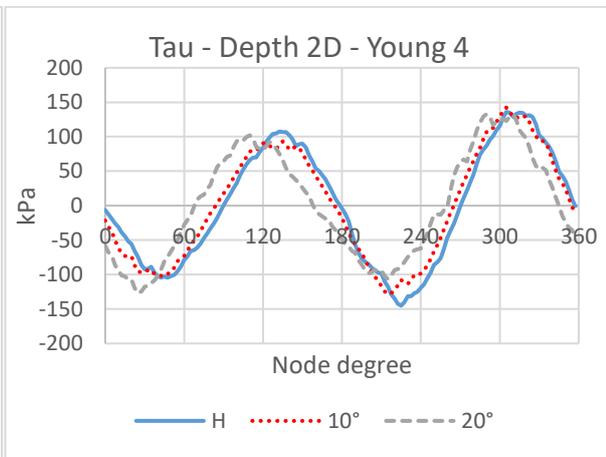
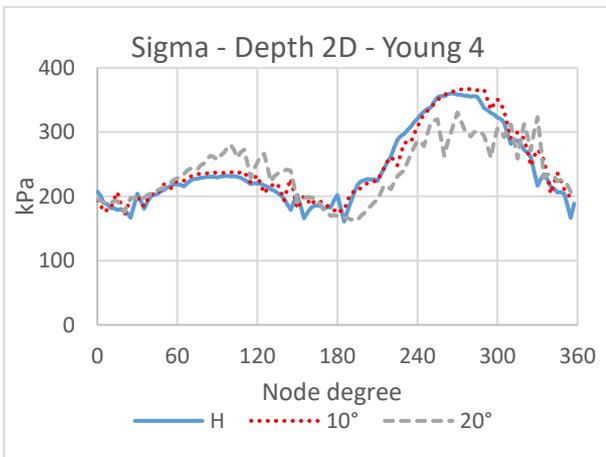


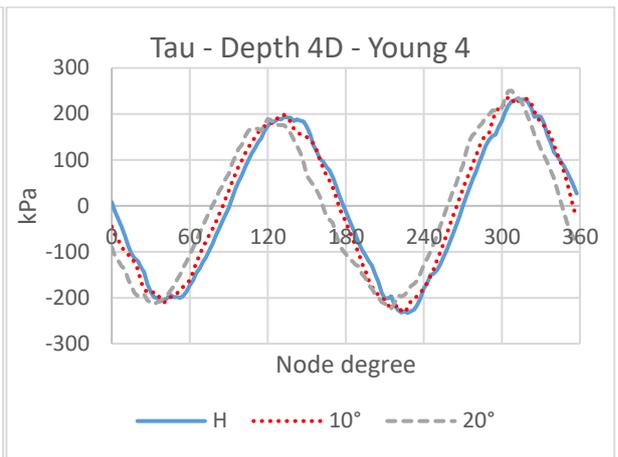
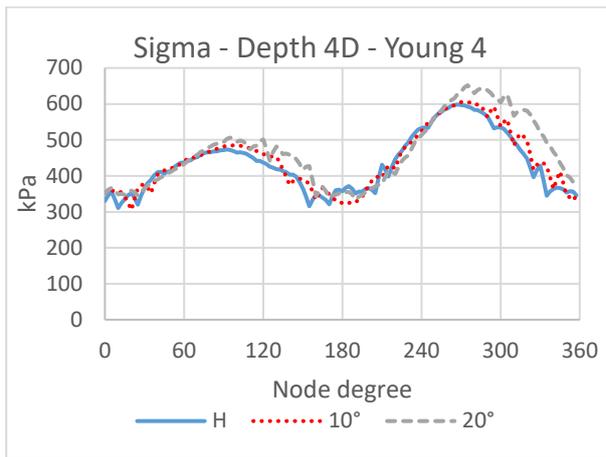
Sito 3



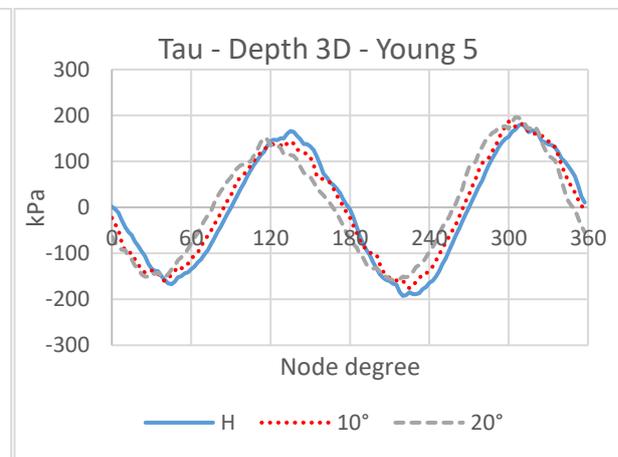
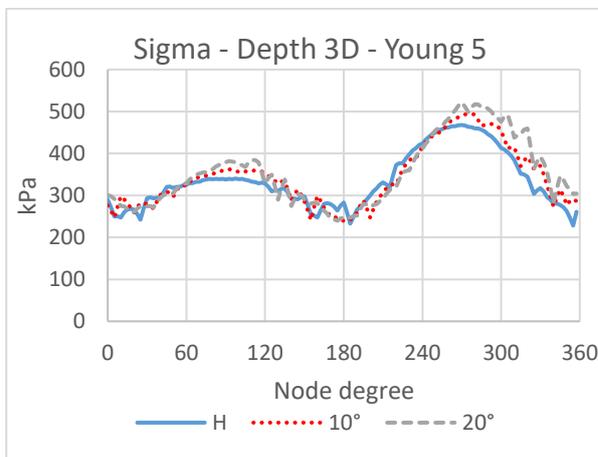
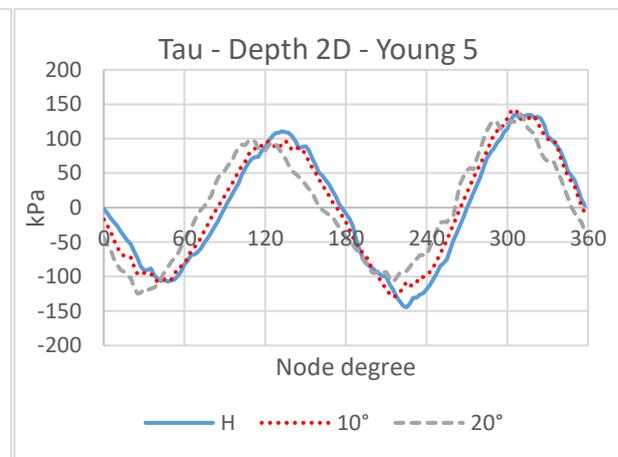
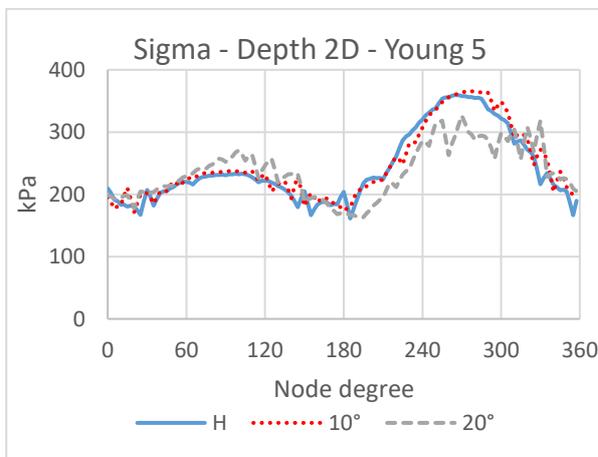


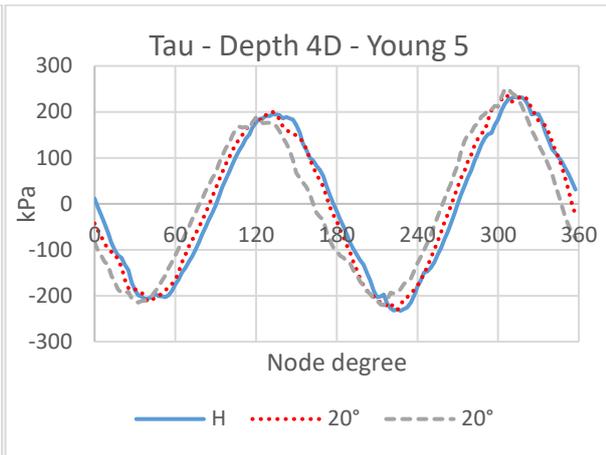
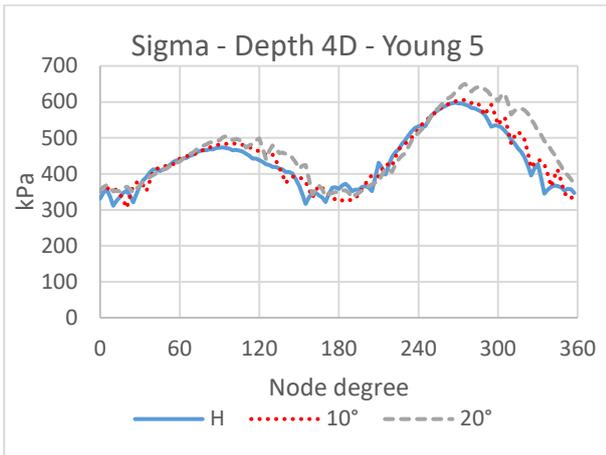
Sito 4



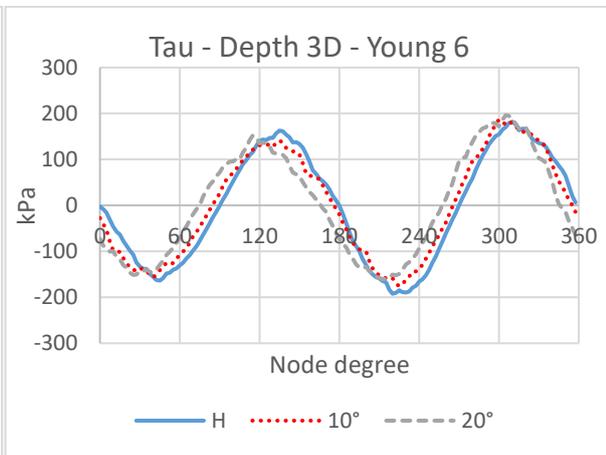
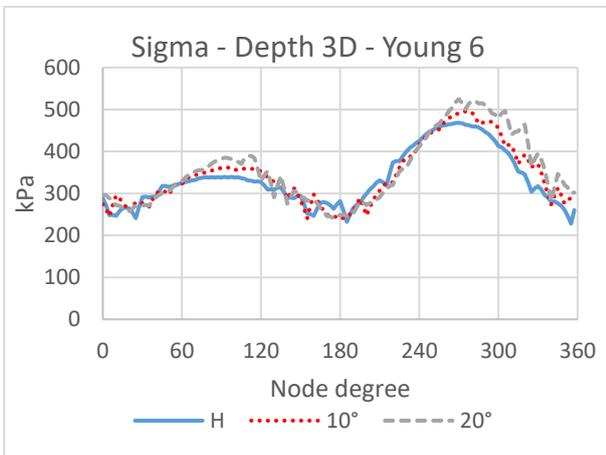
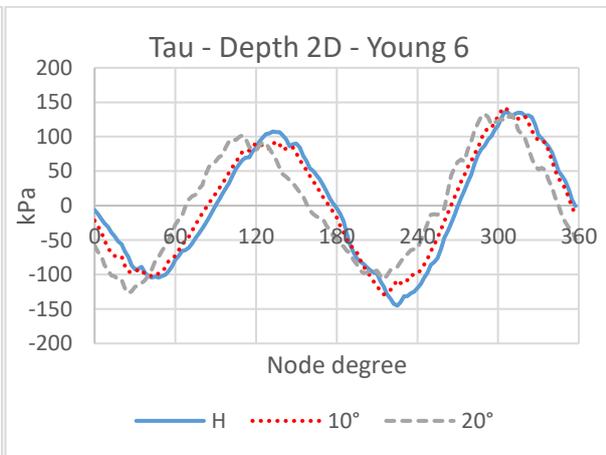
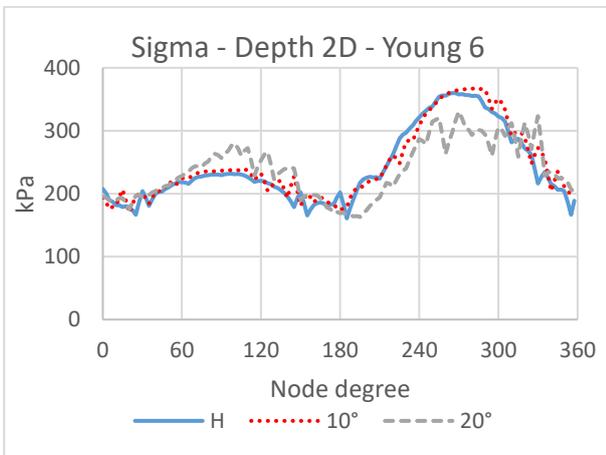


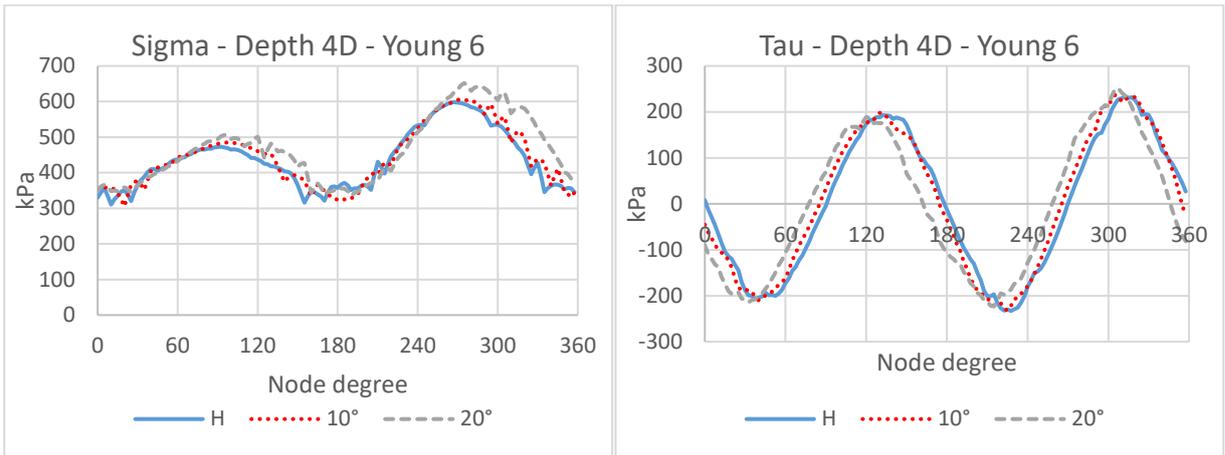
Sito 5





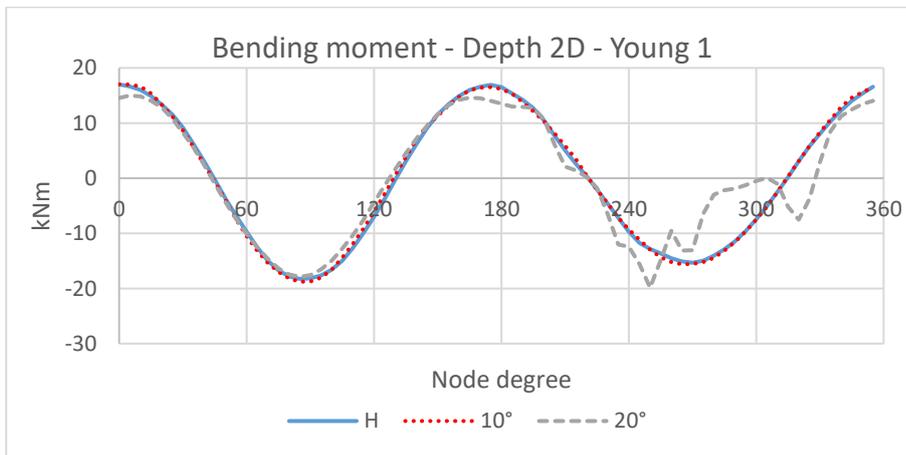
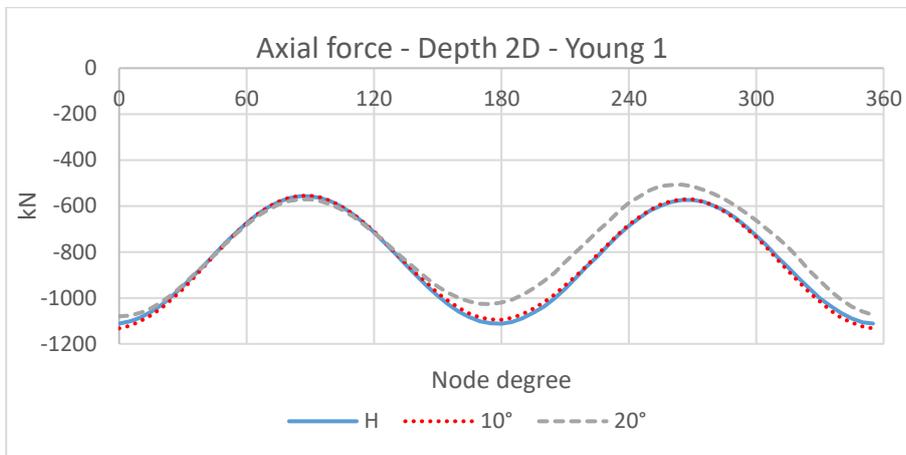
Sito 6

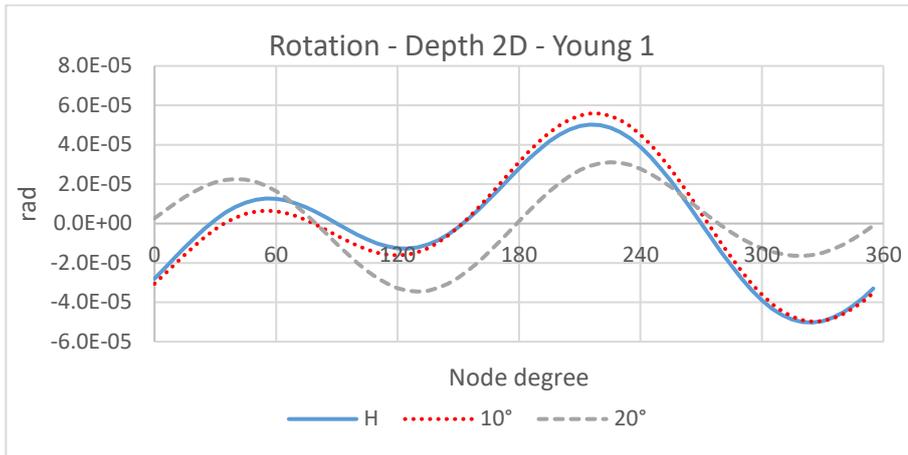




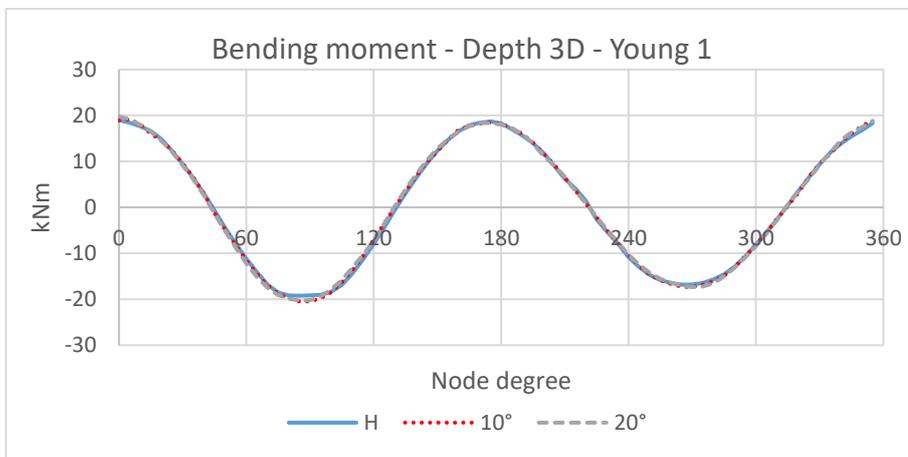
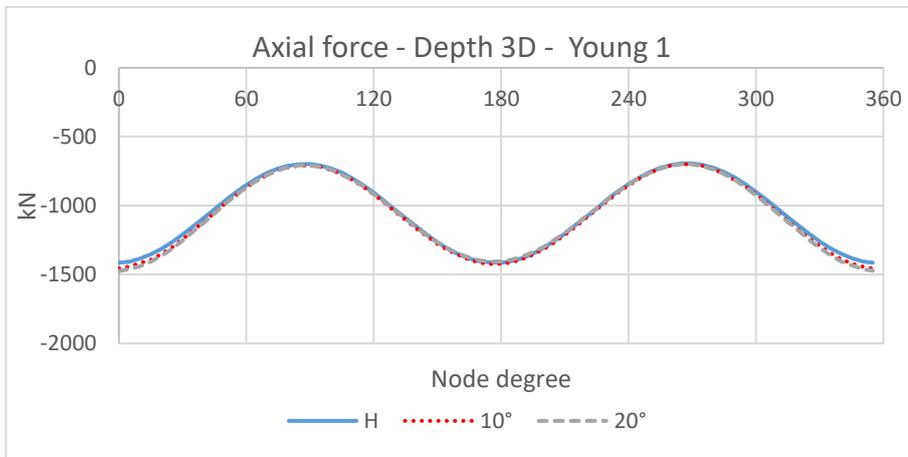
Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni

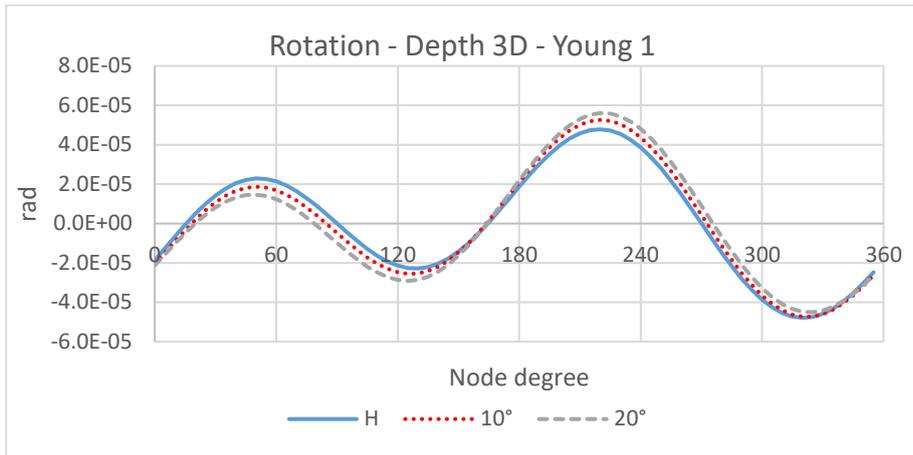
Sito 1 – 2D



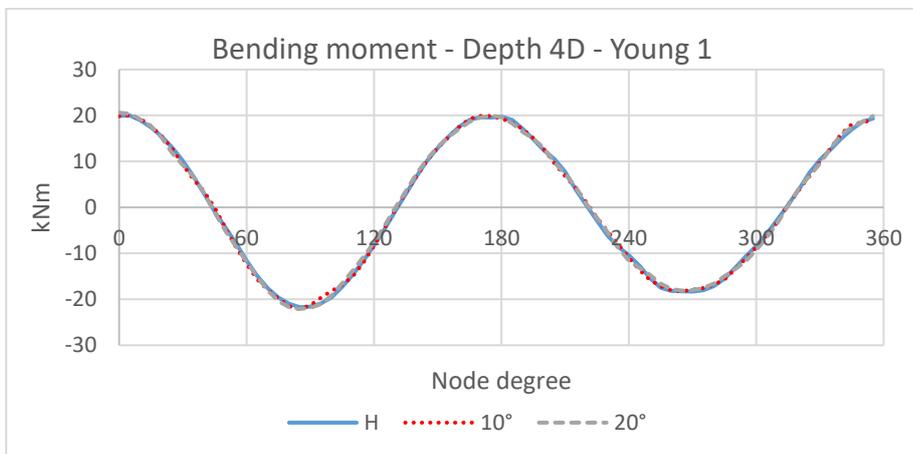
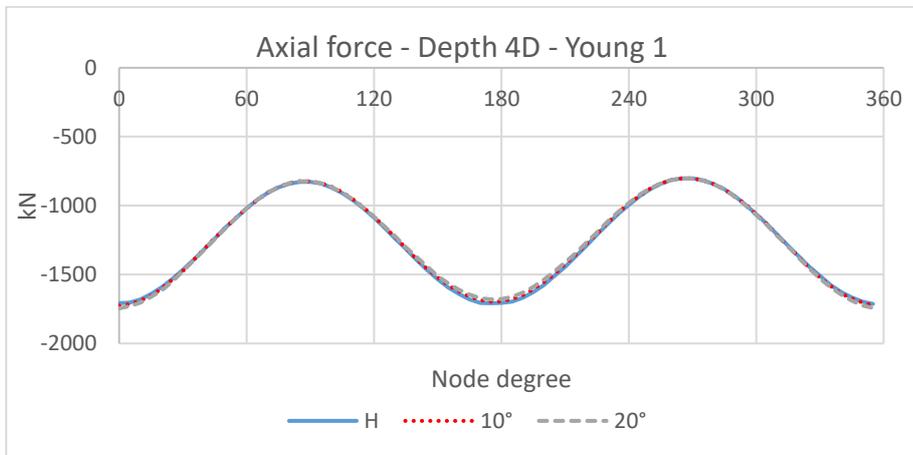


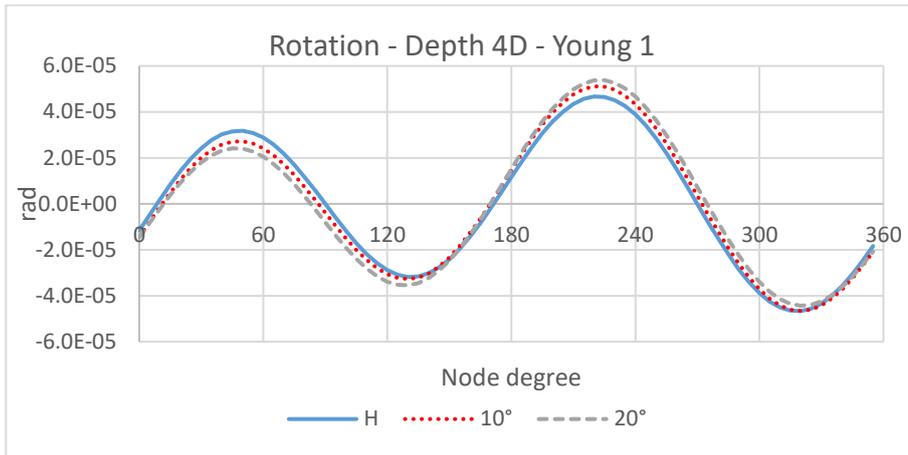
Sito 1 – 3D



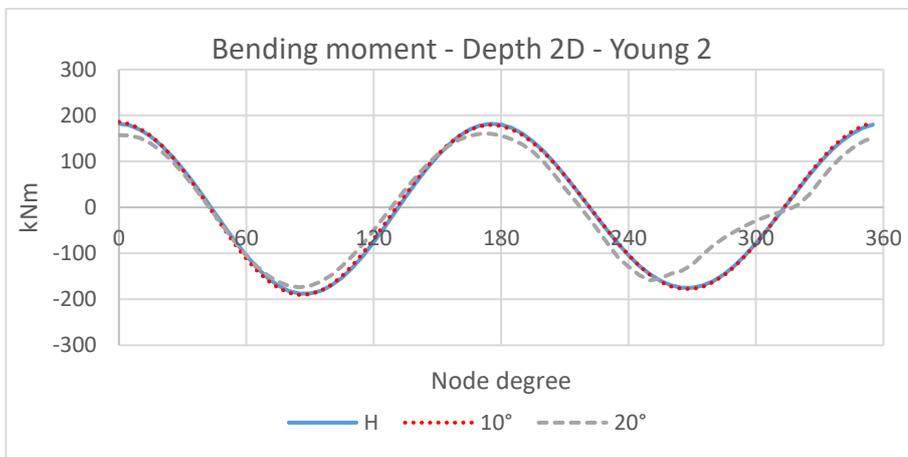
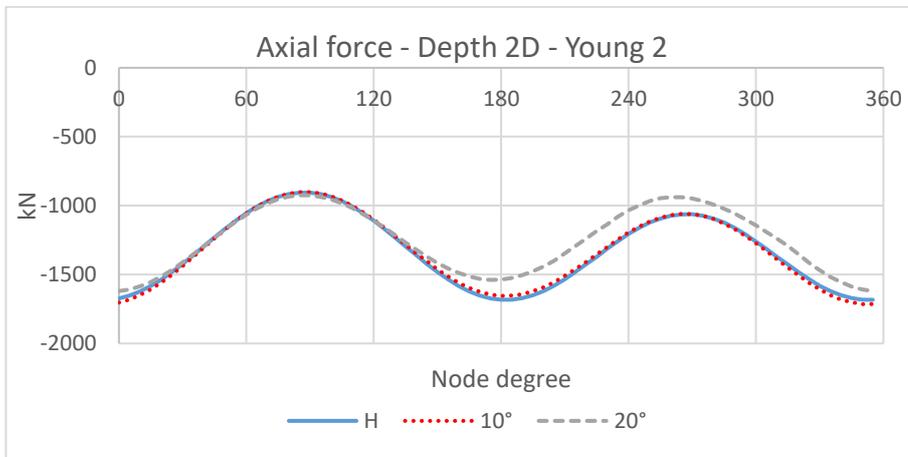


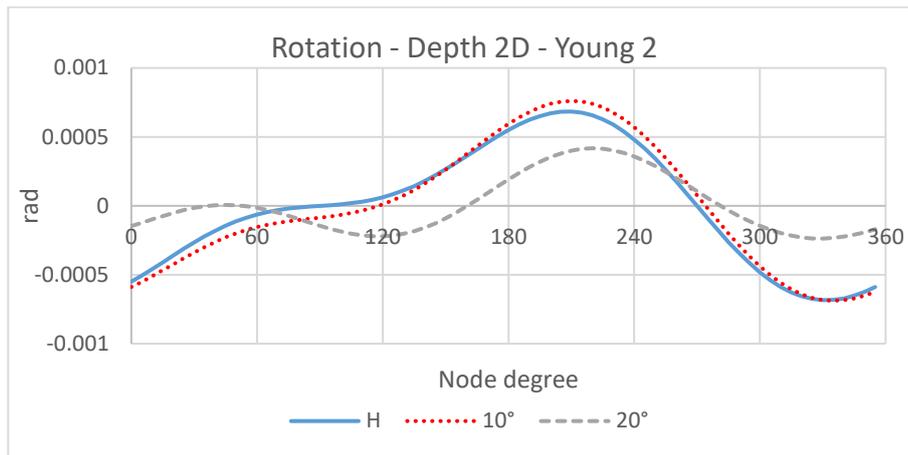
Sito 1 – 4D



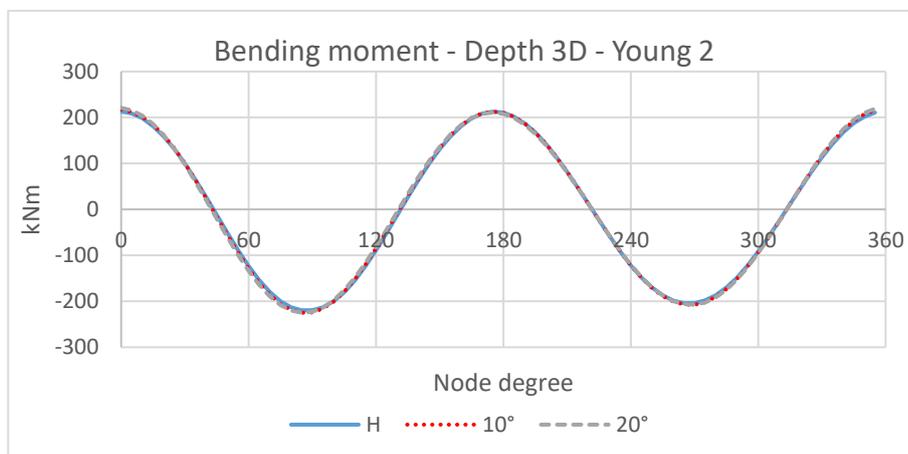
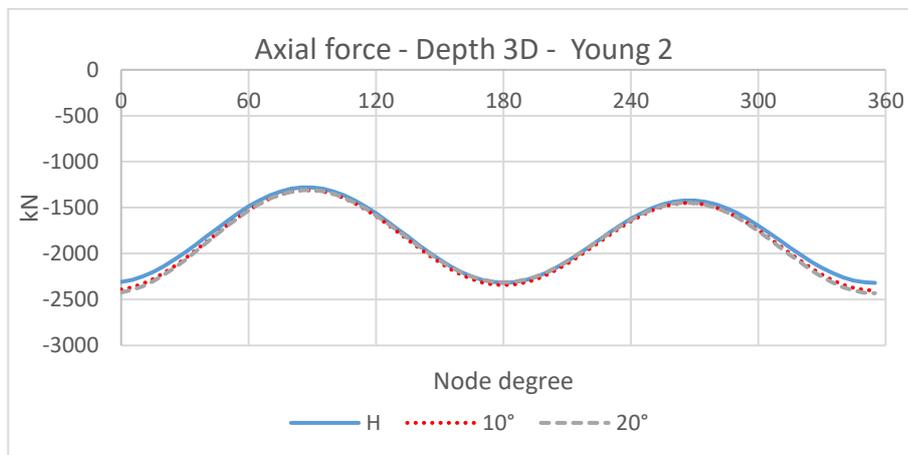


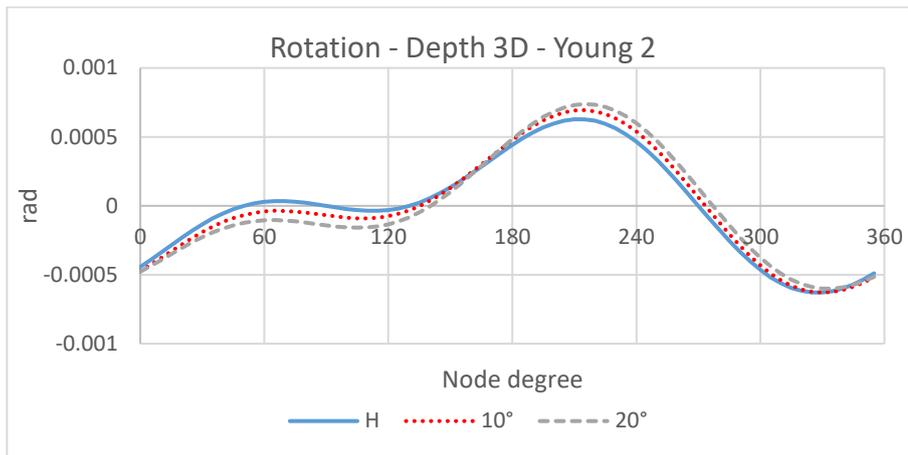
Sito 2 – 2D



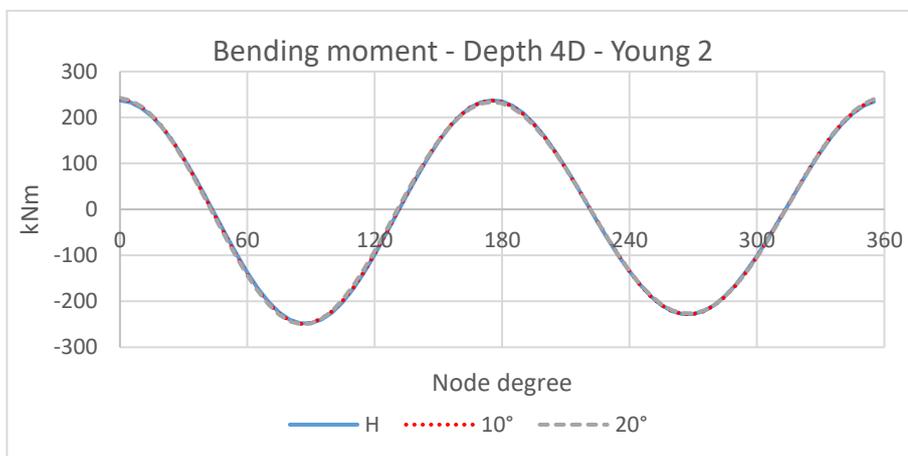
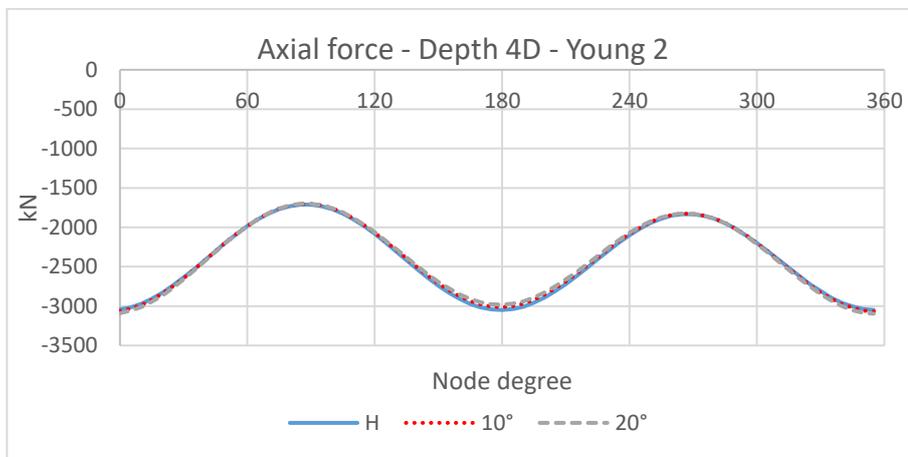


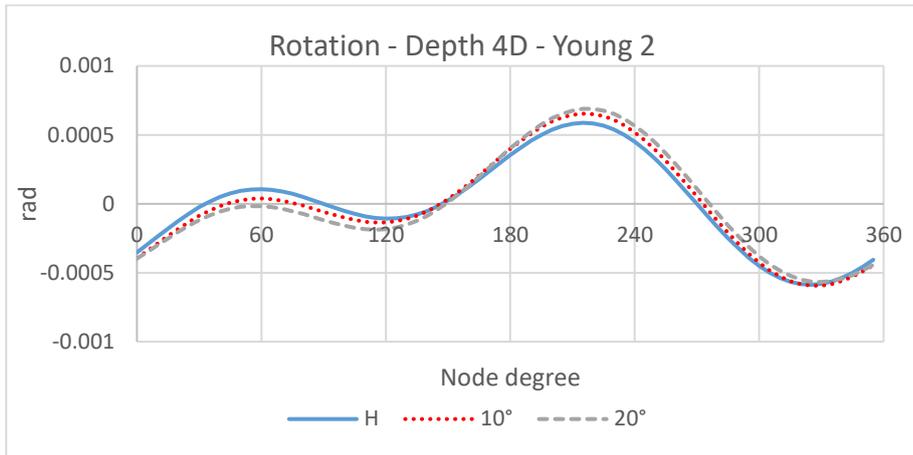
Sito 2 – 3D



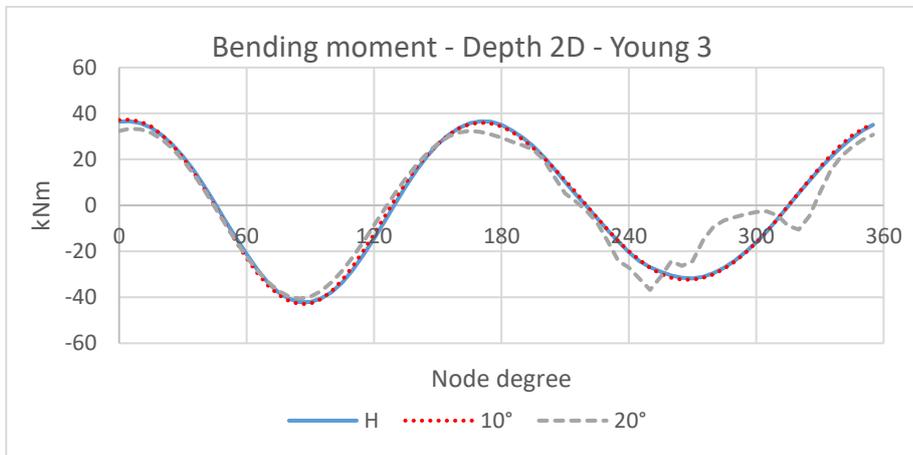
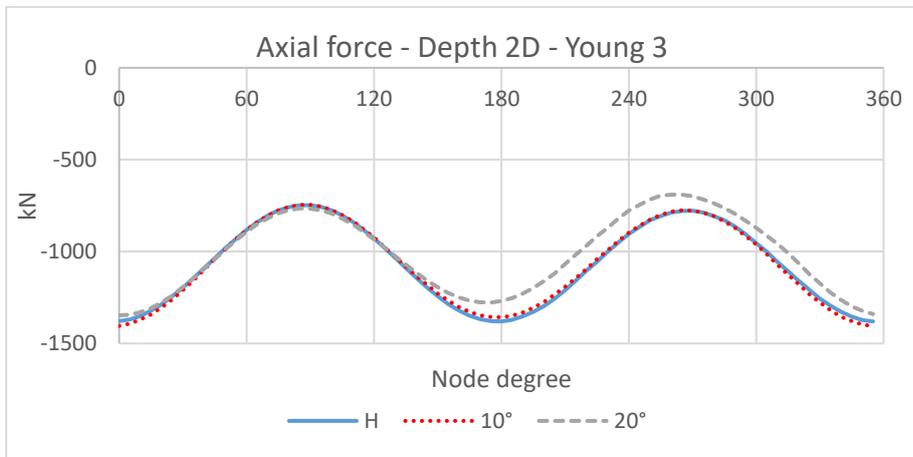


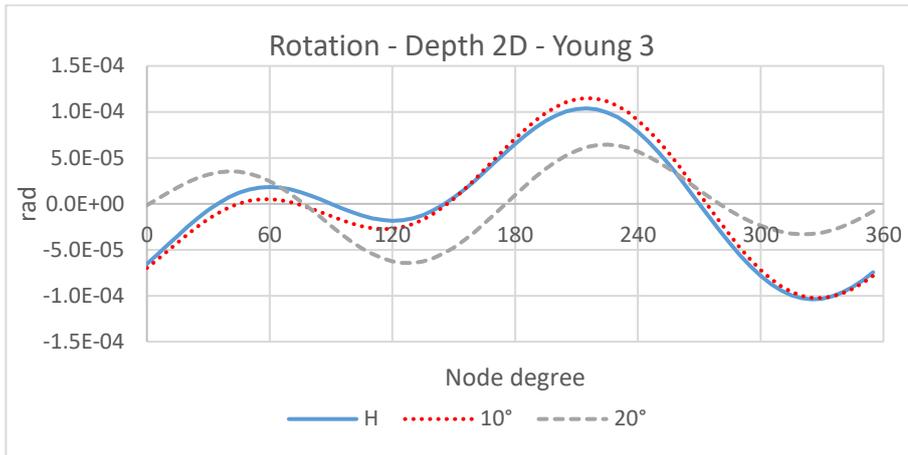
Sito 2 – 4D



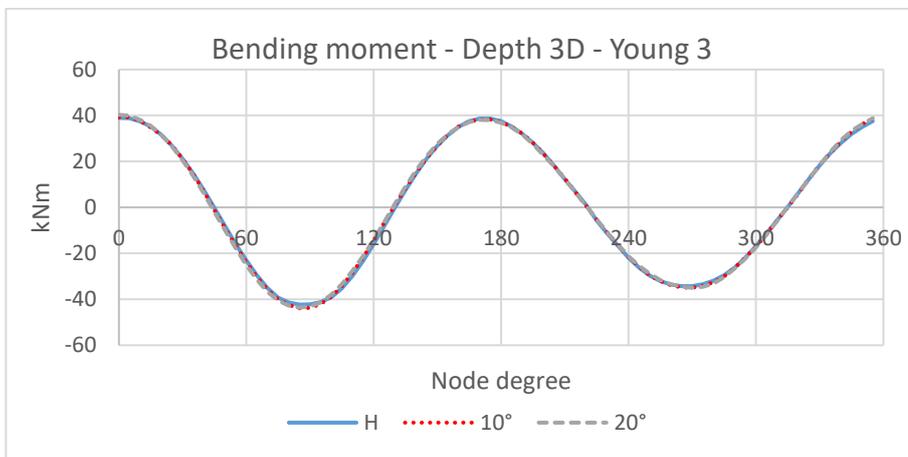
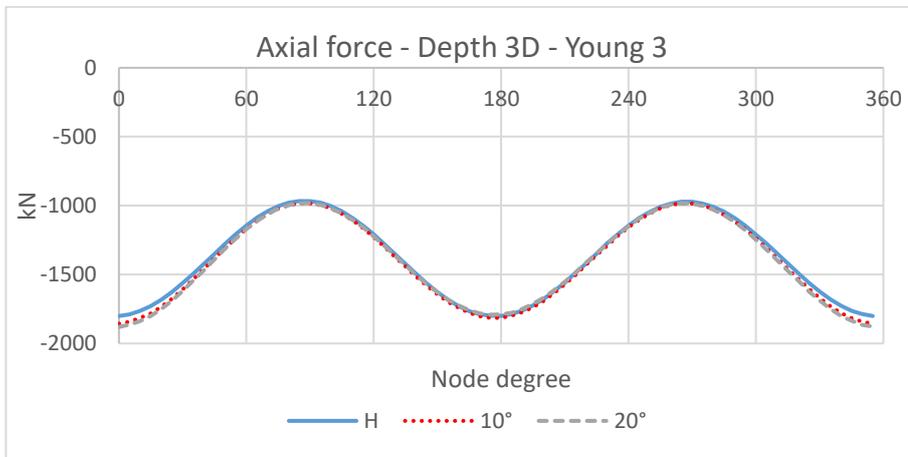


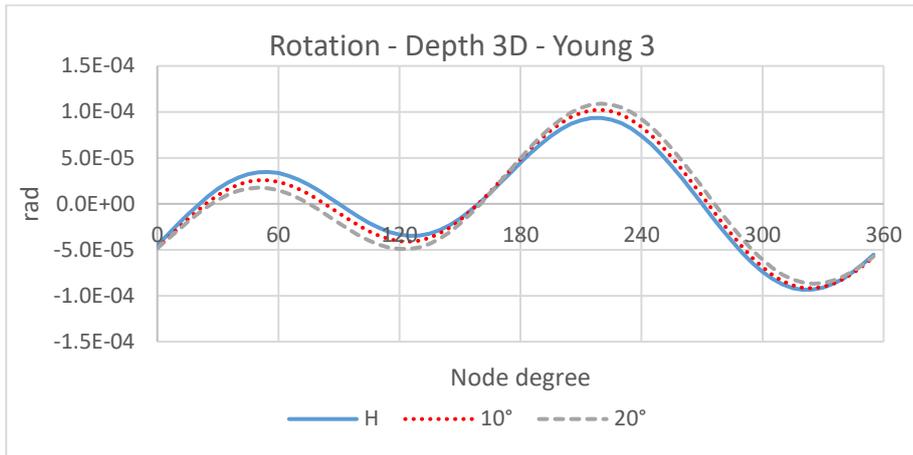
Sito 3 - 2D



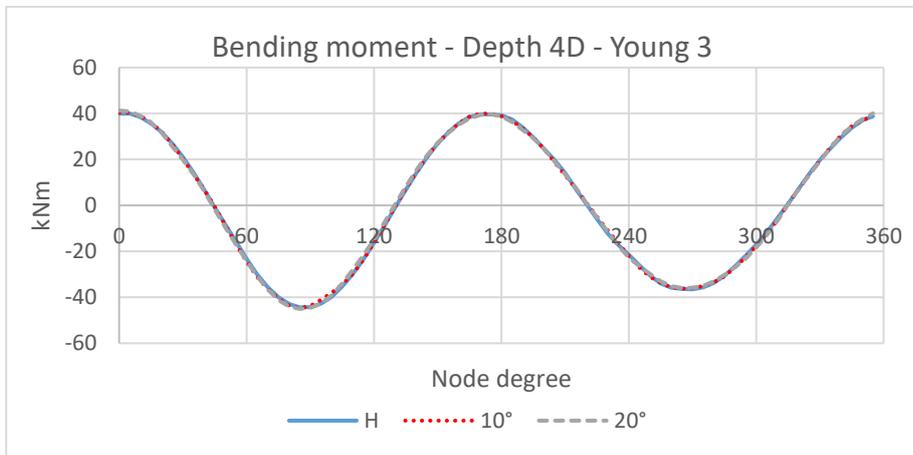
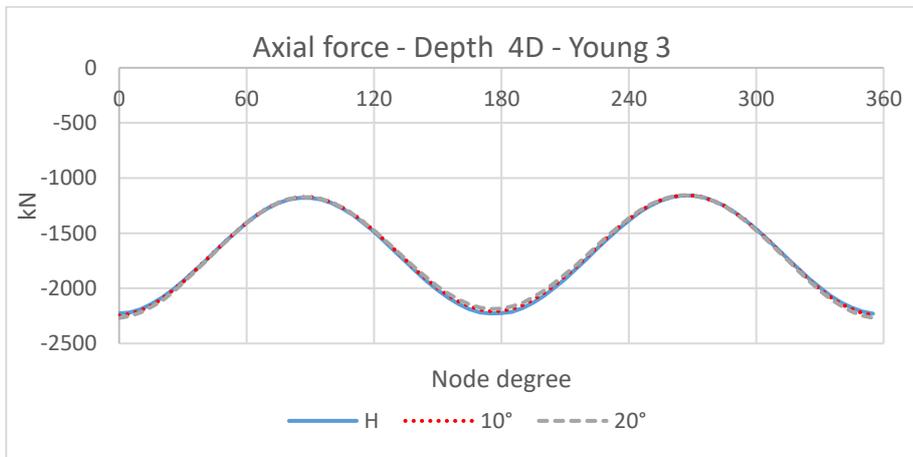


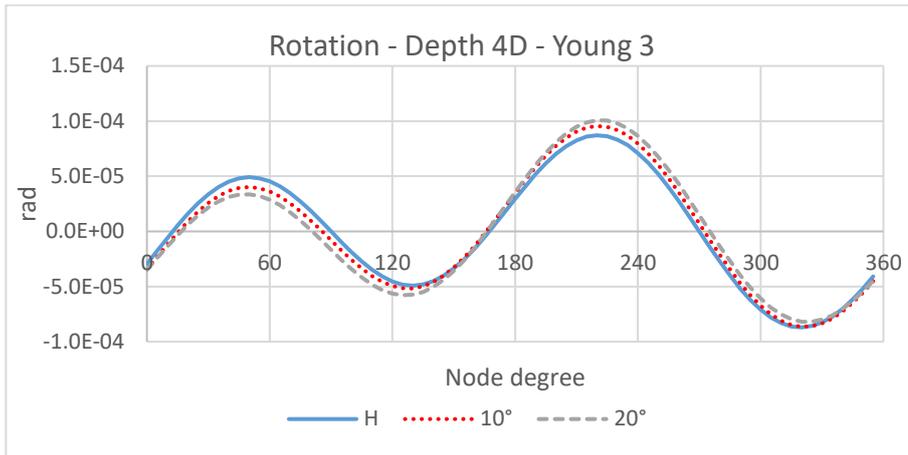
Sito 3 - 3D



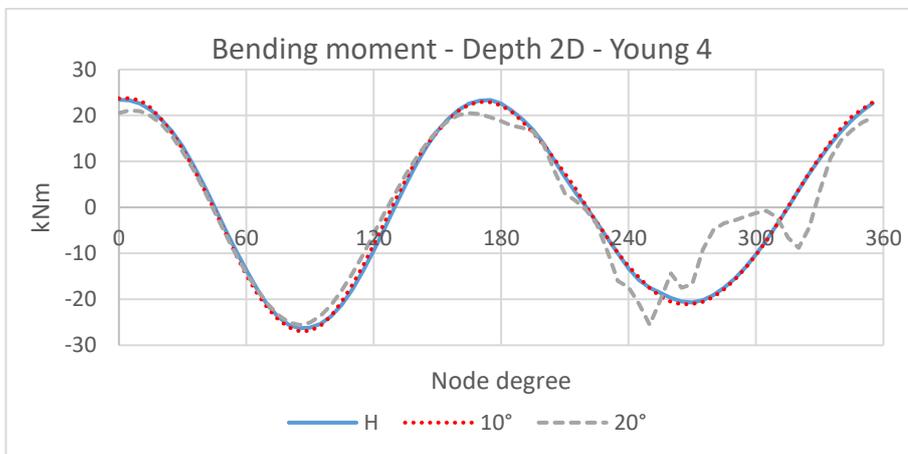
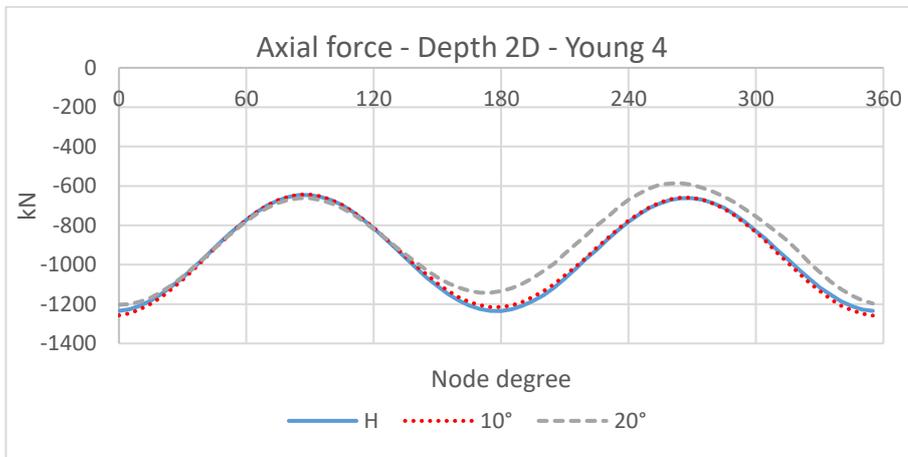


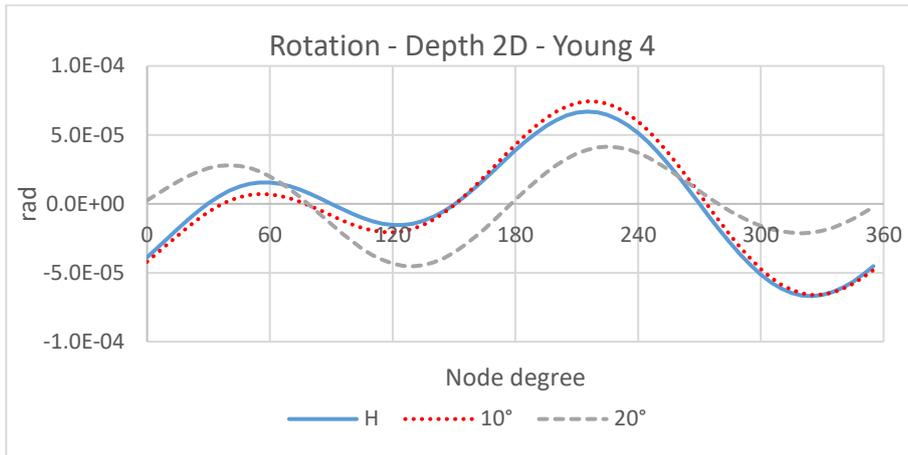
Sito 3 - 4D



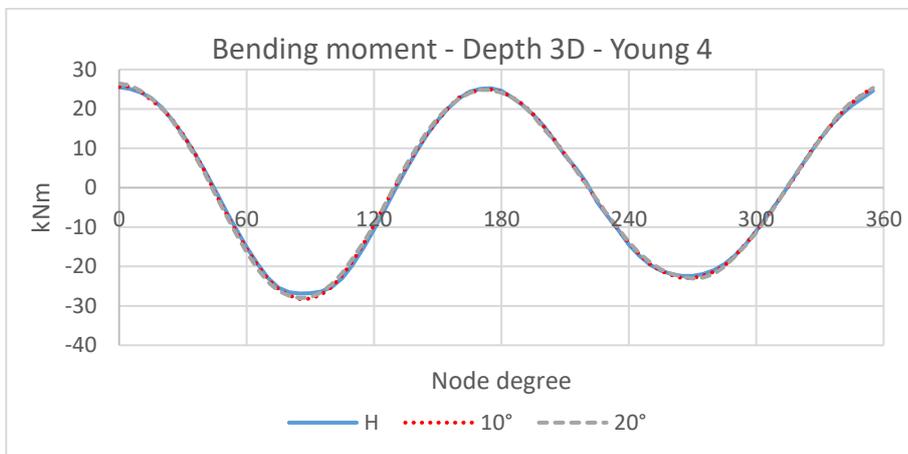
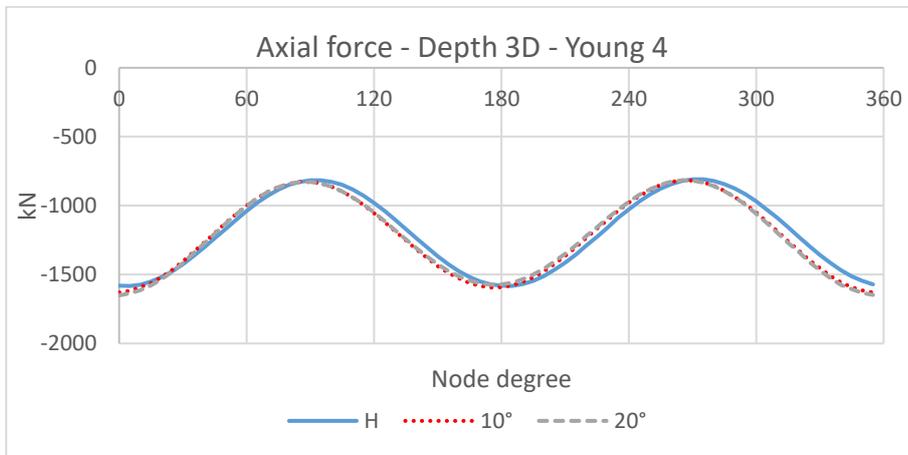


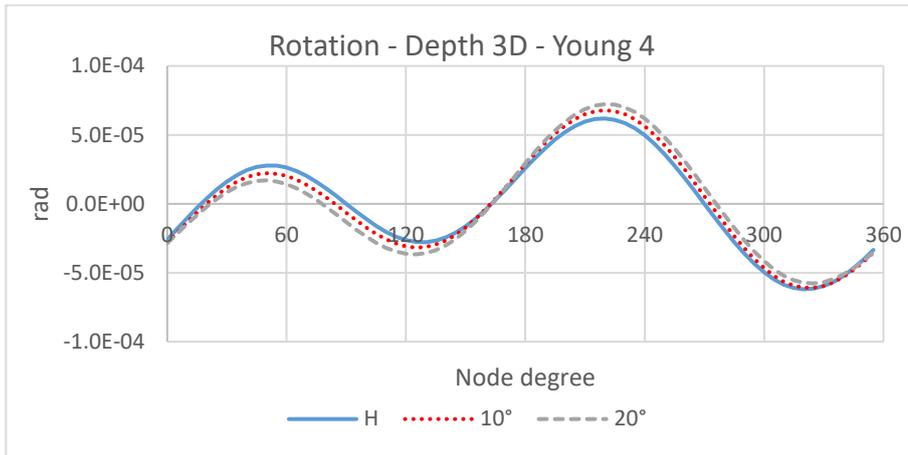
Sito 4 – 2D



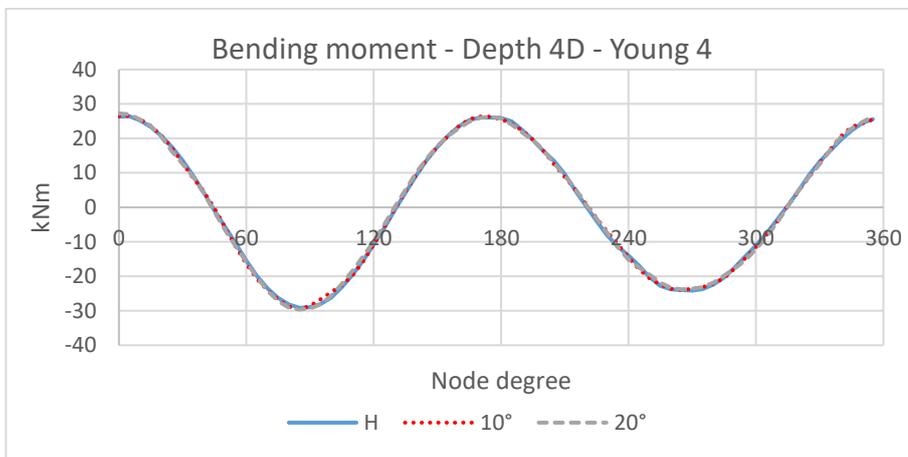
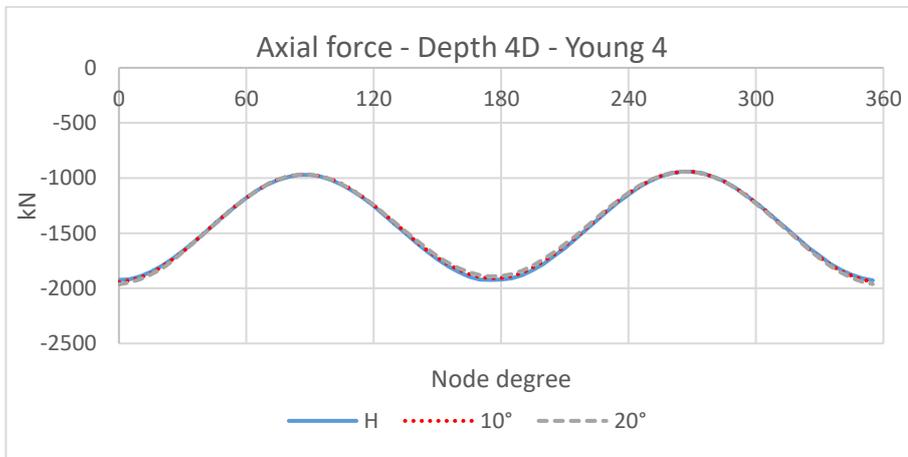


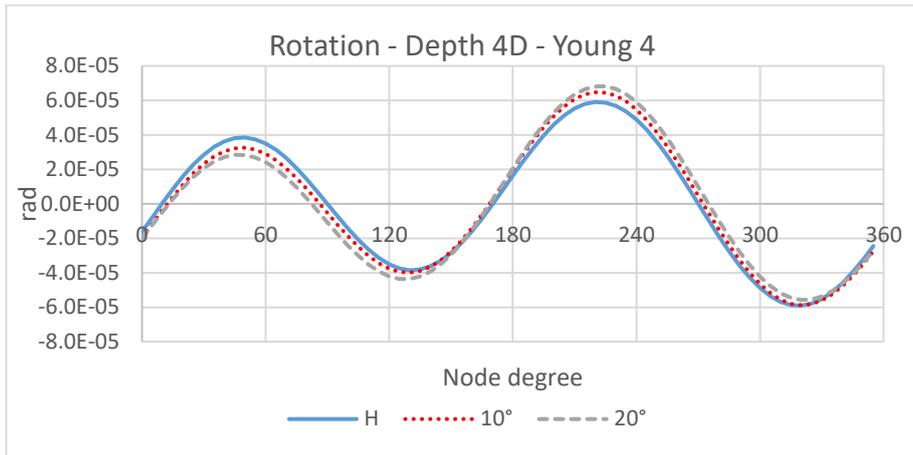
Sito 4 – 3D



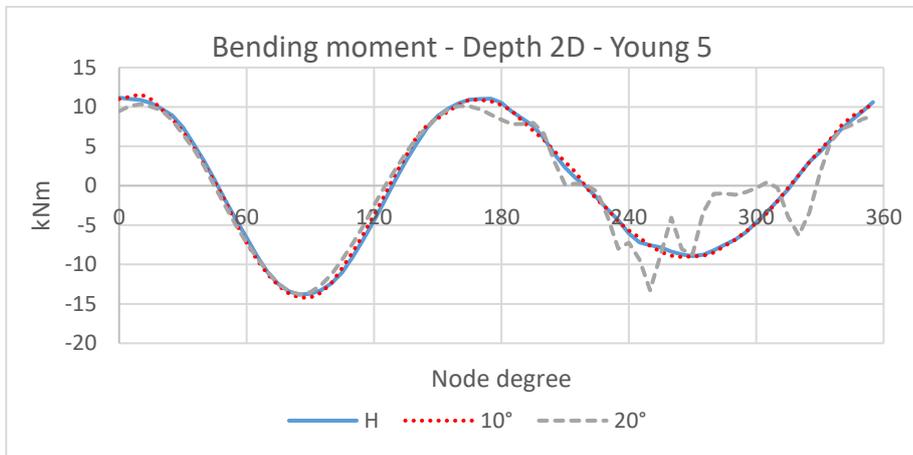
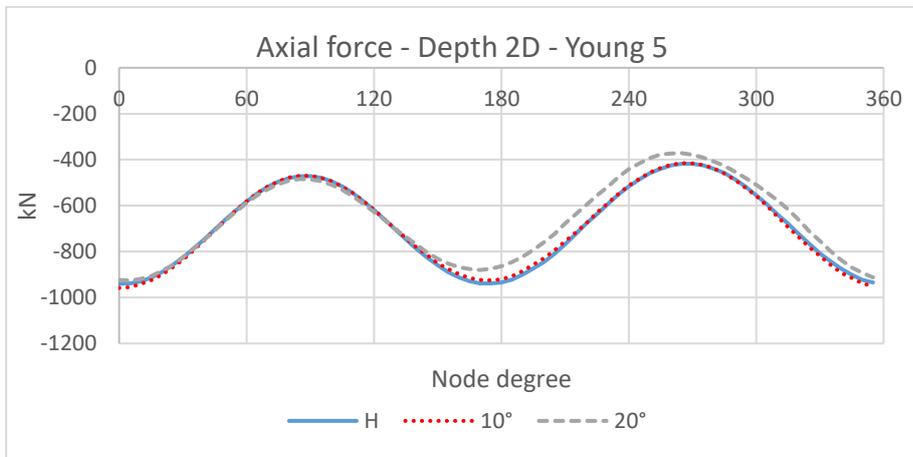


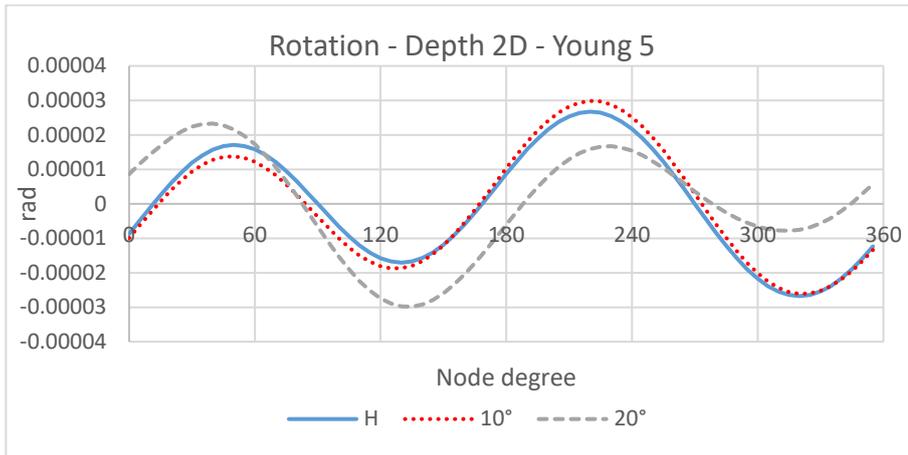
Sito 4 – 4D



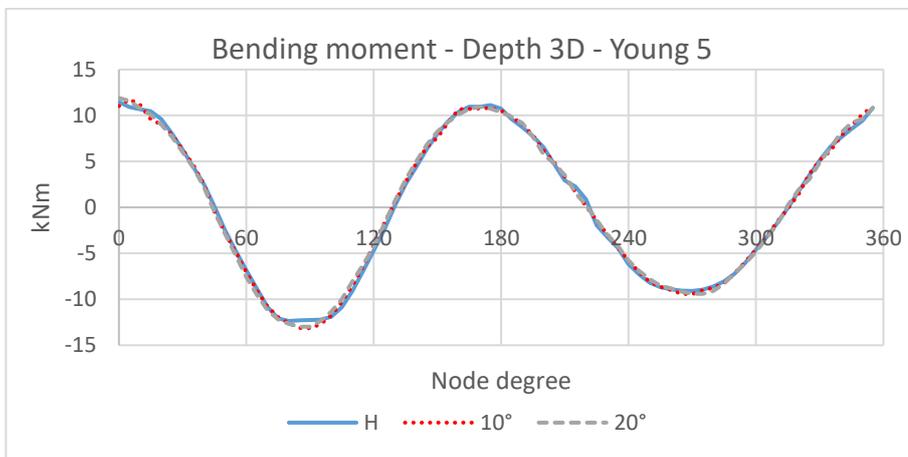
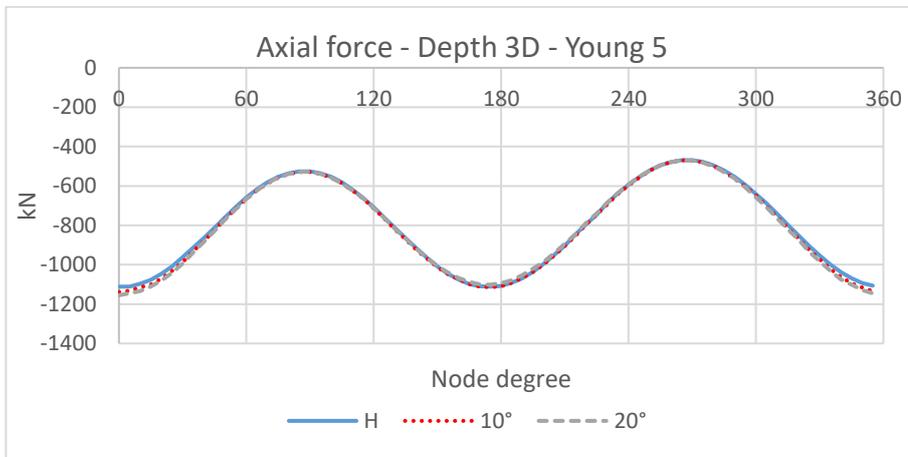


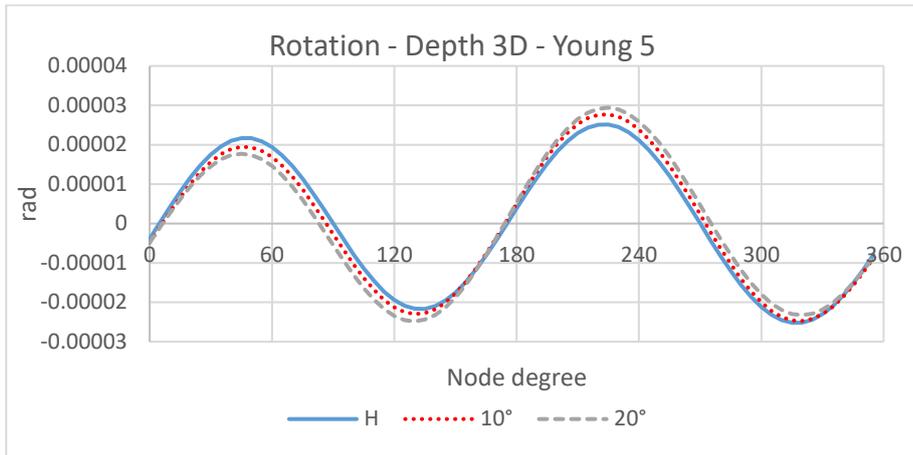
Sito 5 – 2D



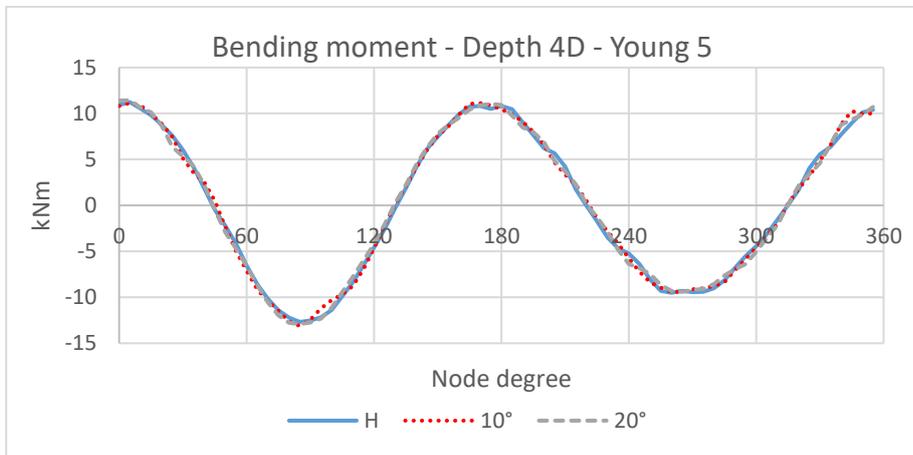
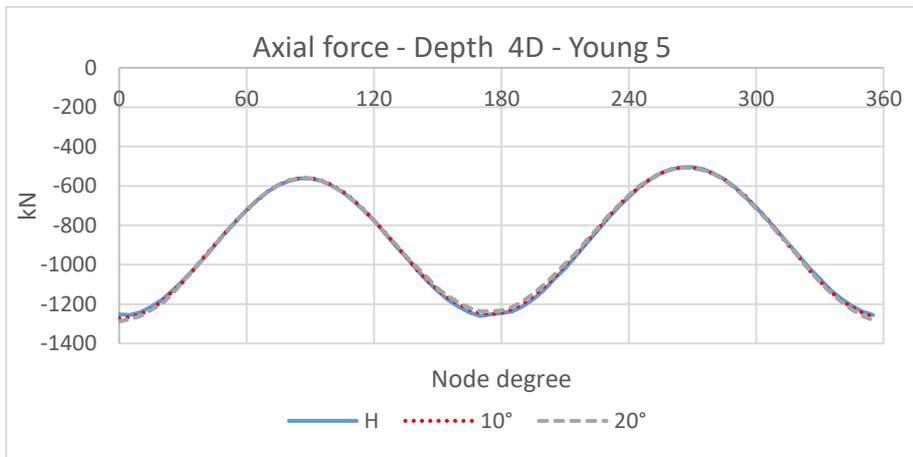


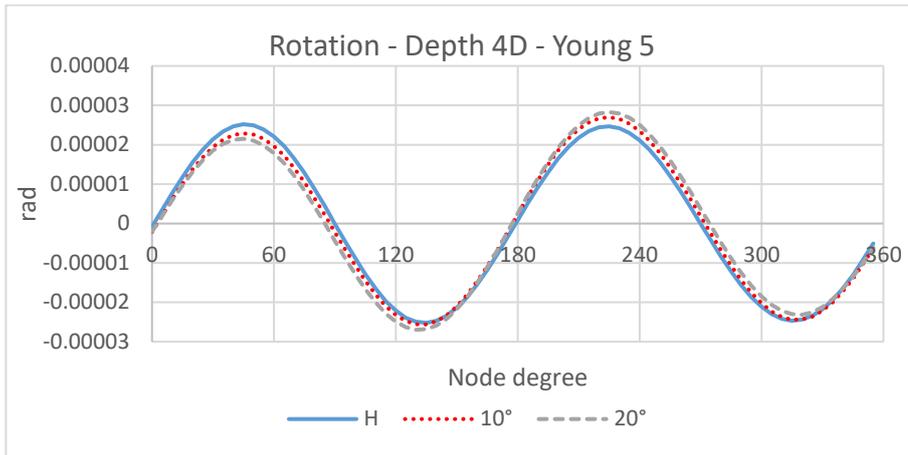
Sito 5 – 3D



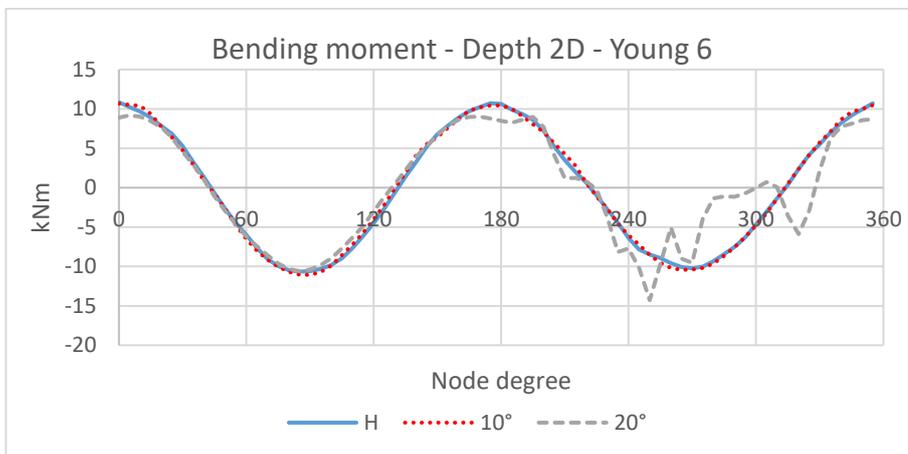
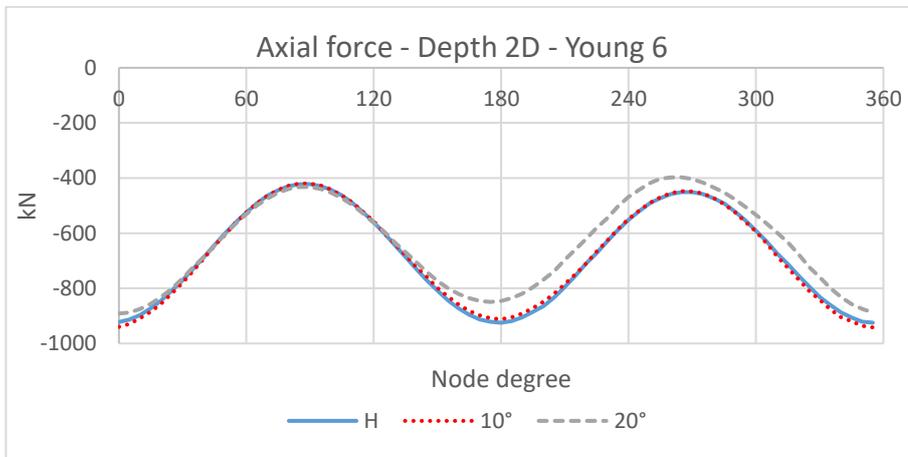


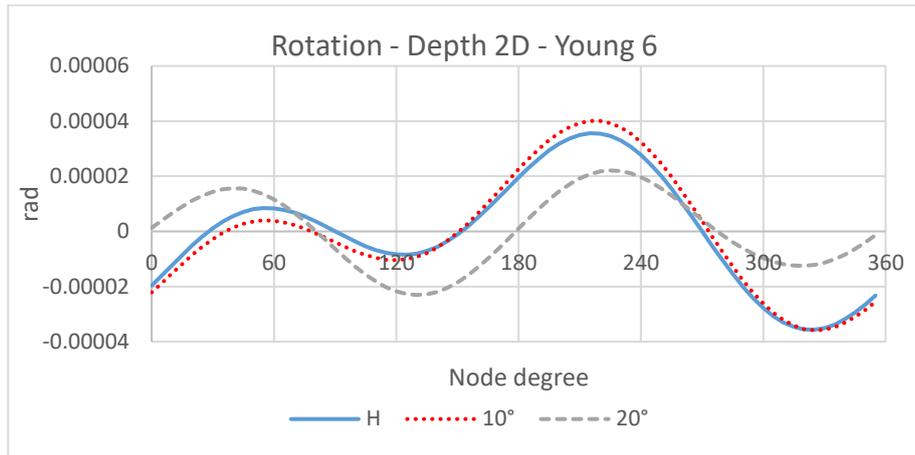
Sito 5 – 4D



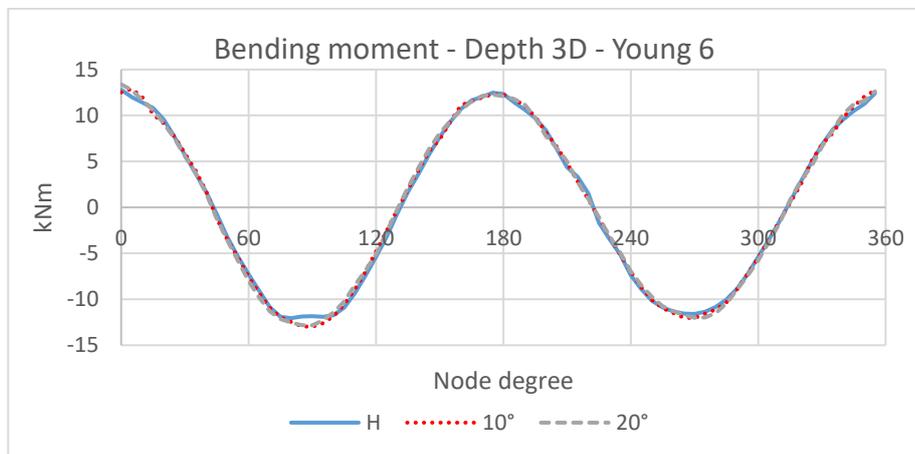
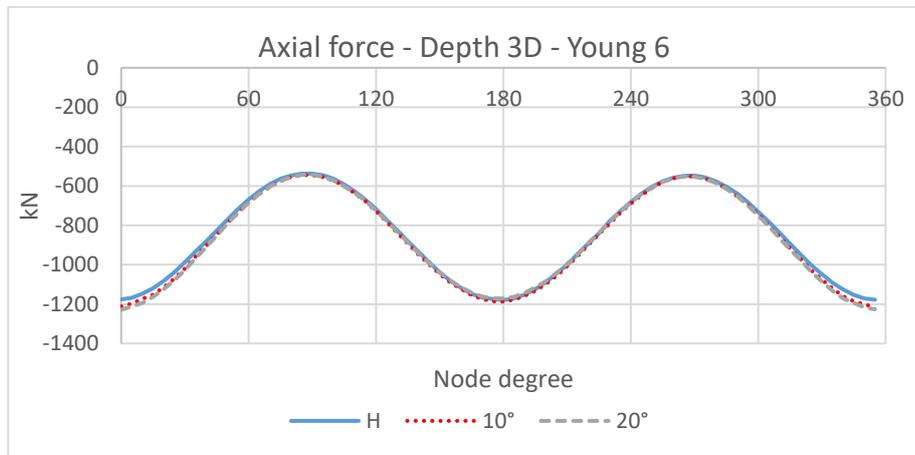


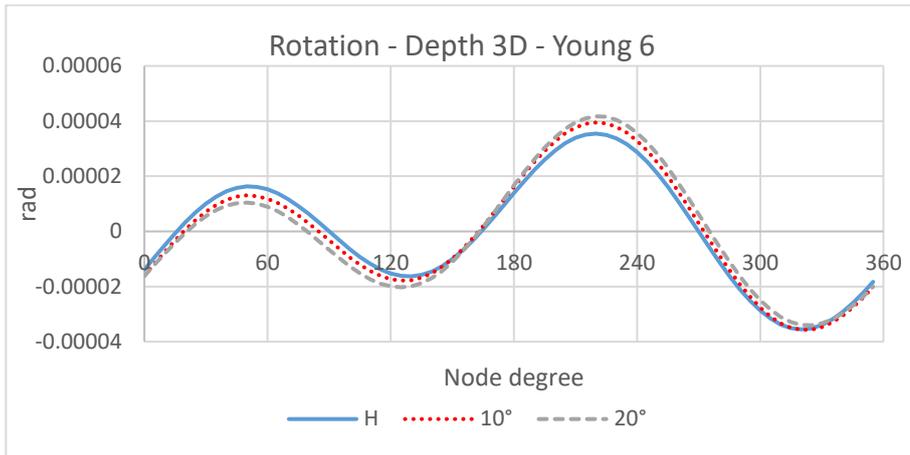
Sito 6 – 2D



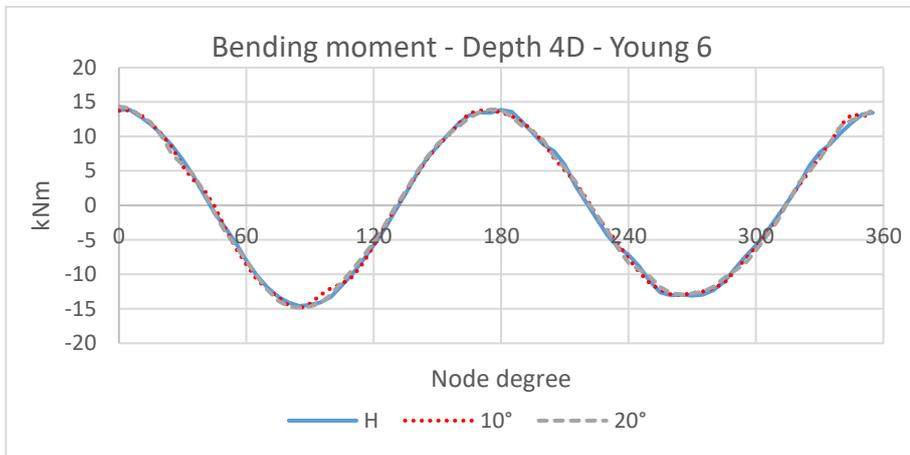
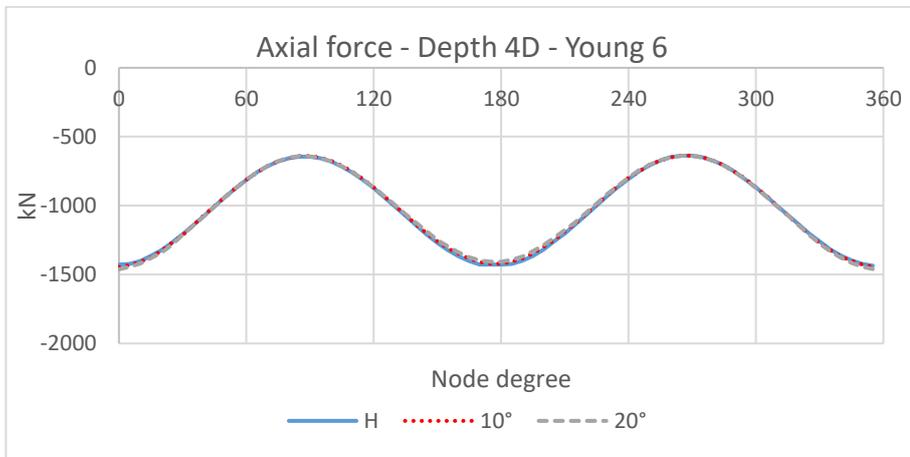


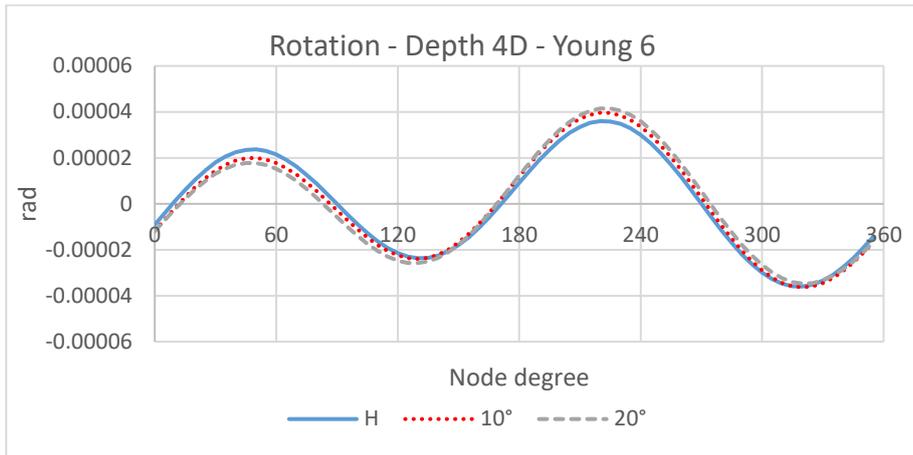
Sito 6 – 3D





Sito 6 – 4D



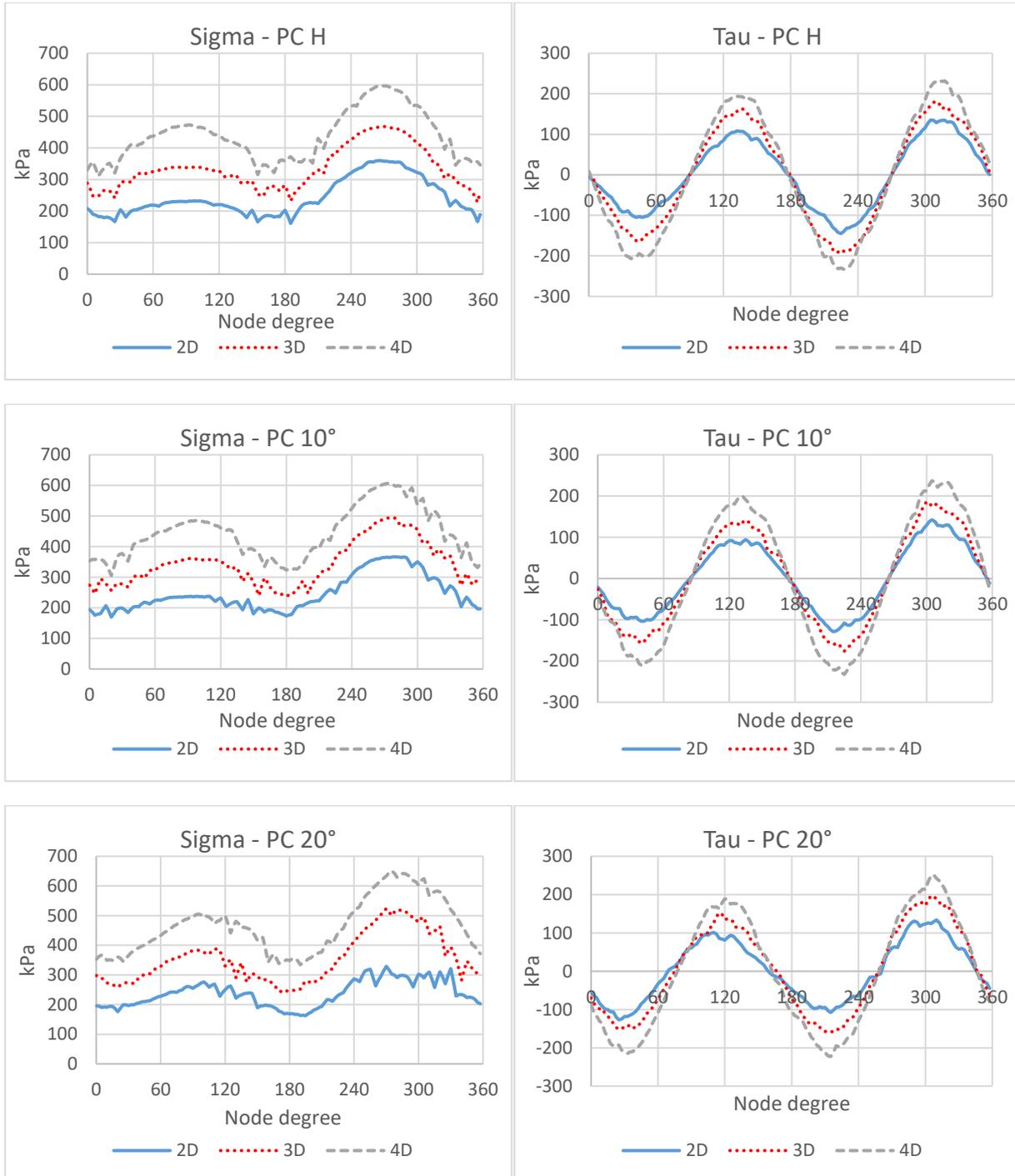


Modelli 1 – 54: Confronto al variare della profondità del piano campagna

All'aumentare della profondità dal piano campagna si nota un aumento dell'ampiezza dei carichi e dei diagrammi di sforzo normale e rotazione mentre solo un leggerissimo aumento dell'ampiezza nei diagrammi di momento flettente.

Tensioni radiali e tangenziali allo stage "Relax 60%"

Per tutti i sei siti in esame

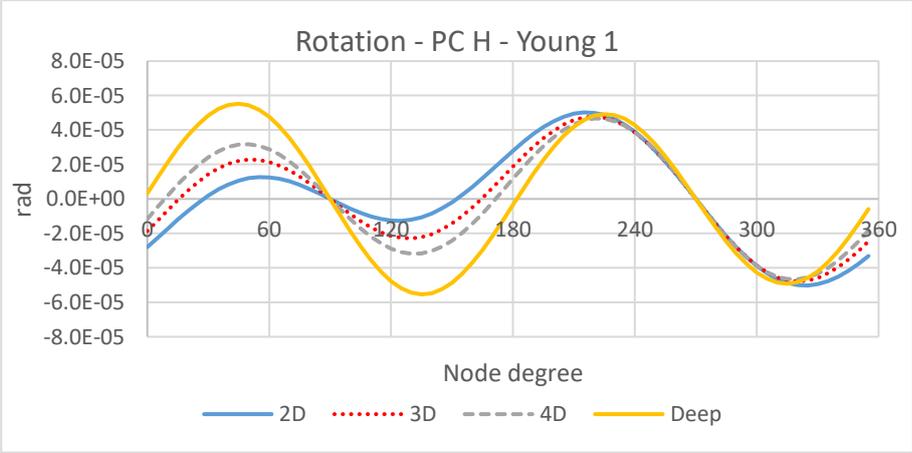
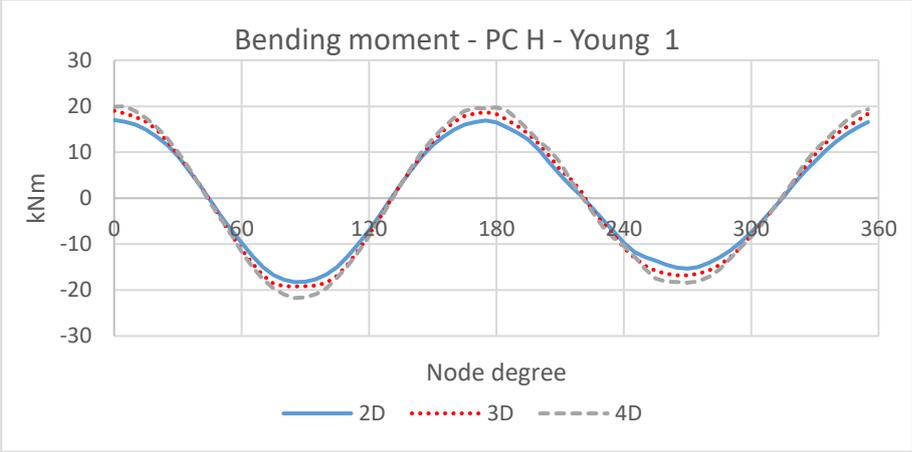
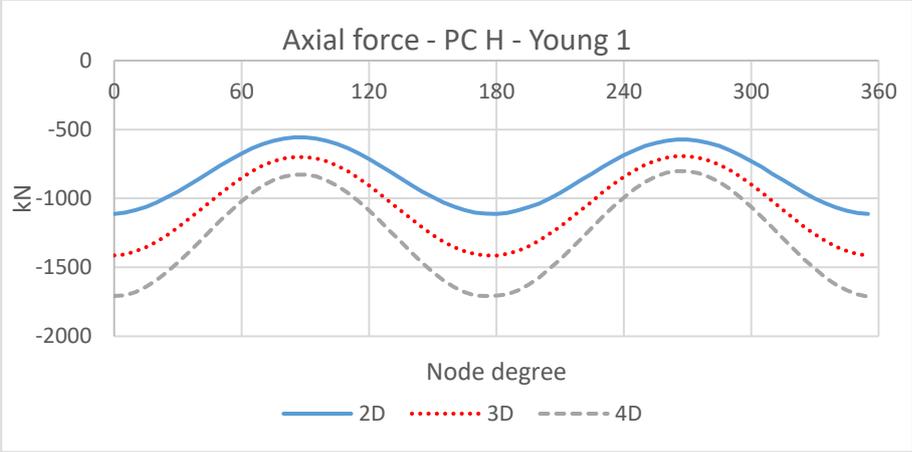


Si noti come questi diagrammi sono identici per tutti i sei siti in esame, ovvero nello stage "relax 60%" le tensioni radiali e tangenziali al contorno dello scavo dipendono solo dal peso specifico del terreno e non dalla sua rigidezza. I modelli in esame sono tutti elastici e non vi è

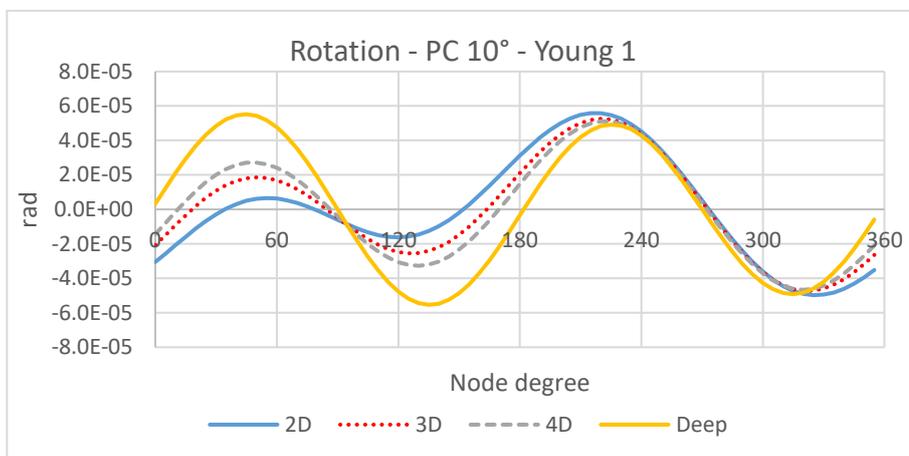
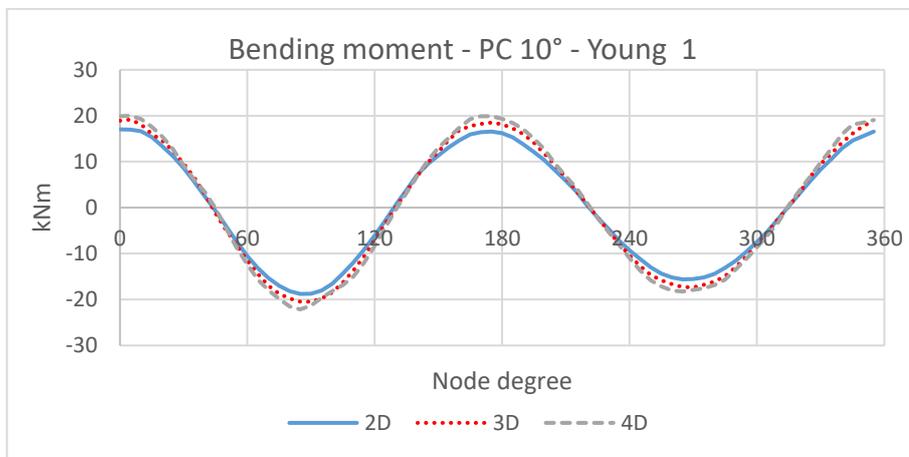
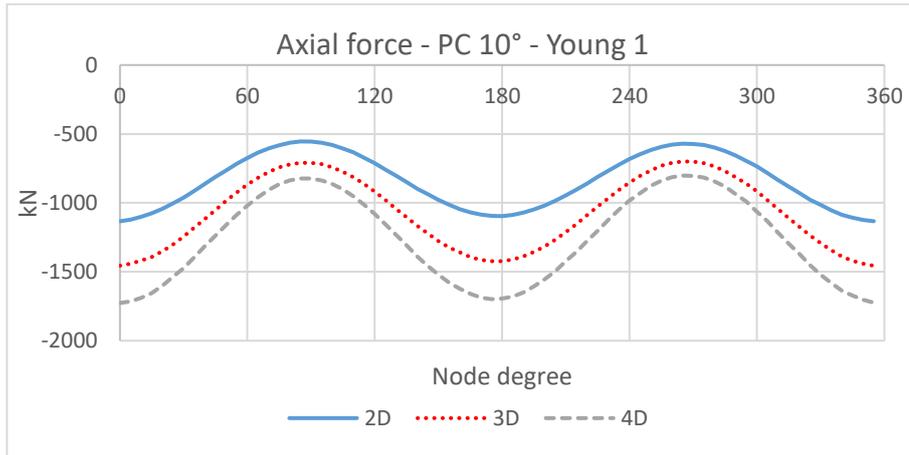
plasticizzazione del materiale che causerebbe la redistribuzione delle tensioni. Naturalmente anche se le tensioni non cambiano, ciò non vale per le caratteristiche della sollecitazione e le rotazioni del liner. Infatti nella deformazione del modello che genera queste grandezze è coinvolta la deformazione del terreno che dipende dalla sua rigidità.

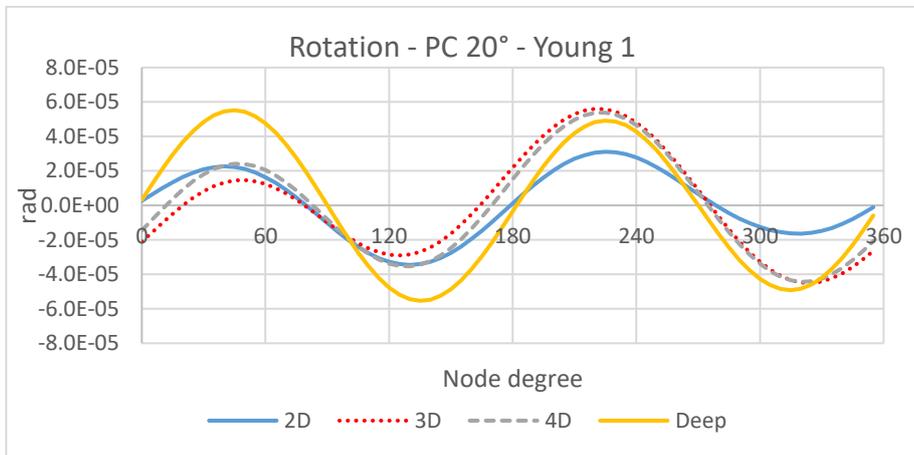
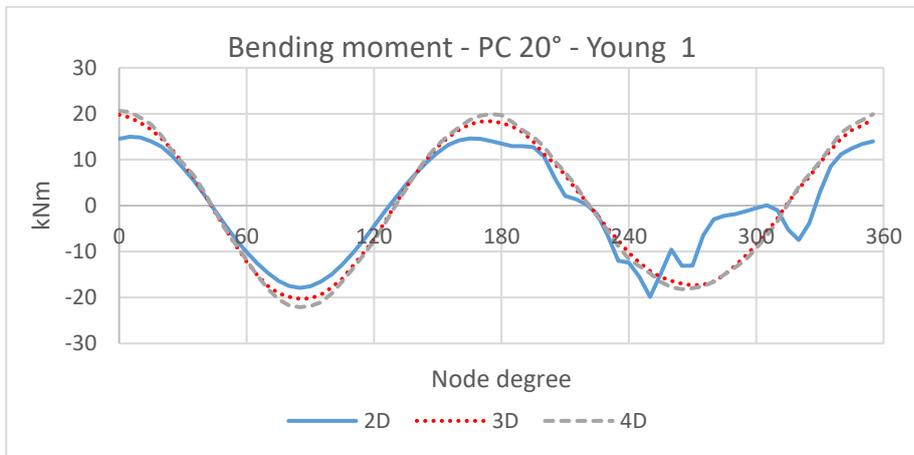
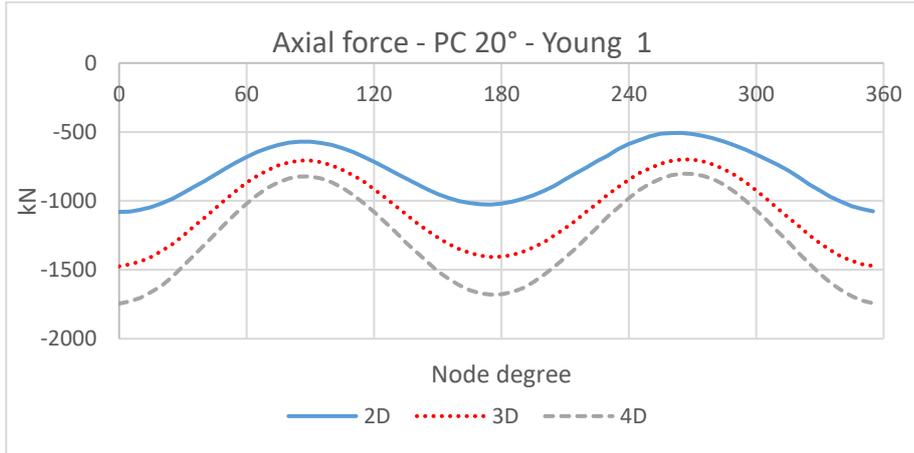
Caratteristiche della sollecitazione e Rotazioni

Sito 1 – PC H

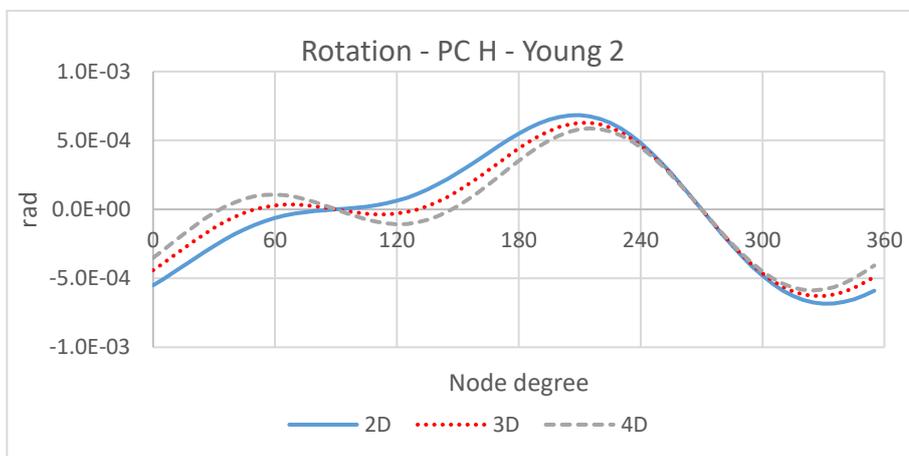
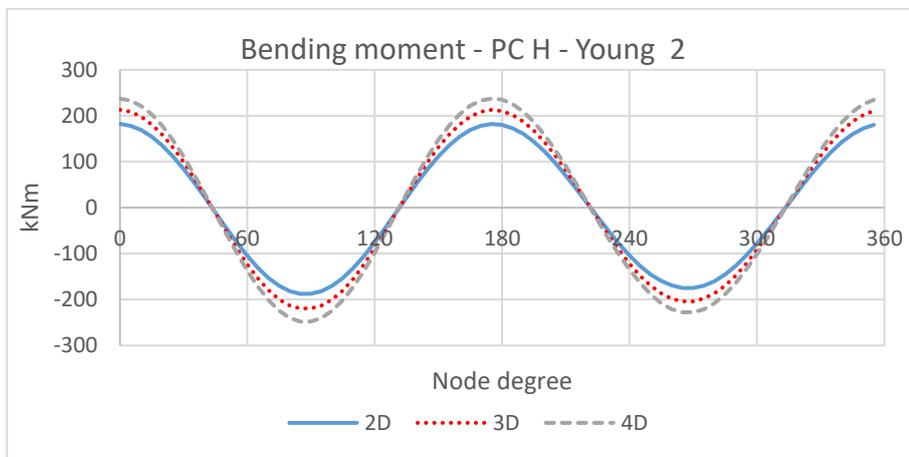
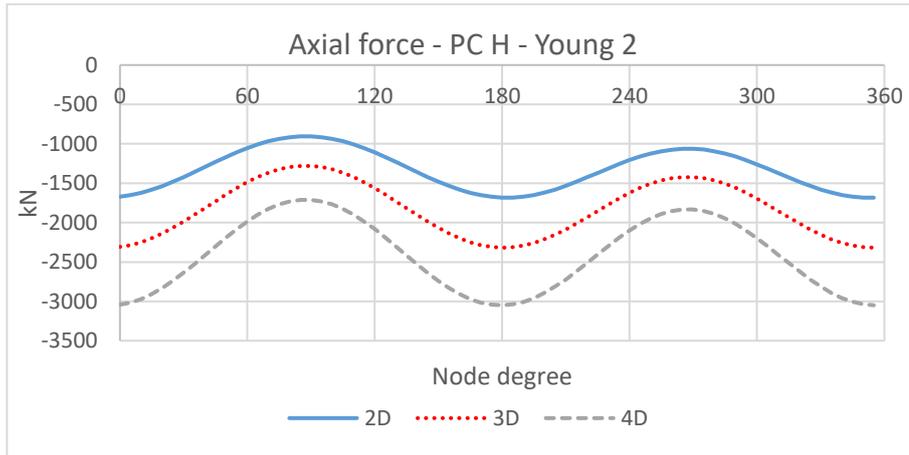


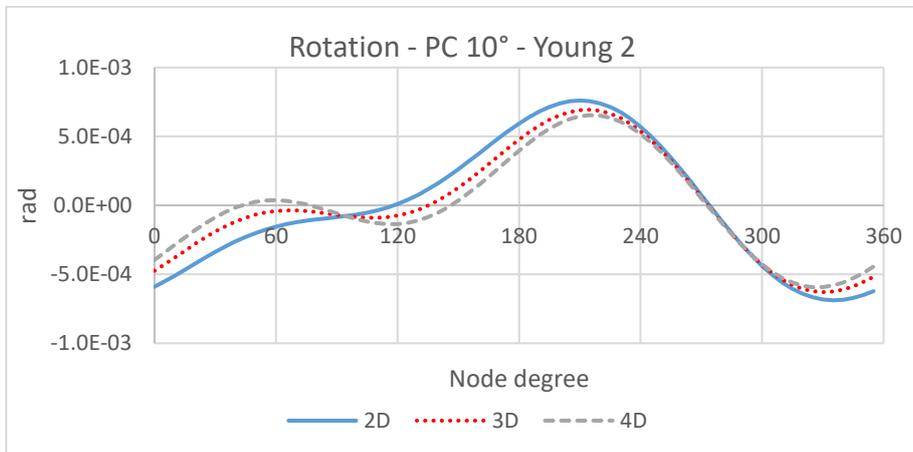
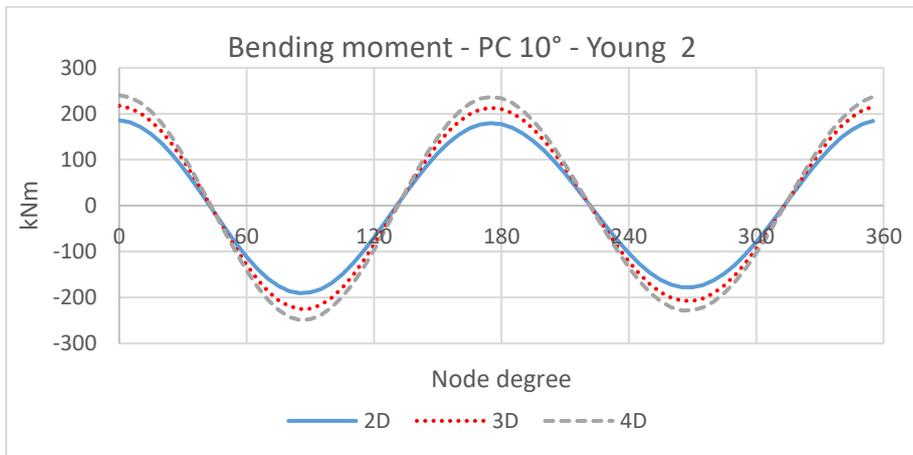
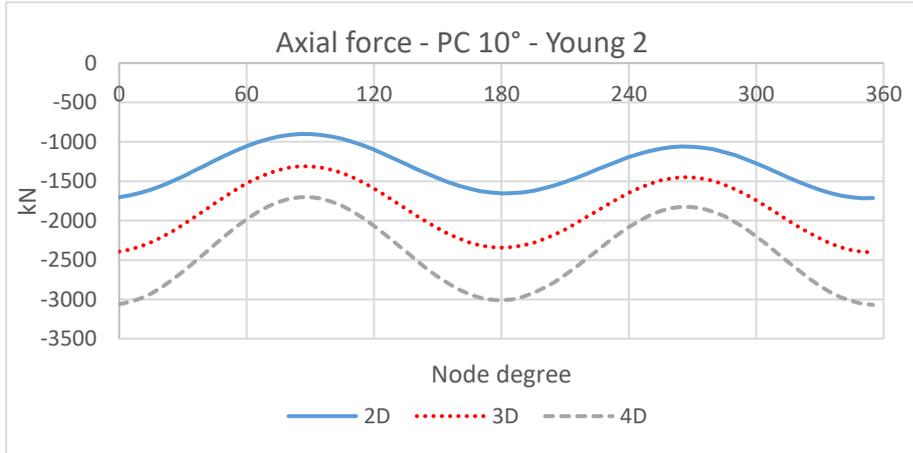
Sito 1 – PC 10°



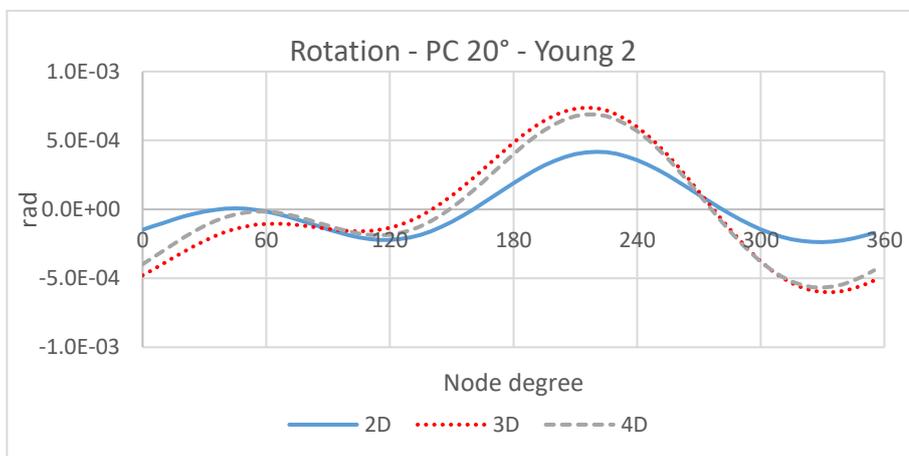
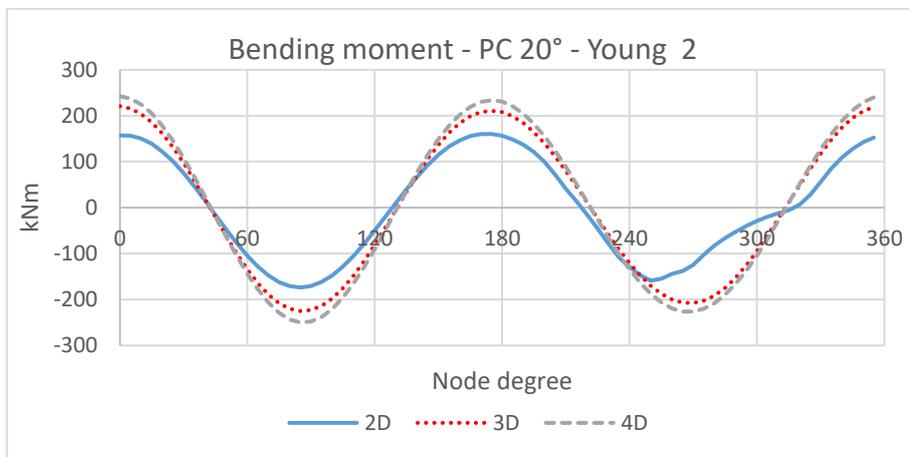
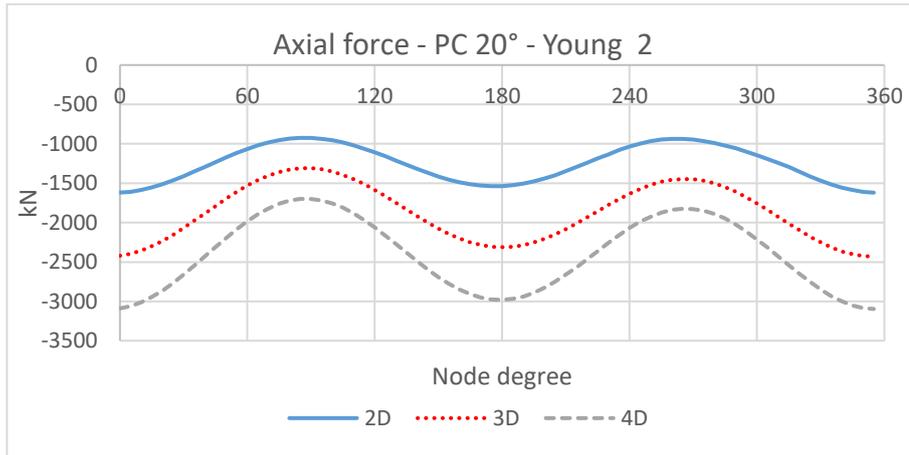


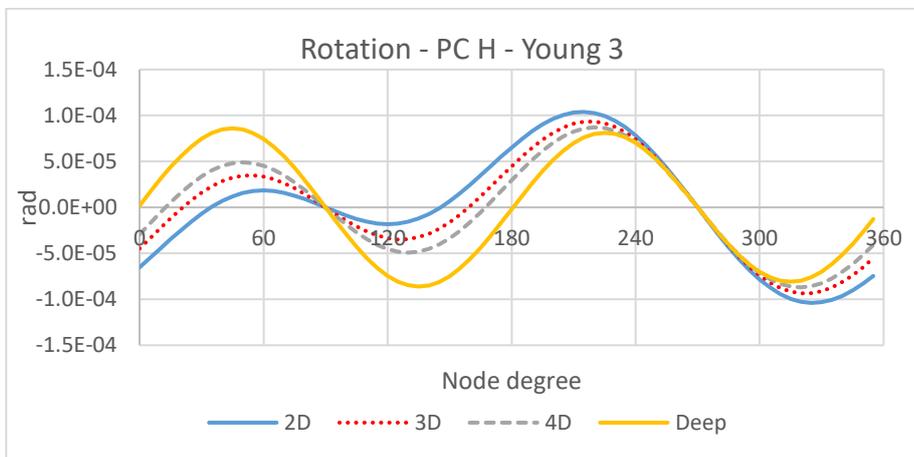
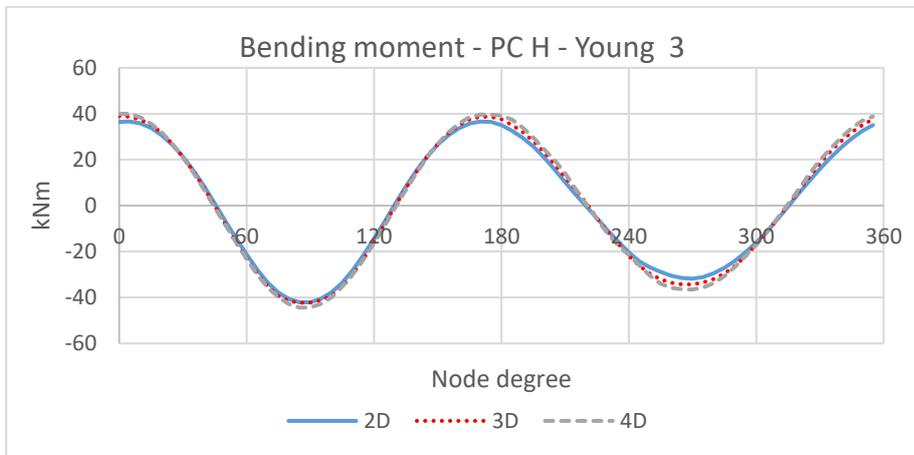
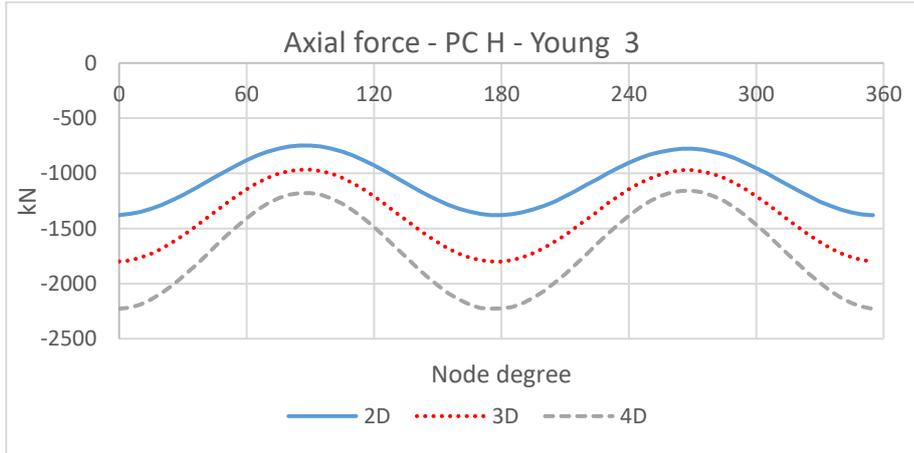
Sito 2 – PC H



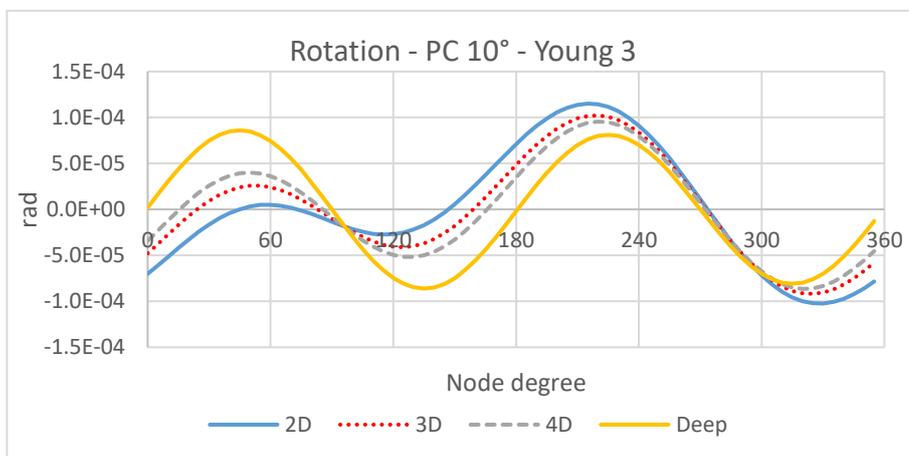
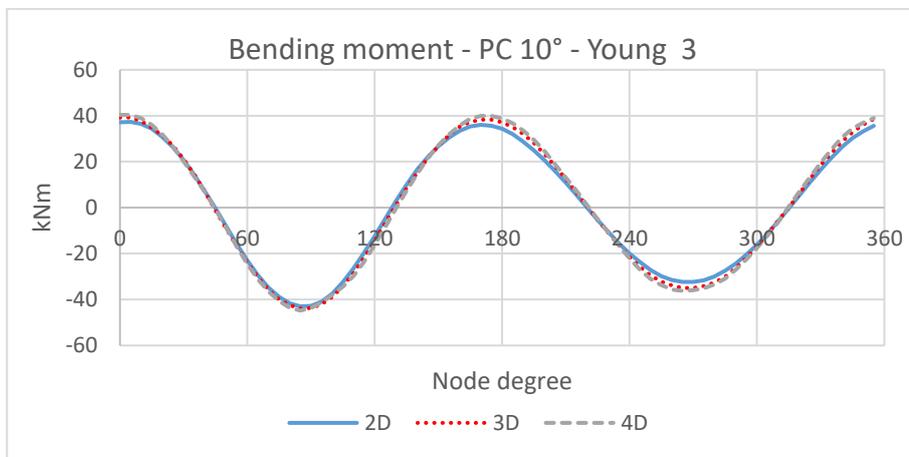
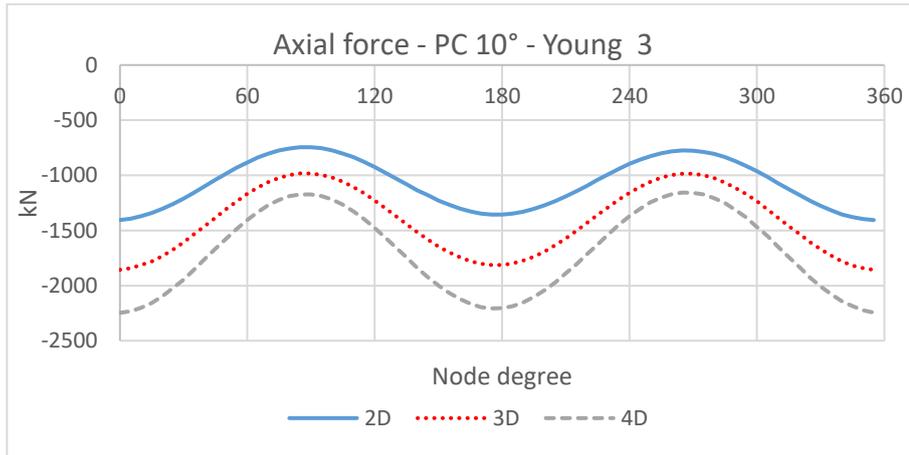


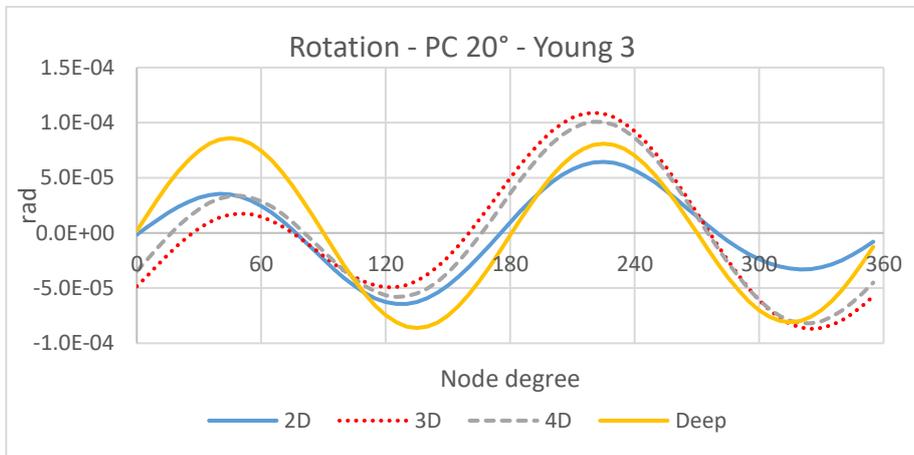
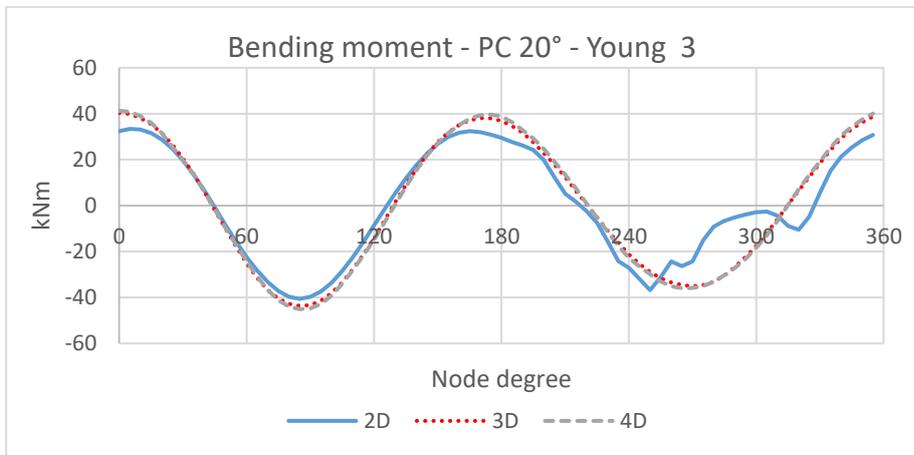
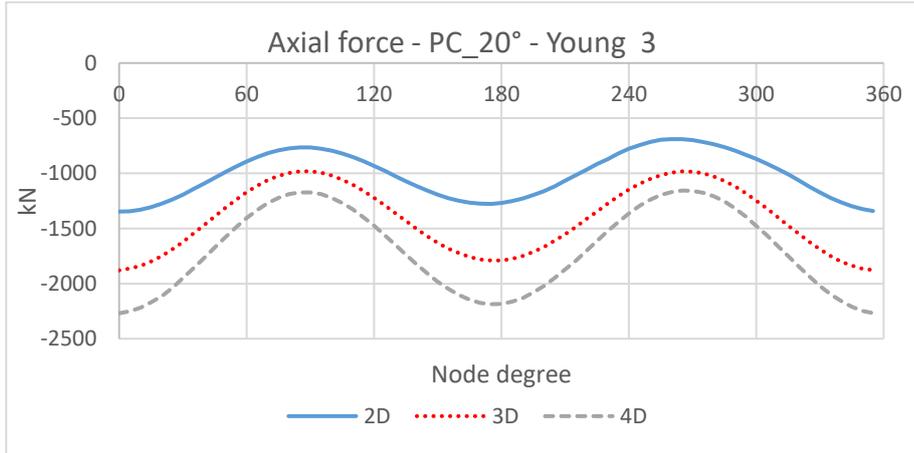
Sito 2 – PC 20°



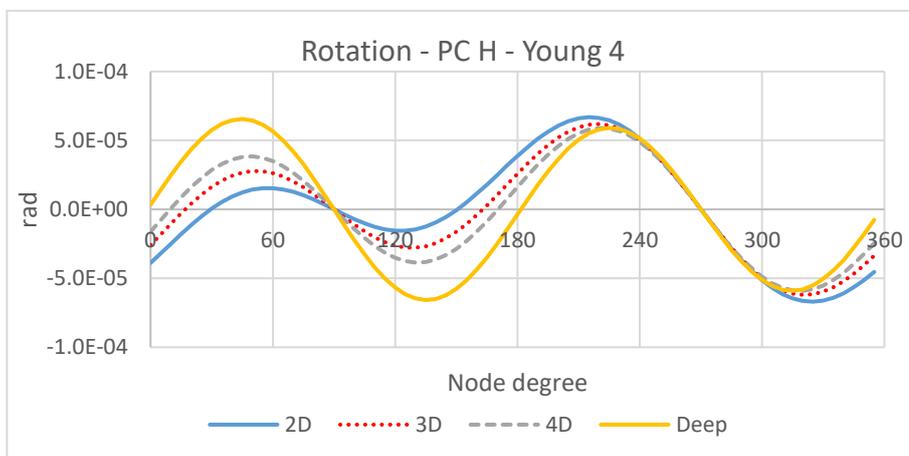
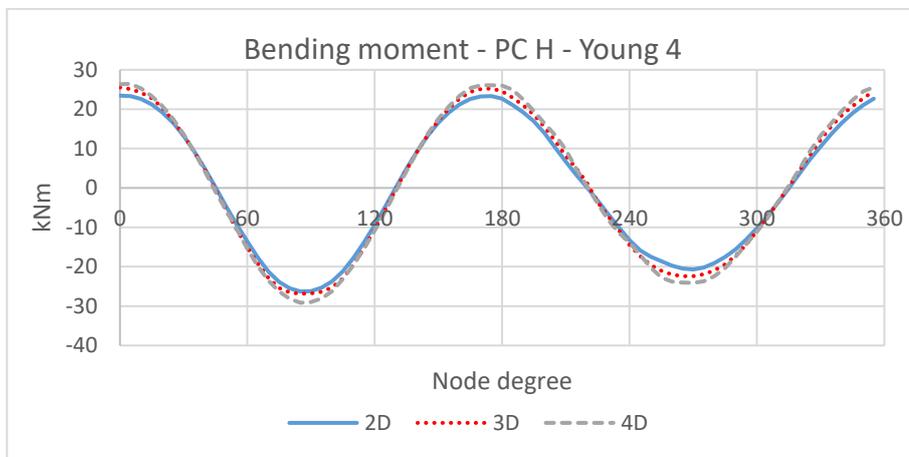
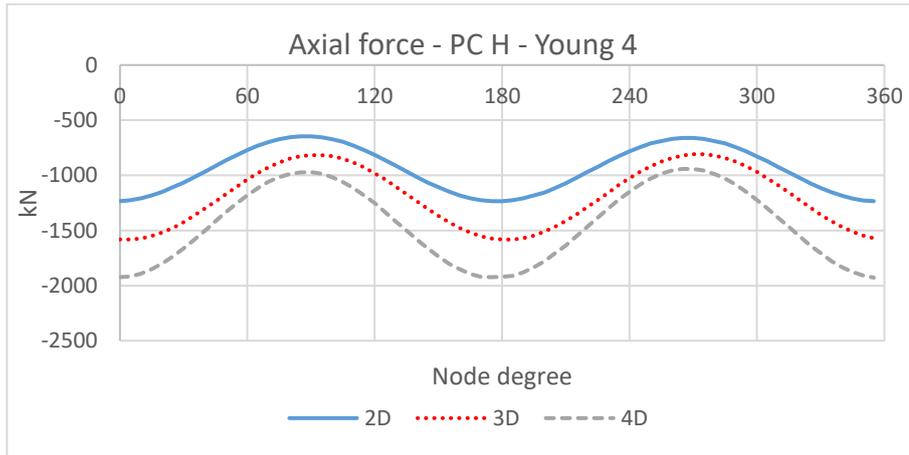


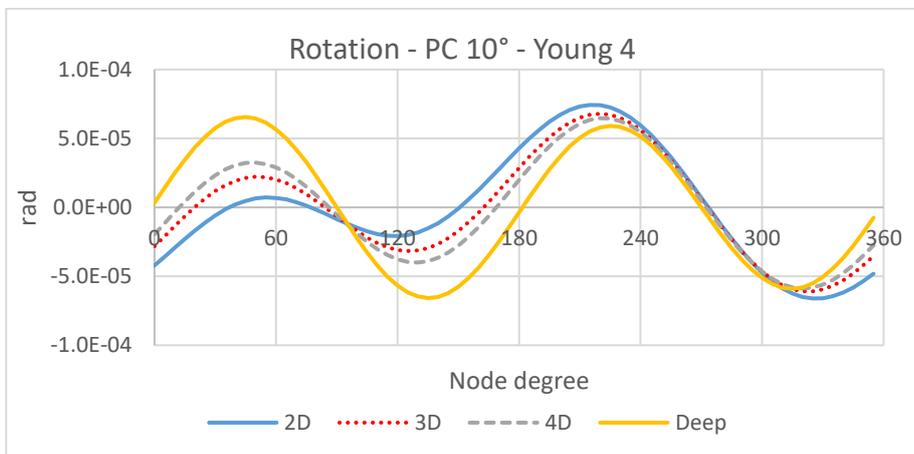
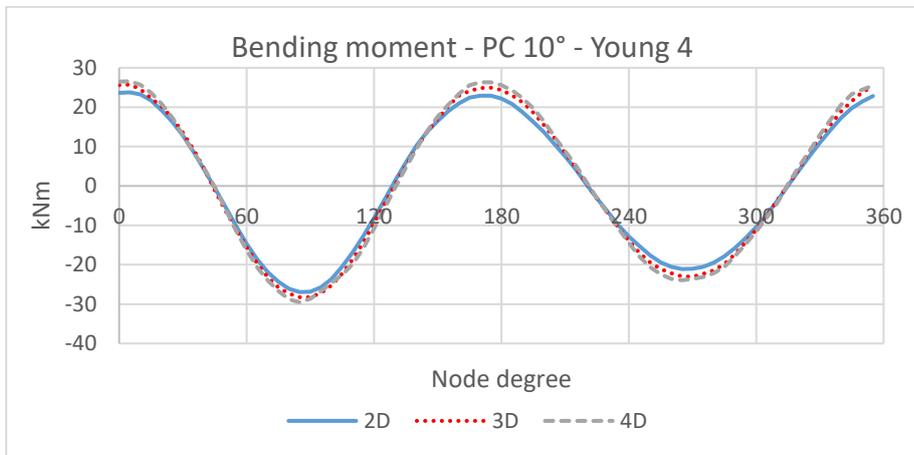
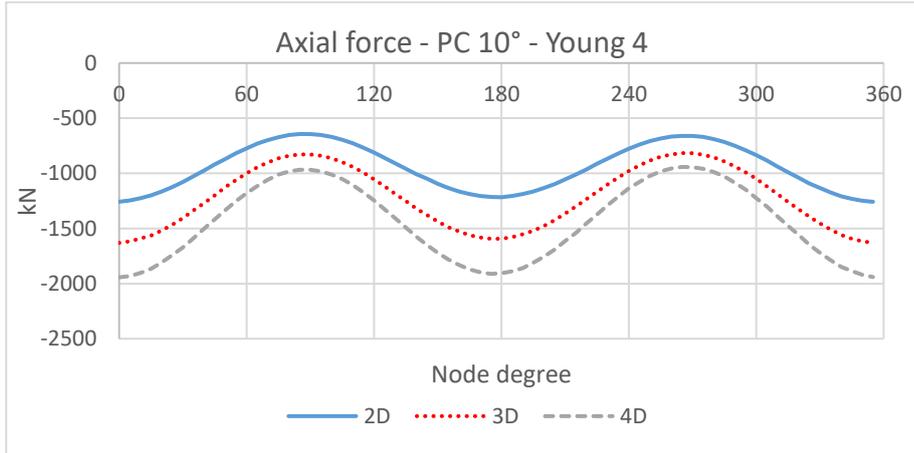
Sito 3 – PC 10°



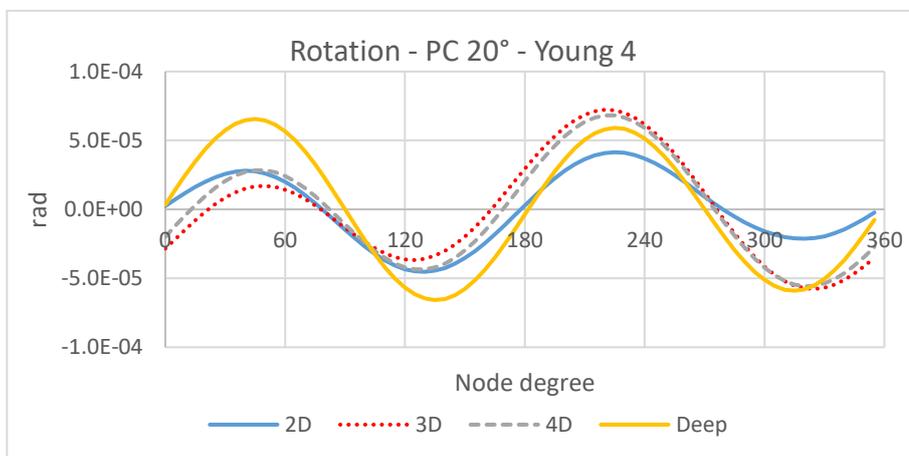
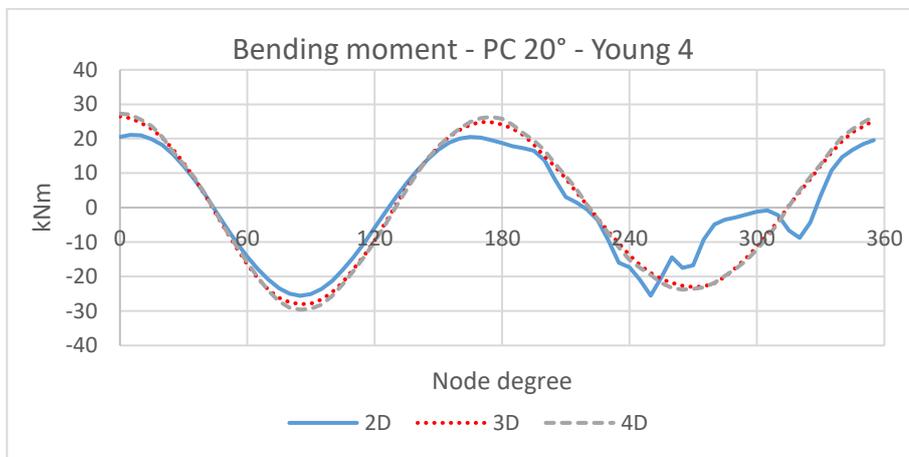
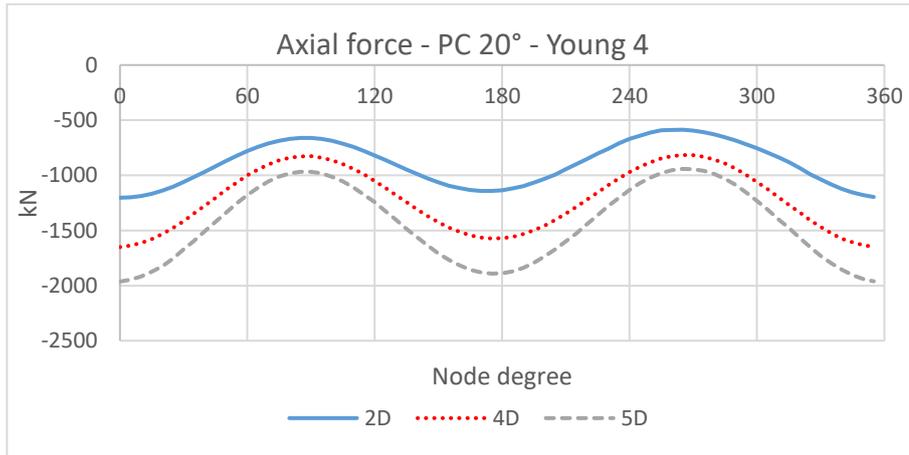


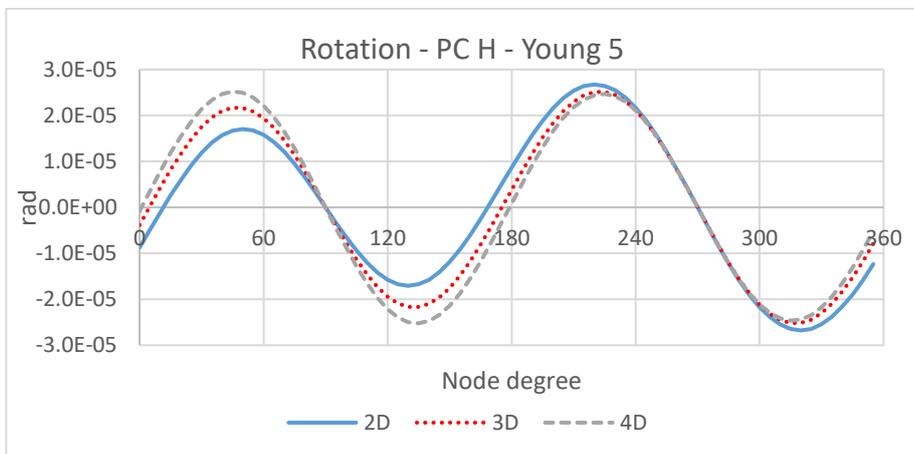
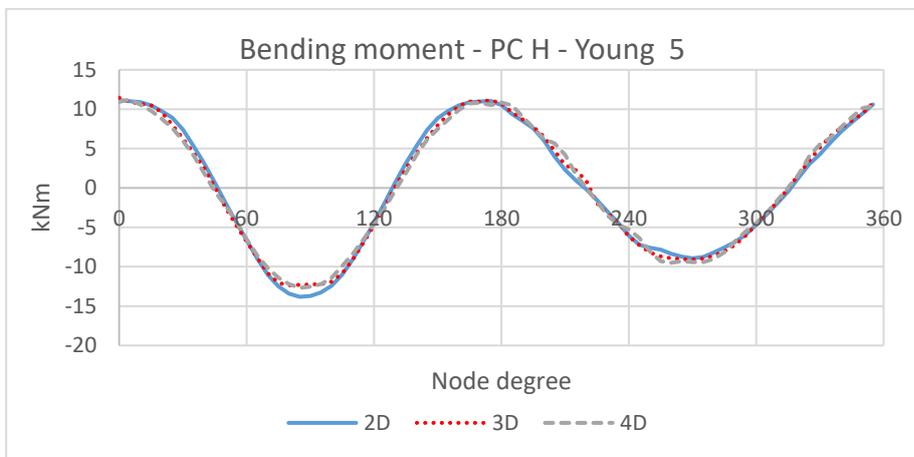
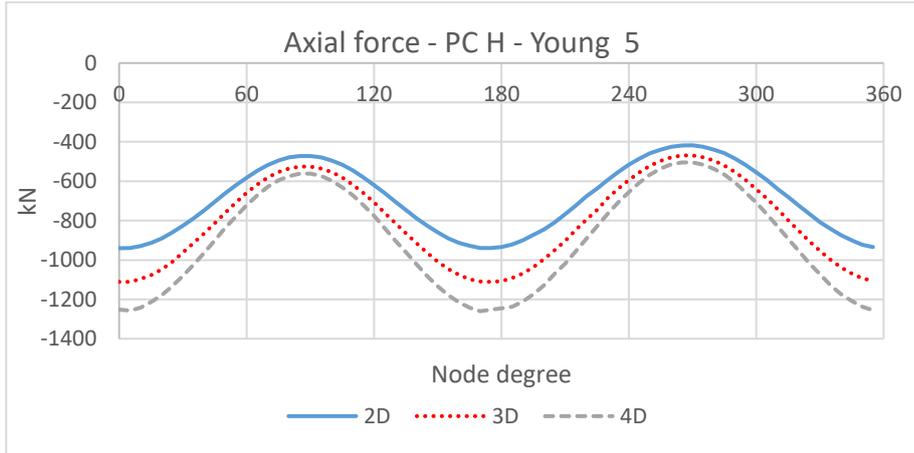
Sito 4 – PC H



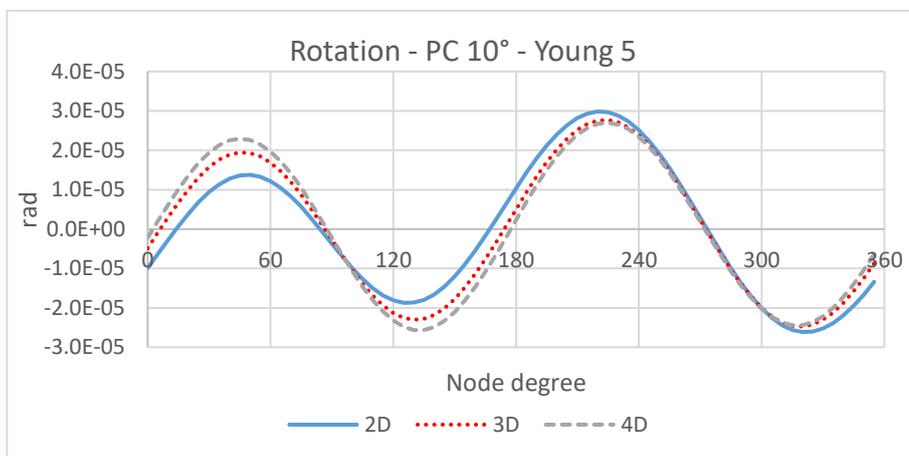
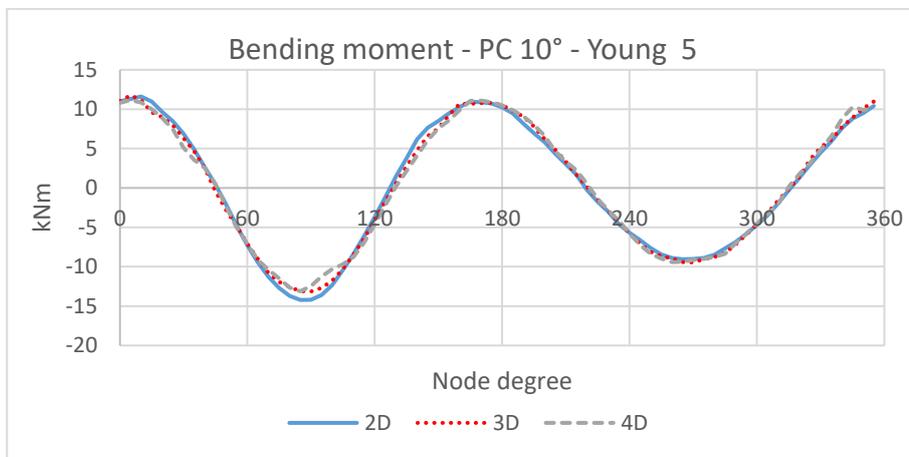
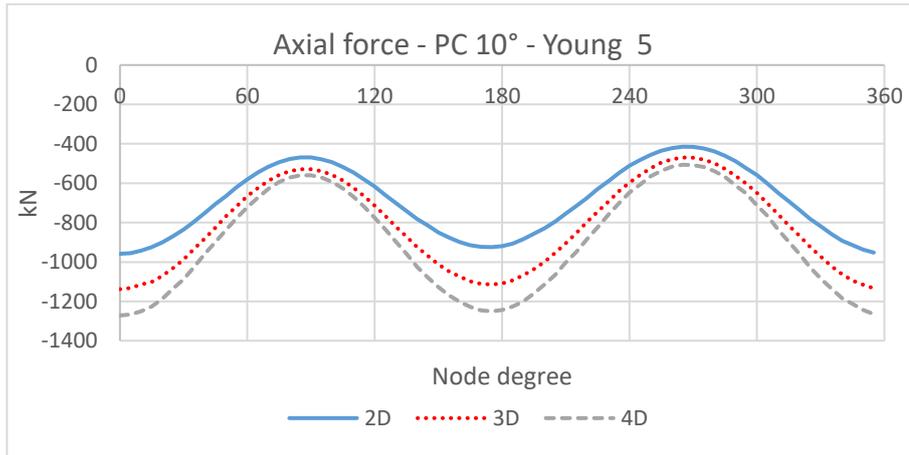


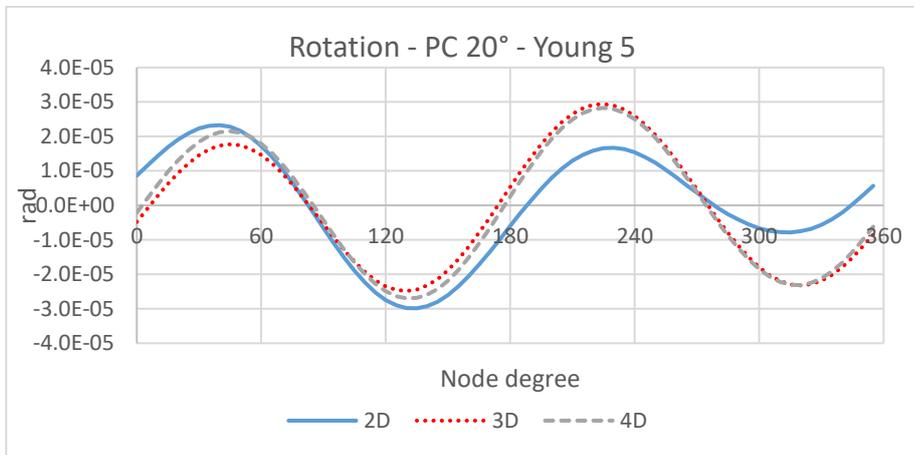
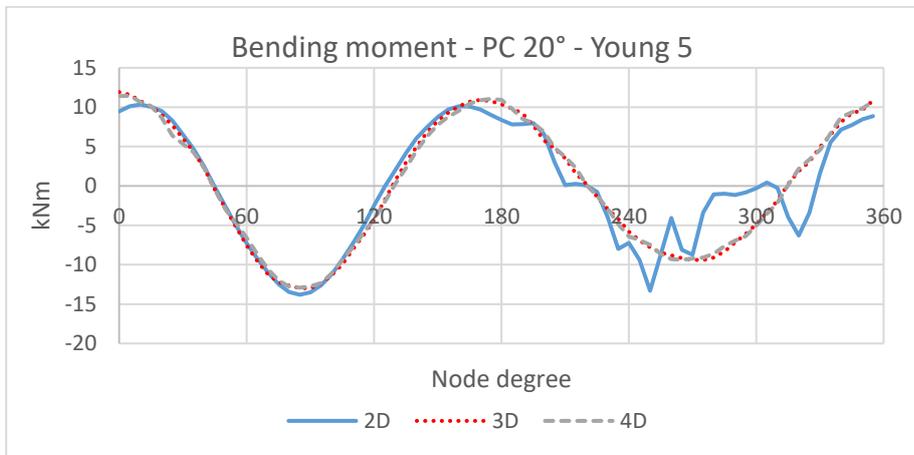
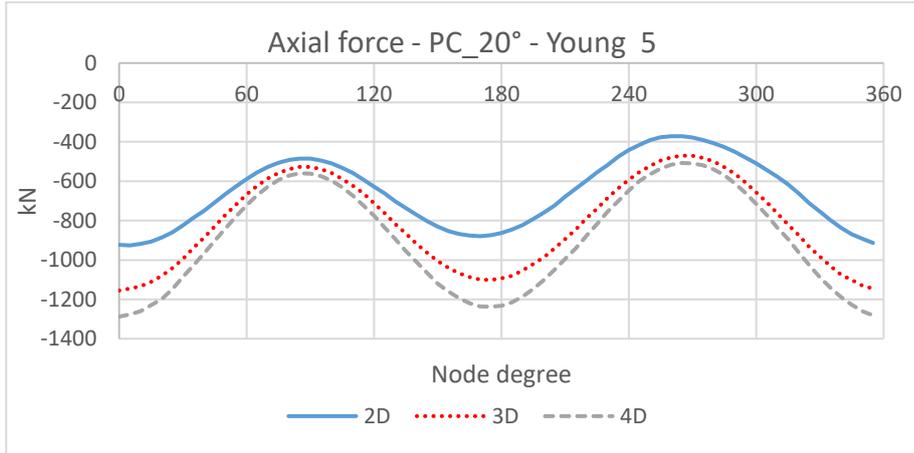
Sito 4 – PC 20°

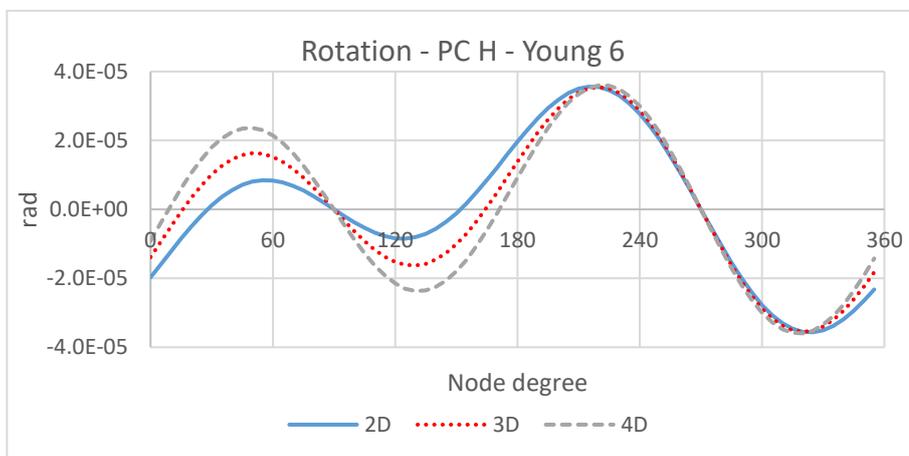
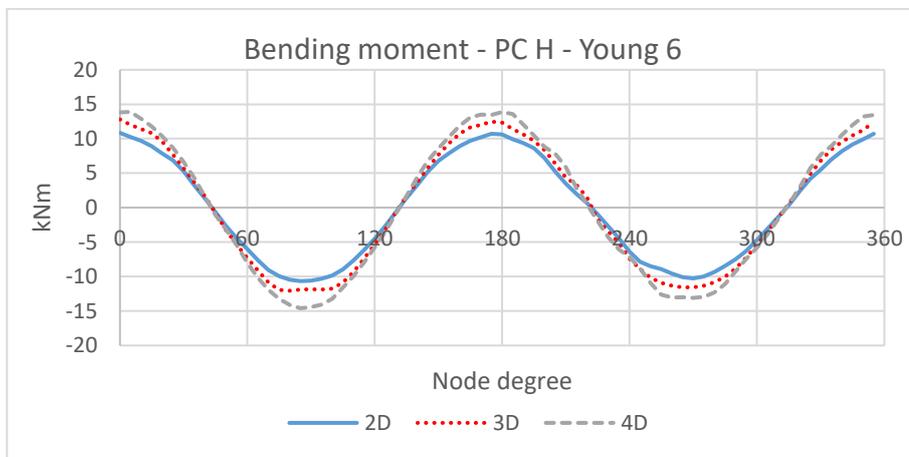
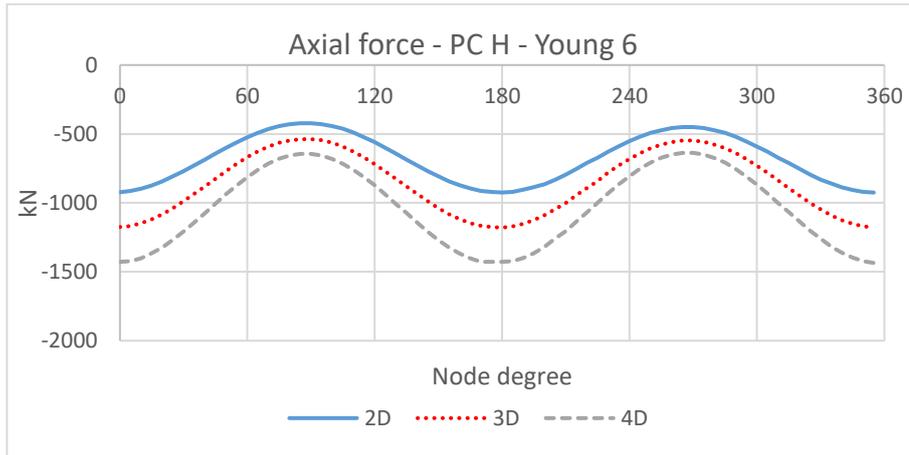


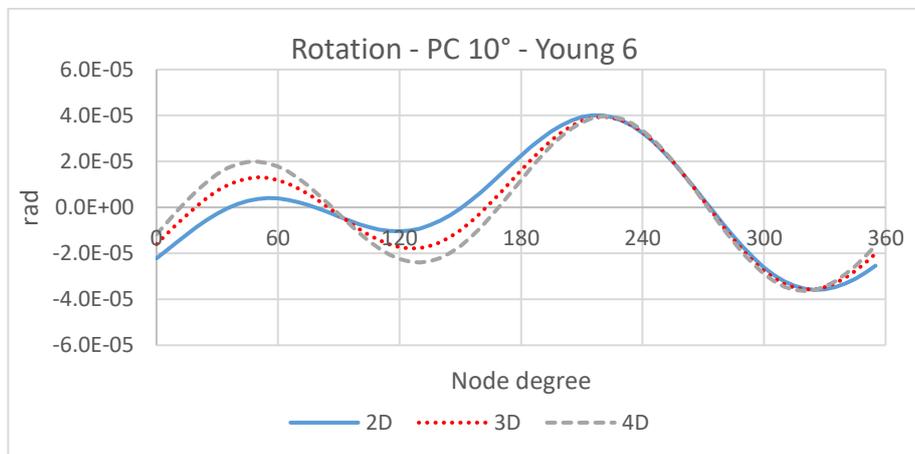
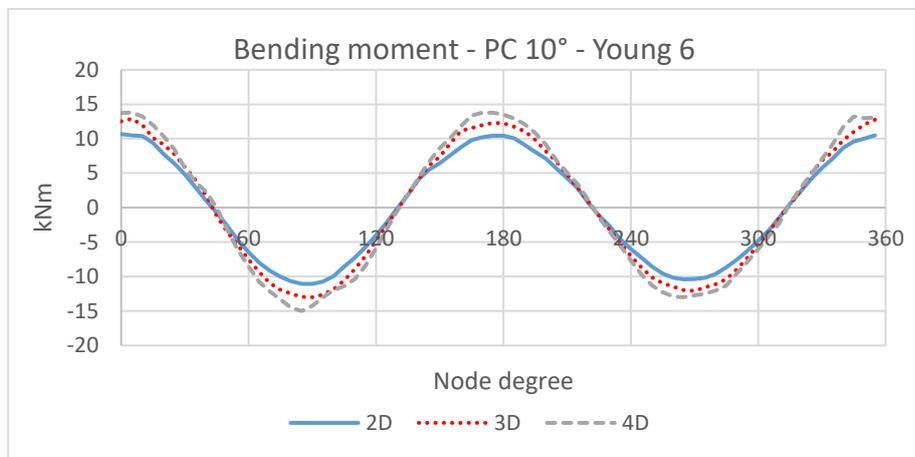
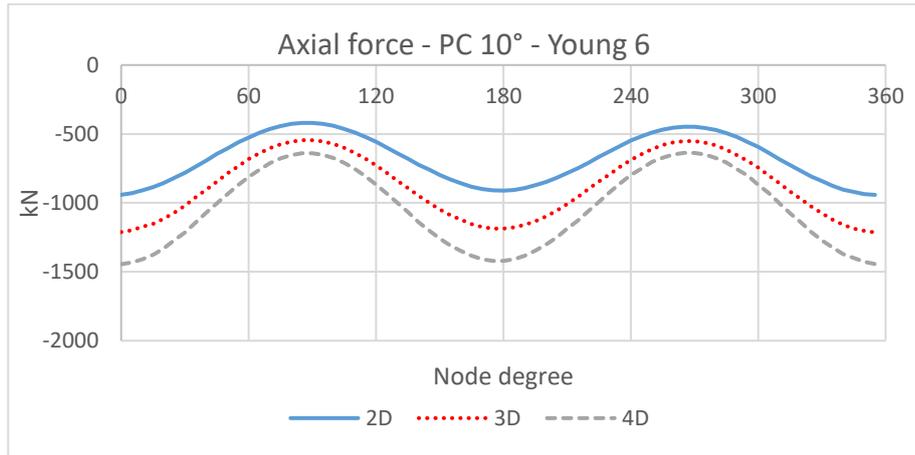


Sito 5 – PC 10°

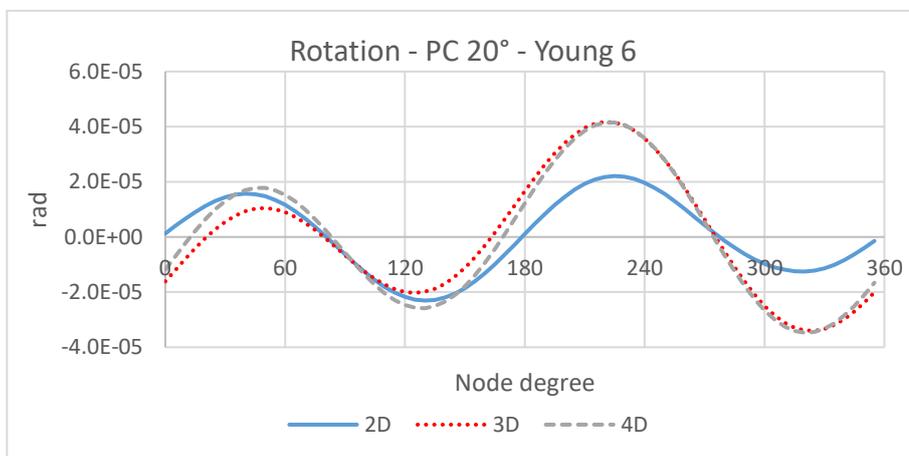
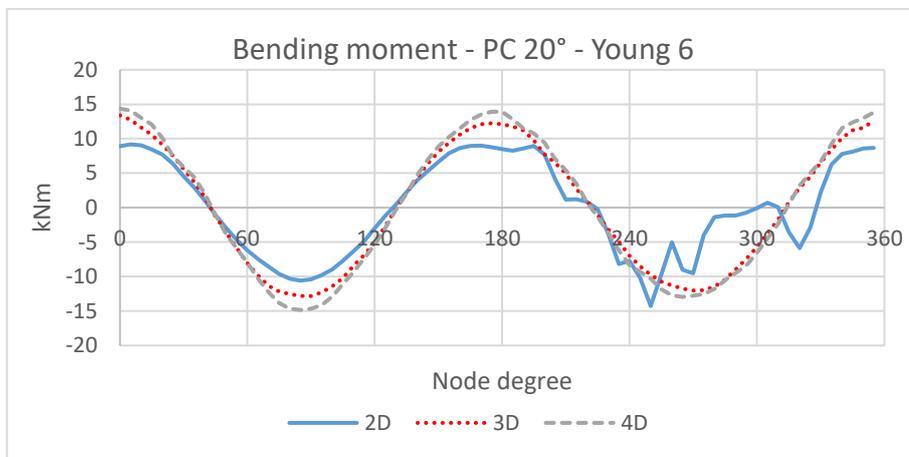
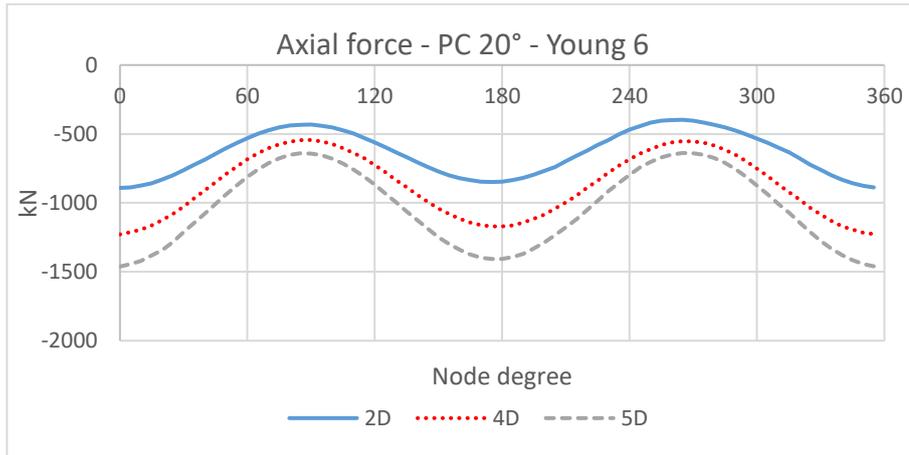








Sito 6 – PC 20°



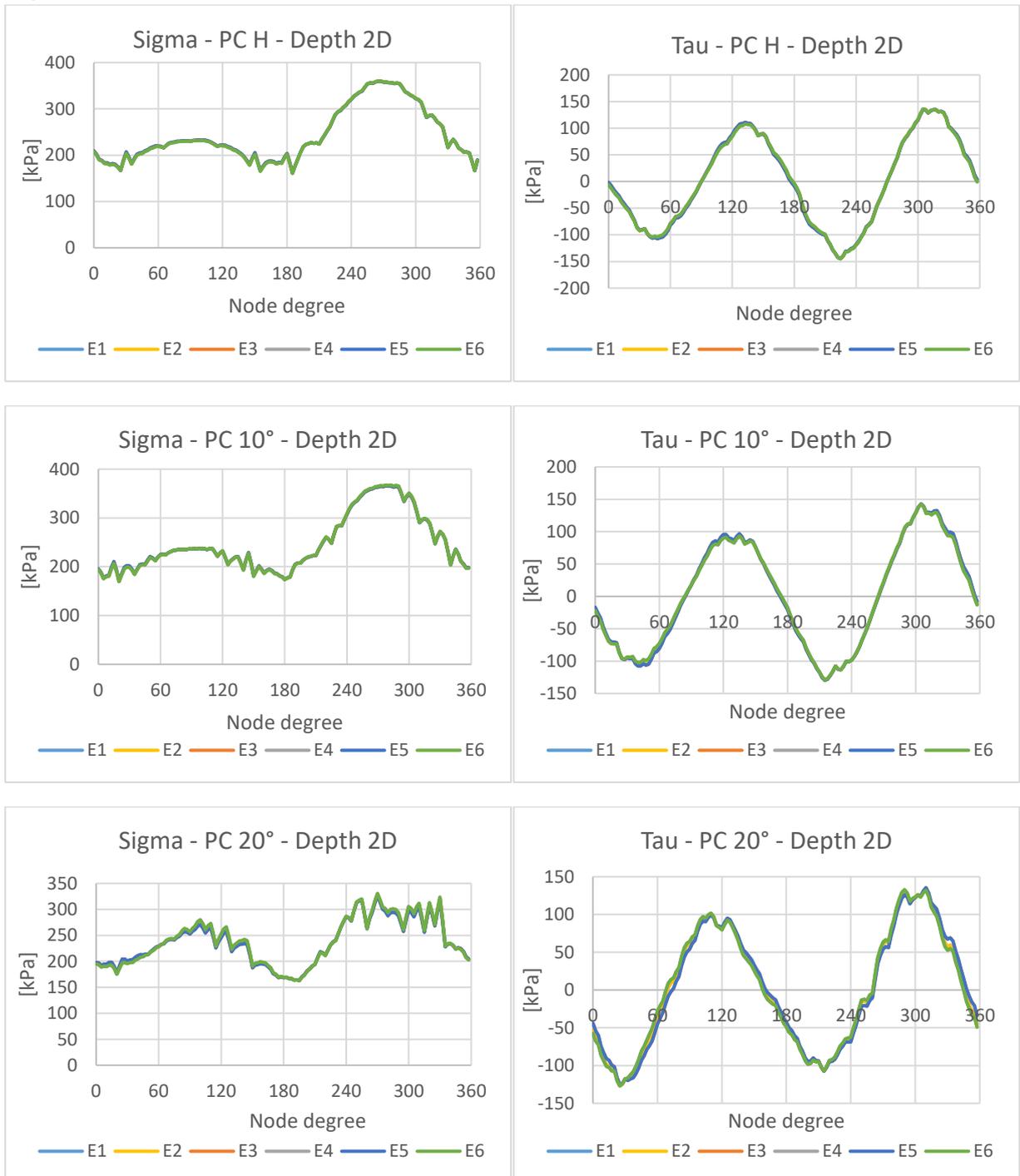
Modelli 1 – 54: Confronto al variare della legge di variazione del modulo di Young

Al variare del gradiente di variazione del modulo di Young, i carichi non variano in accordo con il fatto che questi non dipendono dalla rigidità del terreno, il peso specifico non varia ed il modello è elastico.

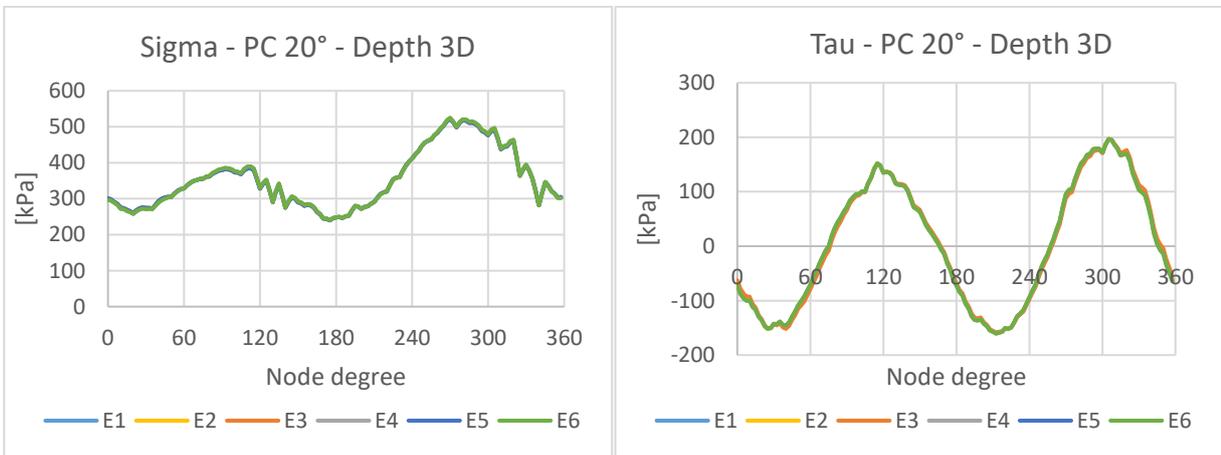
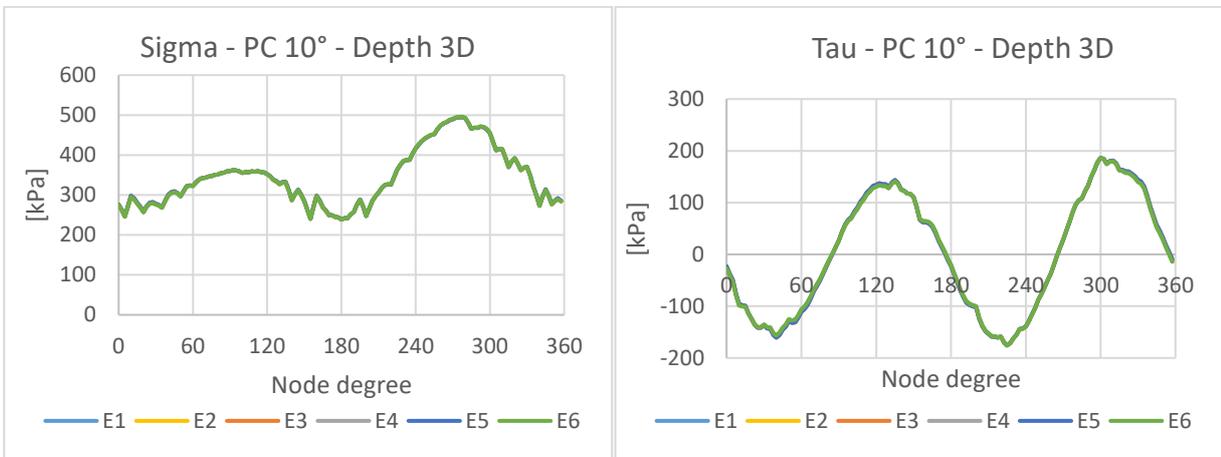
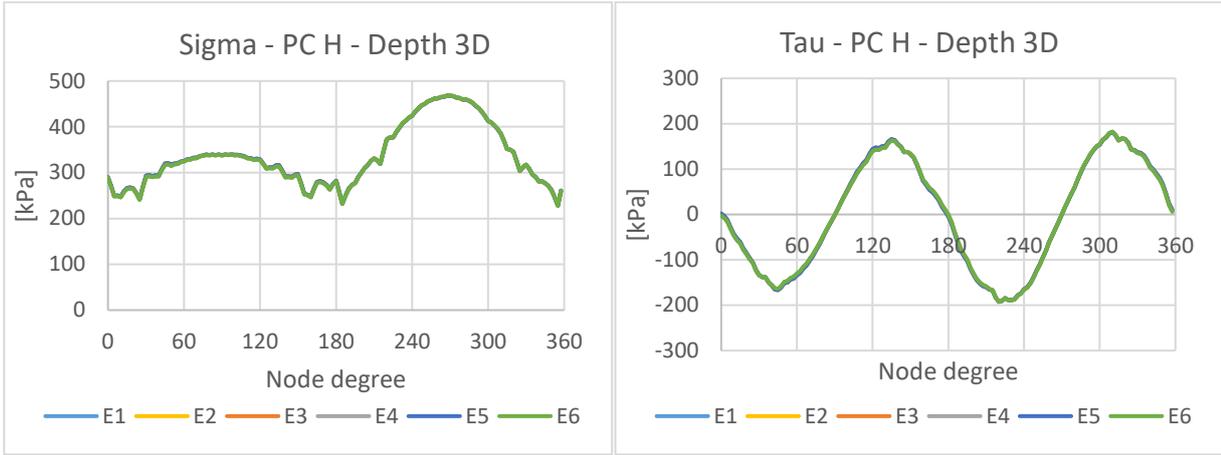
Sforzi assiali, momenti e rotazioni aumentano di ampiezza al diminuire della rigidità del terreno.

Tensioni radiali e tangenziali allo stage "Relax 60%"

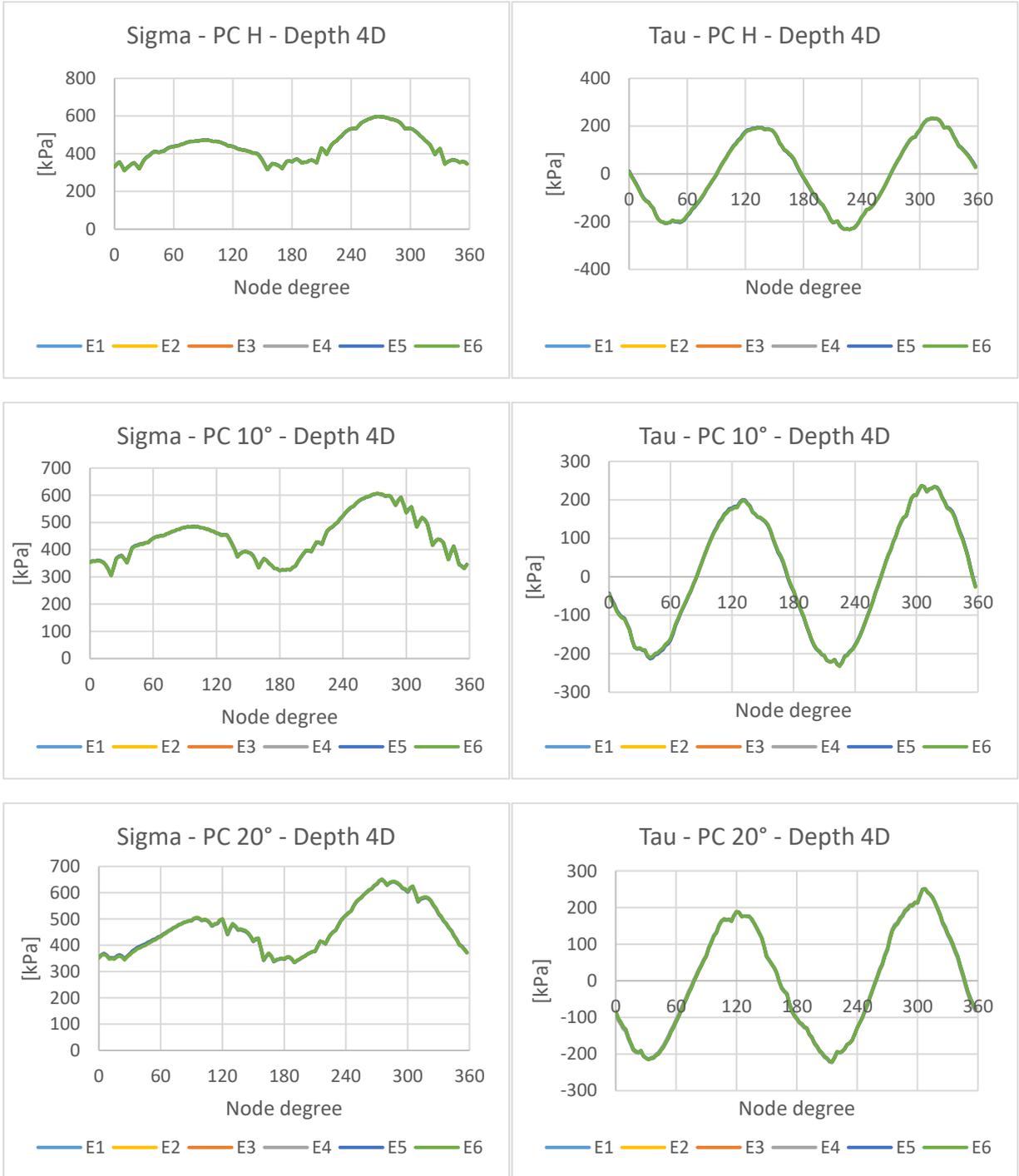
Profondità 2D



Profondità 3D



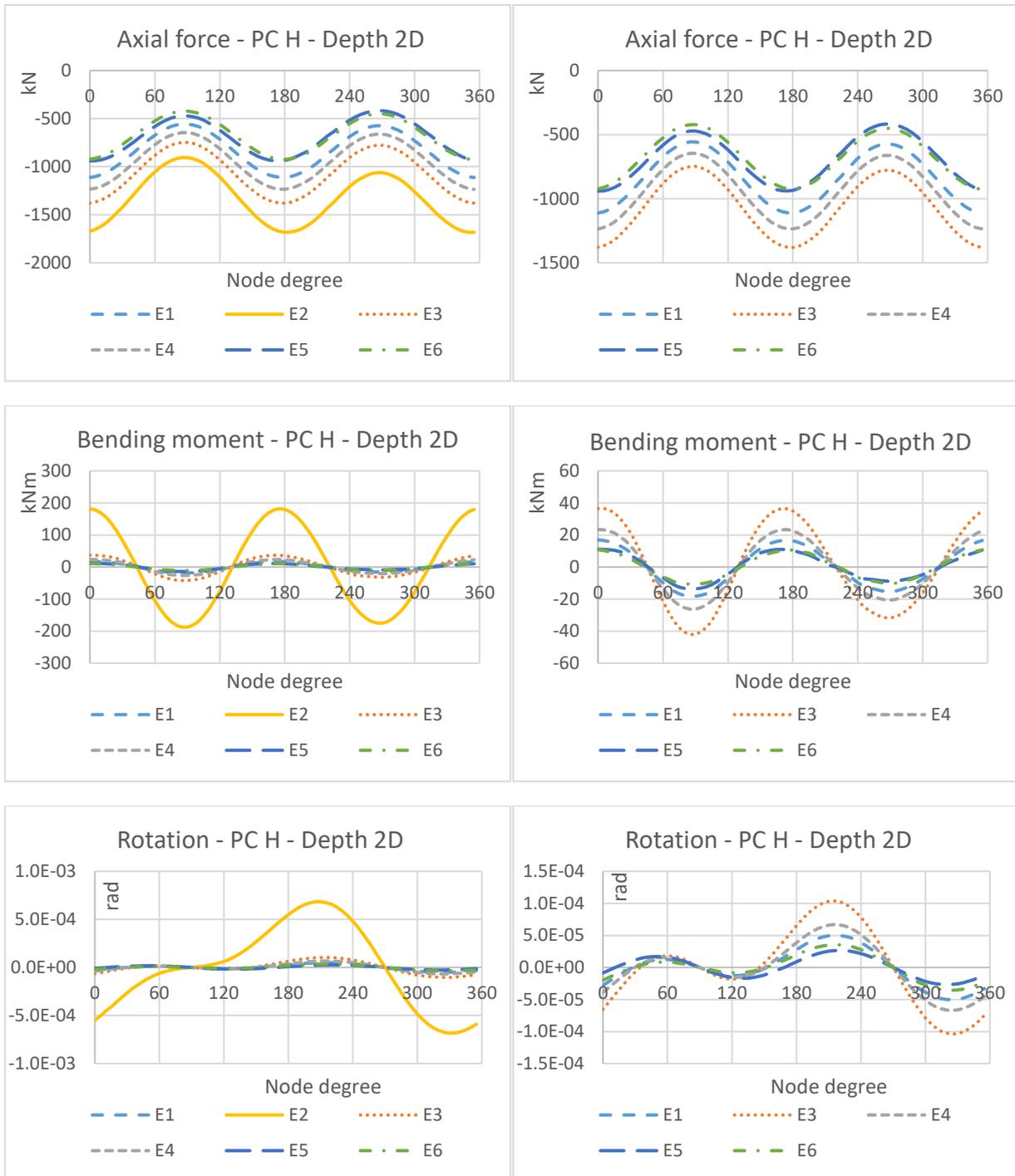
Profondità 4D



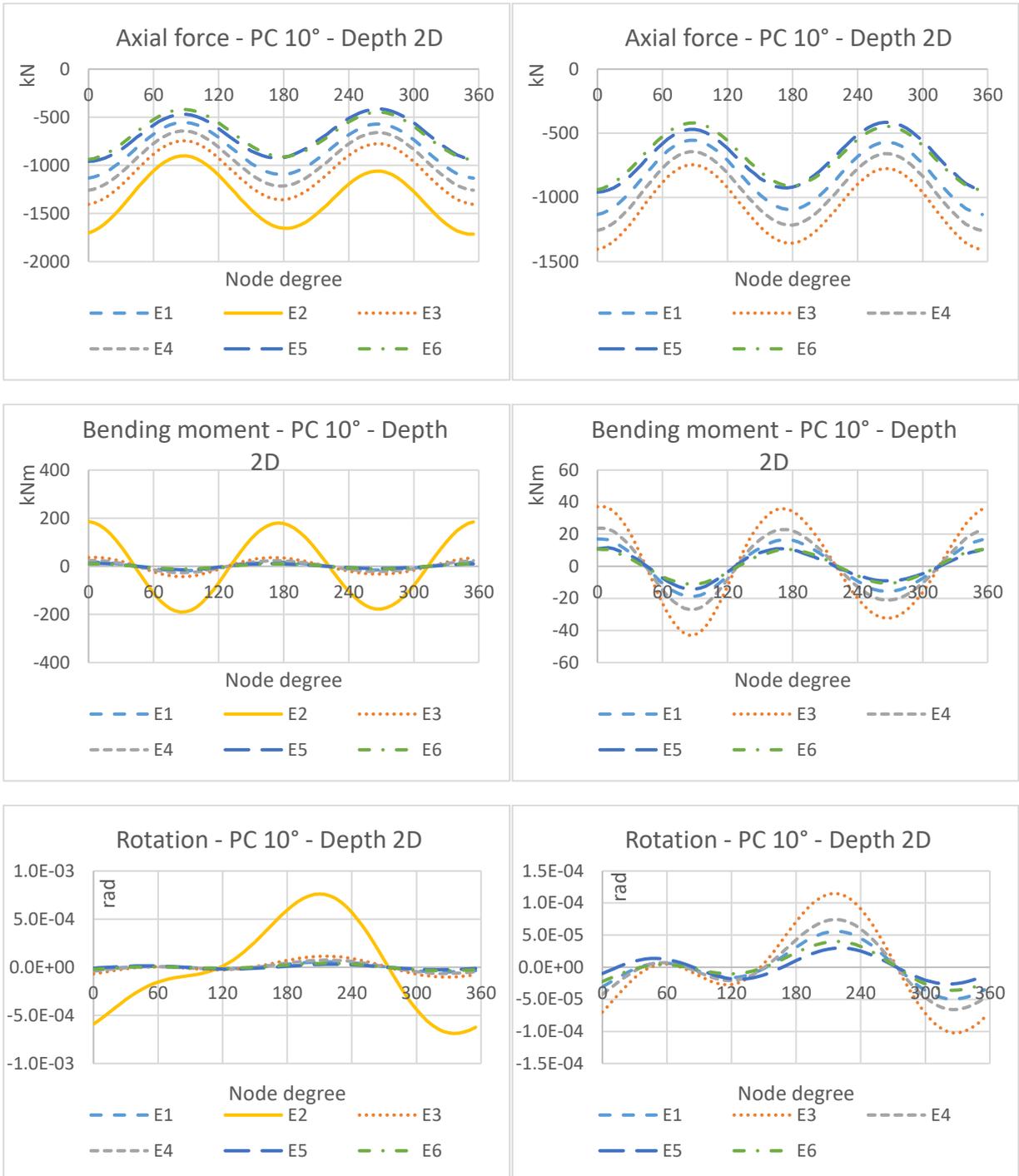
Caratteristiche della sollecitazione e Rotazioni

Profondità 2D – PC H

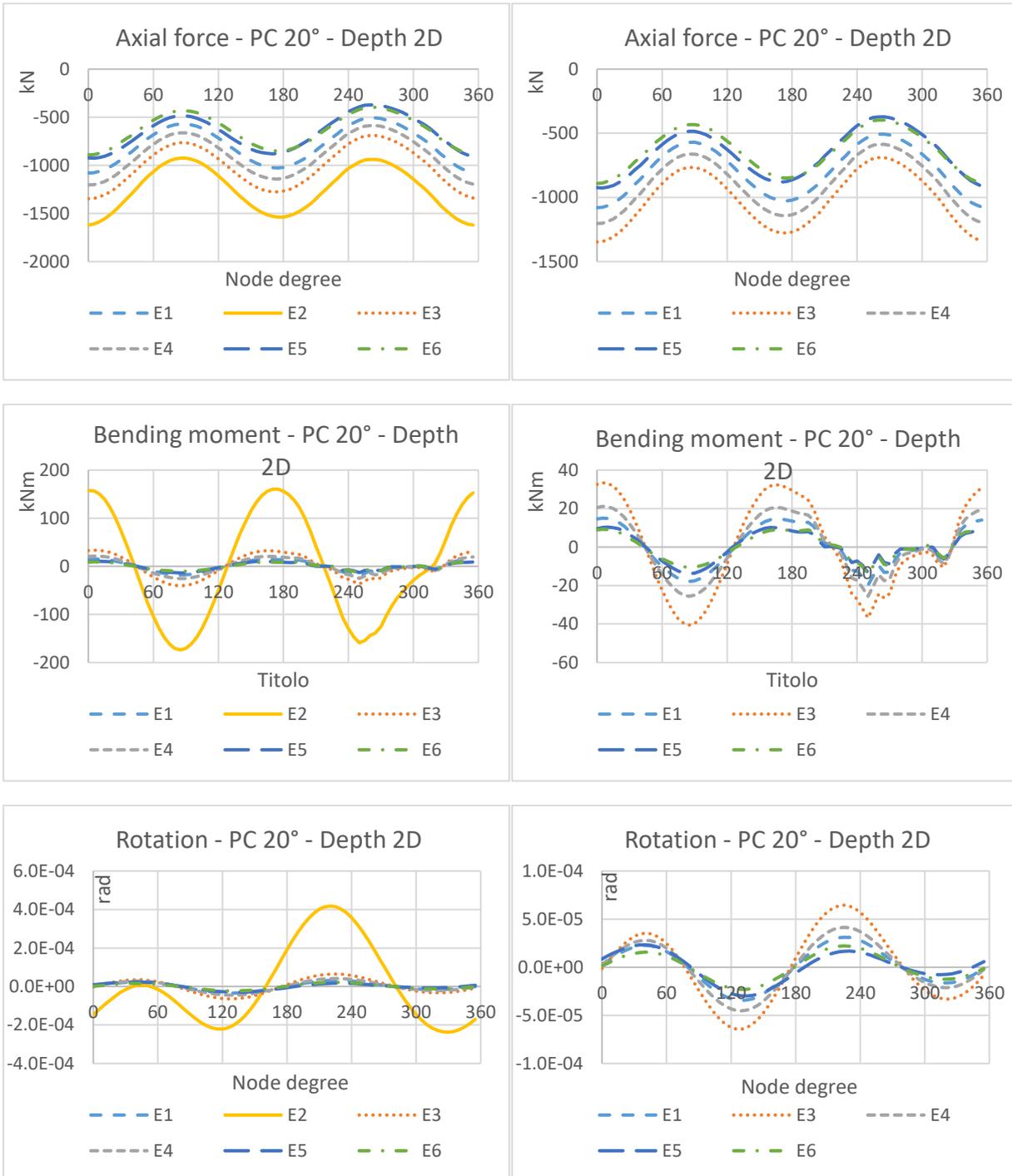
Nella colonna di destra si riportano gli stessi grafici, tuttavia viene esclusa la curva relativa alla legge di variazione di rigidezza del sito 2.



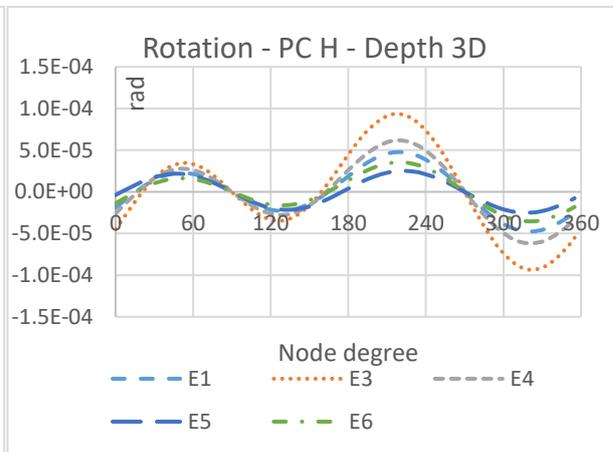
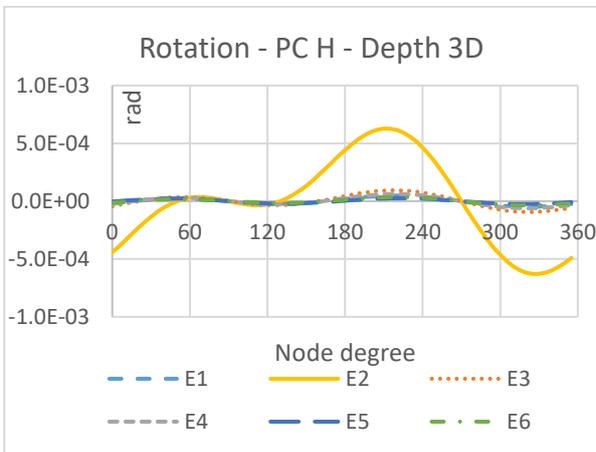
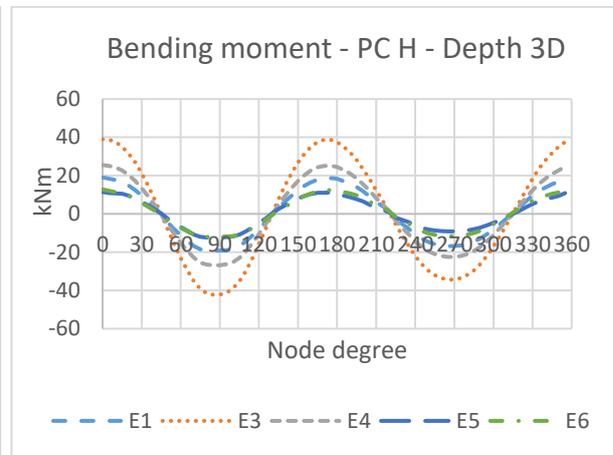
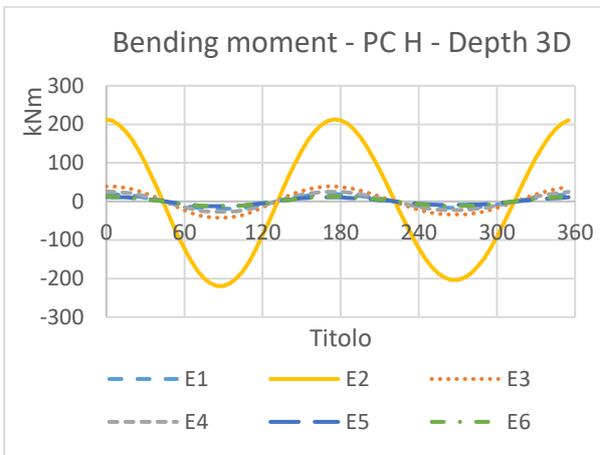
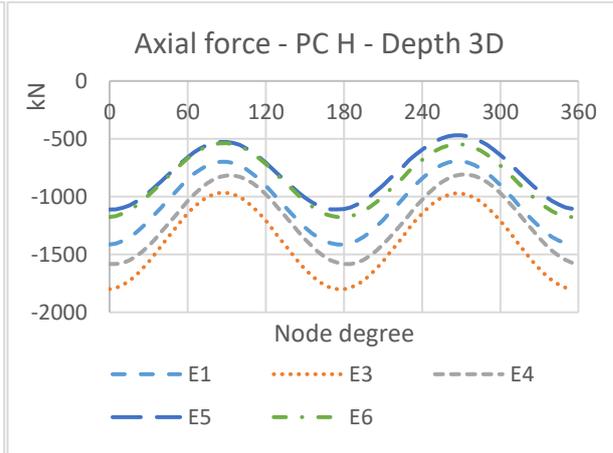
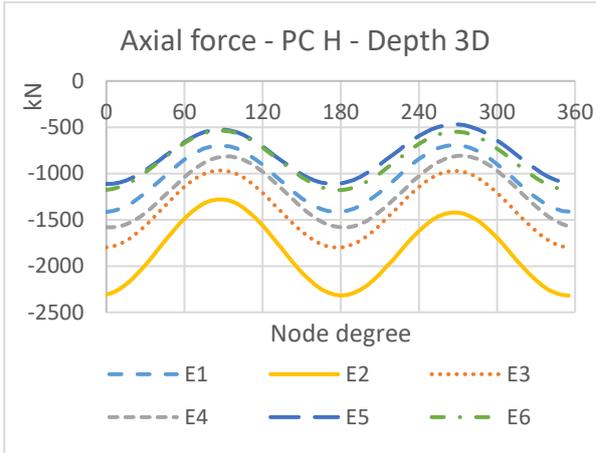
Profondità 2D – PC 10°



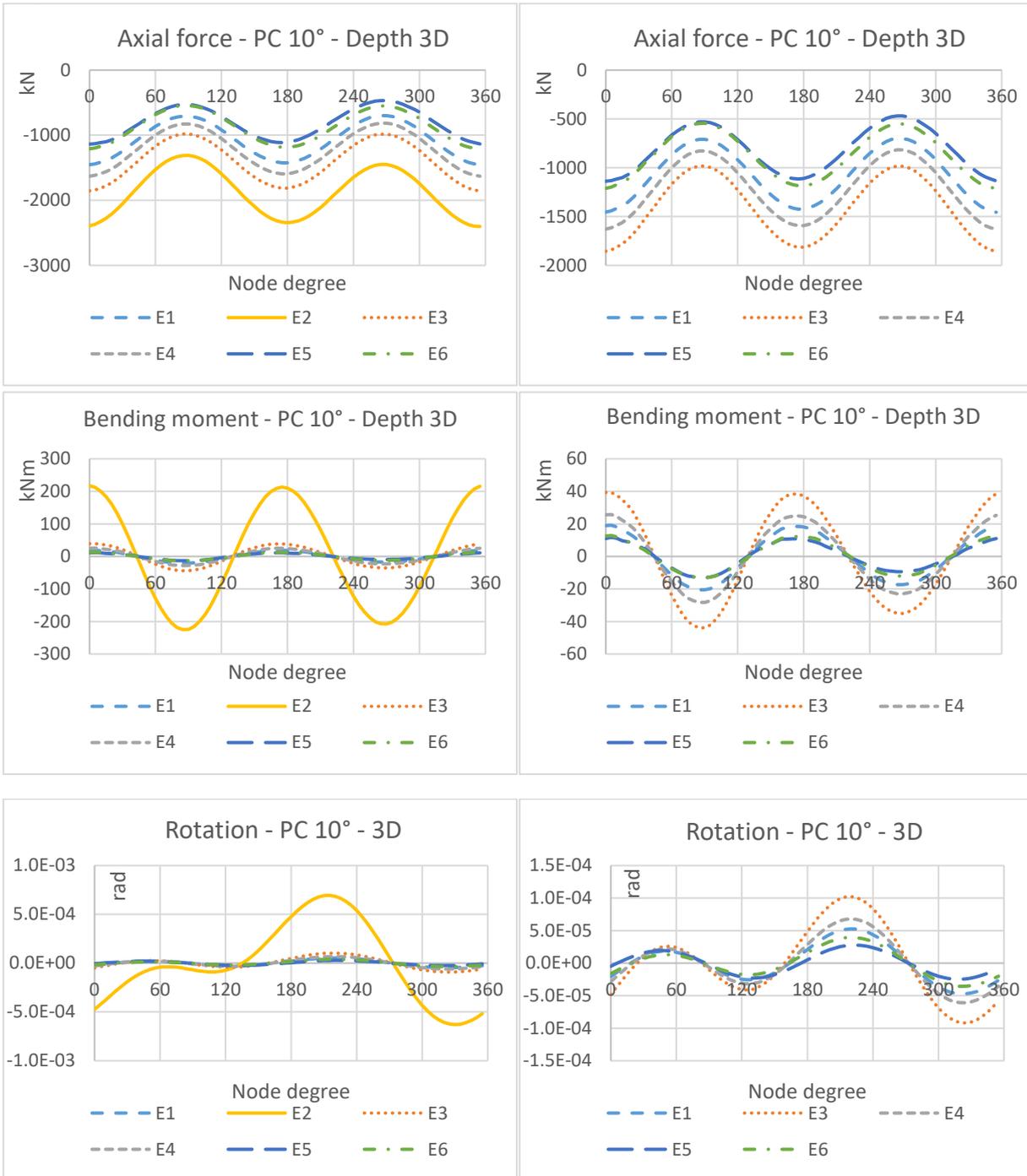
Profondità 2D – PC 20°



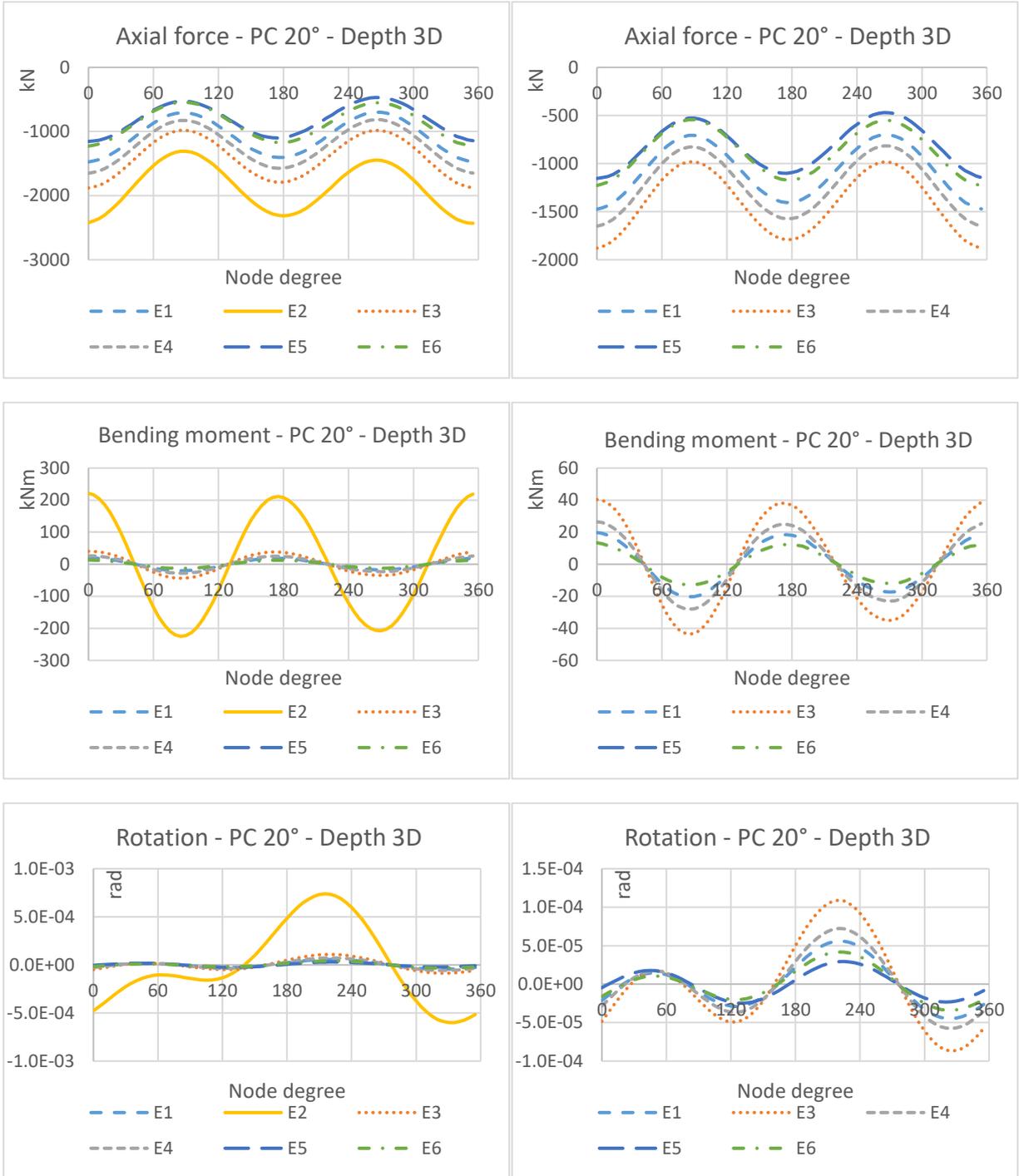
Profondità 3D – PC H

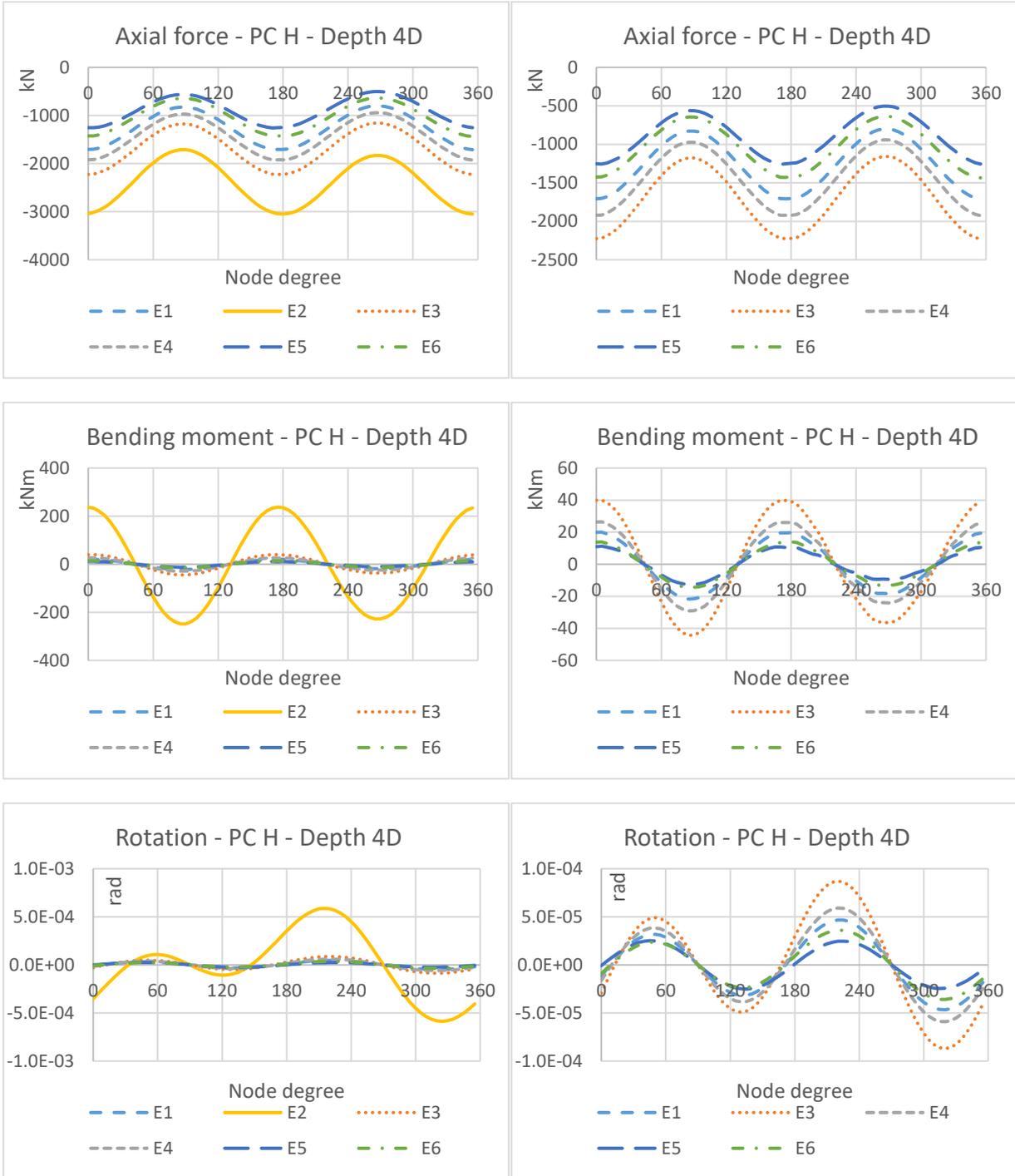


Profondità 3D – PC 10°

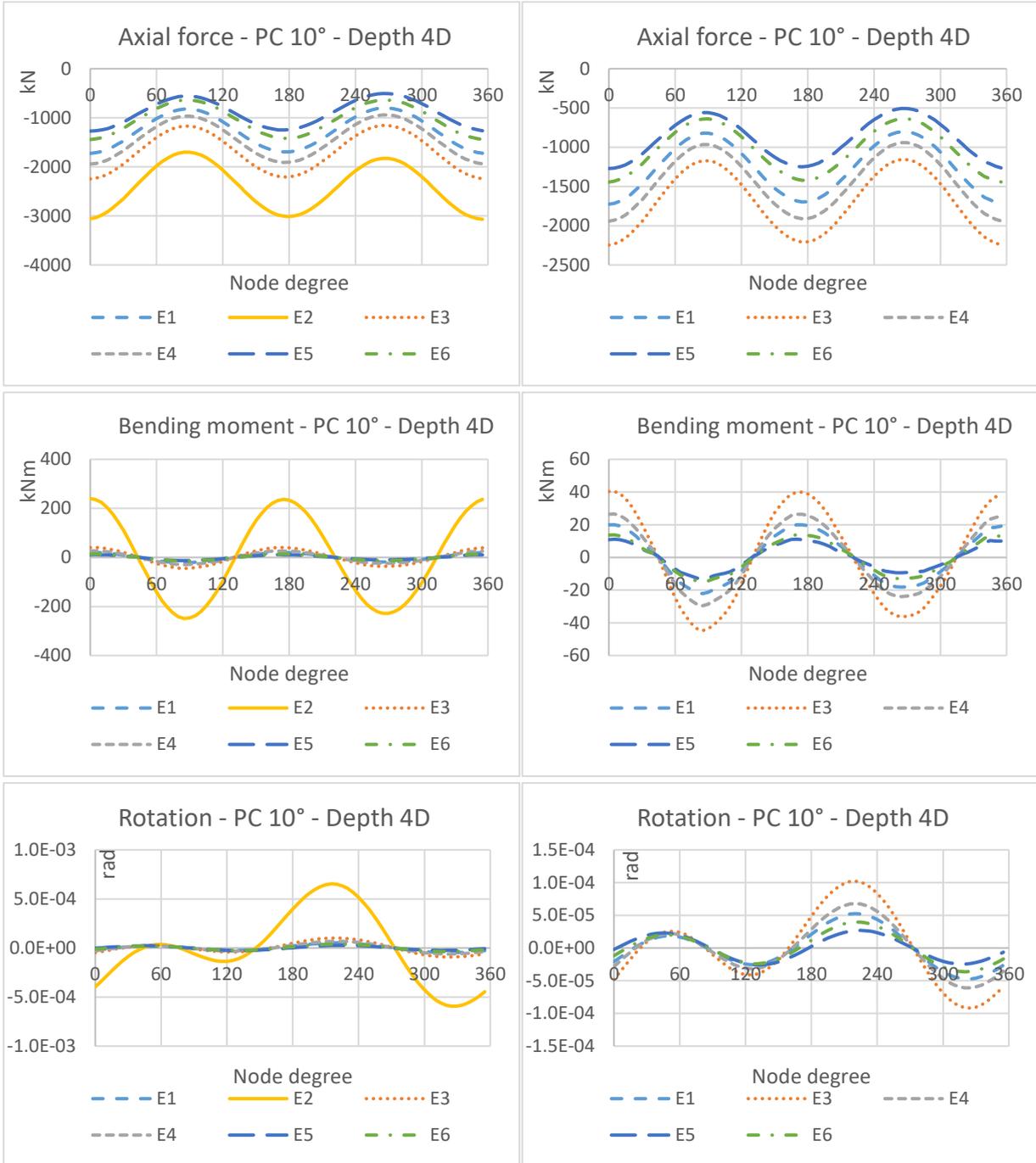


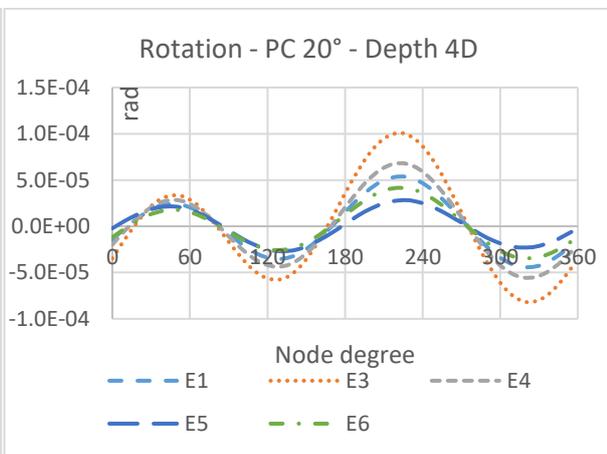
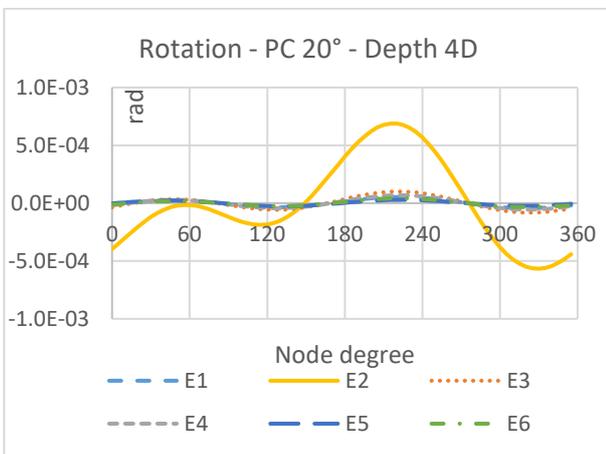
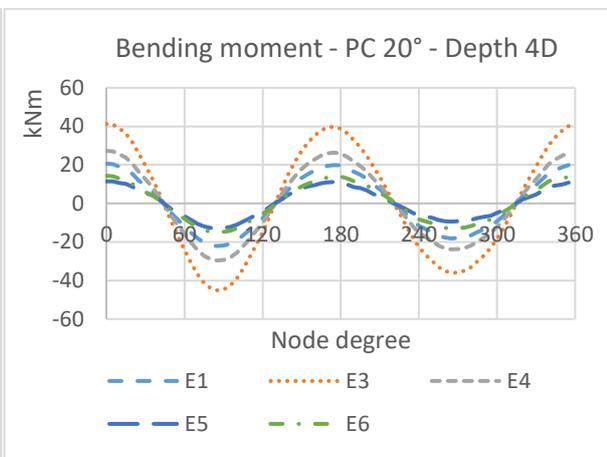
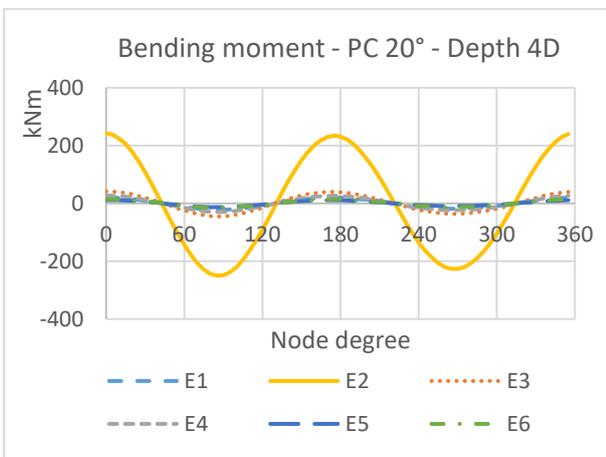
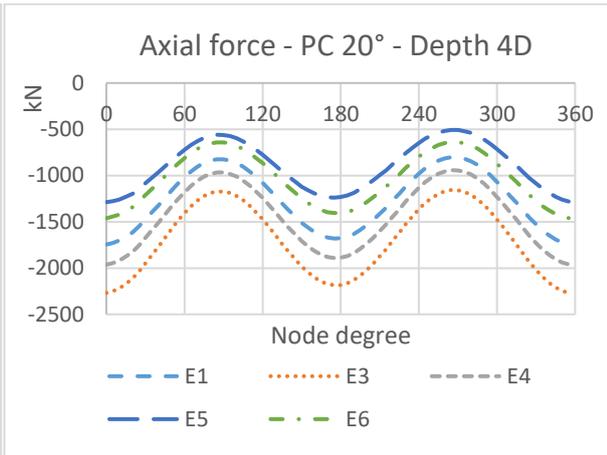
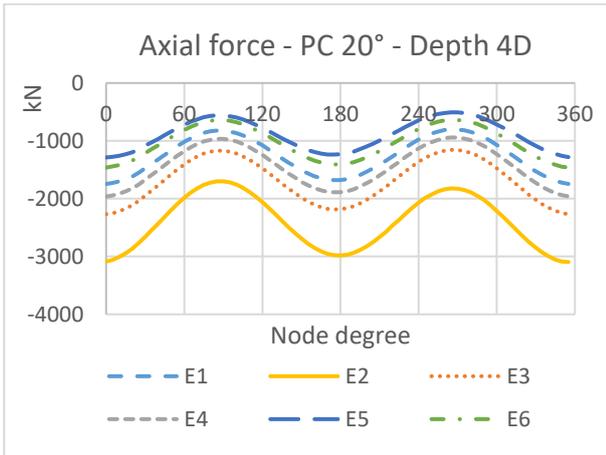
Profondità 3D – PC 20°





Profondità 4D – PC 10°





Taratura delle molle radiali e tangenziali

L'algoritmo genetico funziona bene solo se ricerca i carichi radiali e tangenziali tra le forme di carico corrette, ovvero quegli andamenti che sono davvero responsabili della sola deformazione del rivestimento, i carichi che qui vengono chiamati *carichi netti*.

Per la determinazione dei carichi netti è necessario tarare la rigidezza delle molle radiali e tangenziali nel modello in SAP2000, affinché, applicati i carichi provenienti da RS2 (nello stage di rilascio tensionale) si abbiano dei diagrammi di sforzo normale, momento e rotazione il più vicini possibile a quelli di target provenienti da RS2.

Di seguito si riportano le configurazioni di molle ottimali per ciascun modello.

| TARATURA A MOLLE COSTANTI | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|------------|-----------|--------|--------|----------|-------|--------|-------|-------|
| MODELLI | | | | Kr | Kt | Rapporto | P | Pn | Pm | Pr |
| NUM | Piano campagna | Profondità | Rigidezza | [kN/m] | [kN/m] | kt/Kr | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 1 | PC_H | 2D | L_1 | 275000 | 175000 | 0.6 | 0.828 | 16.836 | 1.917 | 1.595 |
| 2 | PC_H | 3D | L_1 | 325000 | 275000 | 0.8 | 0.954 | 15.925 | 1.715 | 2.487 |
| 3 | PC_H | 4D | L_1 | 400000 | 250000 | 0.6 | 1.072 | 17.347 | 1.611 | 3.930 |
| 4 | PC_H | 2D | L_3 | 150000 | 65000 | 0.4 | 0.781 | 43.515 | 2.141 | 1.264 |
| 5 | PC_H | 3D | L_3 | 175000 | 150000 | 0.9 | 0.897 | 19.133 | 2.041 | 1.747 |
| 6 | PC_H | 4D | L_3 | 225000 | 275000 | 1.2 | 1.042 | 10.631 | 1.865 | 3.040 |
| 7 | PC_H | 2D | L_4 | 175000 | 125000 | 0.7 | 0.853 | 15.462 | 2.191 | 1.536 |
| 8 | PC_H | 3D | L_4 | 250000 | 250000 | 1.0 | 0.959 | 13.891 | 1.895 | 2.256 |
| 9 | PC_H | 4D | L_4 | 325000 | 275000 | 0.8 | 1.105 | 11.779 | 1.789 | 3.825 |
| 10 | PC_10° | 2D | L_1 | 275000 | 200000 | 0.7 | 0.768 | 12.983 | 1.789 | 1.501 |
| 11 | PC_10° | 3D | L_1 | 325000 | 250000 | 0.8 | 0.890 | 12.793 | 1.773 | 2.079 |
| 12 | PC_10° | 4D | L_1 | 400000 | 300000 | 0.8 | 1.008 | 14.673 | 1.568 | 3.494 |
| 13 | PC_10° | 2D | L_3 | 150000 | 60000 | 0.4 | 0.737 | 26.195 | 1.995 | 1.222 |
| 14 | PC_10° | 3D | L_3 | 175000 | 125000 | 0.7 | 0.853 | 15.462 | 2.191 | 1.536 |
| 15 | PC_10° | 4D | L_3 | 225000 | 175000 | 0.8 | 0.995 | 15.880 | 1.985 | 2.282 |
| 16 | PC_10° | 2D | L_4 | 200000 | 150000 | 0.8 | 0.762 | 13.923 | 1.963 | 1.369 |
| 17 | PC_10° | 3D | L_4 | 275000 | 175000 | 0.6 | 0.896 | 12.488 | 1.918 | 1.943 |
| 18 | PC_10° | 4D | L_4 | 325000 | 250000 | 0.8 | 1.047 | 13.435 | 1.796 | 3.085 |
| 19 | PC_20° | 2D | L_1 | 20000 | 7500 | 0.4 | 0.806 | 6.709 | 1.601 | 2.138 |
| 20 | PC_20° | 3D | L_1 | 450000 | 250000 | 0.6 | 0.854 | 6.729 | 1.778 | 2.177 |
| 21 | PC_20° | 4D | L_1 | 350000 | 400000 | 1.1 | 0.831 | 7.316 | 1.537 | 2.400 |
| 22 | PC_20° | 2D | L_3 | 30000 | 20000 | 0.7 | 0.844 | 9.165 | 1.703 | 2.049 |
| 23 | PC_20° | 3D | L_3 | 500000 | 300000 | 0.6 | 0.814 | 9.467 | 2.055 | 1.571 |
| 24 | PC_20° | 4D | L_3 | 450000 | 350000 | 0.8 | 0.881 | 8.860 | 1.830 | 2.104 |
| 25 | PC_20° | 2D | L_4 | 45000 | 20000 | 0.4 | 0.837 | 7.664 | 1.703 | 2.098 |
| 26 | PC_20° | 3D | L_4 | 650000 | 350000 | 0.5 | 0.868 | 6.970 | 1.936 | 2.030 |
| 27 | PC_20° | 4D | L_4 | 500000 | 350000 | 0.7 | 0.881 | 8.061 | 1.700 | 2.363 |
| 28 | PC_H | 2D | L_2 | 20000 | 5000 | 0.3 | 0.708 | 6.567 | 5.055 | 0.941 |
| 29 | PC_H | 3D | L_2 | 400000 | 200000 | 0.5 | 0.902 | 8.972 | 1.365 | 3.776 |
| 30 | PC_H | 4D | L_2 | 400000 | 300000 | 0.8 | 0.779 | 10.147 | 1.558 | 1.841 |
| 31 | PC_H | 2D | L_5 | 30000 | 7500 | 0.3 | 0.675 | 8.333 | 2.615 | 1.022 |
| 32 | PC_H | 3D | L_5 | 500000 | 300000 | 0.6 | 0.871 | 14.143 | 1.213 | 3.942 |
| 33 | PC_H | 4D | L_5 | 450000 | 300000 | 0.7 | 0.859 | 20.619 | 1.387 | 2.530 |
| 34 | PC_H | 2D | L_6 | 40000 | 15000 | 0.4 | 0.734 | 17.594 | 2.061 | 1.218 |
| 35 | PC_H | 3D | L_6 | 650000 | 400000 | 0.6 | 0.783 | 15.088 | 1.051 | 3.863 |
| 36 | PC_H | 4D | L_6 | 500000 | 400000 | 0.8 | 0.957 | 25.458 | 1.318 | 4.061 |
| 37 | PC_10° | 2D | L_2 | 35000 | 5000 | 0.1 | 0.704 | 5.726 | 4.642 | 0.971 |
| 38 | PC_10° | 3D | L_2 | 400000 | 70000 | 0.2 | 0.836 | 11.252 | 1.401 | 2.539 |

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|-----|--------|--------|-----|-------|--------|-------|-------|
| 39 | PC_10° | 4D | L_2 | 450000 | 200000 | 0.4 | 0.724 | 12.730 | 1.512 | 1.559 |
| 40 | PC_10° | 2D | L_5 | 30000 | 5000 | 0.2 | 0.685 | 8.227 | 3.066 | 0.989 |
| 41 | PC_10° | 3D | L_5 | 550000 | 300000 | 0.5 | 0.863 | 12.077 | 1.232 | 3.777 |
| 42 | PC_10° | 4D | L_5 | 500000 | 450000 | 0.9 | 0.8 | 14.91 | 1.42 | 2.12 |
| 43 | PC_10° | 2D | L_6 | 35000 | 25000 | 0.7 | 0.7 | 10.3 | 2.44 | 1.09 |
| 44 | PC_10° | 3D | L_6 | 600000 | 300000 | 0.5 | 0.79 | 13.79 | 1 | 5.1 |
| 45 | PC_10° | 4D | L_6 | 500000 | 300000 | 0.6 | 0.86 | 16.32 | 1.24 | 3.38 |
| 46 | PC_20° | 2D | L_2 | 35000 | 5000 | 0.1 | 0.68 | 6.828 | 1.95 | 1.25 |
| 47 | PC_20° | 3D | L_2 | 400000 | 70000 | 0.2 | 0.69 | 6.441 | 1.37 | 1.76 |
| 48 | PC_20° | 4D | L_2 | 450000 | 200000 | 0.4 | 0.72 | 5.709 | 1.36 | 2.08 |
| 49 | PC_20° | 2D | L_5 | 30000 | 5000 | 0.2 | 0.69 | 6.291 | 3.23 | 1.03 |
| 50 | PC_20° | 3D | L_5 | 550000 | 300000 | 0.5 | 0.79 | 6.706 | 1.24 | 3.23 |
| 51 | PC_20° | 4D | L_5 | 500000 | 450000 | 0.9 | 0.74 | 6.071 | 1.4 | 2.13 |
| 52 | PC_20° | 2D | L_6 | 35000 | 25000 | 0.7 | 0.66 | 5.92 | 2.32 | 1.1 |
| 53 | PC_20° | 3D | L_6 | 600000 | 300000 | 0.5 | 0.64 | 5.601 | 1 | 2.53 |
| 54 | PC_20° | 4D | L_6 | 500000 | 300000 | 0.6 | 0.7 | 6.219 | 1.23 | 2.21 |

Si noti che, in tabella sono riportati i punteggi parziali ed il punteggio totale per misurare l'adattamento dei diagrammi ottenuti nel modello semplificato e quelli di target. Il calcolo dei punteggi avviene esattamente con la stessa tecnica usata nell'algorithm genetico, con la differenza che in questo caso il controllo e calcolo dell'errore si esegue per ogni nodo del rivestimento e non solo per i 12 nodi strumentati.

Reazioni vincolari e carichi netti

Una volta determinate le rigidezze ottimali delle molle per ciascun modello, è necessario determinare i carichi netti sottraendo ai carichi precedentemente applicati la reazioni vincolari delle molle. Inoltre occorre verificare che, applicando sul modello semplificato (in SAP2000) i carichi netti con una configurazione di molle di rigidezza trascurabile, i diagrammi di sforzo normale, momento e rotazione coincidano con quelli di target (RS2); e naturalmente, che siano simili anche ai diagrammi ottenuti nel modello semplificato con i carichi "lordi" e le molle di rigidezza tarata.

| PUNTEGGI Carichi netti - molle di rigidezza trascurabile | | | | | | | | | |
|--|----------------|------------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| MODELLI | | | | K_r | K_t | P | P_n | P_m | P_r |
| NUM | Piano campagna | Profondità | Young | [kN/m] | [kN/m] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 1 | PC_H | 2D | L_1 | 100 | 100 | 0.843 | 17.782 | 2.130 | 1.515 |
| 2 | PC_H | 3D | L_1 | 100 | 100 | 0.921 | 17.055 | 2.077 | 1.831 |
| 3 | PC_H | 4D | L_1 | 100 | 100 | 1.105 | 20.459 | 2.024 | 2.761 |
| 4 | PC_H | 2D | L_3 | 100 | 100 | 0.758 | 46.127 | 1.980 | 1.261 |
| 5 | PC_H | 3D | L_3 | 100 | 100 | 0.861 | 20.221 | 1.991 | 1.640 |
| 6 | PC_H | 4D | L_3 | 100 | 100 | 1.012 | 11.227 | 1.845 | 2.796 |
| 7 | PC_H | 2D | L_4 | 100 | 100 | 0.834 | 15.552 | 2.023 | 1.562 |
| 8 | PC_H | 3D | L_4 | 100 | 100 | 0.906 | 14.574 | 2.008 | 1.863 |
| 9 | PC_H | 4D | L_4 | 100 | 100 | 1.077 | 12.853 | 1.921 | 3.030 |
| 10 | PC_10° | 2D | L_1 | 100 | 100 | 0.751 | 13.439 | 1.865 | 1.386 |
| 11 | PC_10° | 3D | L_1 | 100 | 100 | 0.929 | 13.178 | 1.984 | 2.013 |
| 12 | PC_10° | 4D | L_1 | 100 | 100 | 1.050 | 15.680 | 1.937 | 2.685 |
| 13 | PC_10° | 2D | L_3 | 100 | 100 | 0.701 | 25.471 | 1.845 | 1.183 |
| 14 | PC_10° | 3D | L_3 | 100 | 100 | 0.834 | 15.552 | 2.023 | 1.562 |
| 15 | PC_10° | 4D | L_3 | 100 | 100 | 0.955 | 16.618 | 1.930 | 2.134 |

| | | | | | | | | | |
|----|--------|----|-----|-----|-----|-------|--------|-------|-------|
| 16 | PC_10° | 2D | L_4 | 100 | 100 | 0.739 | 13.909 | 1.922 | 1.315 |
| 17 | PC_10° | 3D | L_4 | 100 | 100 | 0.878 | 13.243 | 1.883 | 1.880 |
| 18 | PC_10° | 4D | L_4 | 100 | 100 | 1.026 | 14.468 | 1.900 | 2.634 |
| 19 | PC_20° | 2D | L_1 | 100 | 100 | 0.747 | 6.693 | 1.630 | 1.734 |
| 20 | PC_20° | 3D | L_1 | 100 | 100 | 0.681 | 6.664 | 1.610 | 1.433 |
| 21 | PC_20° | 4D | L_1 | 100 | 100 | 0.723 | 7.085 | 1.628 | 1.592 |
| 22 | PC_20° | 2D | L_3 | 100 | 100 | 0.873 | 9.064 | 1.662 | 2.309 |
| 23 | PC_20° | 3D | L_3 | 100 | 100 | 0.713 | 9.311 | 1.793 | 1.356 |
| 24 | PC_20° | 4D | L_3 | 100 | 100 | 0.863 | 8.648 | 1.717 | 2.170 |
| 25 | PC_20° | 2D | L_4 | 100 | 100 | 0.821 | 7.642 | 1.678 | 2.036 |
| 26 | PC_20° | 3D | L_4 | 100 | 100 | 0.716 | 6.934 | 1.670 | 1.530 |
| 27 | PC_20° | 4D | L_4 | 100 | 100 | 0.809 | 7.888 | 1.661 | 1.971 |
| 28 | PC_H | 2D | L_2 | 100 | 100 | 0.698 | 6.353 | 4.159 | 0.967 |
| 29 | PC_H | 3D | L_2 | 100 | 100 | 1.017 | 9.708 | 1.793 | 3.100 |
| 30 | PC_H | 4D | L_2 | 100 | 100 | 0.874 | 10.189 | 2.235 | 1.669 |
| 31 | PC_H | 2D | L_5 | 100 | 100 | 0.670 | 7.992 | 2.401 | 1.051 |
| 32 | PC_H | 3D | L_5 | 100 | 100 | 0.883 | 13.537 | 2.050 | 1.753 |
| 33 | PC_H | 4D | L_5 | 100 | 100 | 0.892 | 21.557 | 2.133 | 1.649 |
| 34 | PC_H | 2D | L_6 | 100 | 100 | 0.721 | 16.114 | 1.939 | 1.237 |
| 35 | PC_H | 3D | L_6 | 100 | 100 | 0.985 | 14.684 | 1.872 | 2.422 |
| 36 | PC_H | 4D | L_6 | 100 | 100 | 1.072 | 24.894 | 2.083 | 2.422 |
| 37 | PC_10° | 2D | L_2 | 100 | 100 | 0.689 | 5.545 | 3.912 | 0.985 |
| 38 | PC_10° | 3D | L_2 | 100 | 100 | 0.891 | 11.637 | 1.762 | 2.135 |
| 39 | PC_10° | 4D | L_2 | 100 | 100 | 0.742 | 13.050 | 1.837 | 1.375 |
| 40 | PC_10° | 2D | L_5 | 100 | 100 | 0.674 | 7.866 | 2.718 | 1.012 |
| 41 | PC_10° | 3D | L_5 | 100 | 100 | 1.028 | 12.114 | 1.828 | 2.910 |
| 42 | PC_10° | 4D | L_5 | 100 | 100 | 0.896 | 14.988 | 1.941 | 1.870 |
| 43 | PC_10° | 2D | L_6 | 100 | 100 | 0.687 | 9.743 | 2.248 | 1.101 |
| 44 | PC_10° | 3D | L_6 | 100 | 100 | 1.037 | 13.119 | 1.835 | 2.912 |
| 45 | PC_10° | 4D | L_6 | 100 | 100 | 1.022 | 15.552 | 2.000 | 2.415 |
| 46 | PC_20° | 2D | L_2 | 100 | 100 | 0.658 | 6.474 | 1.841 | 1.217 |
| 47 | PC_20° | 3D | L_2 | 100 | 100 | 0.631 | 6.302 | 1.664 | 1.211 |
| 48 | PC_20° | 4D | L_2 | 100 | 100 | 0.617 | 5.611 | 1.469 | 1.315 |
| 49 | PC_20° | 2D | L_5 | 100 | 100 | 0.652 | 6.026 | 2.784 | 0.992 |
| 50 | PC_20° | 3D | L_5 | 100 | 100 | 0.610 | 6.638 | 1.384 | 1.305 |
| 51 | PC_20° | 4D | L_5 | 100 | 100 | 0.586 | 6.000 | 1.403 | 1.208 |
| 52 | PC_20° | 2D | L_6 | 100 | 100 | 0.656 | 5.696 | 2.136 | 1.136 |
| 53 | PC_20° | 3D | L_6 | 100 | 100 | 0.522 | 5.279 | 1.353 | 1.013 |
| 54 | PC_20° | 4D | L_6 | 100 | 100 | 0.604 | 5.925 | 1.482 | 1.232 |

Si noti come l'andamento che si riflette nei punteggi è leggermente cambiato ma ancora accettabile.

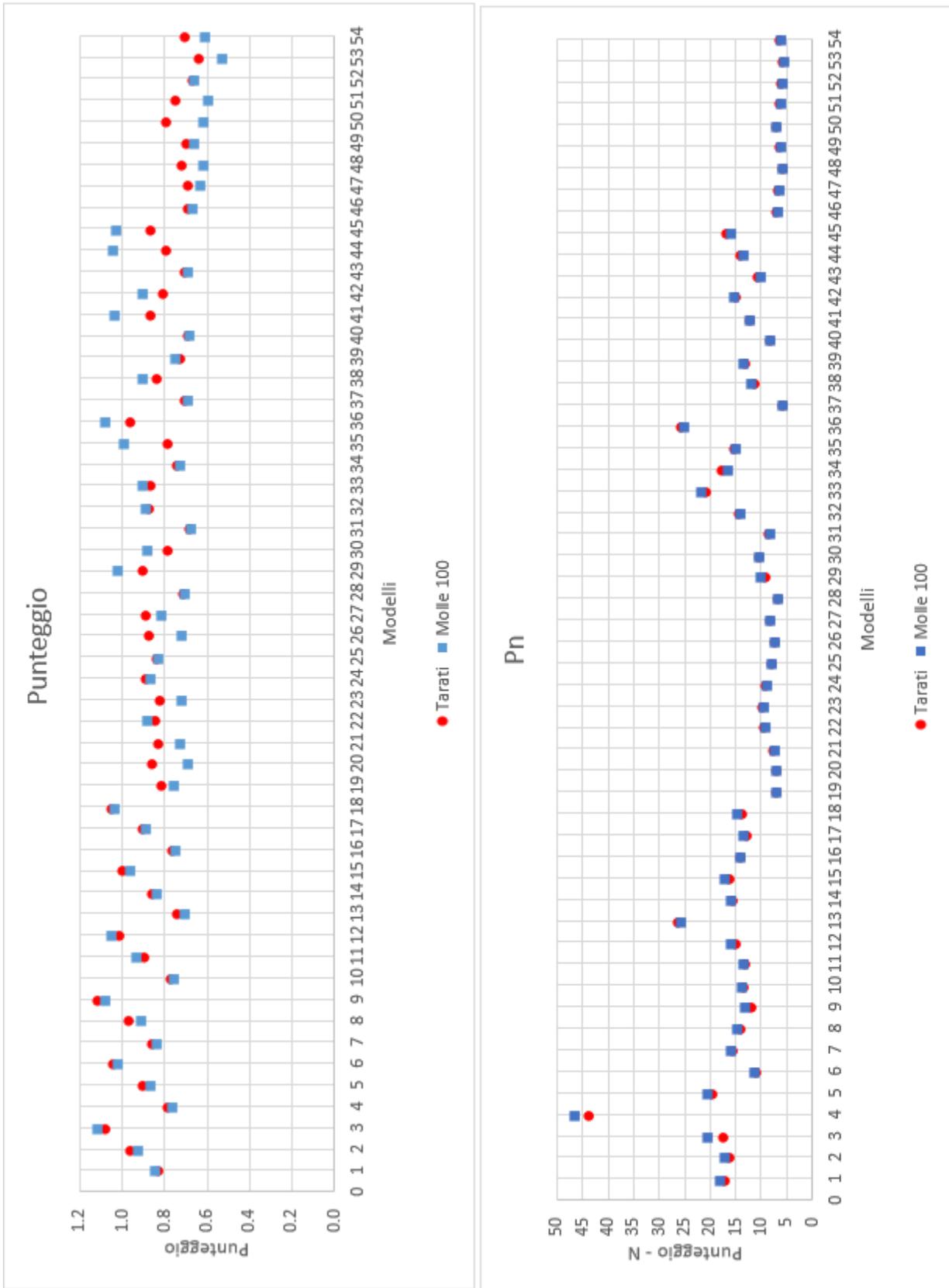


Figura 31 Confronto punteggi - molle tarate e i carichi lordi VS molle trascurabili e carichi netti

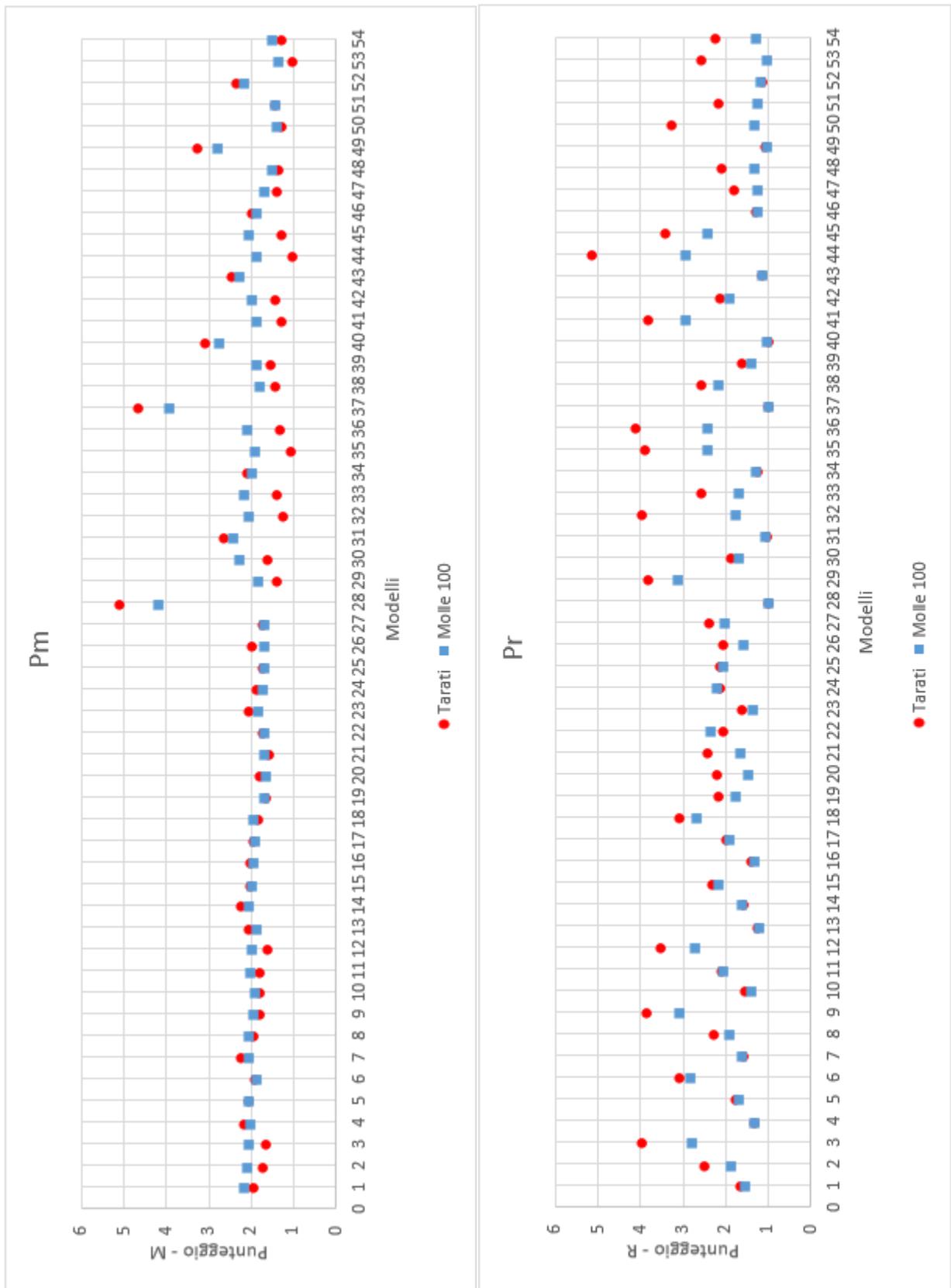


Figura 32 Confronto punteggi - molle tarate e i carichi lordi VS molle trascurabili e carichi netti

Modello PCH_2D_L1 – Analisi FEM/FDM, taratura molle, reazioni vincolari e carichi netti

Modello geo-meccanico

Si riporta a titolo di esempio l'analisi completa svolta per il modello PCH_2D_L1. Le stesse operazioni sono state svolte per i restanti 53 modelli.

Il modello adottato per tale galleria ha forma quadrata di dimensioni pari a 562x328 m. La galleria ha diametro pari a 13,7 m ed il rivestimento è modellato con 72 elementi beam intervallati da 72 nodi, uno ogni 5 gradi. Lo scavo si trova ad una profondità di 2D sotto il piano campagna.

Si sono adottate condizioni al contorno di tipo cinematico che bloccano sia gli spostamenti in direzione orizzontale che quelli in direzione verticale nei due vertici inferiori, mentre sono bloccati gli spostamenti verticali sulla base del modello e gli spostamenti orizzontali sui bonds verticali.

Il materiale che costituisce il semi-spazio è *isotropo, elastico-lineare*. Il coefficiente di Poisson è assunto pari a 0,3 mentre il modulo di Young è assunto variabile con la profondità secondo la legge del sito 1.

Lo stato tensionale geostatico è assunto variabile con la profondità proporzionalmente al peso specifico del materiale, il coefficiente di spinta a riposo è assunto pari a 0,5. Il modello è in condizioni di deformazione piana.

Modello geo-meccanico su FLAC 2D

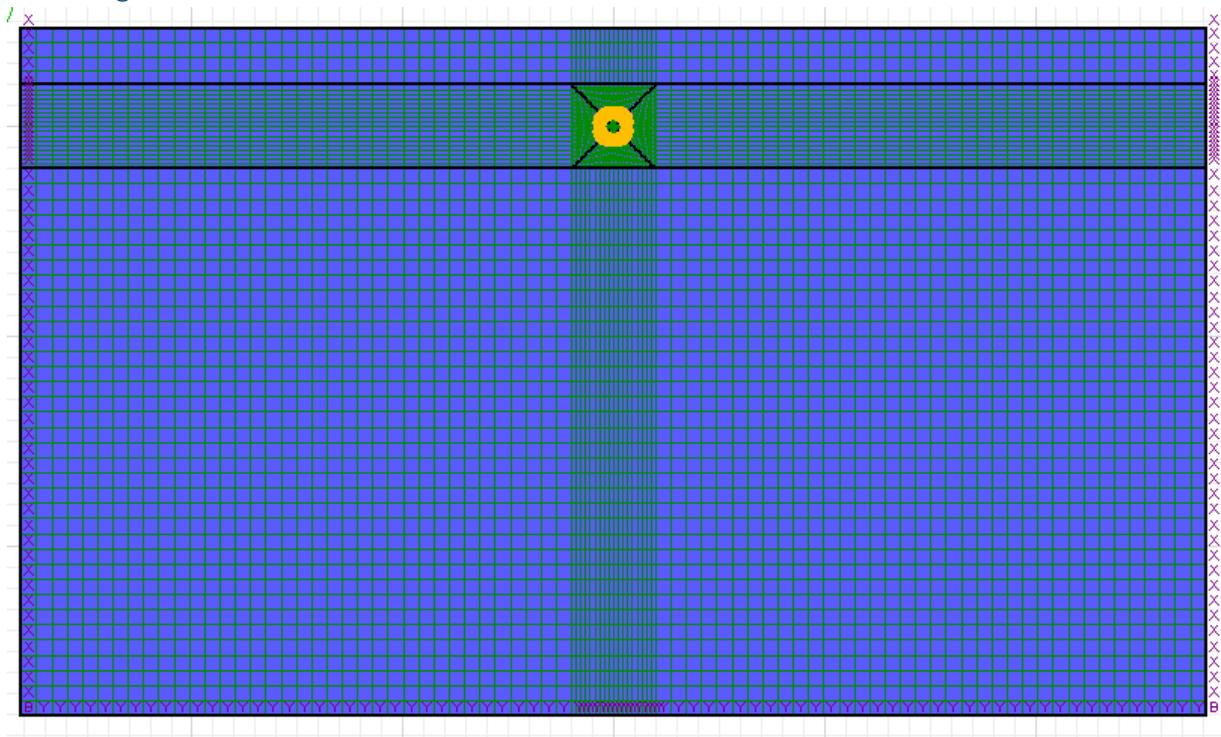


Figura 33 Flac2D – Mesh modello geo-meccanico

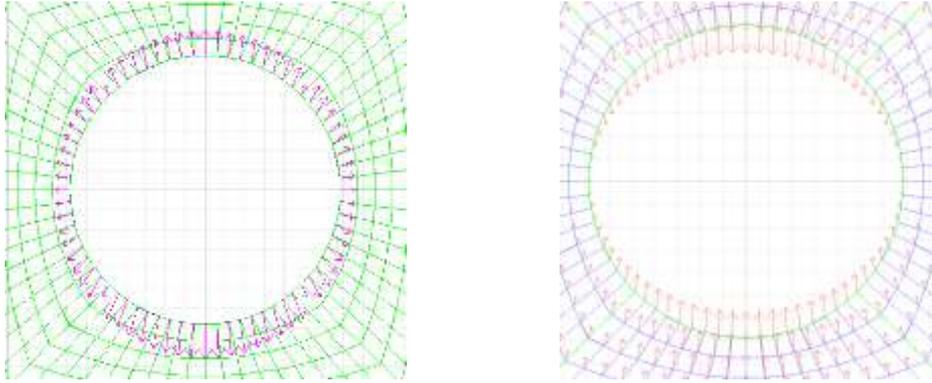
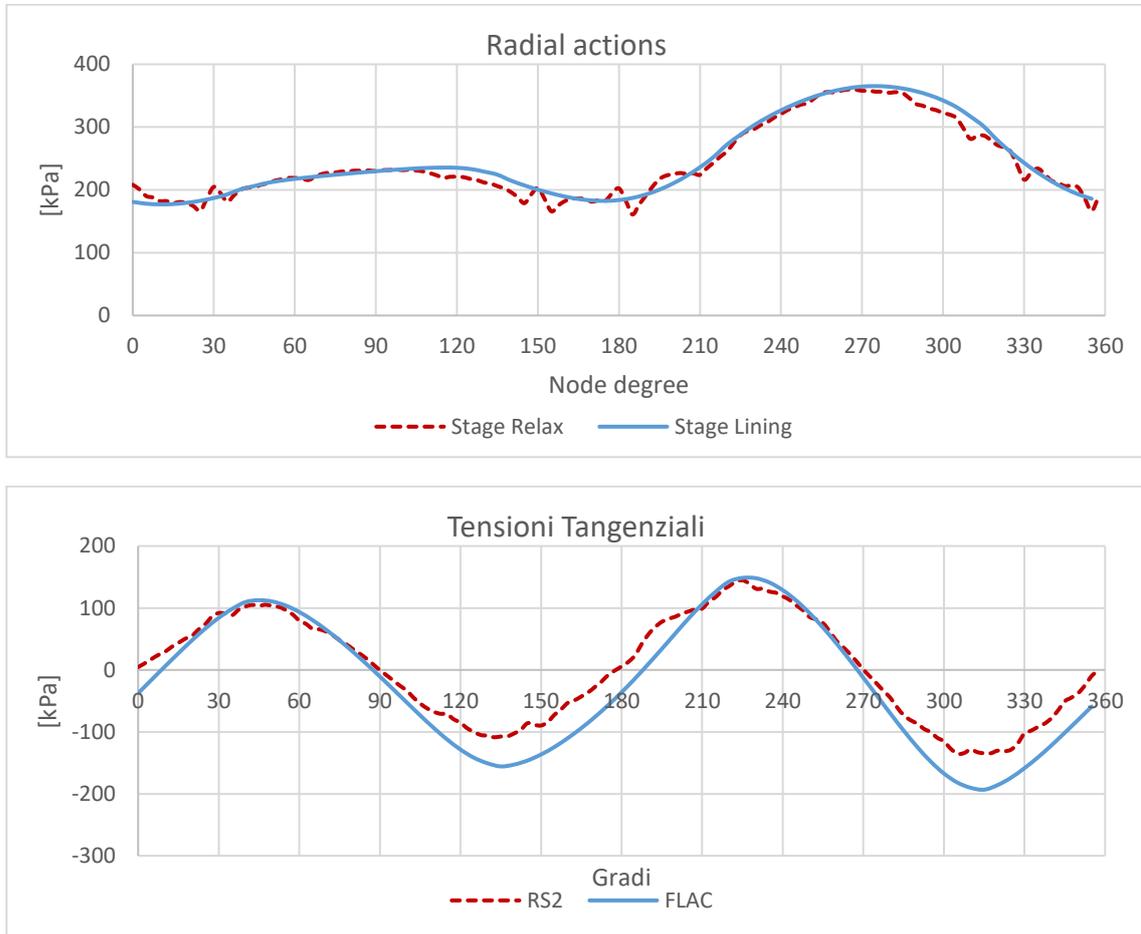


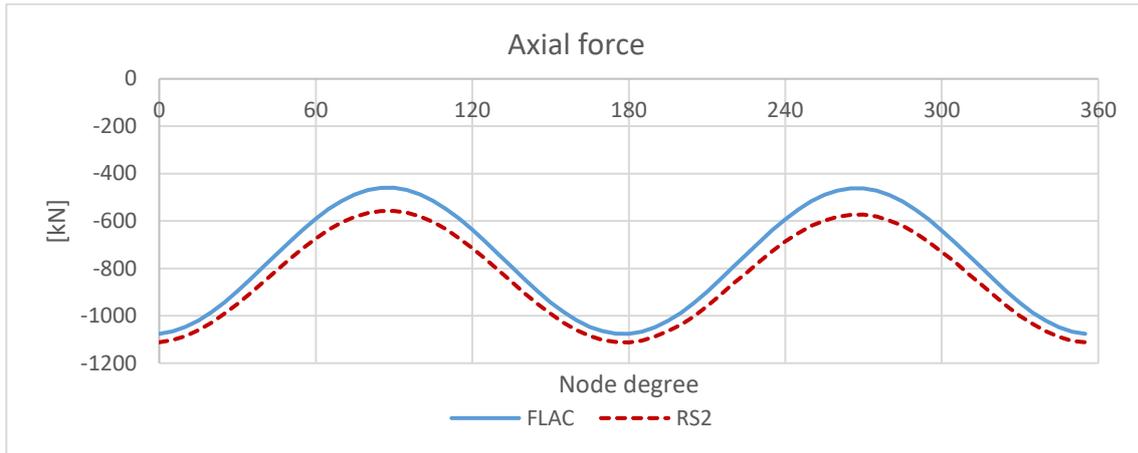
Figura 34 FLAC2D: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)

Risultati analisi con Rocscience RS2 e confronto con Flac2D

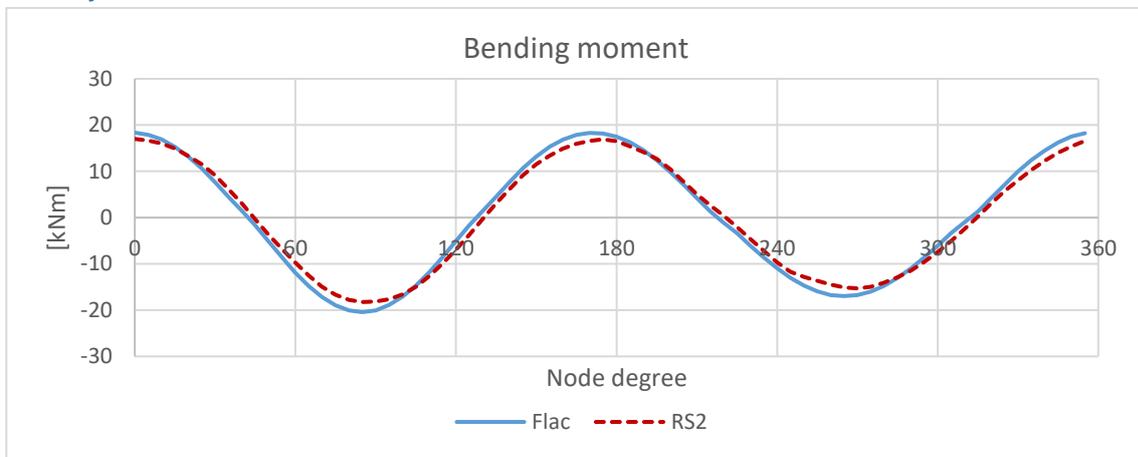
Tensioni agenti sul contorno dello scavo nei differenti stage



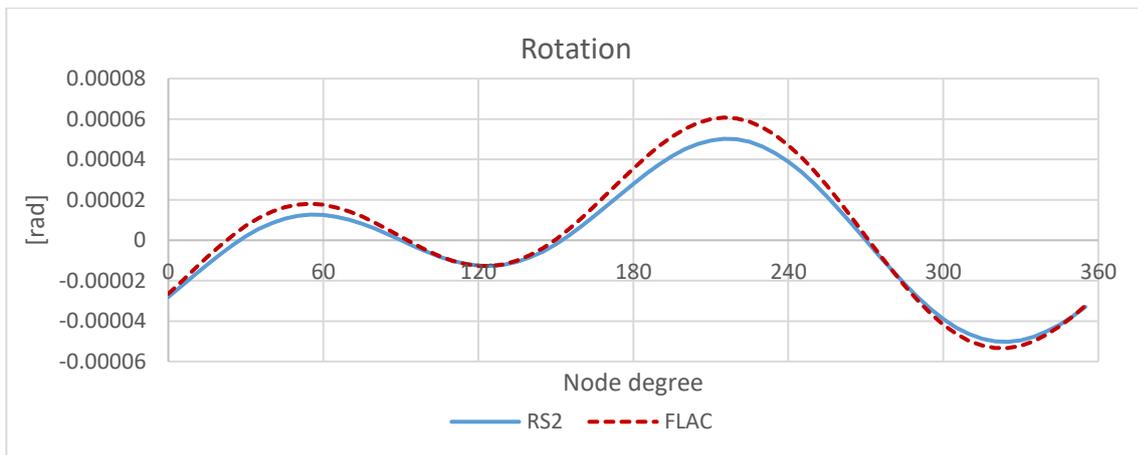
Sforzo normale



Momento flettente

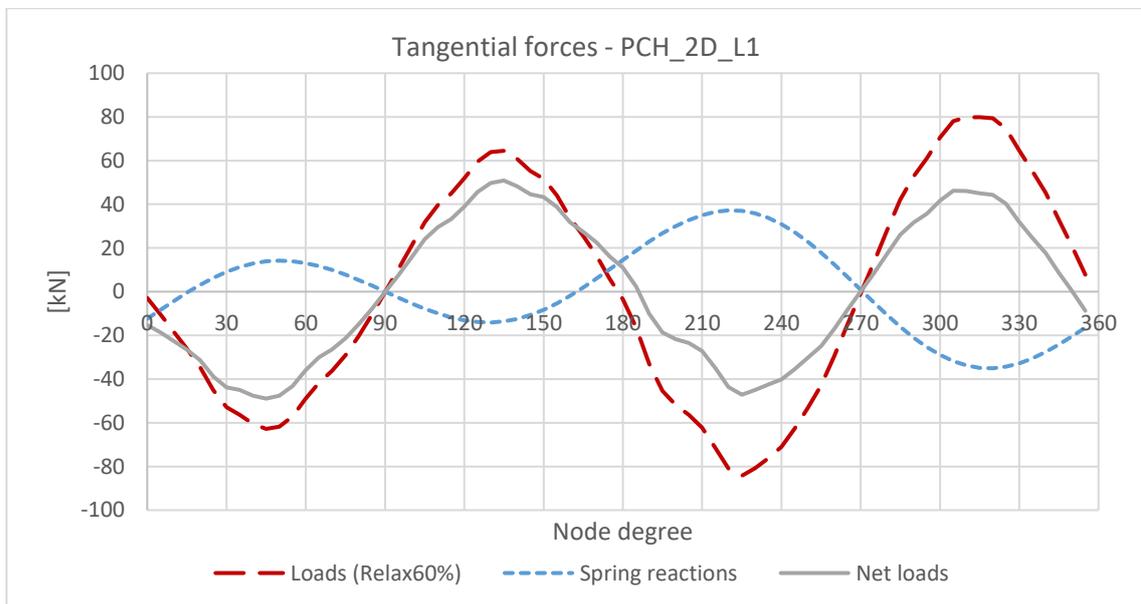
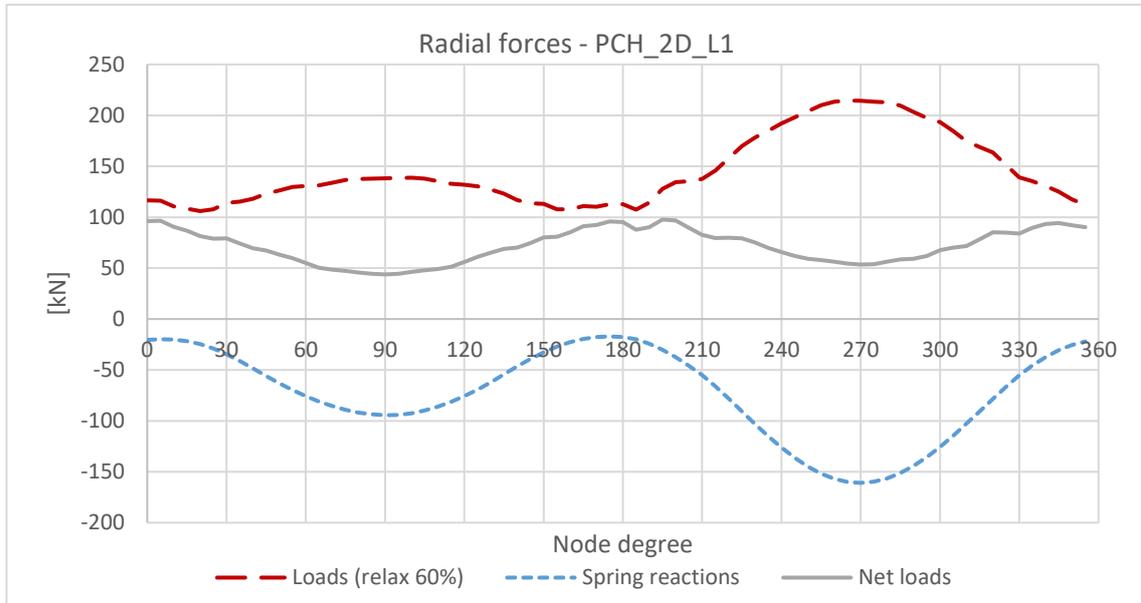


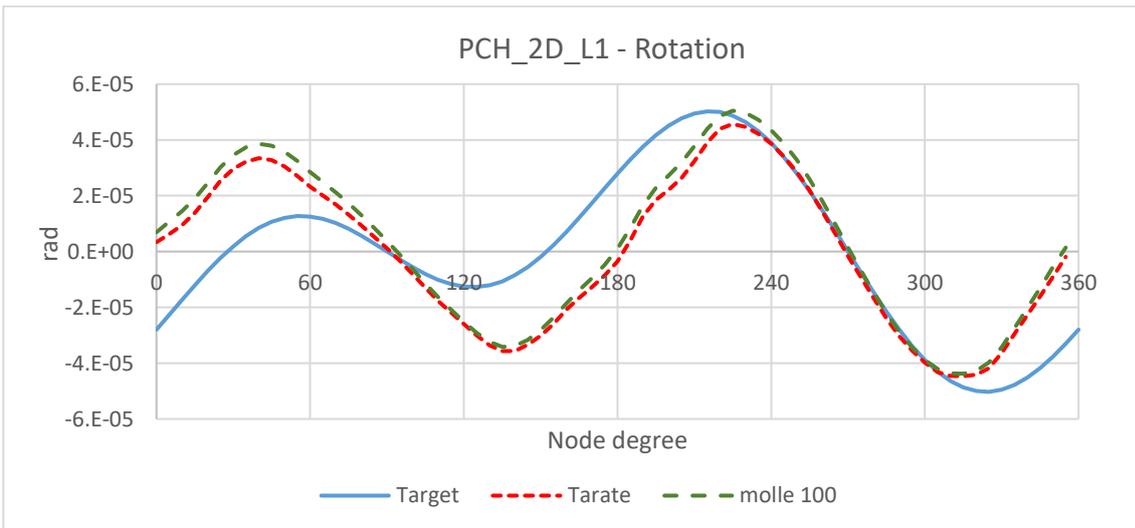
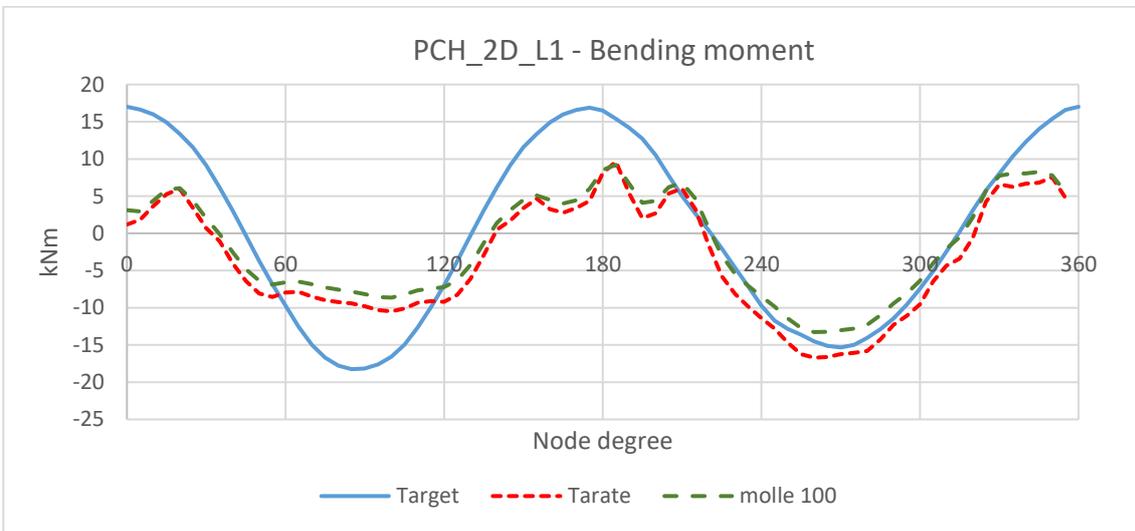
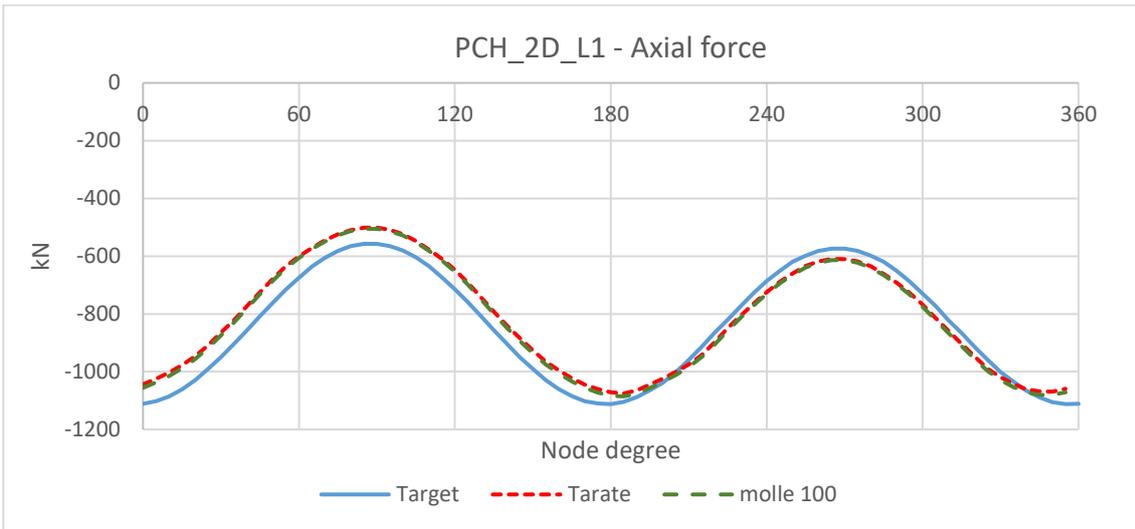
Rotazioni dei nodi del rivestimento



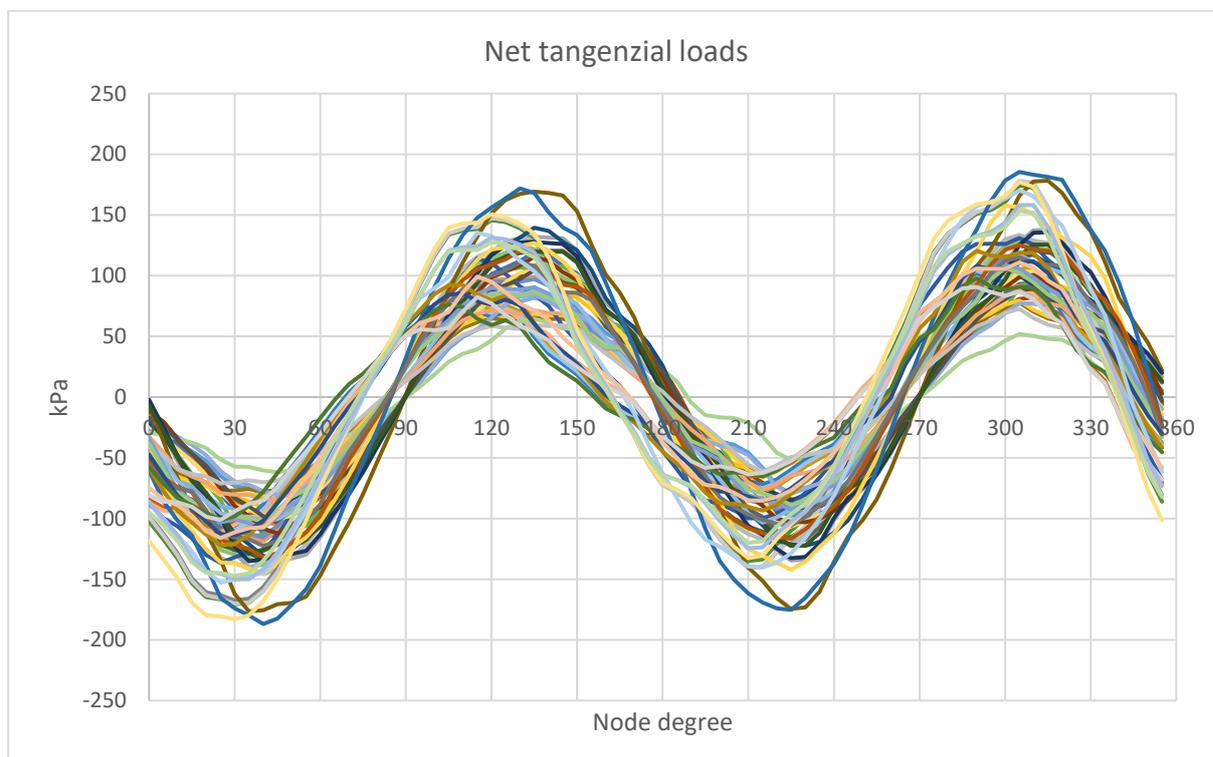
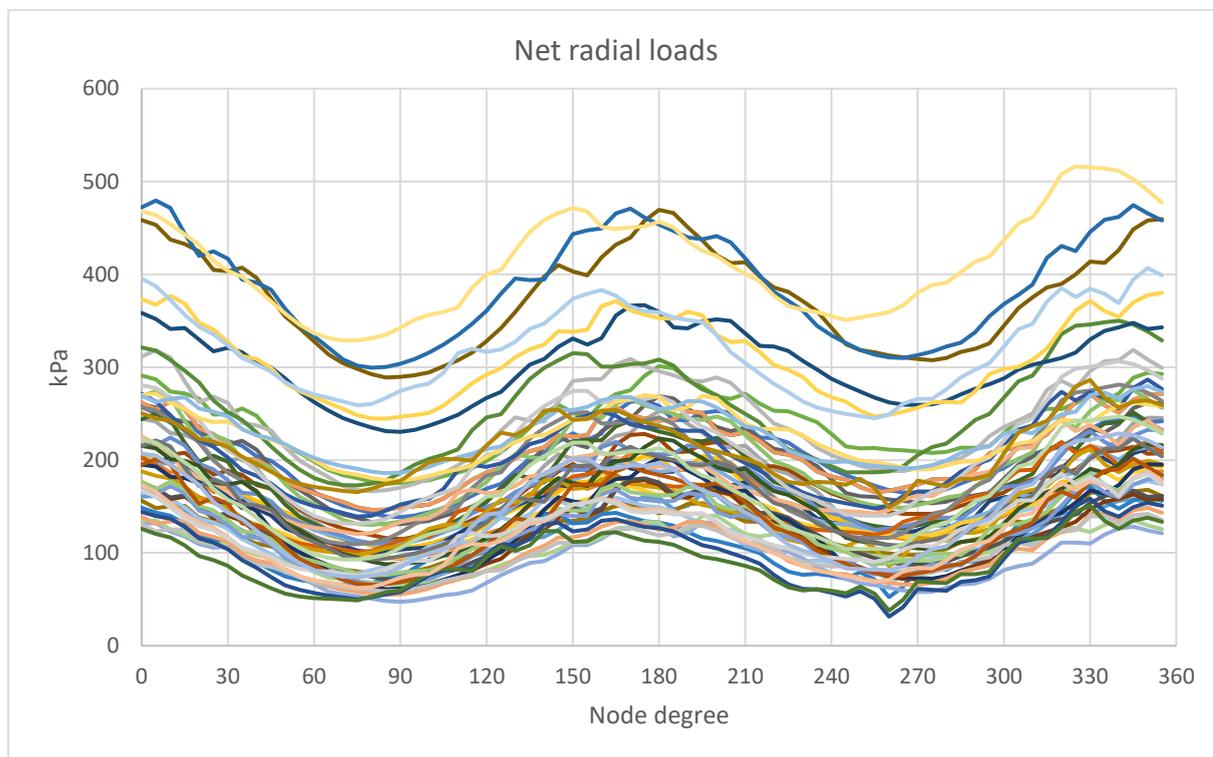
Carichi netti

Dai seguenti grafici si nota come i carichi radiali, oltre che essere ridotti in ampiezza, siano sfasati rispetto ai carichi lordi, mentre i carichi radiali sono in fase con ampiezza ridotta. Inoltre si rende noto che i carichi lordi che sono distribuiti sull'elemento beam sono stati trasformati in carichi concentrati nei nodi, affinché vi possano essere sommate le reazioni vincolari.





Per tutti i 54 modelli elastici analizzati il comportamento delle reazioni vincolari e di conseguenza l'andamento dei carichi netti è analogo.

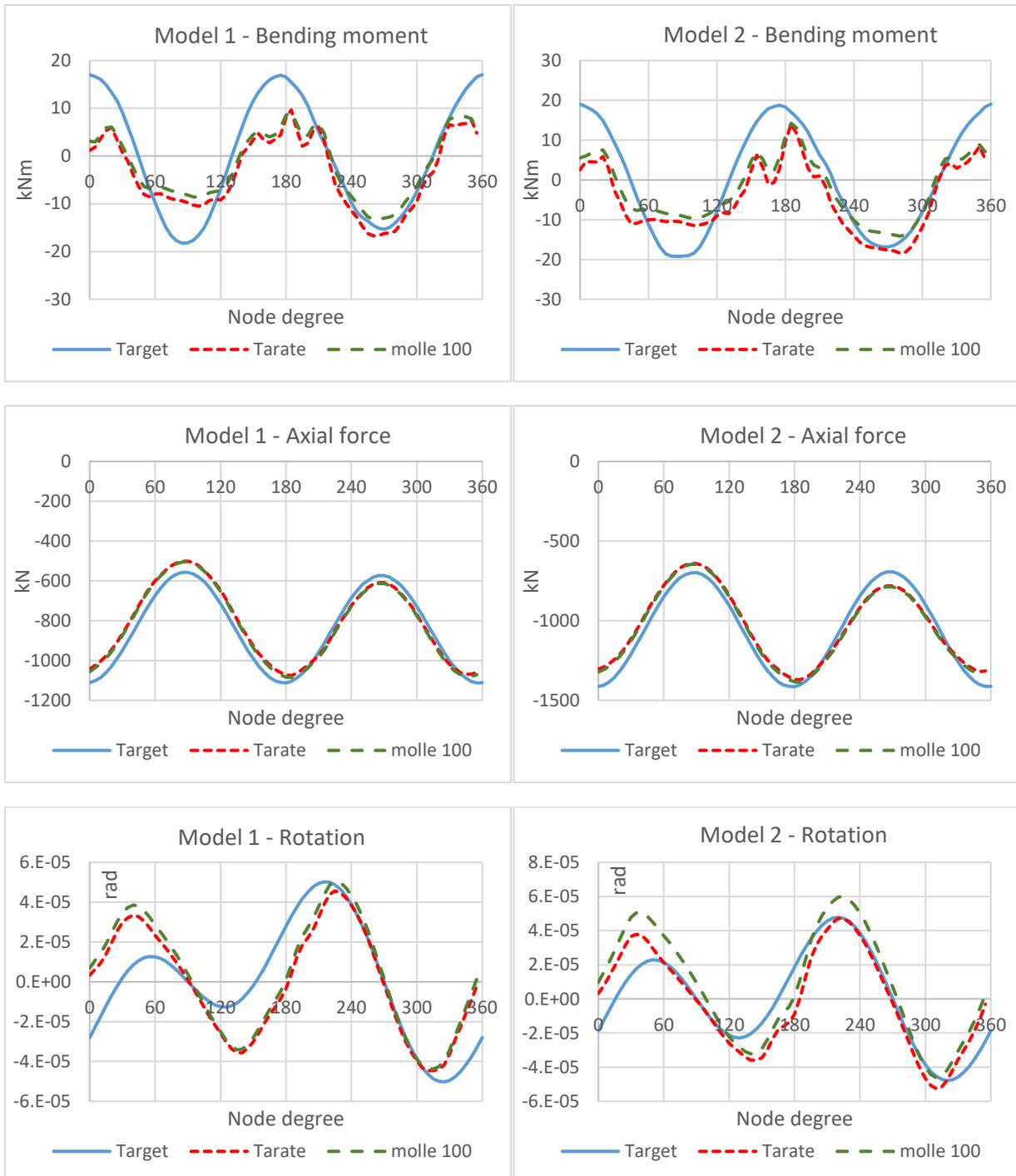


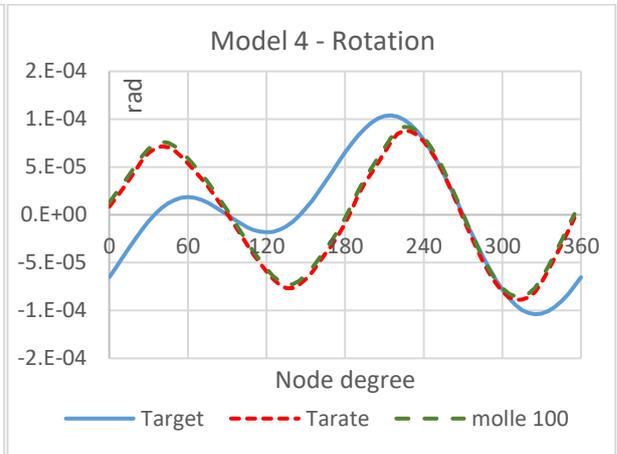
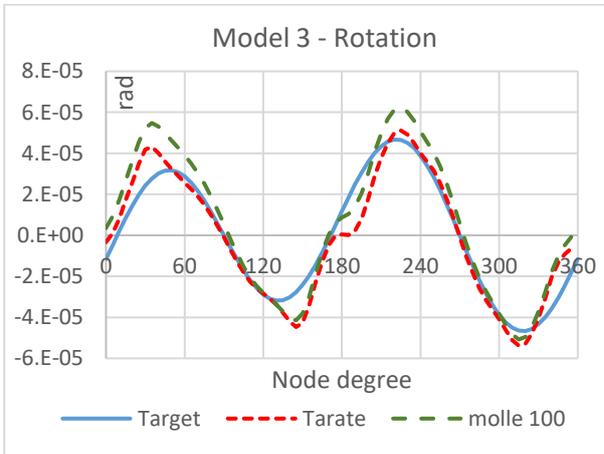
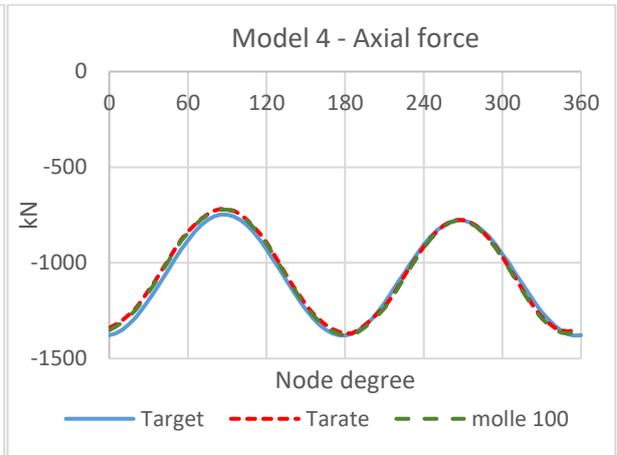
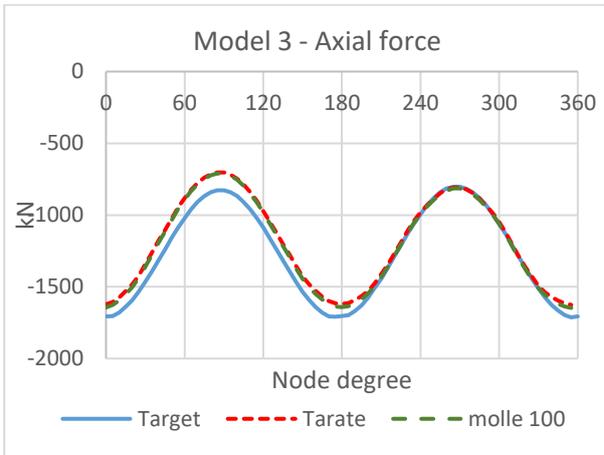
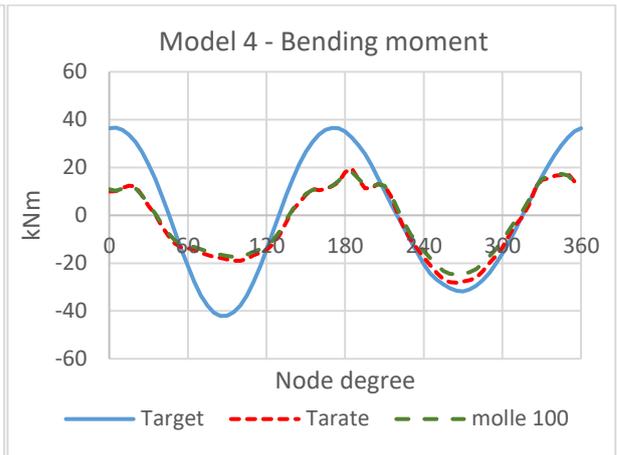
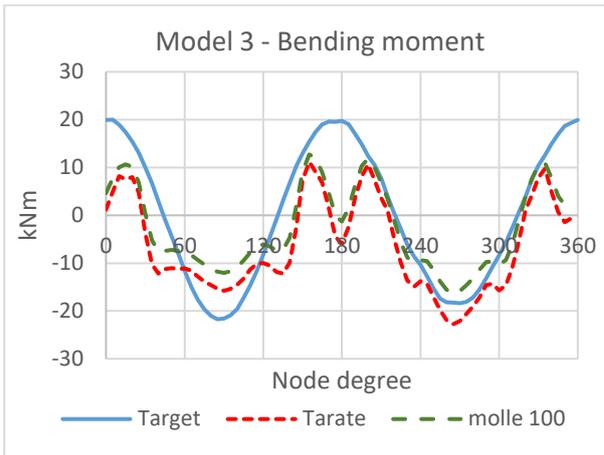
Sforzo normale, momento flettente e rotazione

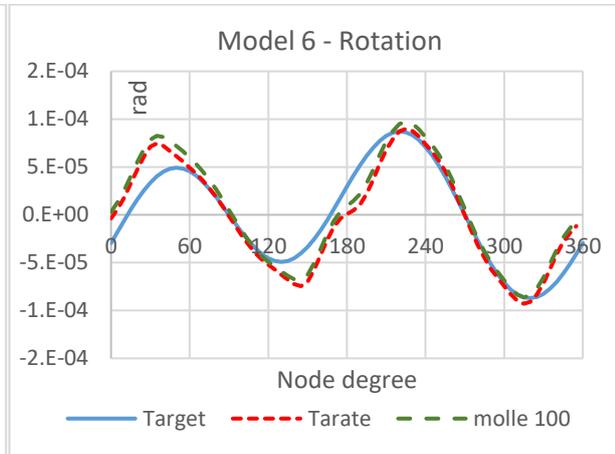
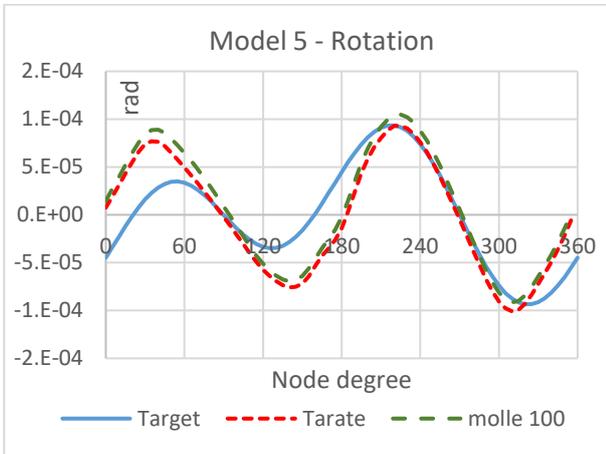
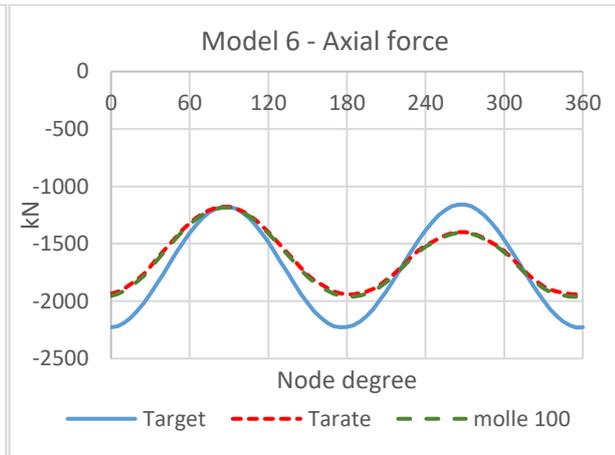
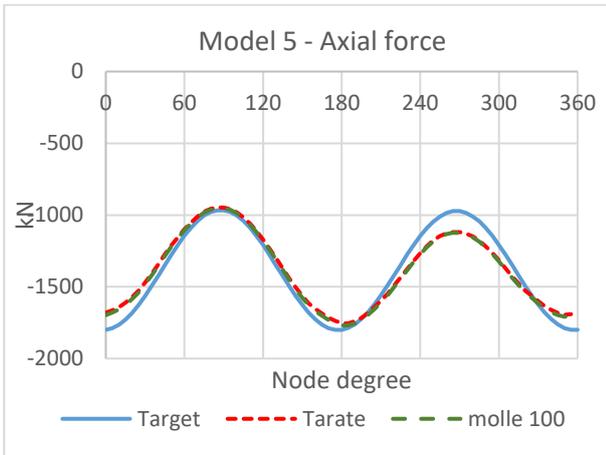
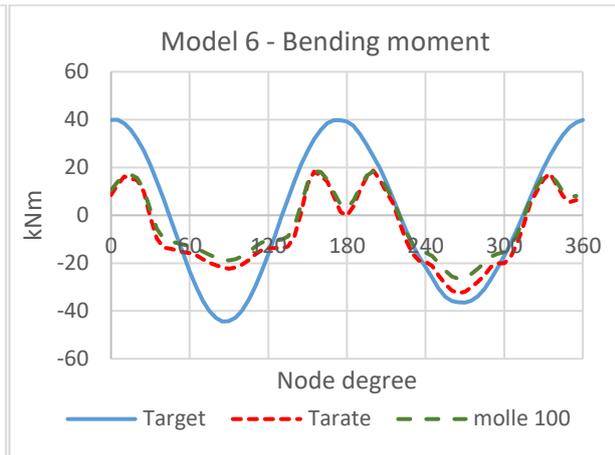
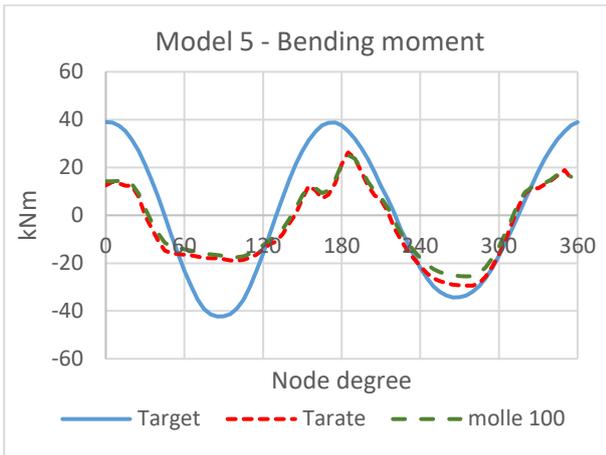
Di seguito si riporta il confronto tra i diagrammi di sforzo normale, momento flettente e rotazione di tipo:

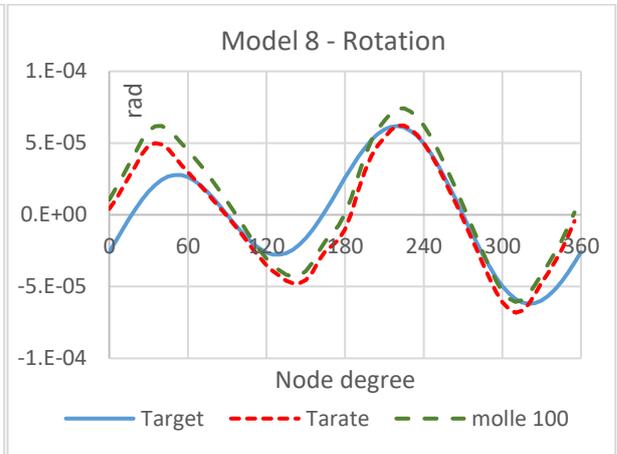
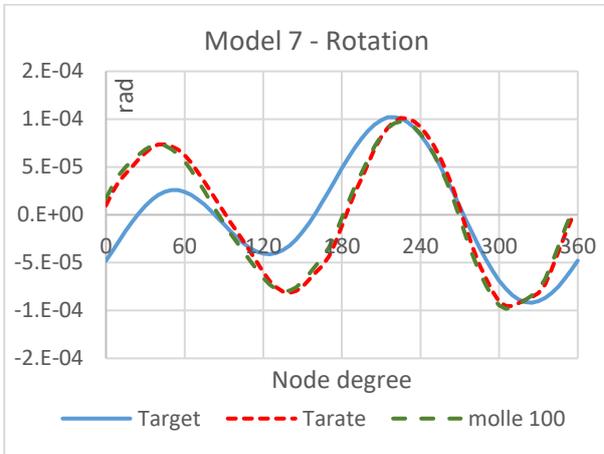
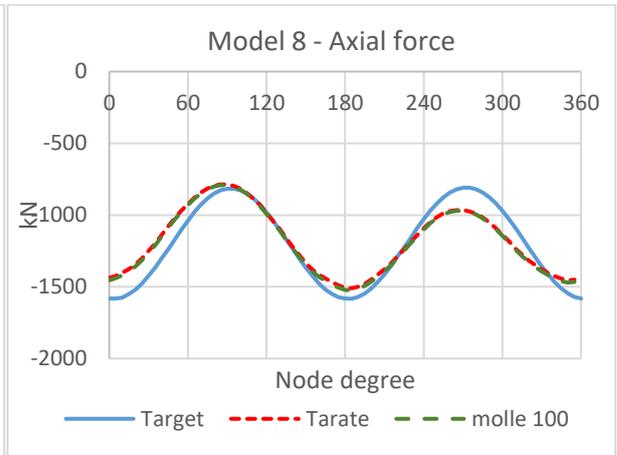
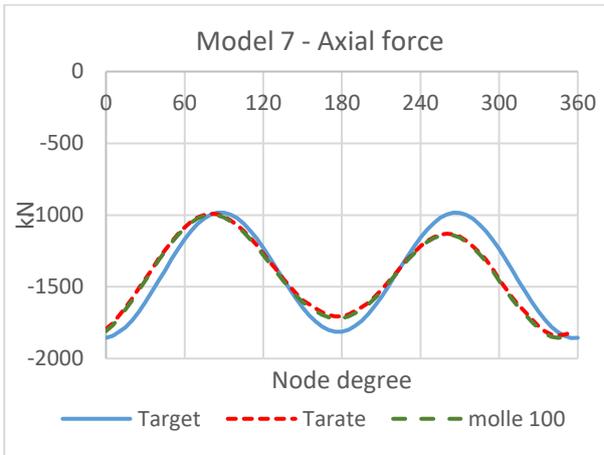
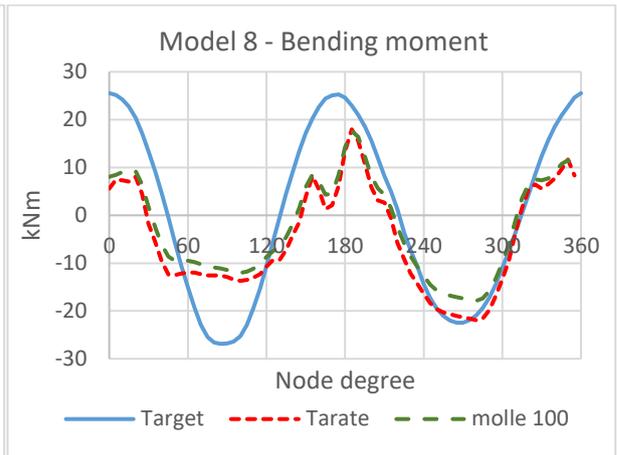
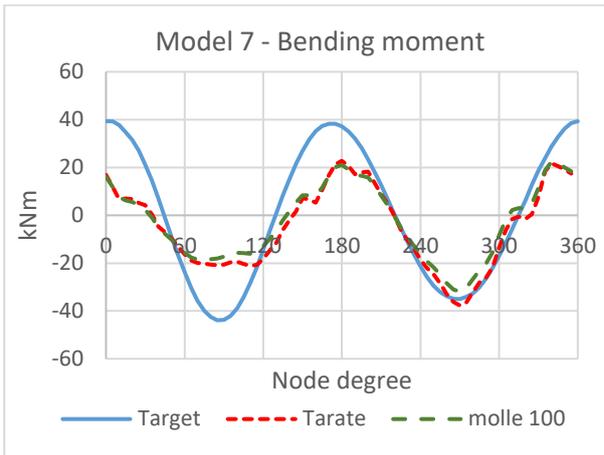
- “Target” ovvero provenienti da RS2,

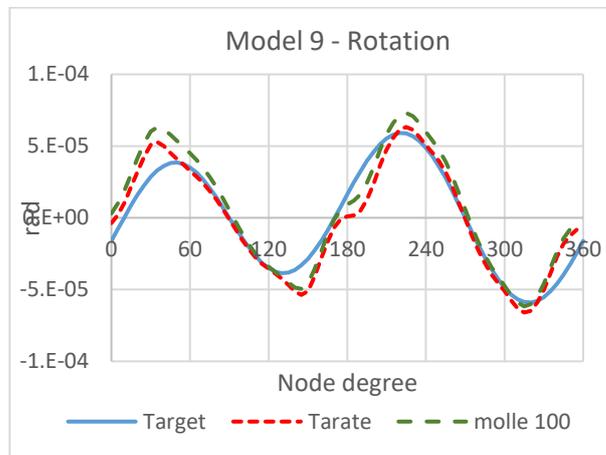
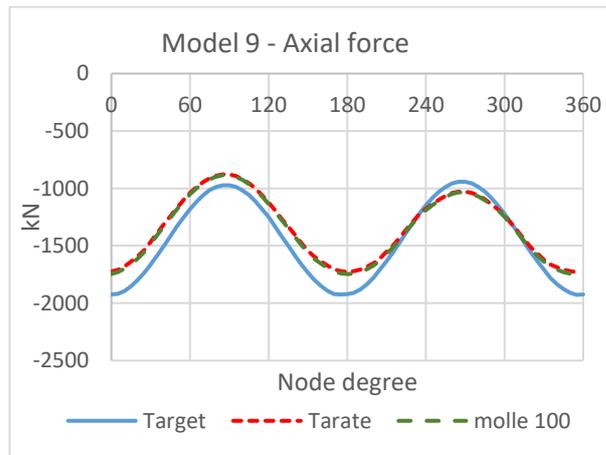
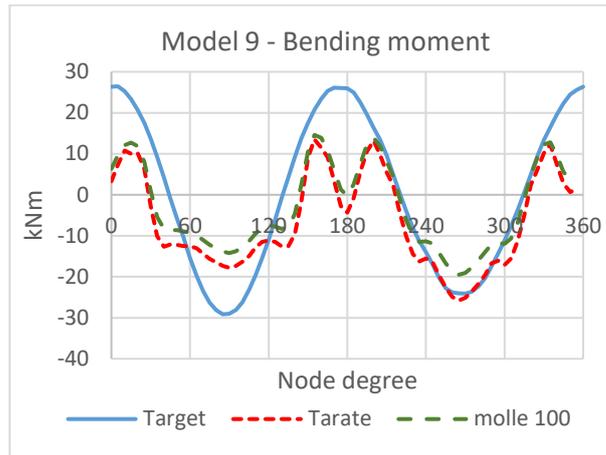
- “*Tarate*” ovvero provenienti dal modello semplificato con molle tarate e carichi lordi applicati,
- “*molle 100*” ovvero provenienti dal modello semplificato con i carichi netti applicati e molle di rigidezza trascurabile pari a 100 kN/m.

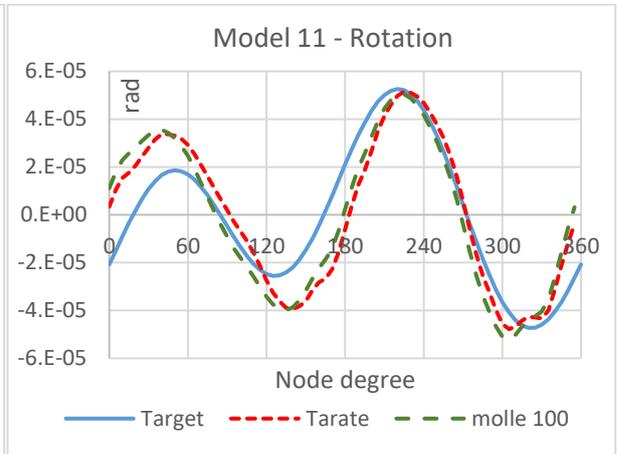
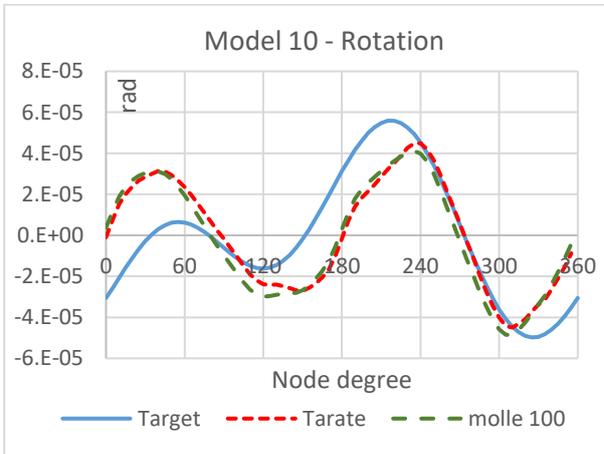
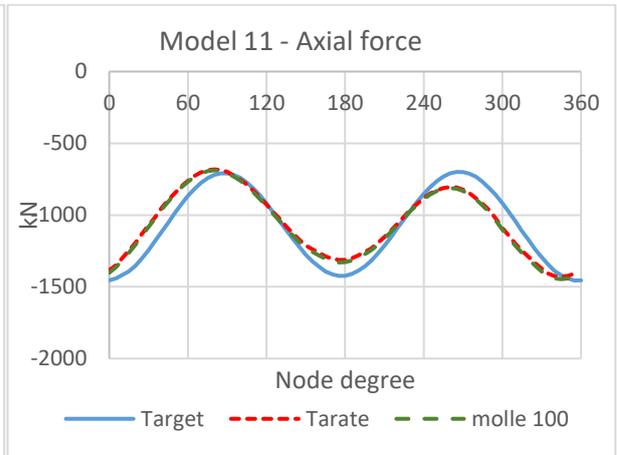
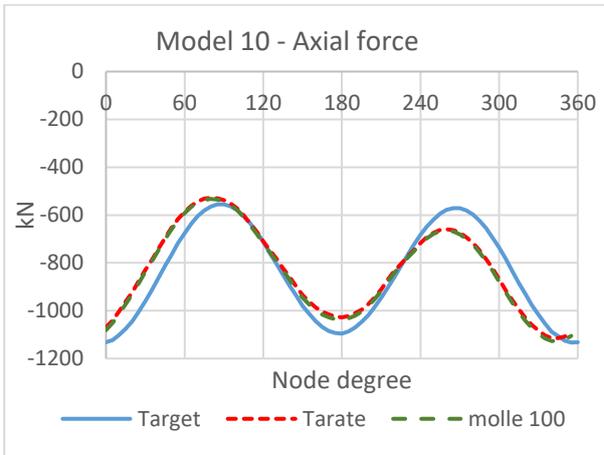
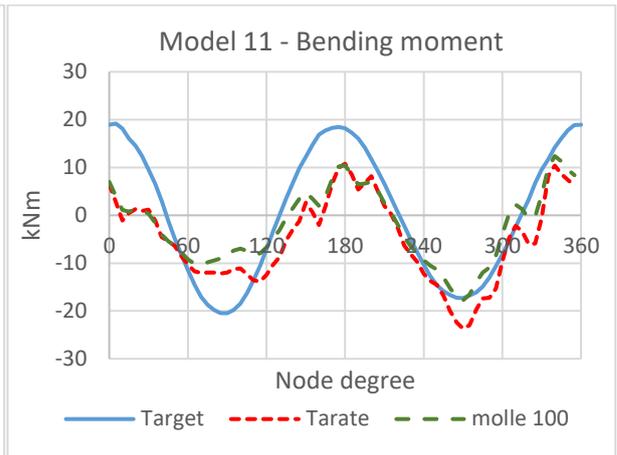
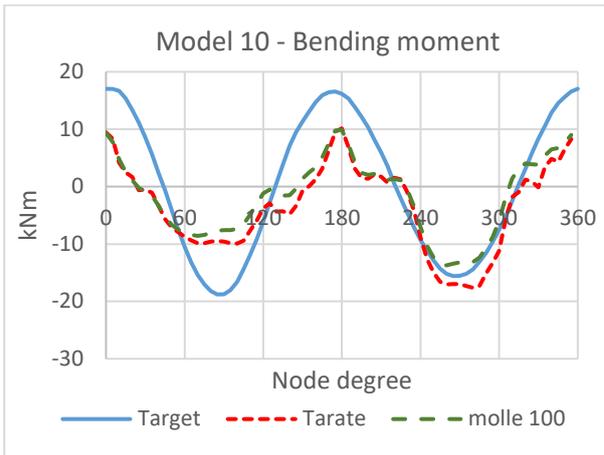


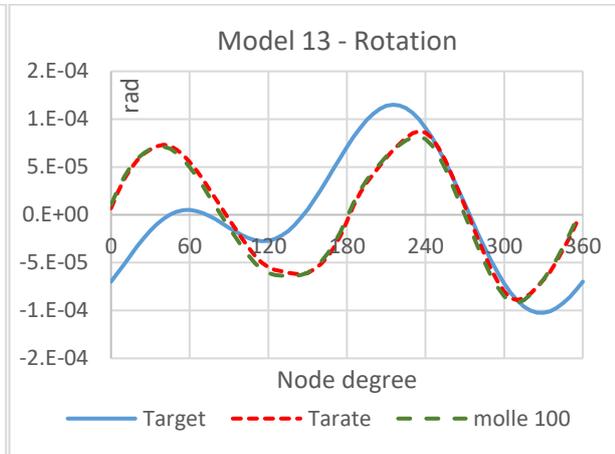
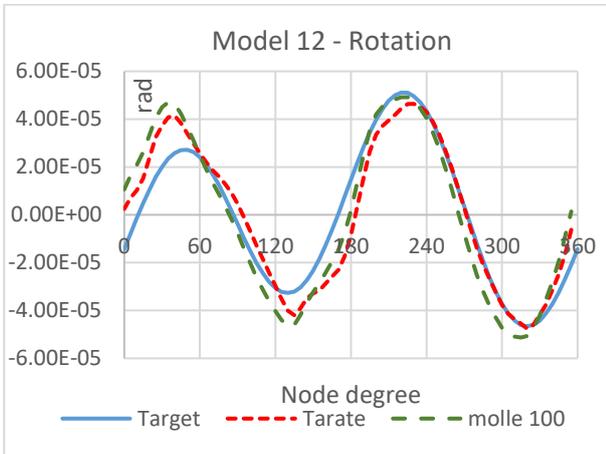
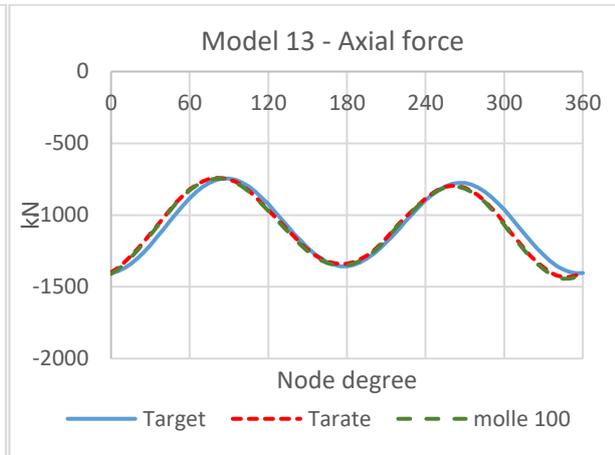
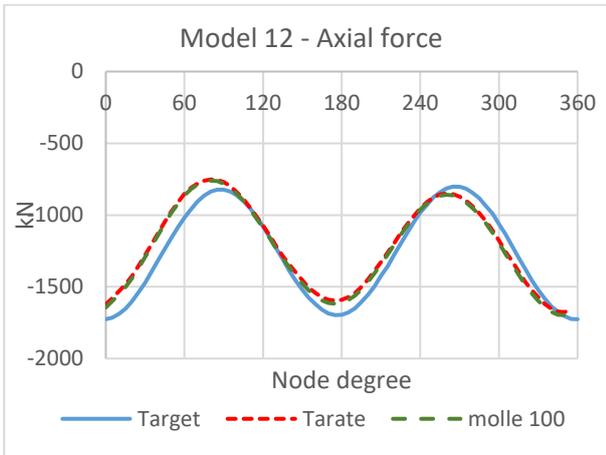
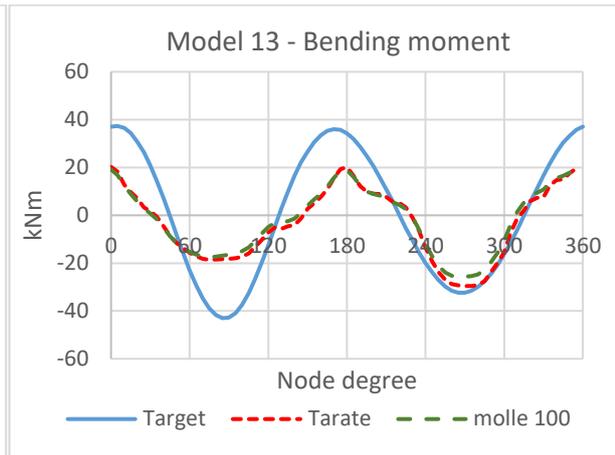
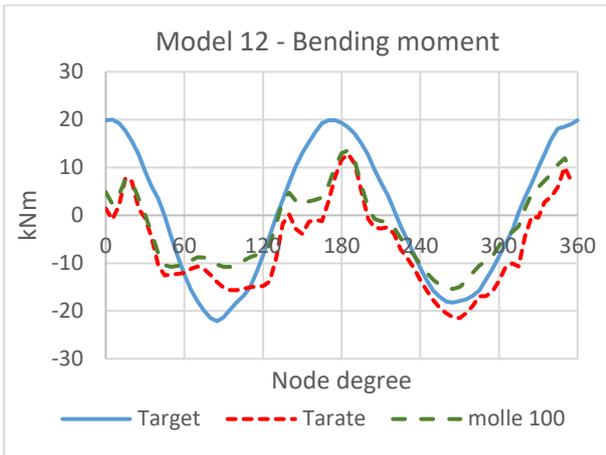


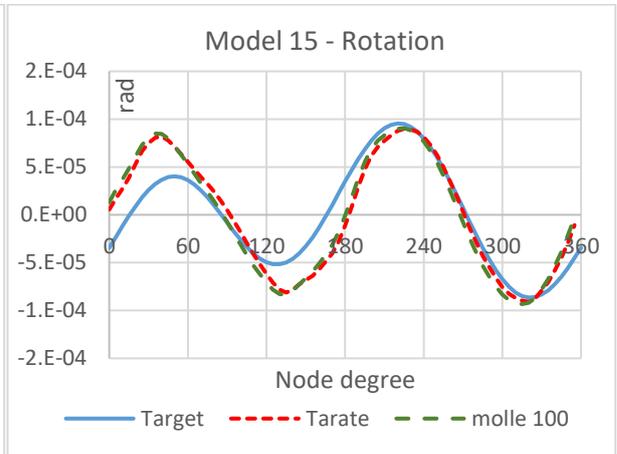
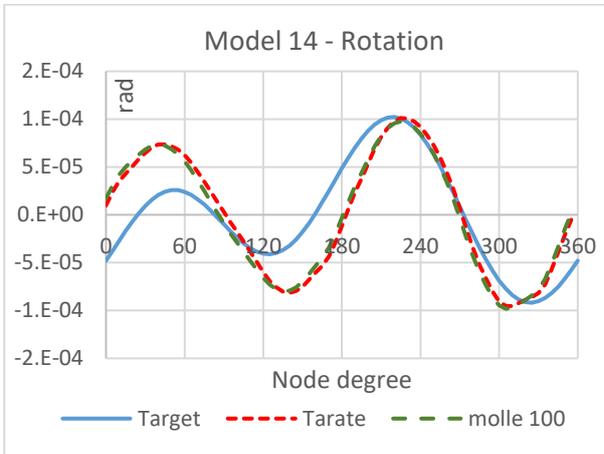
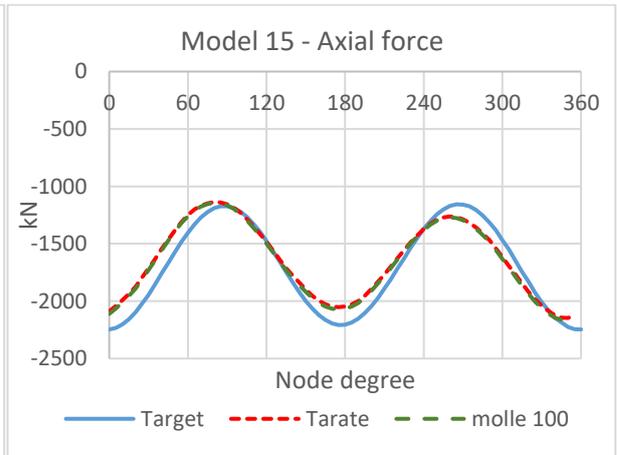
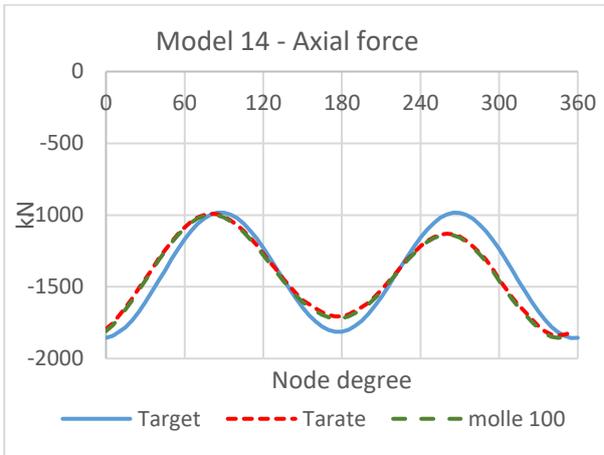
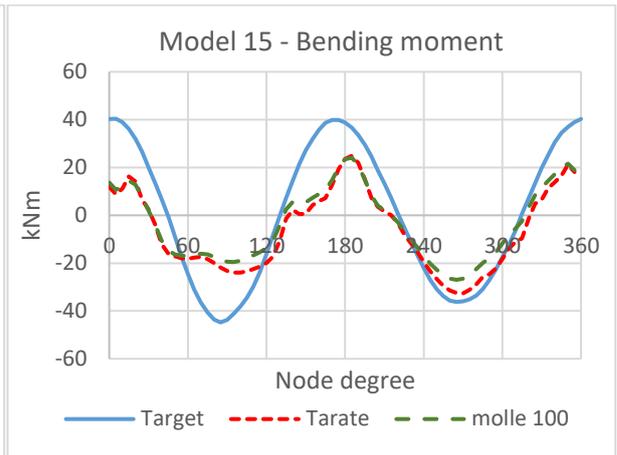
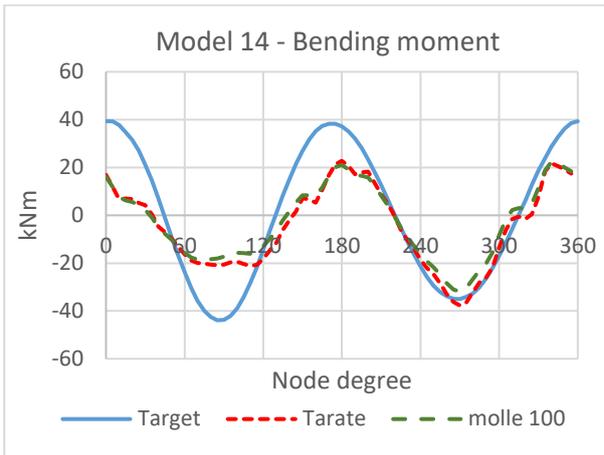


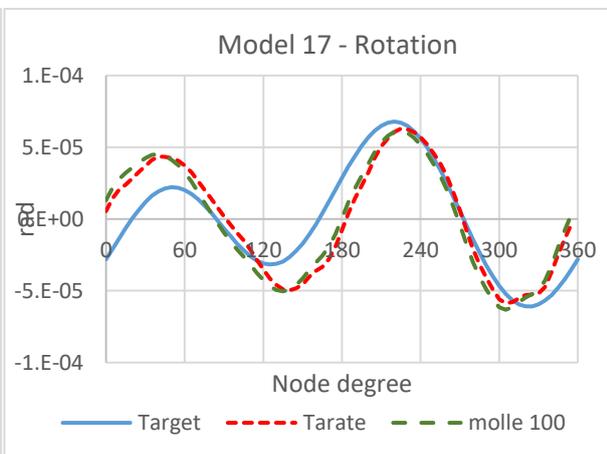
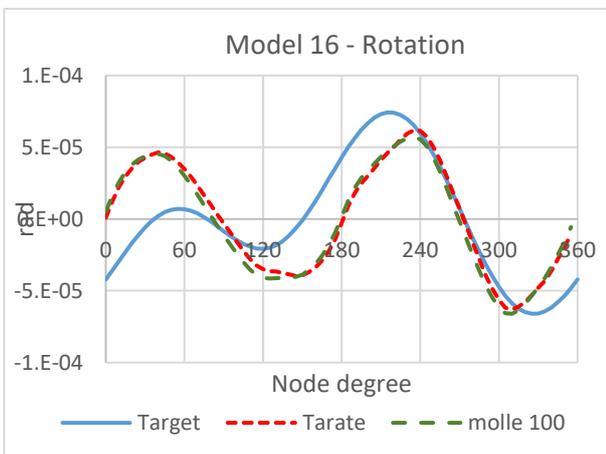
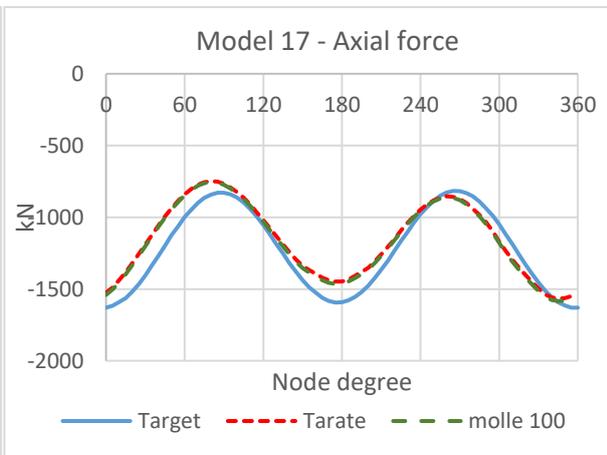
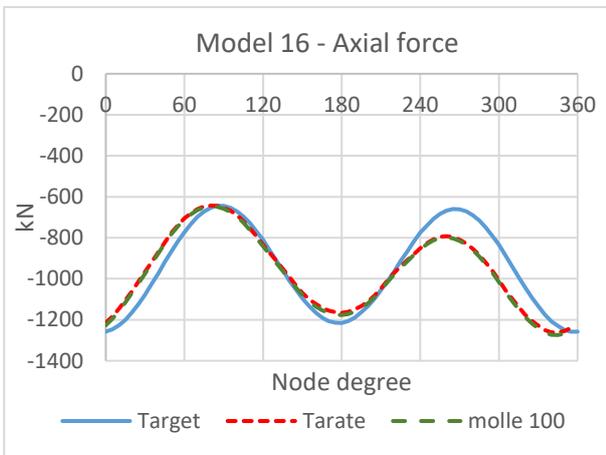
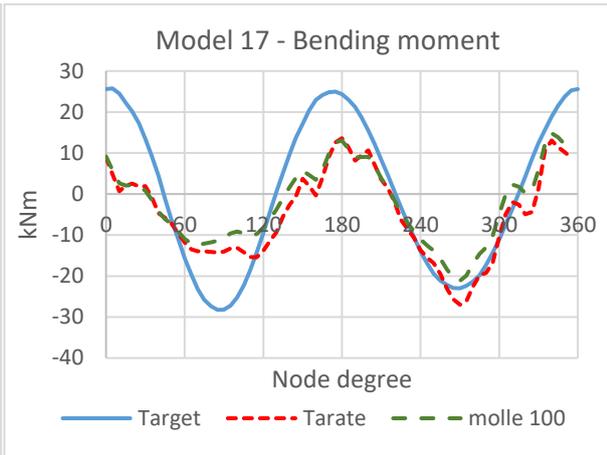
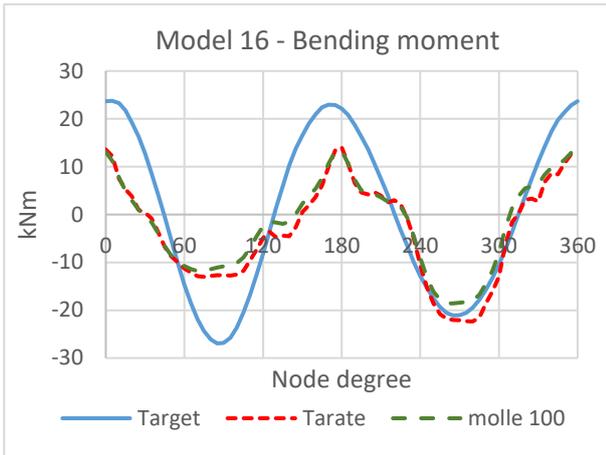


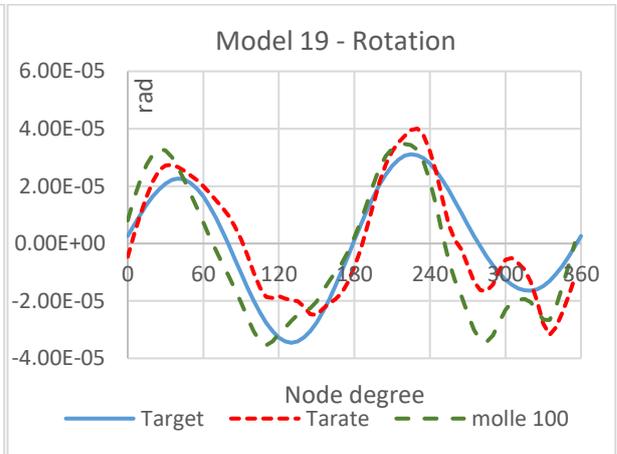
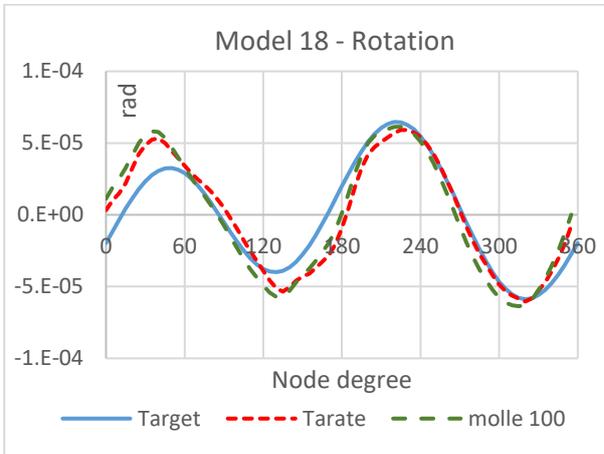
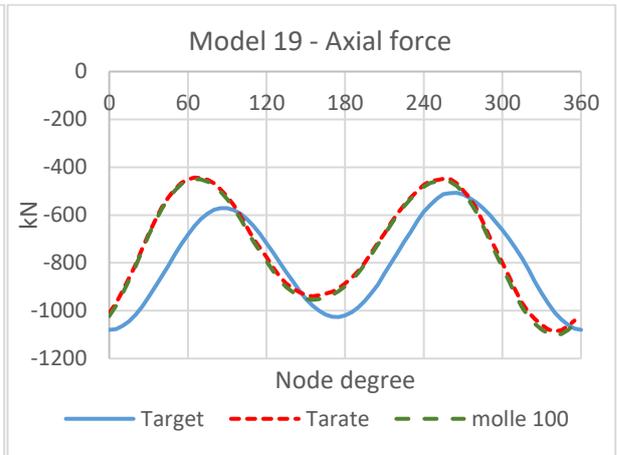
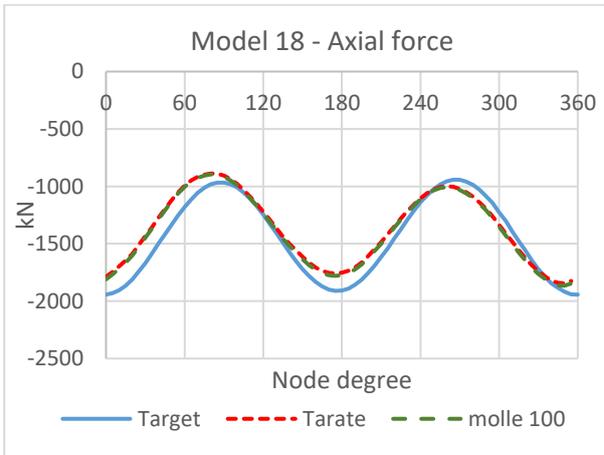
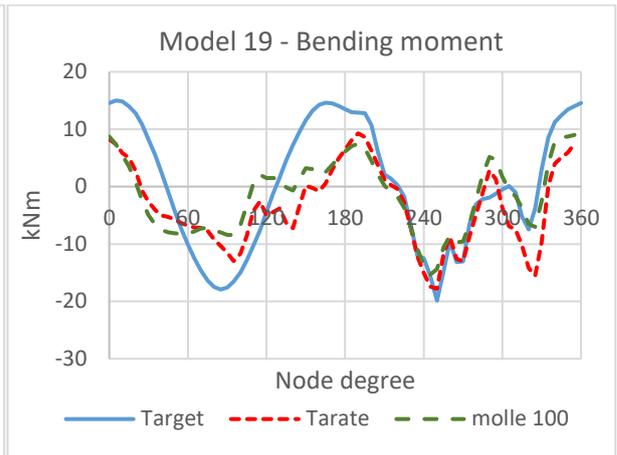
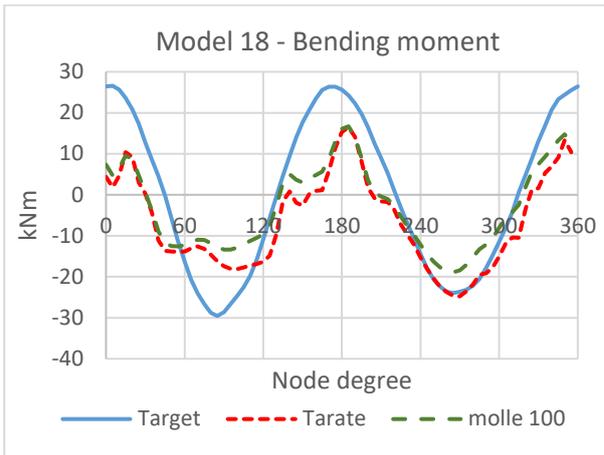


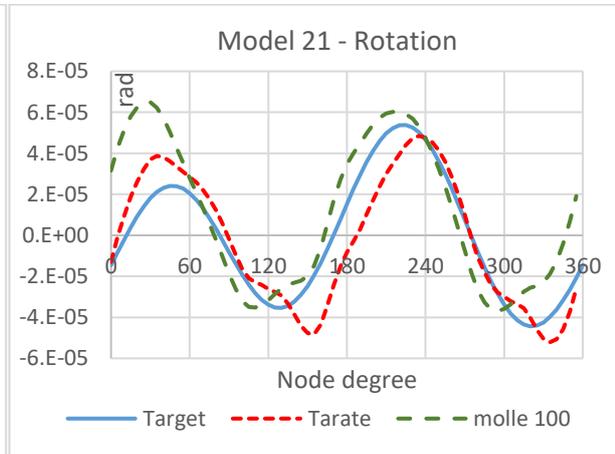
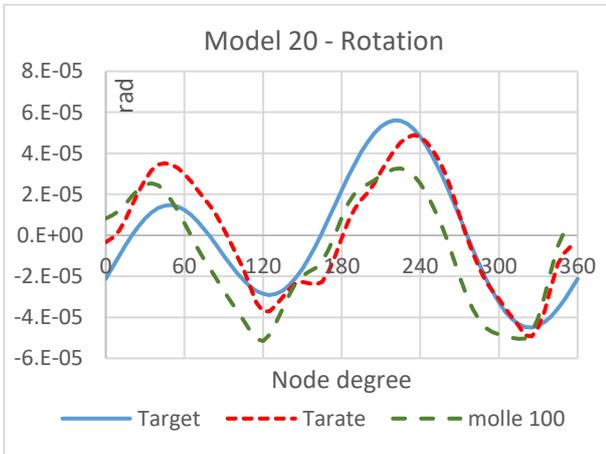
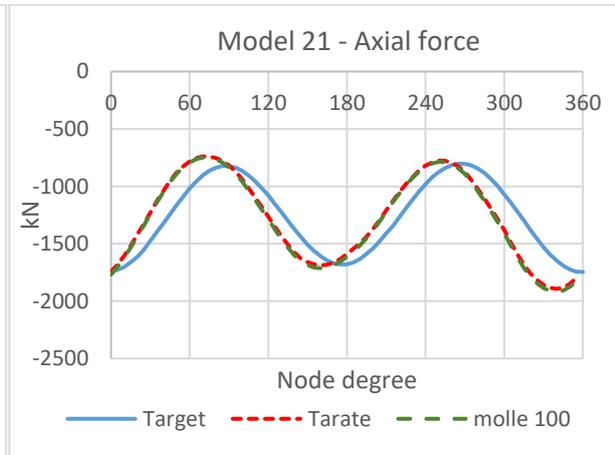
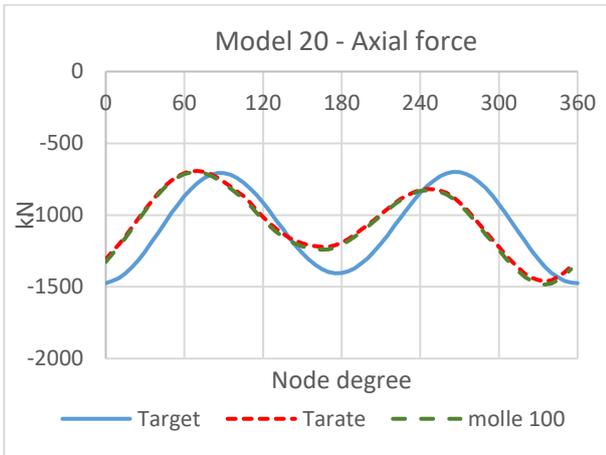
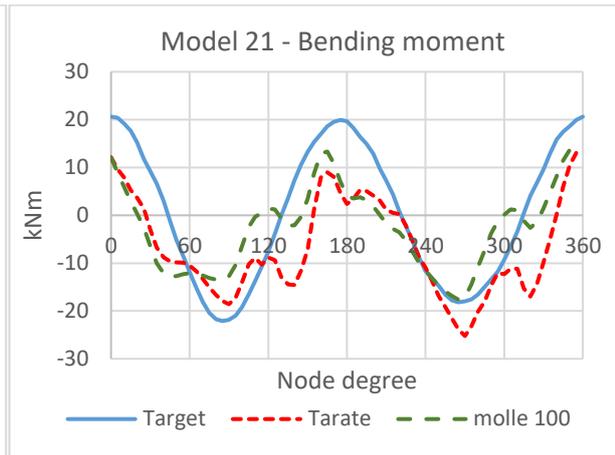
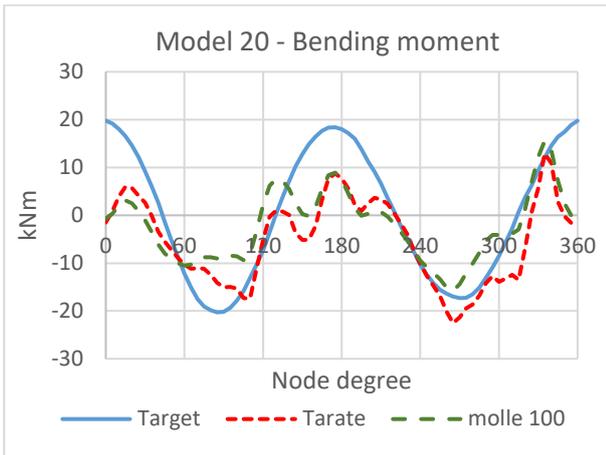


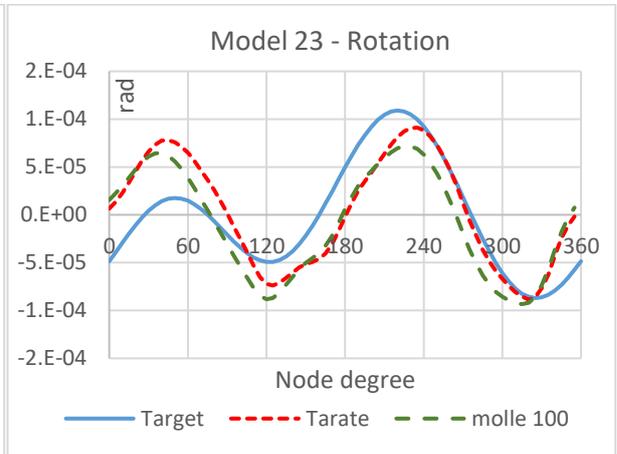
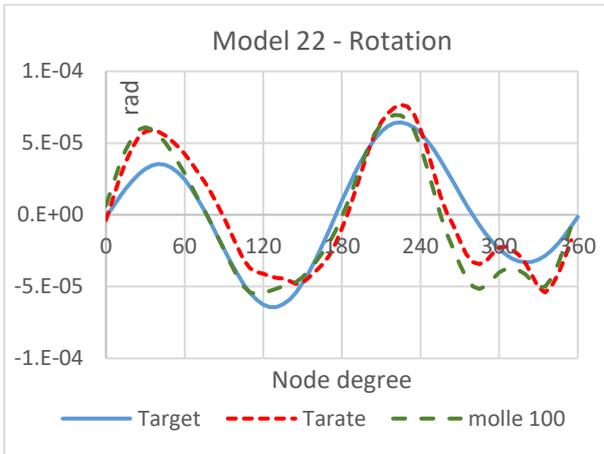
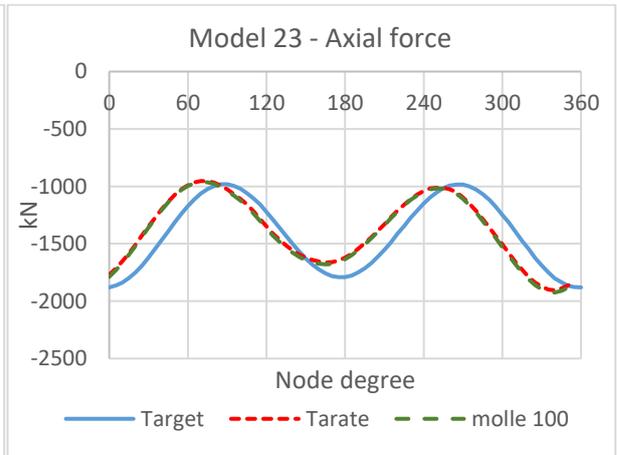
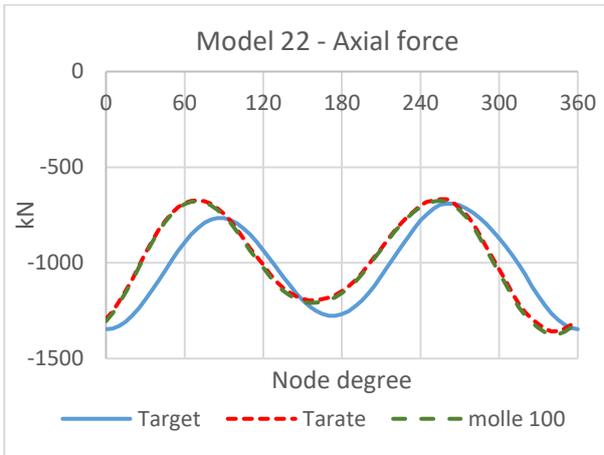
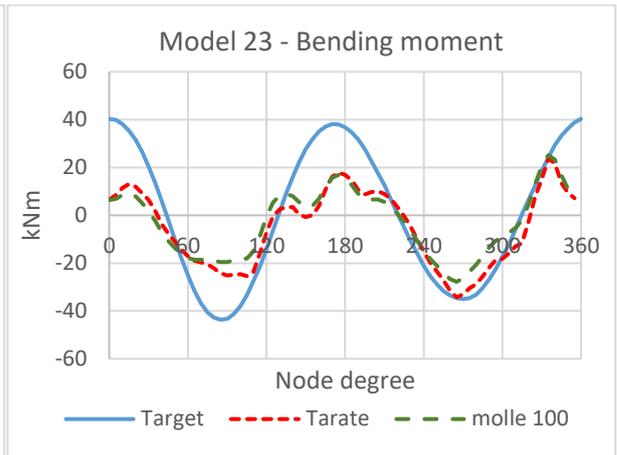
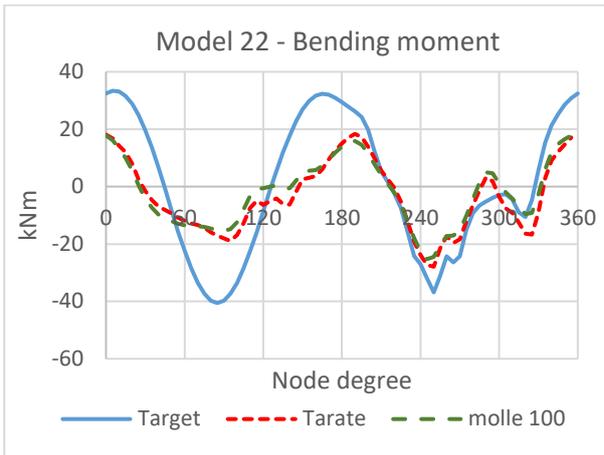


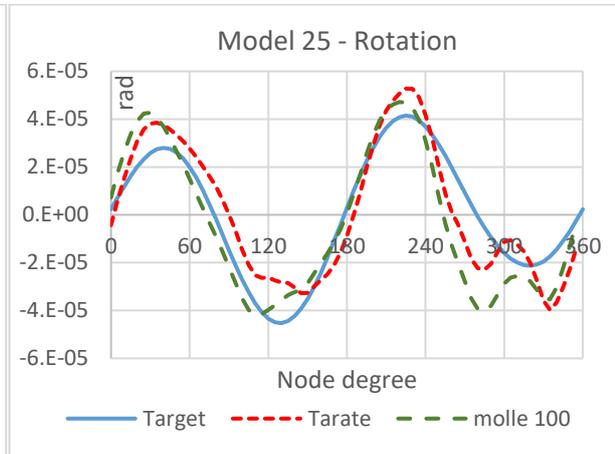
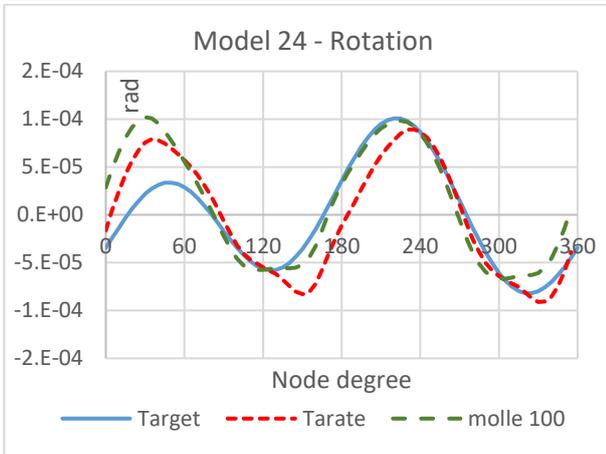
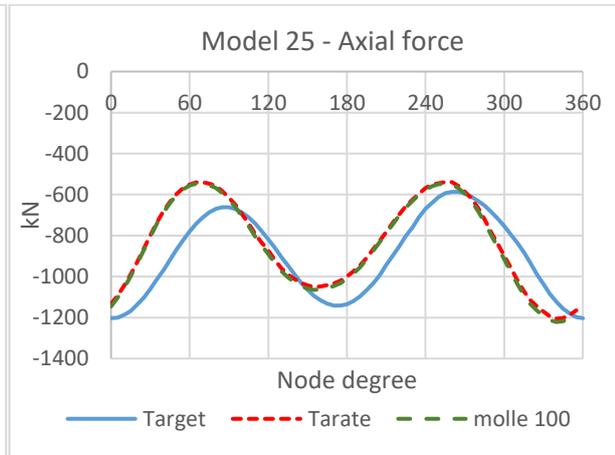
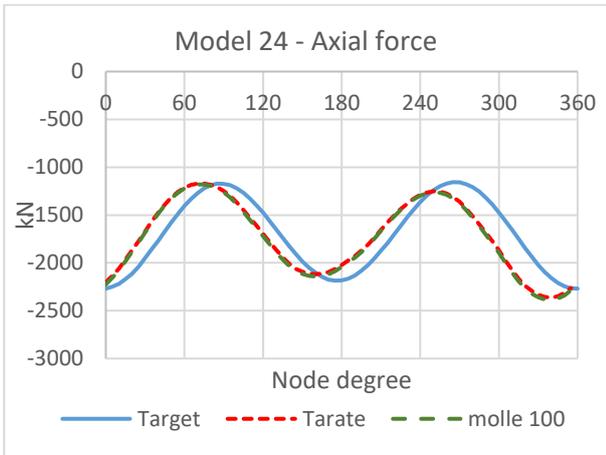
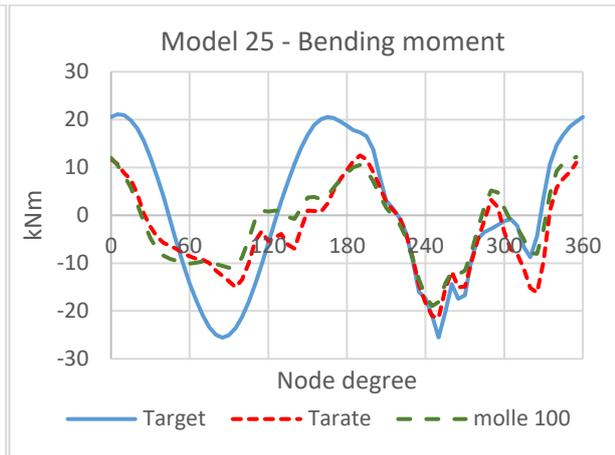
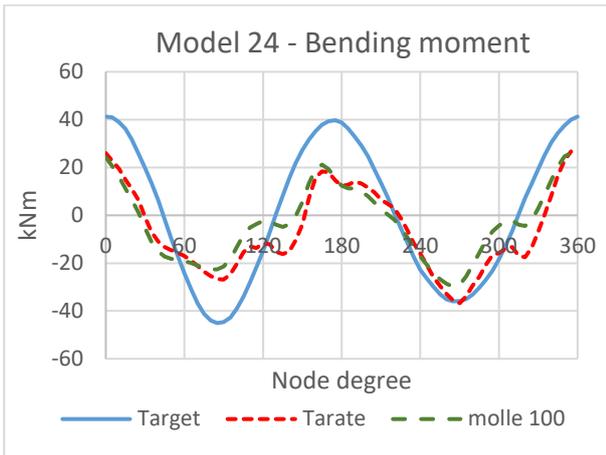


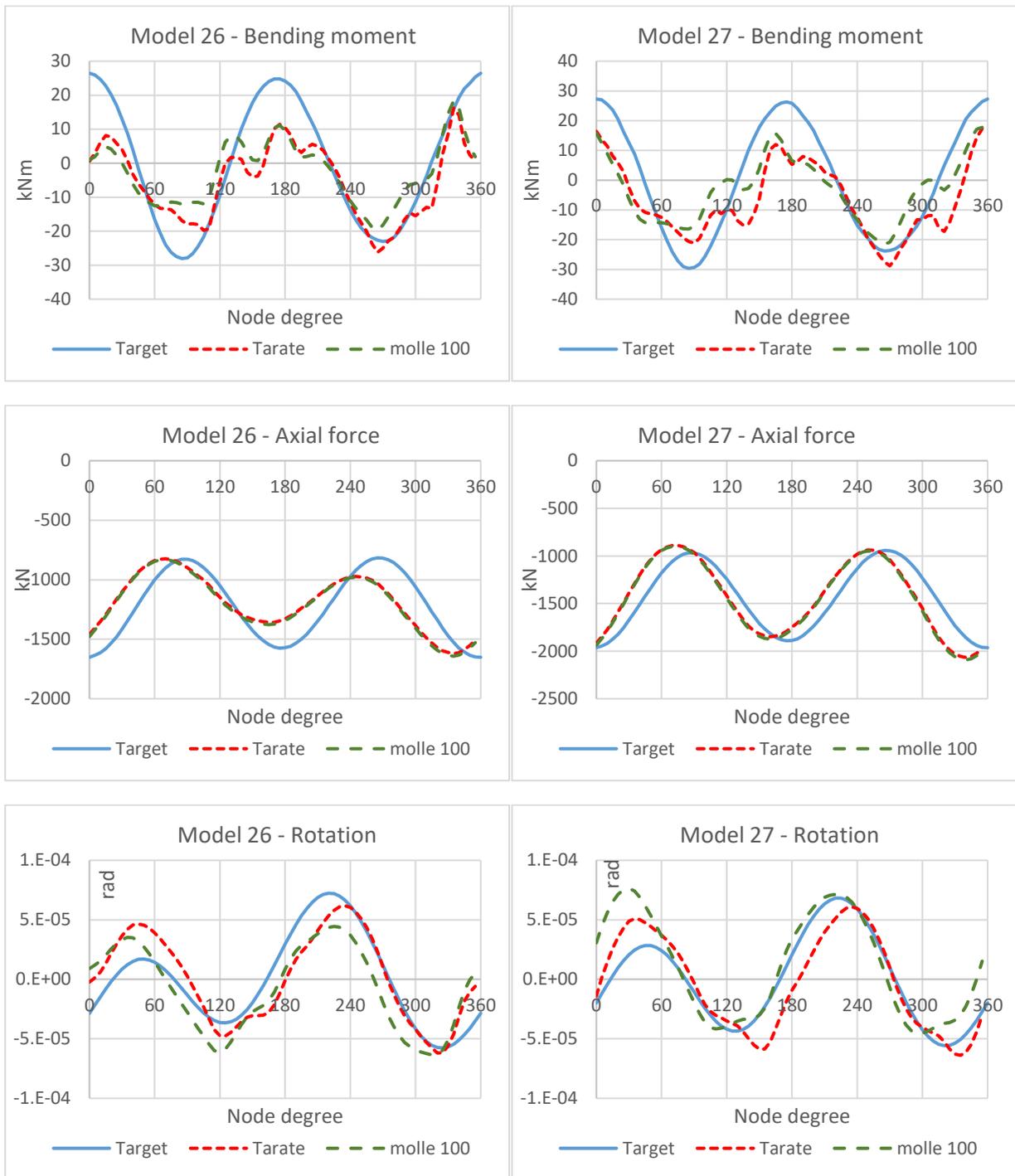












Si sono riportati solo i diagrammi relativi ai primi 27 modelli mentre gli altri sono riportati negli allegati.

Le soluzioni ottenute con le molle opportunamente tarate e i “carichi lordi” sono molto vicine, quasi sovrapponibili, a quelle ottenute applicando i “carichi netti” sul modello con molle di rigidezza trascurabile. Entrambe le soluzioni si discostano dalla soluzione di “Target” fornita da RS2, tuttavia restano accettabili ai fini di questa trattazione, una taratura più raffinata delle molle potrebbe portare ad un risultato migliore. L’adattamento delle curve al target è espresso attraverso il punteggio. Lo sforzo normale viene rappresentato molto bene, il momento flettente ha più

irregolarità ma si deve considerare che i valori sono molto bassi rispetto ad N , quindi, l'errore che si commette è grande, tuttavia lo si commette su una grandezza molto piccola.

Da queste simulazioni, nell'ottica dell'applicazione dell'algoritmo genetico, si possono trarre le seguenti considerazioni. L'idea di trascurare la rigidità delle molle aggirando il problema della taratura è efficace e perseguibile se tale algoritmo viene corretto sulle forme di carico, affinché, ricerchi tra le forme di carico simili a quelle dei carichi netti. In alternativa si potrebbe tarare la rigidità delle molle fittizie e ricercare i carichi lordi, tuttavia nell'applicazione in fase di monitoraggio potrebbero non essere disponibili dati sufficienti per la taratura delle molle.

Di seguito si proporrà una correzione dell'algoritmo genetico secondo quanto appena detto, quindi, tarando le forme di carico sui carichi netti e non più su quelli lordi.

12. Modelli elasto-plastici

Alcuni dei precedenti modelli sono stati modificati impiegando una legge costitutiva elastica perfettamente plastica. Lo scopo è confrontare carichi e sollecitazioni tra i modelli elastici e quelli ELPLA per capire se è possibile applicare la stessa metodologia in presenza di plasticizzazioni.

PCH_3D_L1 – ELPLA

Proprietà del materiale

Legge di variazione del modulo elastico con la profondità:

$$\text{Legge 1: } E(z) = 1000 + 57,5 * z \quad [MPa]$$

Altre proprietà meccaniche:

$$\gamma = 2100 \text{ kN/m}^3$$

$$k_0 = 0,5$$

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb.

$$\varphi' = 35^\circ$$

$$c' = 0$$

Lo stato tensionale geostatico è assunto variabile linearmente con la profondità proporzionalmente al peso specifico.

Zone di plasticizzazione

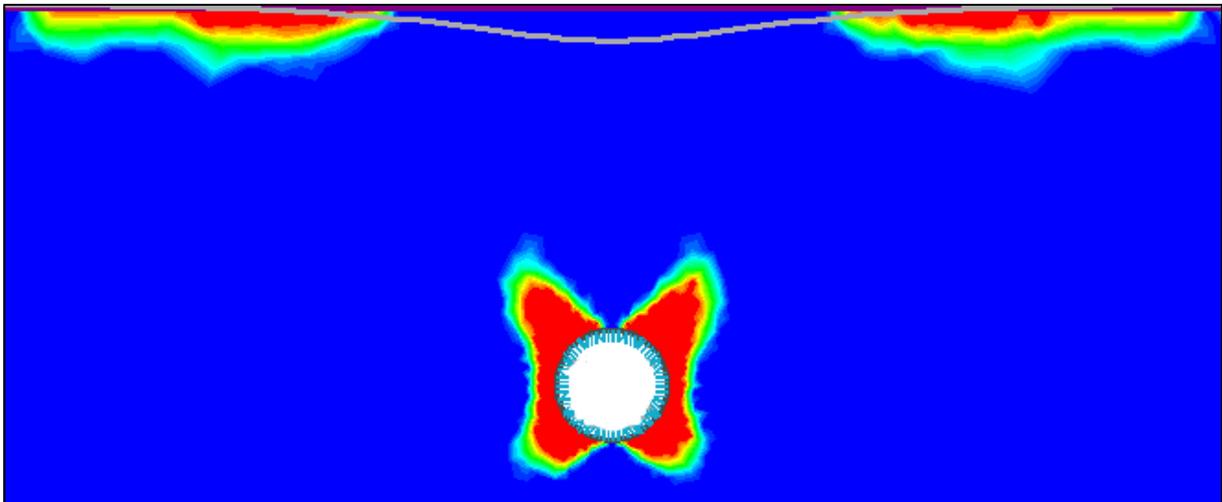
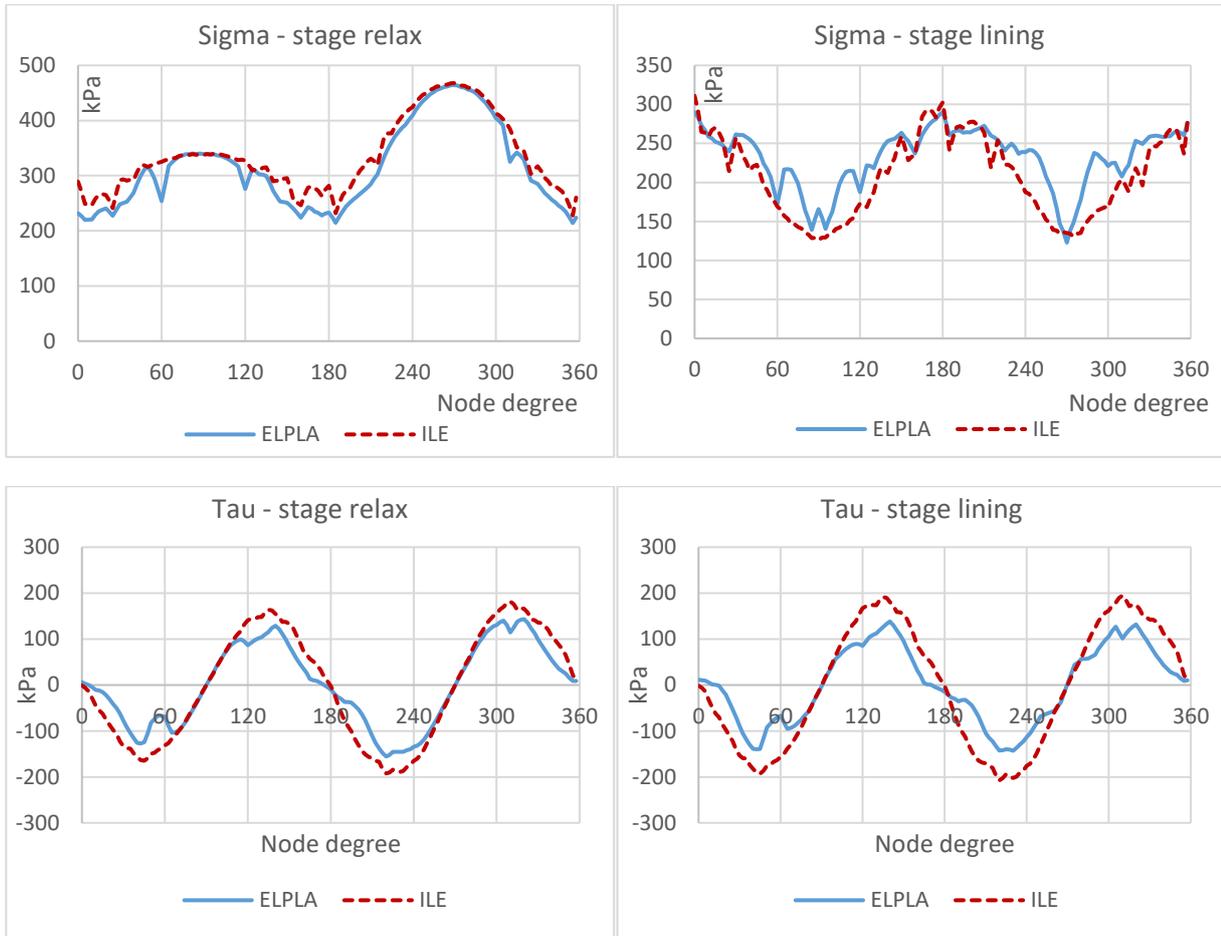


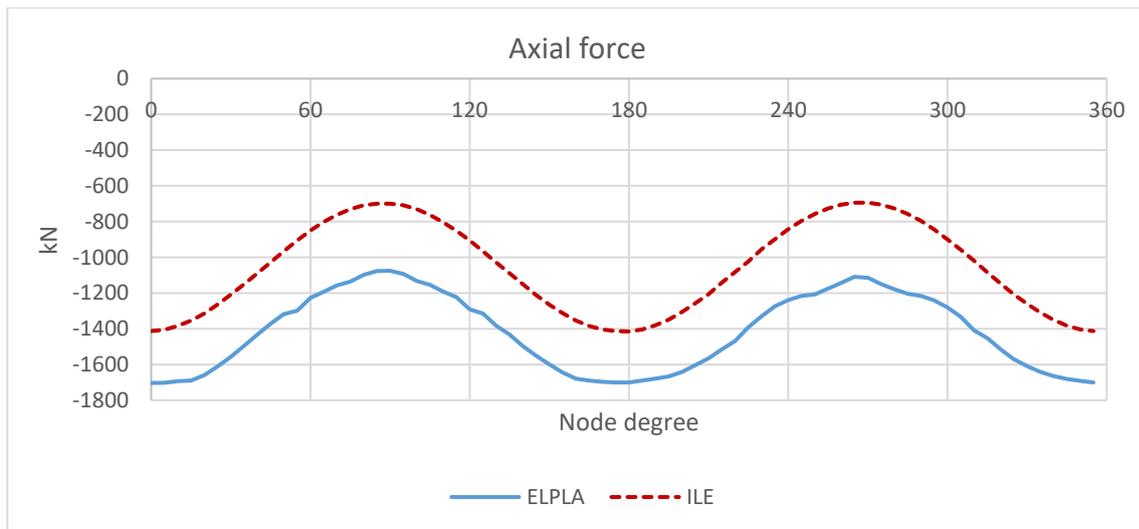
Figura 35 *PCH_3D_L1 - ELPLA*: zone di plasticizzazione

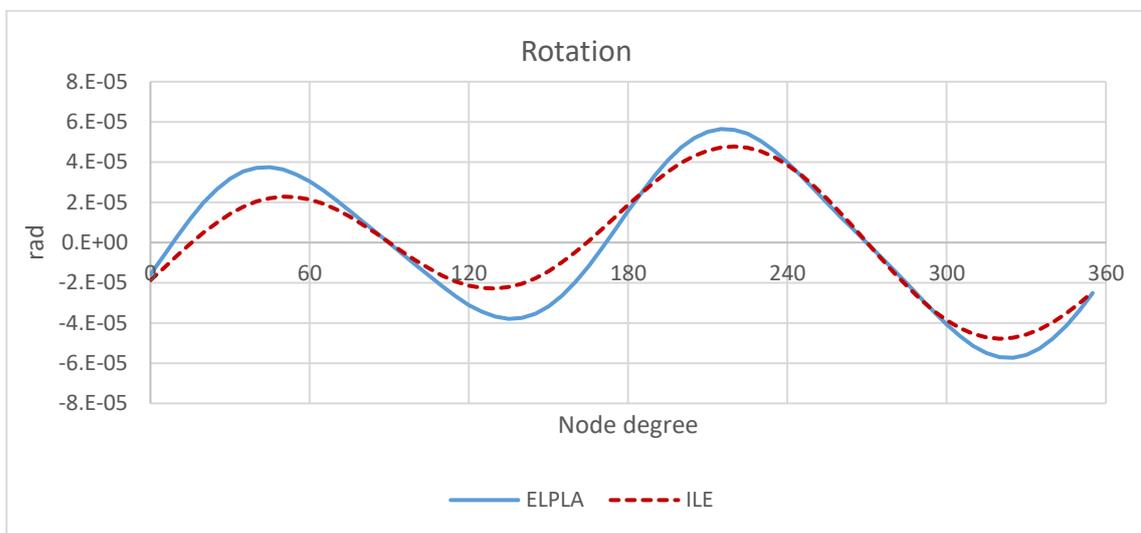
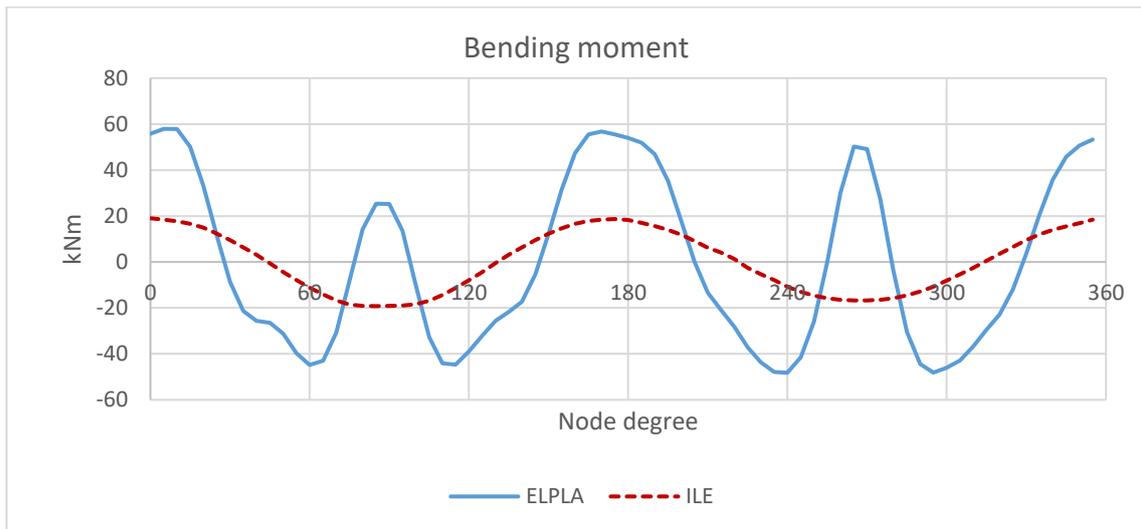
Confronto ILE-ELPLA

Tensioni



Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni





PCH_3D_L3 – ELPLA

Proprietà del materiale

Legge di variazione del modulo elastico con la profondità:

$$\text{Legge 3: } E(z) = 200 + 34 * z \quad [MPa]$$

Altre proprietà meccaniche:

$$\gamma = 2100 \text{ kN/m}^3$$

$$k_0 = 0,5$$

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb.

$$\varphi' = 40^\circ$$

$$c' = 0$$

Lo stato tensionale geostatico è assunto variabile linearmente con la profondità proporzionalmente al peso specifico.

Zone di plasticizzazione

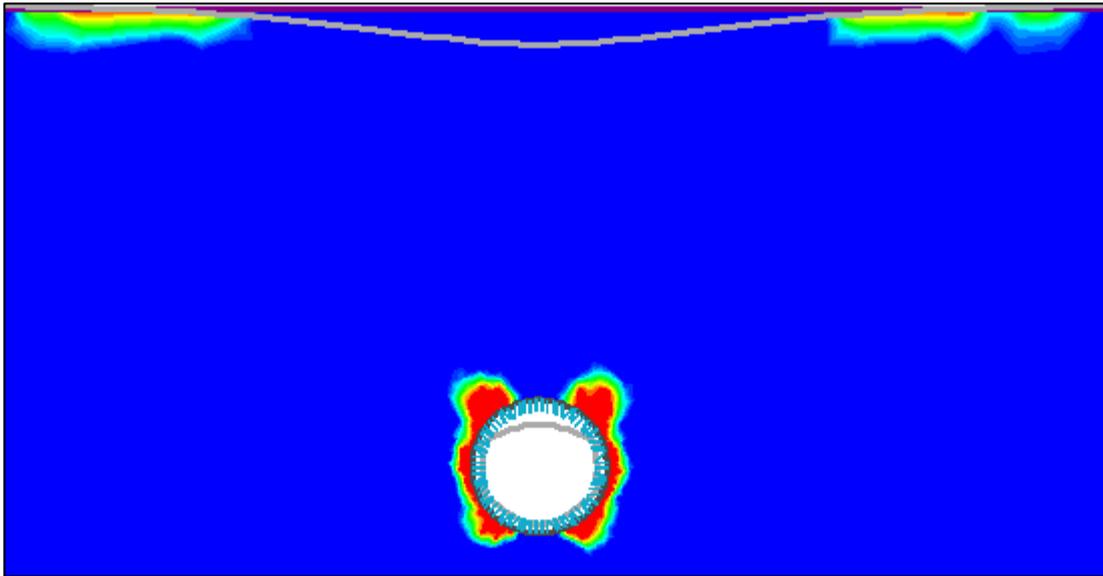
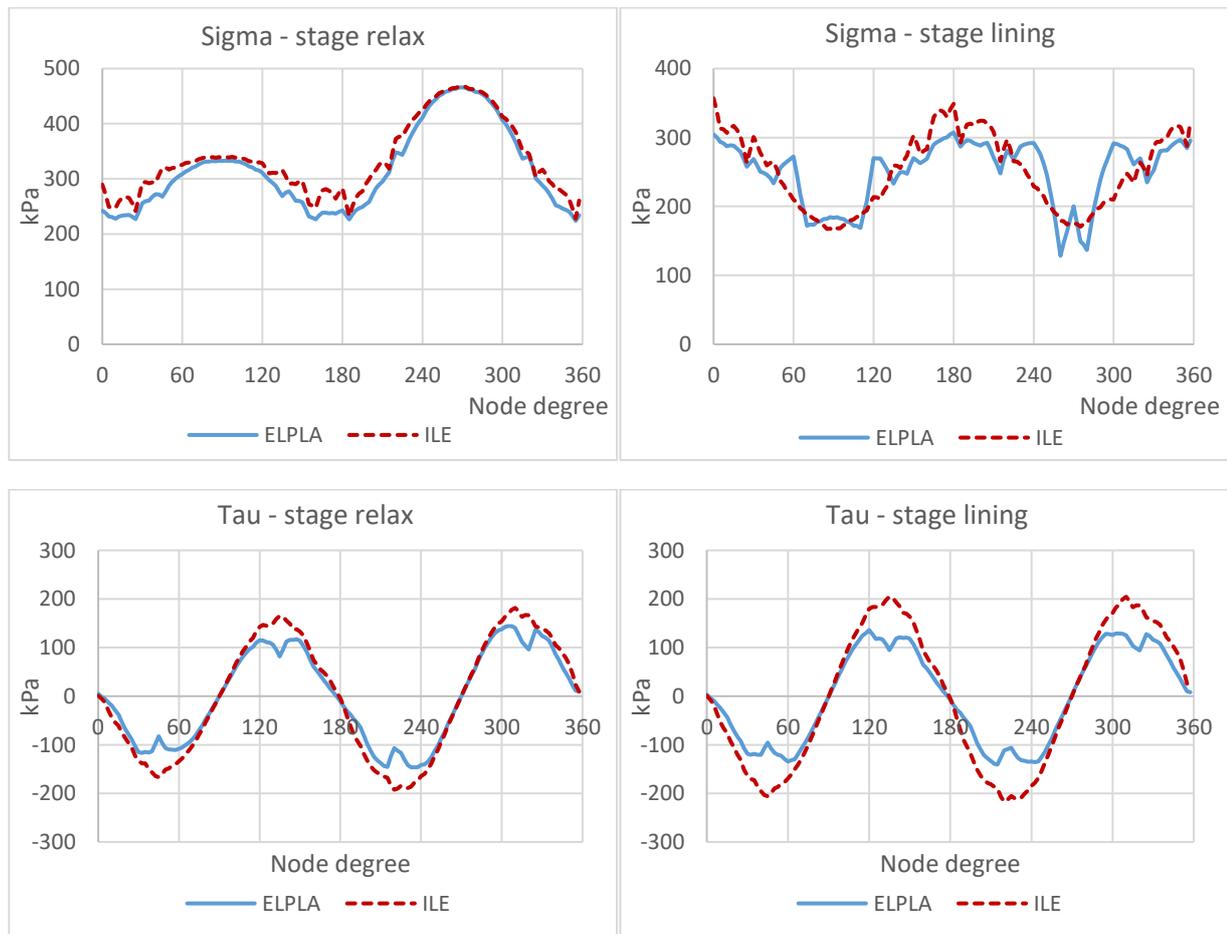


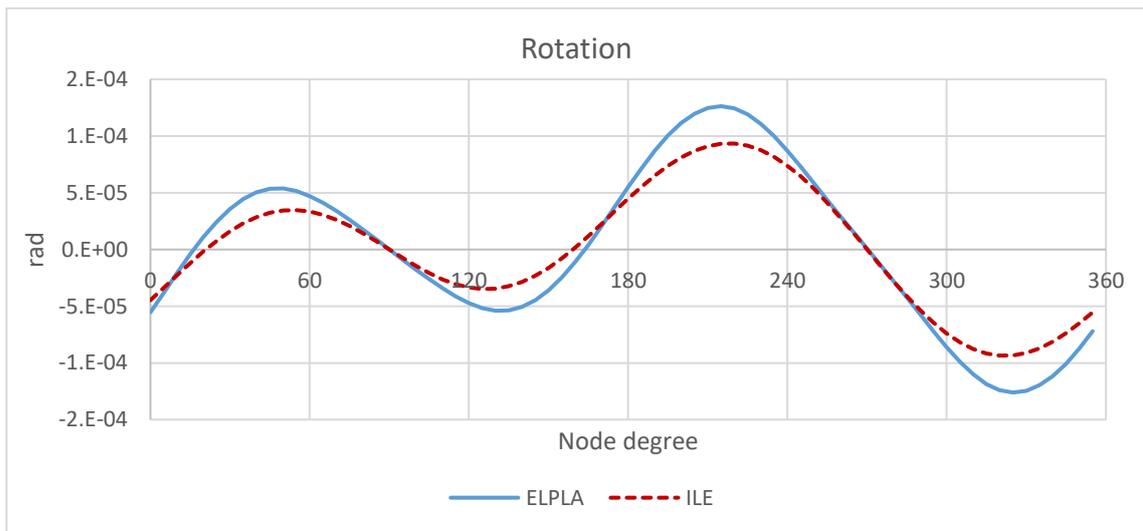
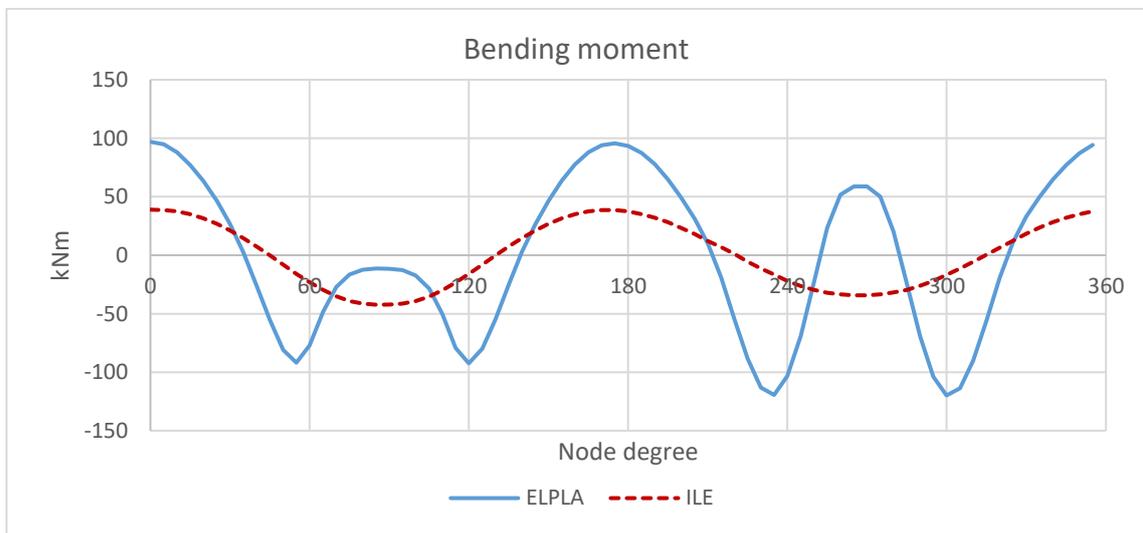
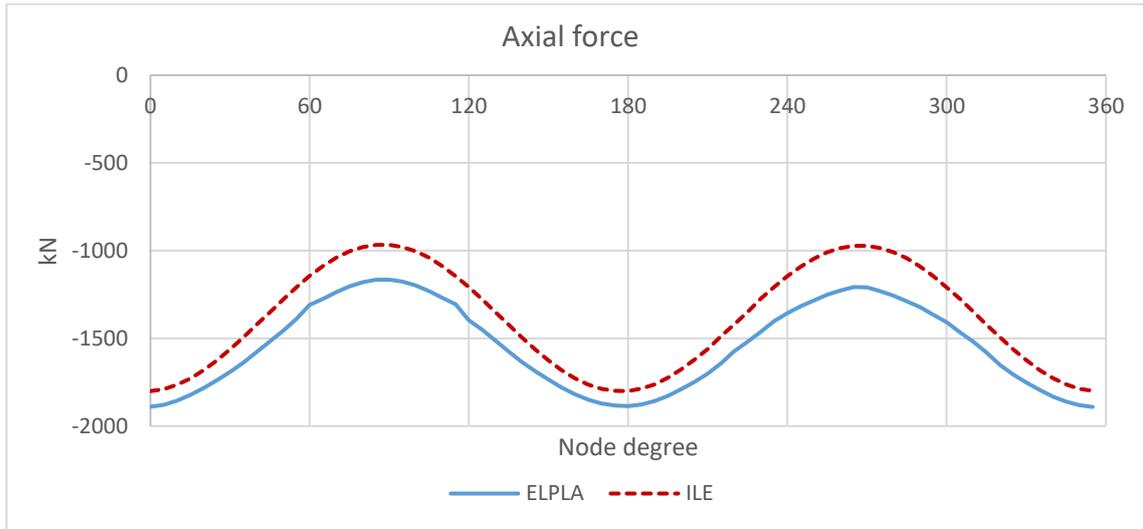
Figura 36 PCH_3D_L3 - ELPLA: zone di plasticizzazione

Confronto ILE-ELPLA

Tensioni



Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni



PCH_3D_L6 – ELPLA

Proprietà del materiale

Legge di variazione del modulo elastico con la profondità:

$$\text{Legge 6: } E(z) = 2466 + 64,5 * z \quad [\text{MPa}]$$

Altre proprietà meccaniche:

$$\gamma = 2100 \text{ kN/m}^3$$

$$k_0 = 0,5$$

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb.

$$\varphi' = 35^\circ$$

$$c' = 0$$

Lo stato tensionale geostatico è assunto variabile linearmente con la profondità proporzionalmente al peso specifico.

Zone di plasticizzazione

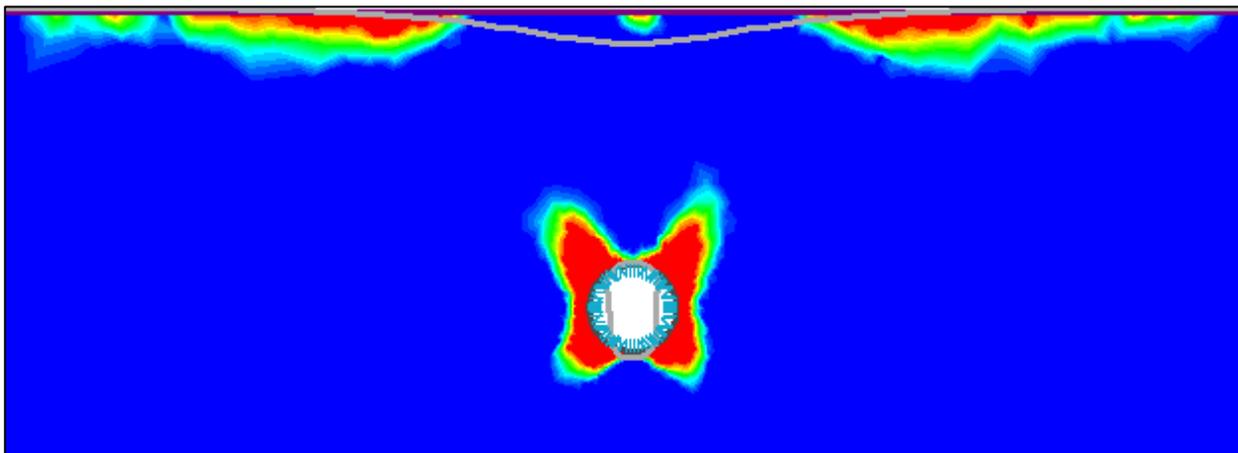
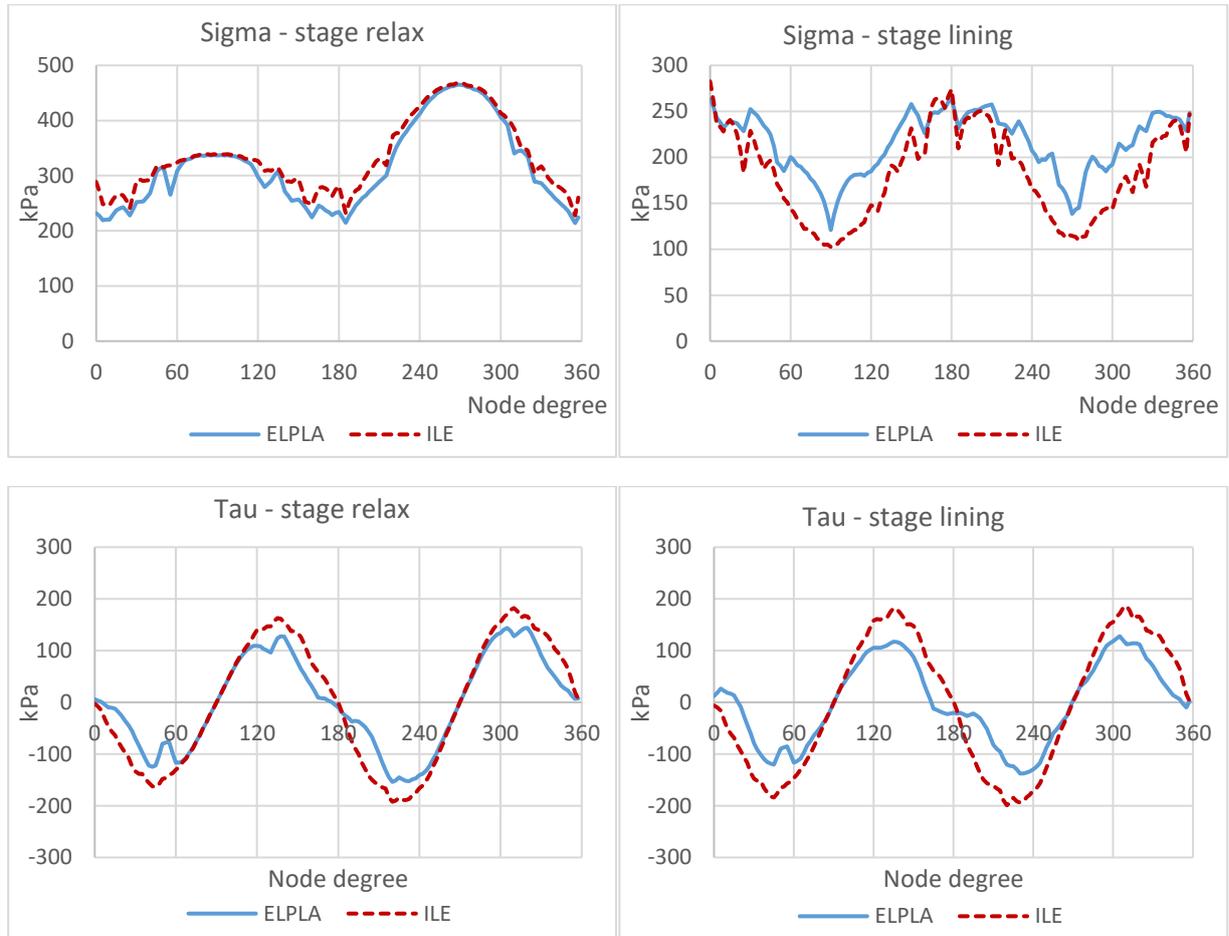


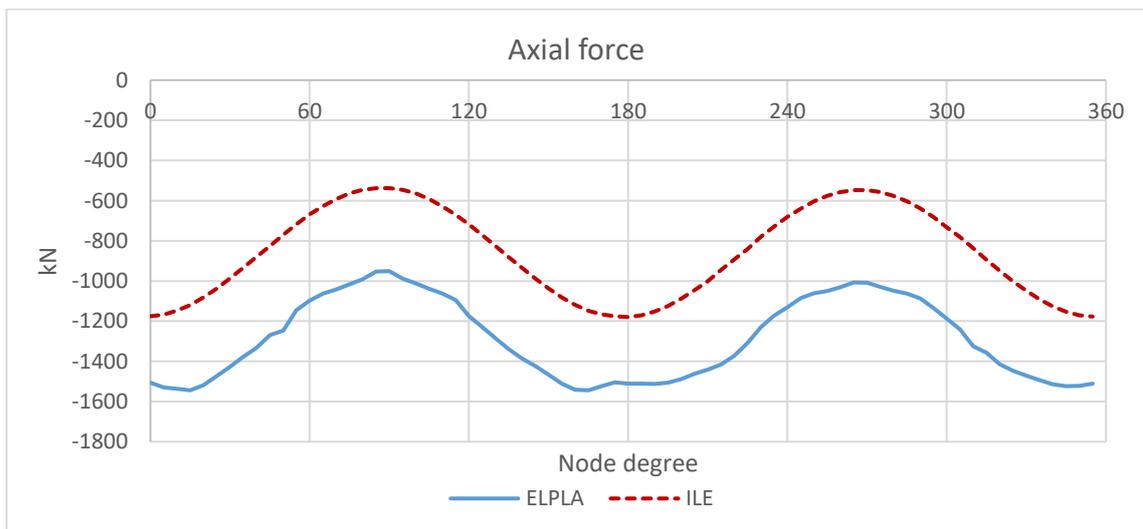
Figura 37 PCH_3D_L6 - ELPLA: zone di plasticizzazione

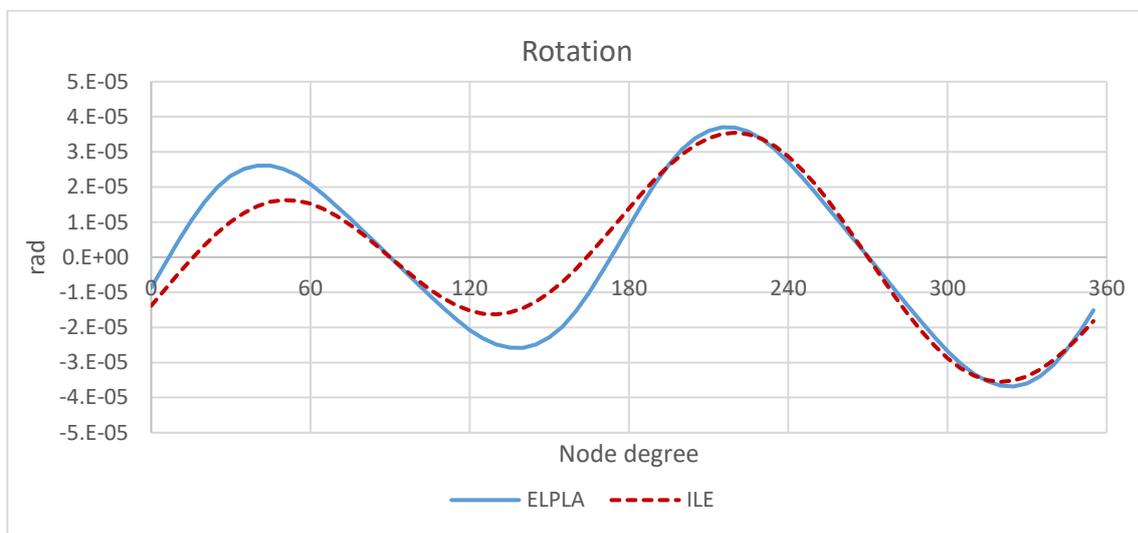
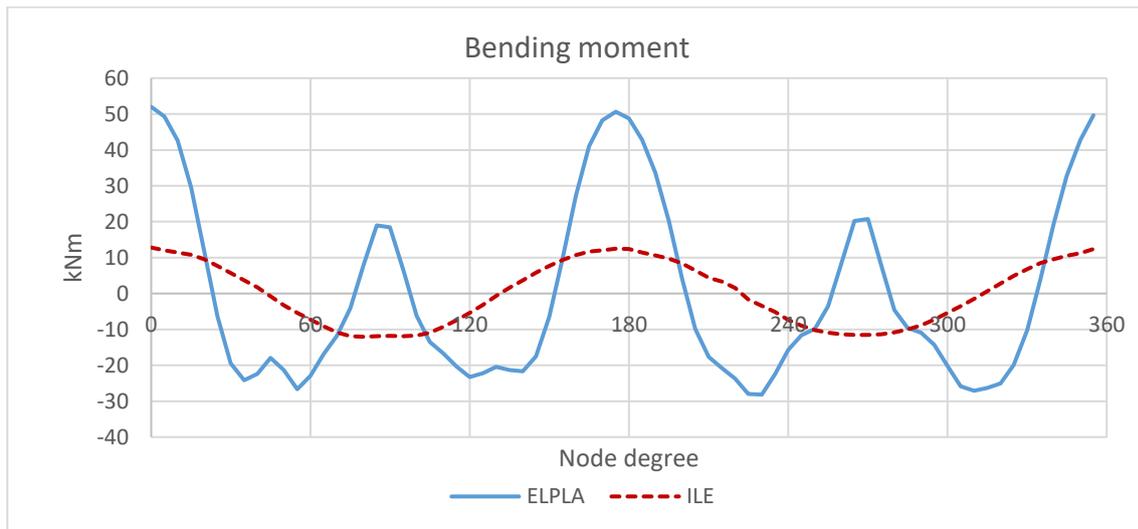
Confronto ILE-ELPLA

Tensioni



Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni





PC20_2D_L1 – ELPLA

Proprietà del materiale

Legge di variazione del modulo elastico con la profondità:

$$\text{Legge 1: } E(z) = 1000 + 57,5 * z \quad [MPa]$$

Altre proprietà meccaniche:

$$\gamma = 2100 \text{ kN/m}^3$$

$$k_0 = 0,5$$

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb.

$$\varphi' = 35^\circ$$

$$c' = 0$$

Lo stato tensionale geostatico è assunto variabile linearmente con la profondità proporzionalmente al peso specifico.

Zone di plasticizzazione

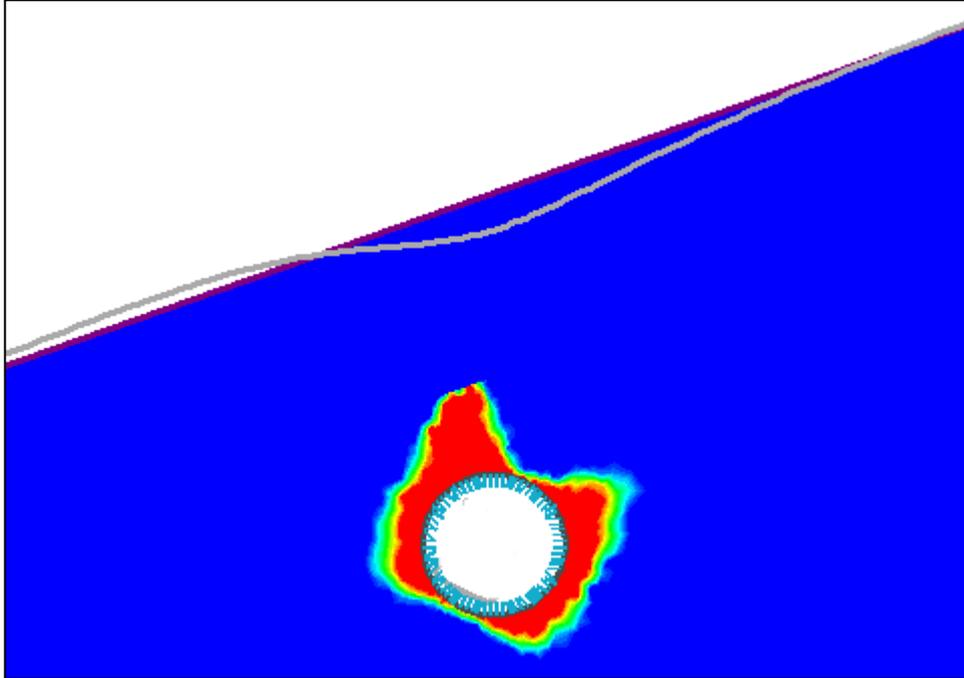
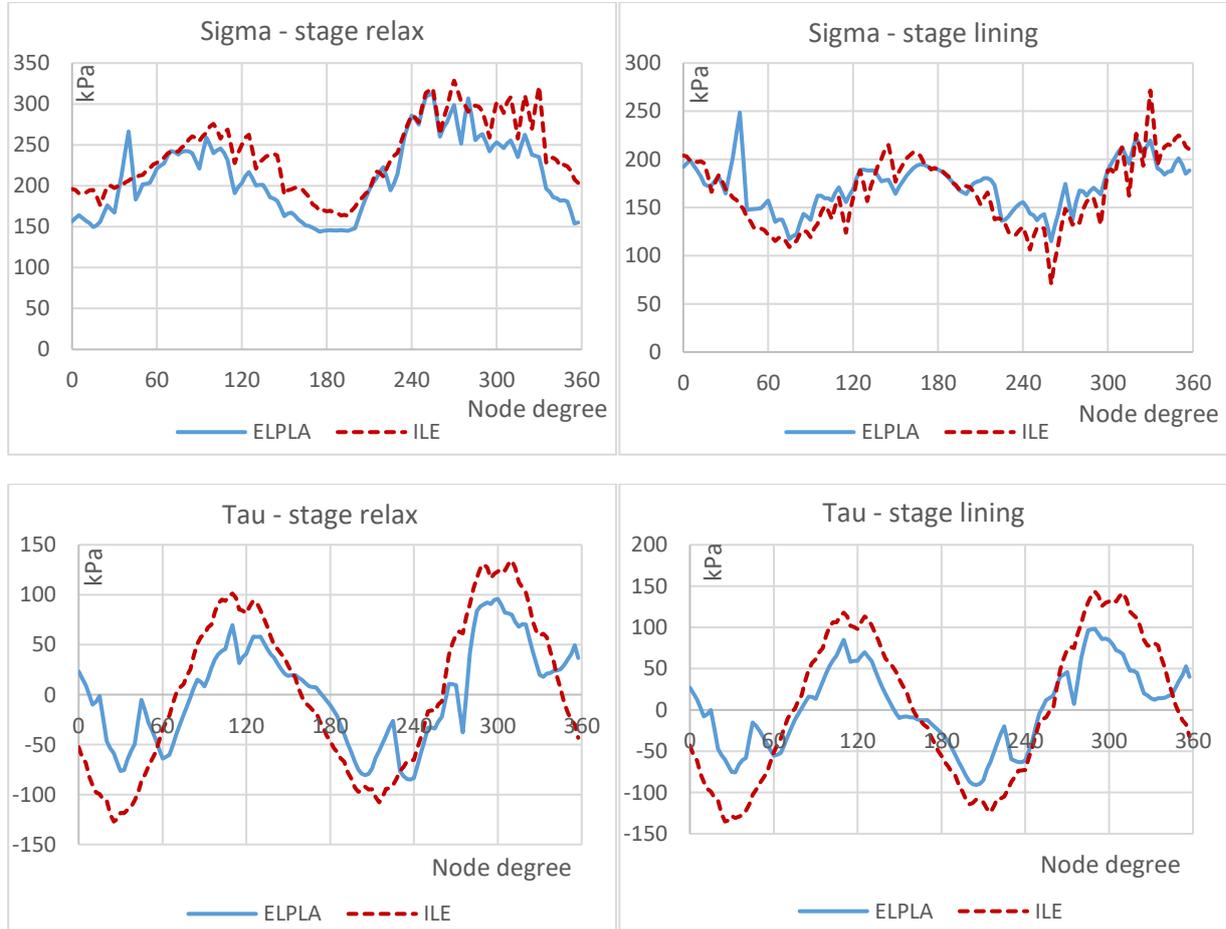


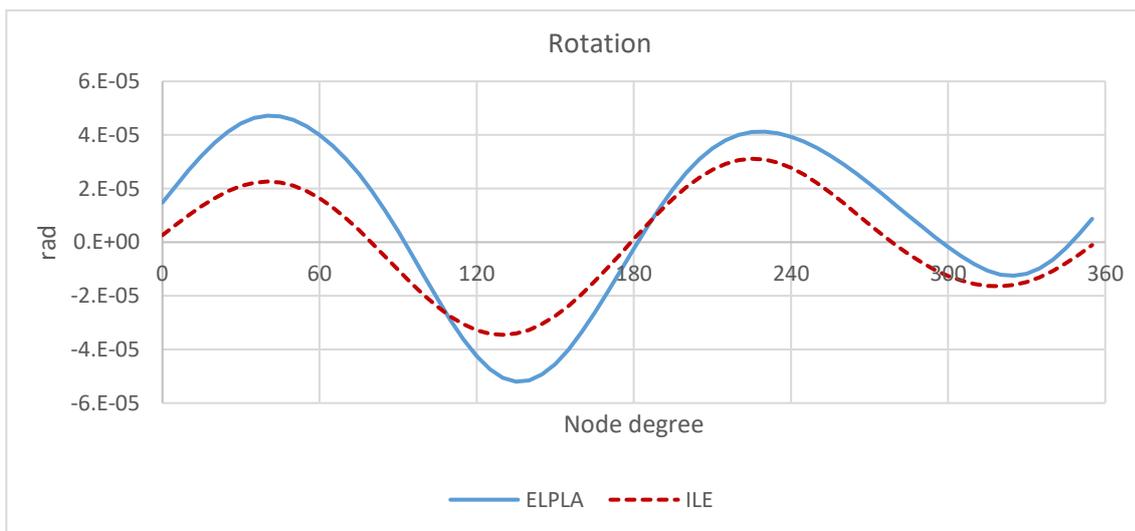
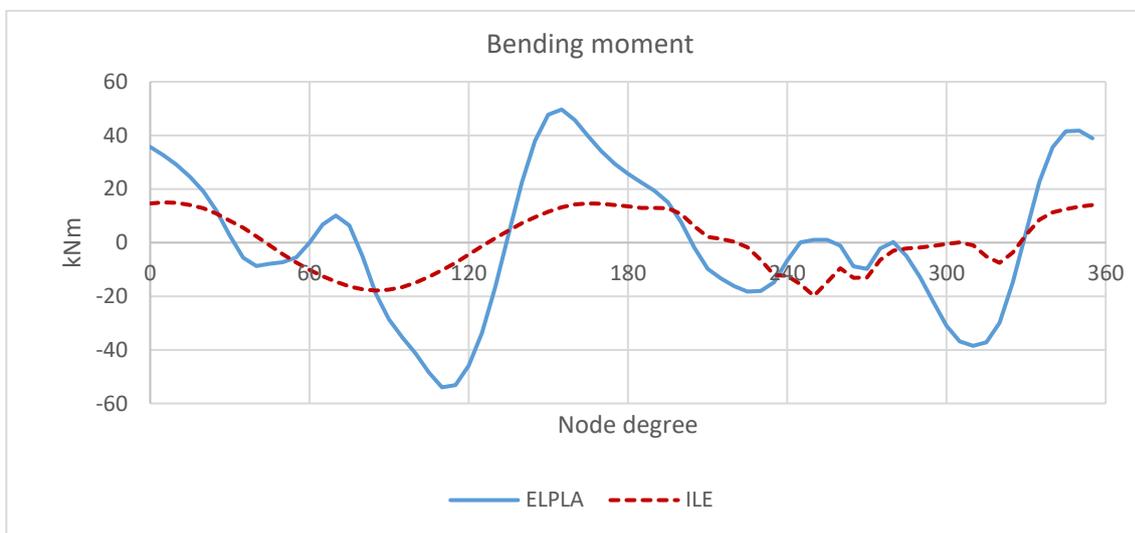
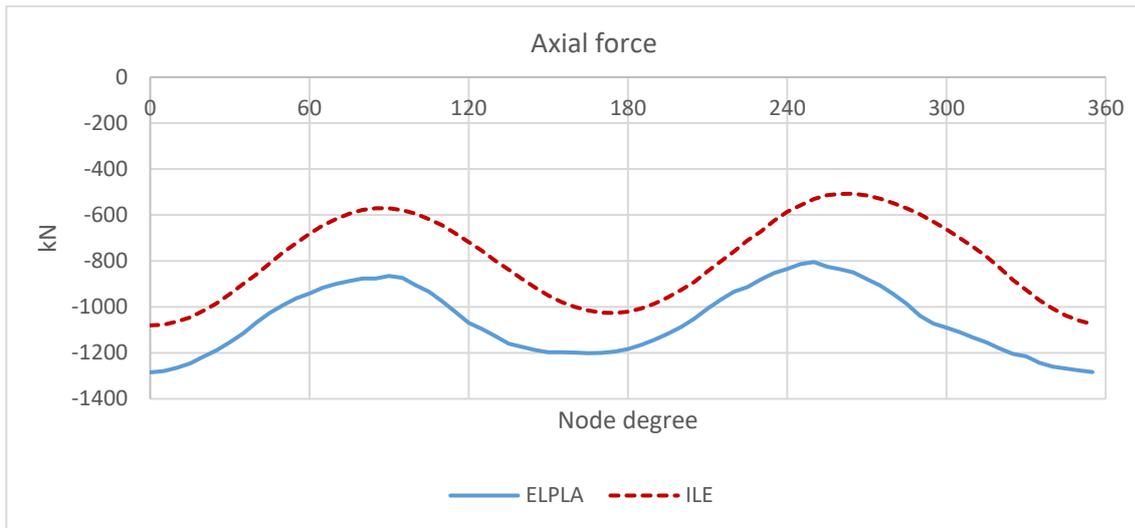
Figura 38 PC20_2D_L1 - ELPLA: zone di plasticizzazione

Confronto ILE-ELPLA

Tensioni



Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni



PC20_2D_L3 – ELPLA

Proprietà del materiale

Legge di variazione del modulo elastico con la profondità:

$$\text{Legge 3: } E(z) = 200 + 34 * z \quad [\text{MPa}]$$

Altre proprietà meccaniche:

$$\gamma = 2100 \text{ kN/m}^3$$

$$k_0 = 0,5$$

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb.

$$\varphi' = 40^\circ$$

$$c' = 0$$

Lo stato tensionale geostatico è assunto variabile linearmente con la profondità proporzionalmente al peso specifico.

Zone di plasticizzazione

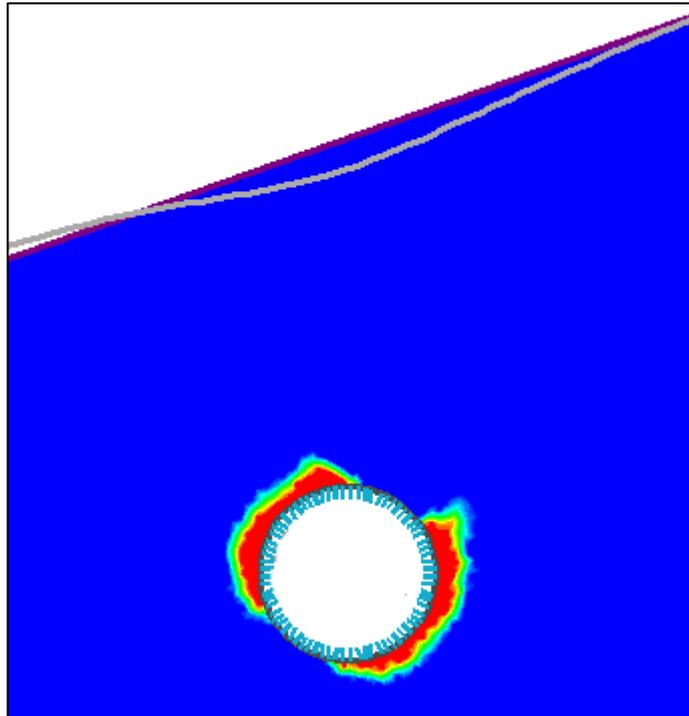
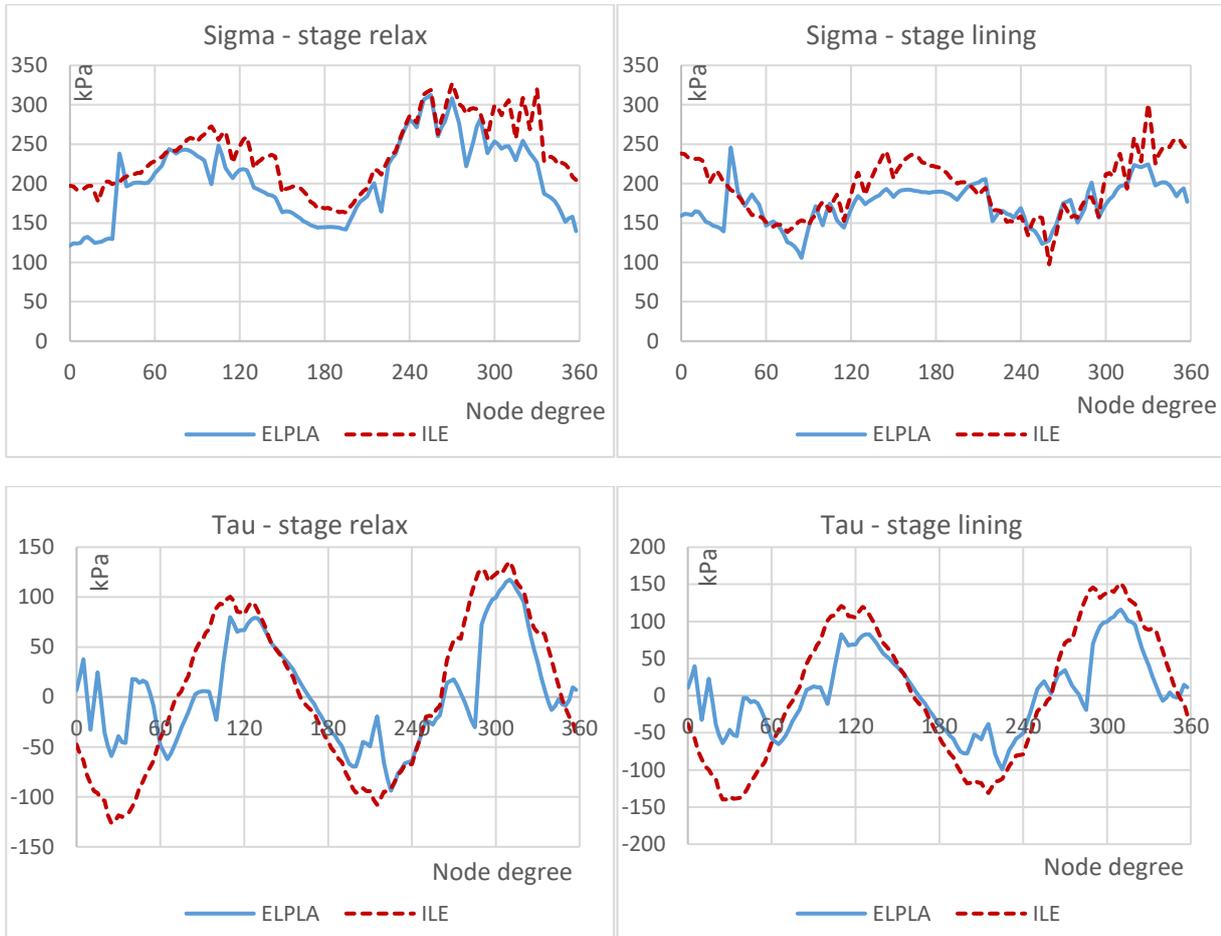


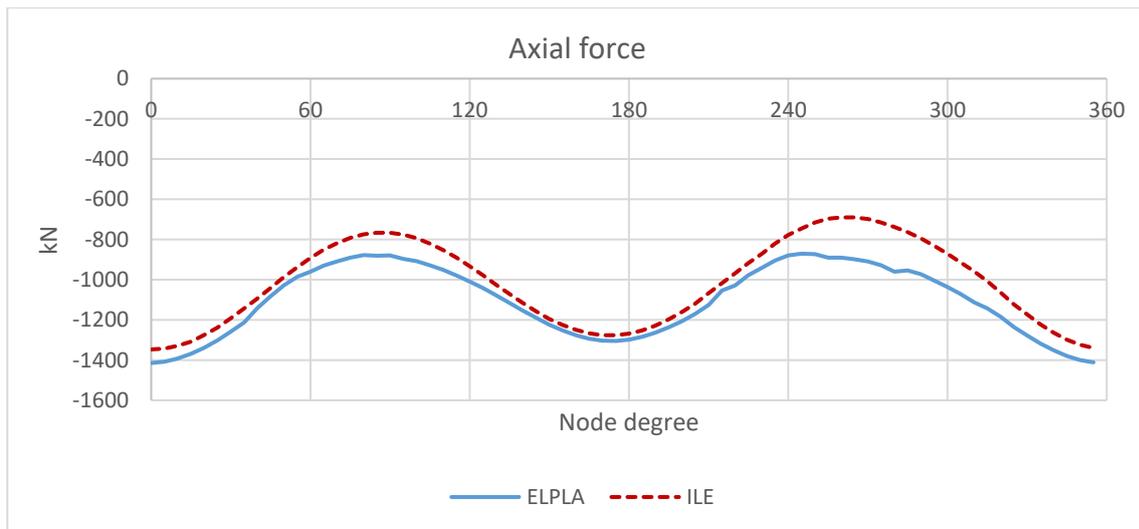
Figura 39 PC20_2D_L3 - ELPLA: zone di plasticizzazione

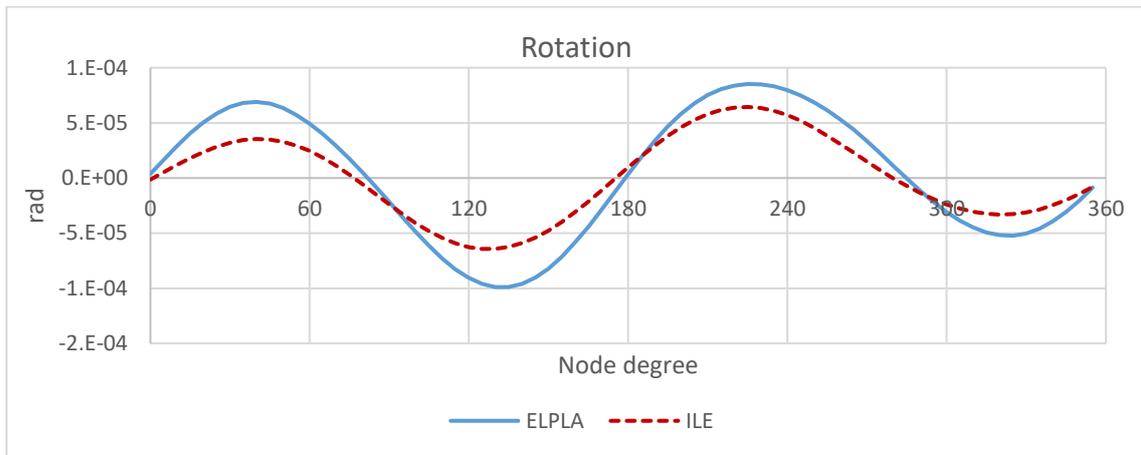
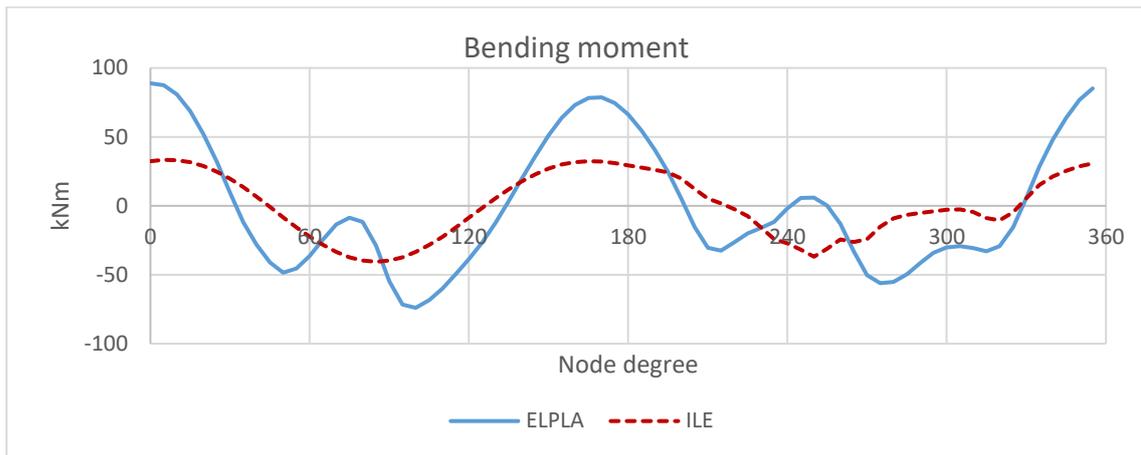
Confronto ILE-ELPLA

Tensioni



Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni





PC20_2D_L6 – ELPLA

Proprietà del materiale

Legge di variazione del modulo elastico con la profondità:

$$\text{Legge 6: } E(z) = 2466 + 64,5 * z \quad [\text{MPa}]$$

Altre proprietà meccaniche:

$$\gamma = 2100 \text{ kN/m}^3$$

$$k_0 = 0,5$$

Il criterio di rottura utilizzato è quello di Mohr-Coulomb.

$$\varphi' = 35^\circ$$

$$c' = 0$$

Lo stato tensionale geostatico è assunto variabile linearmente con la profondità proporzionalmente al peso specifico.

Zone di plasticizzazione

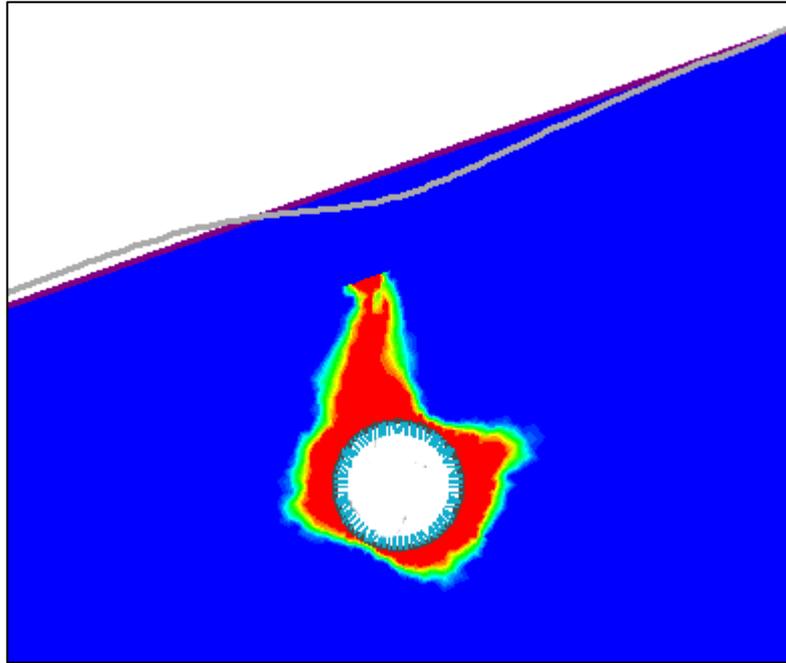
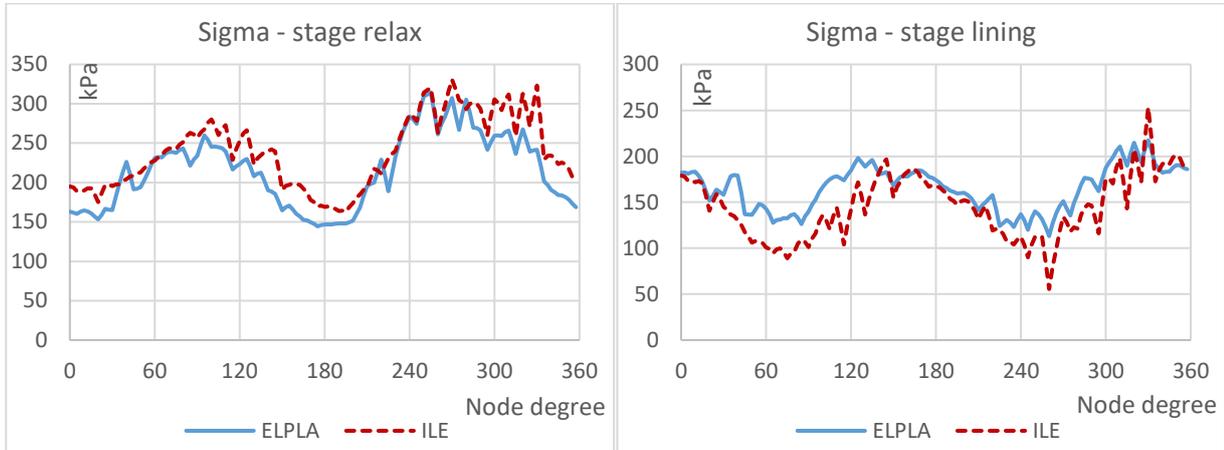
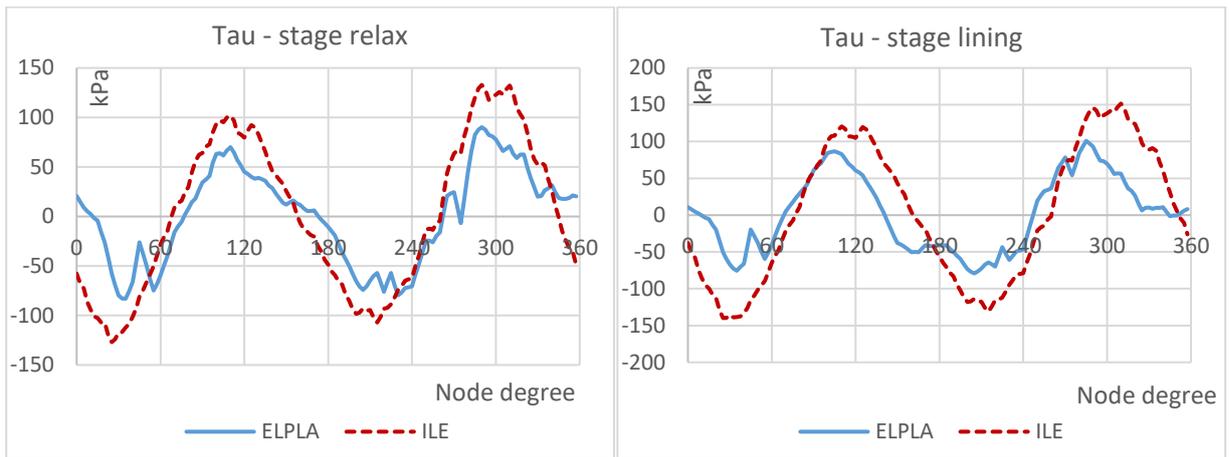


Figura 40 PC20_2D_L6 - ELPLA: zone di plasticizzazione

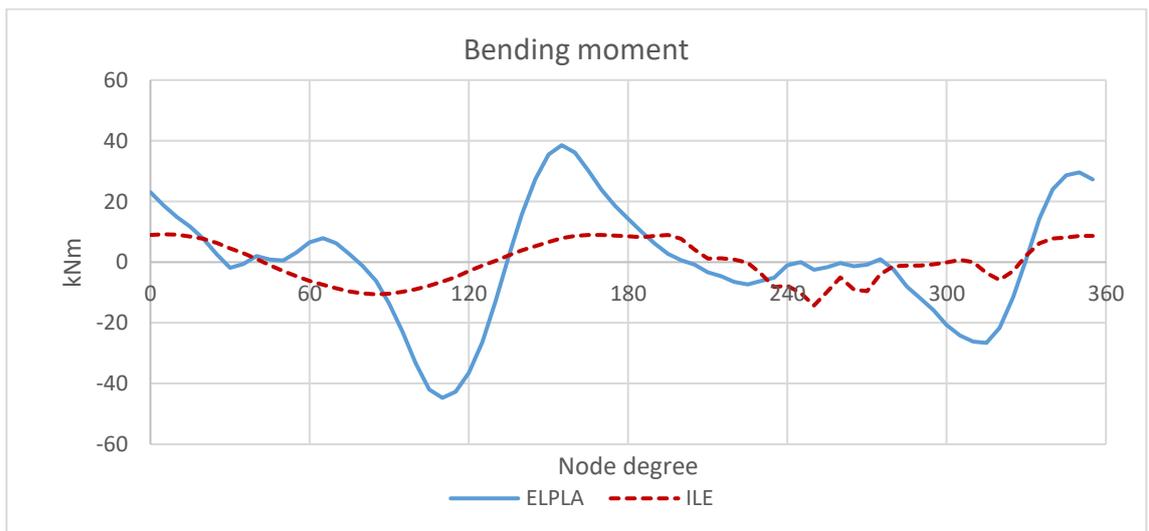
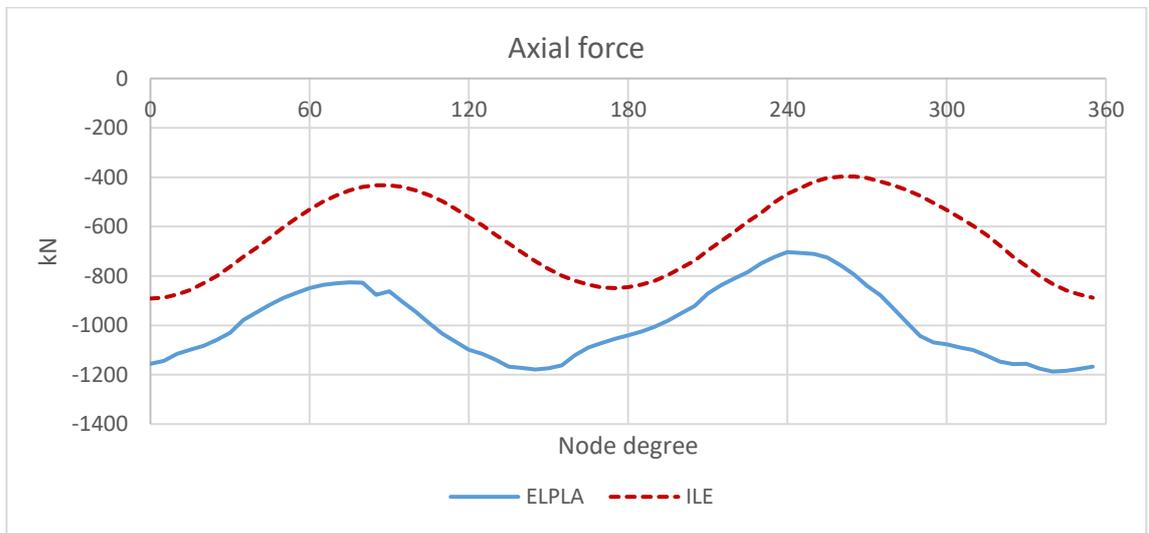
Confronto ILE-ELPLA

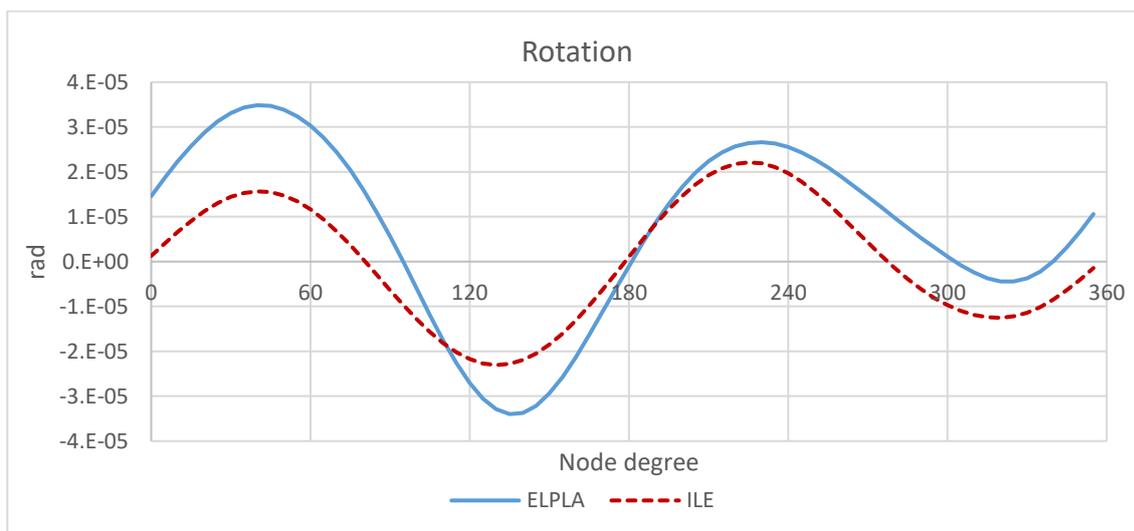
Tensioni





Caratteristiche della sollecitazione e rotazioni





I modelli elasto-plastici riportati sono stati anch'essi sottoposti al processo di taratura delle molle a rigidità costante, tuttavia non sono stati ottenuti risultati apprezzabili al punto da procedere con le analisi per la determinazione dei carichi netti.

Si consiglia per eventuali sviluppi futuri, di ottimizzare la taratura delle molle per modelli ELPLA, eventualmente, adottando molle con legge costitutiva elasto-plastica e provarne a tarare la rigidità ed il carico di snervamento. Così si potranno calcolare dei carichi netti più realistici e verificare se tali forme di carico possono essere ricercate nell'algoritmo genetico.

13. Correzioni all'algorithmo genetico

Allo stato iniziale l'AG si mostrava inadatto a gestire i target provenienti dai modelli numerici, spaziando tra forme di carico non adatte a quelle che si sono rivelate essere quelle corrette da applicare in un modello con molle trascurabili.

Come mostrato nei capitoli precedenti, se si vuole ricercare il carico responsabile della sola deformazione del rivestimento, non considerando l'interazione col terreno mediante l'impiego di molle di rigidezza trascurabile, si deve ricercare il suddetto carico tra le forme che si sono indicate come "carichi netti".

Per tutti i modelli analizzati - *modelli elastici lineari con contatto tra liner e mesh del terreno non modellato mediante superficie di contatto con possibile scorrimento* - è stato necessario modificare le forme d'onda radiali e tangenziali come segue.

Inizialmente si adoperavano 3 funzioni per il carico distribuito radiale ed altrettante per il carico distribuito tangenziale, mostrate nella Figura 8. Inoltre vi erano contemplati due carichi concentrati radiali ed altrettanti tangenziali.

Per ridurre l'ampia variabilità delle forme di carico e restringere il campo verso delle forme simili a quelle ottenute nell'analisi, è stato necessario eliminare tutti i carichi concentrati, eliminare un'onda sia per il carico radiale che per il carico tangenziale e correggere alcune delle onde rimanenti.

Forme d'onda radiale:

$$\begin{aligned} \text{radiale A:} & \quad \{\cos(\varphi + \theta_1)\} \cdot \alpha_1 \\ \text{radiale B} & \quad \{-\cos[2(\varphi + \theta_2)]\} \cdot \alpha_2 \end{aligned}$$

Forme d'onda tangenziale:

$$\begin{aligned} \text{tangenziale A:} & \quad \{\sin(\varphi + \theta_3)\} \cdot \beta_1 \\ \text{tangenziale B:} & \quad \{\sin[2(\varphi + \theta_4)]\} \cdot \beta_2 \end{aligned}$$

Dove:

- α_1, α_2 sono i coefficienti amplificativi delle tre onde adimensionali radiali, generati casualmente in un intervallo scelto dall'utente, proporzionalmente all'ampiezza dei carichi che ci si aspetta;
- θ_1, θ_2 sono le fasi delle tre onde radiali generate casualmente nel range definito dal parametro di direzione;
- β_1, β_2 sono i coefficienti amplificativi delle tre onde tangenziali, generati casualmente in un intervallo scelto dall'utente, proporzionalmente all'ampiezza dei carichi che ci si aspetta;
- θ_3, θ_4 sono le fasi delle tre onde adimensionali tangenziali, generate casualmente nel range definito dal parametro di direzione;

Anche i range di variazione dei coefficienti amplificativi sono stati modificati:

Per il carico radiale, la forma radiale B risulta essere quella che da l'andamento principale all'andamento del carico, il coefficiente di amplificazione relativo:

$$\alpha_2 \in [0 ; a_2] \quad \text{con} \quad a_2 > 0$$

La forma radiale A risulta essere la modulatrice, ovvero va a variare l'ampiezza dei picchi della forma d'onda radiale B per renderla asimmetrica rispetto all'asse verticale che, appunto, separa i picchi. Il relativo coefficiente amplificativo varierà nel seguente insieme:

$$\alpha_1 \in [-a_1 ; a_1] \quad \text{con} \quad 0 < a_1 < 0,3 \cdot a_2$$

Per il carico tangenziale la forma tangenziale B risulta essere la principale, mentre la forma d'onda tangenziale A risulta essere la modulatrice come nel caso delle forme d'onda radiali. Pertanto:

$$\beta_2 \in [0 ; b_2] \quad \text{con} \quad b_2 > 0$$

$$\beta_1 \in [-b_1 ; b_1] \quad \text{con} \quad 0 < b_1 < 0,1 \cdot b_2$$

Per quanto riguarda gli angoli di sfasamento ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) questi variano con passo di 5° , in un intervallo definito dal *parametro di direzione* che è fornito come dato di input dall'utente:

$$\theta \in [dir - 30^\circ ; dir + 30^\circ] \cup [(180^\circ + dir) - 30^\circ ; (180^\circ + dir) + 30^\circ]$$

I dati input che l'utente è chiamato ad inserire sono: il *parametro di direzione* che è l'angolo che l'asse lungo il quale la galleria subisce la convergenza massima forma con l'asse orizzontale; il *carico radiale netto medio*; il *numero di individui* di cui sarà costituita ogni generazione ed infine i parametri a_2 e b_2 che sono scelti in base all'ampiezza dei carichi previsti.

Vista la variabilità di tali parametri, che aumenta in presenza di modelli soggetti ad uno stato tensionale elevato (gallerie profonde), è necessario lanciare l'analisi utilizzando non meno di 150 individui nella popolazione iniziale, al fine di avere risultati accettabili e poco suscettibili a variazioni se si rilancia un'analisi identica.

14. Analisi con l'algoritmo genetico

Modificato l'algoritmo genetico, si mostra come questo riesce a convergere sui carichi netti, determinati in precedenza per i modelli in esame.

Si noti come con le modifiche apportate, fin dalla prima generazione di individui (carichi) generati casualmente si lavora con forme d'onda simili a quelle di target.

Modello Profonda 1

Forme d'onda della prima generazione

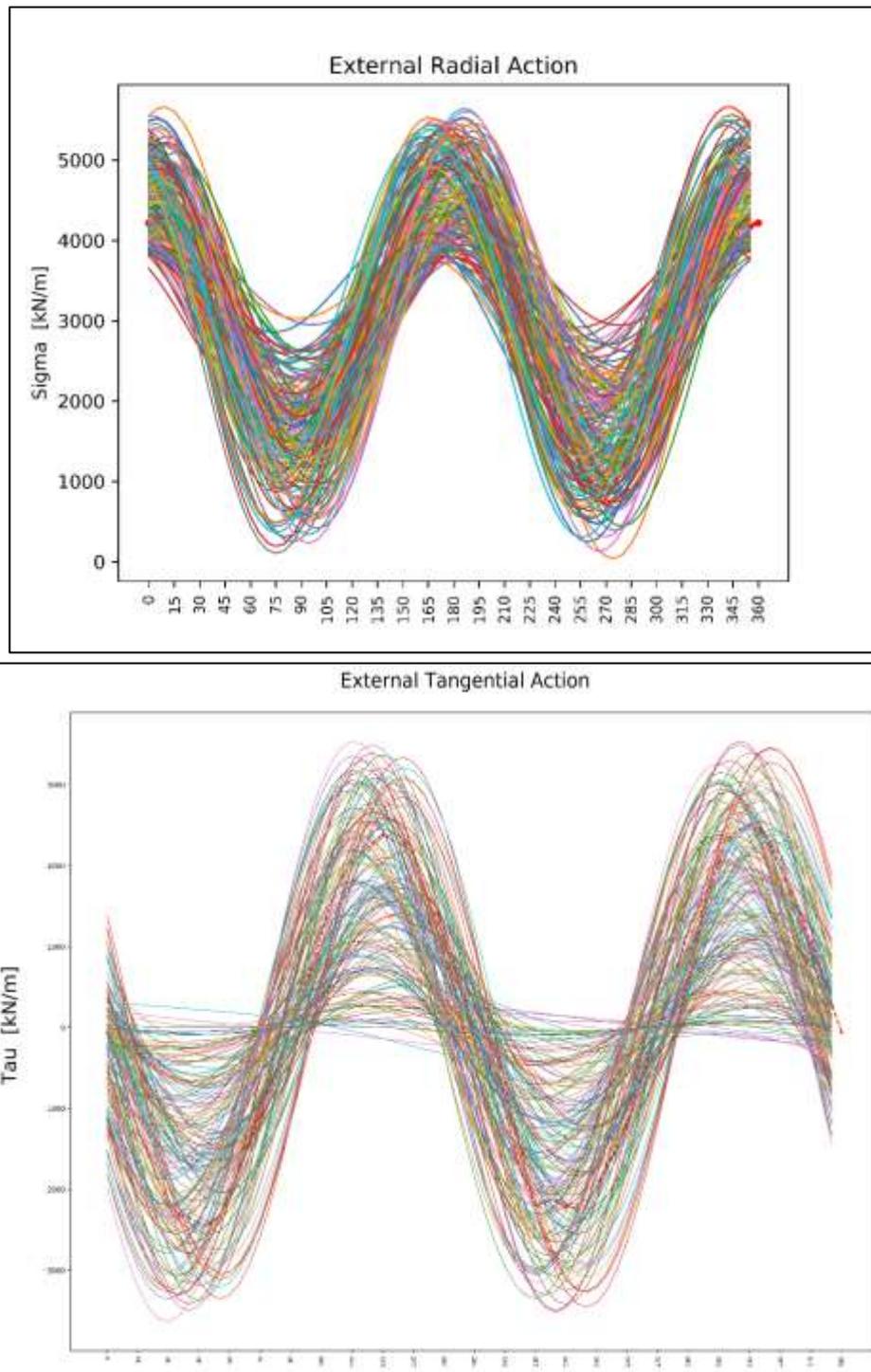
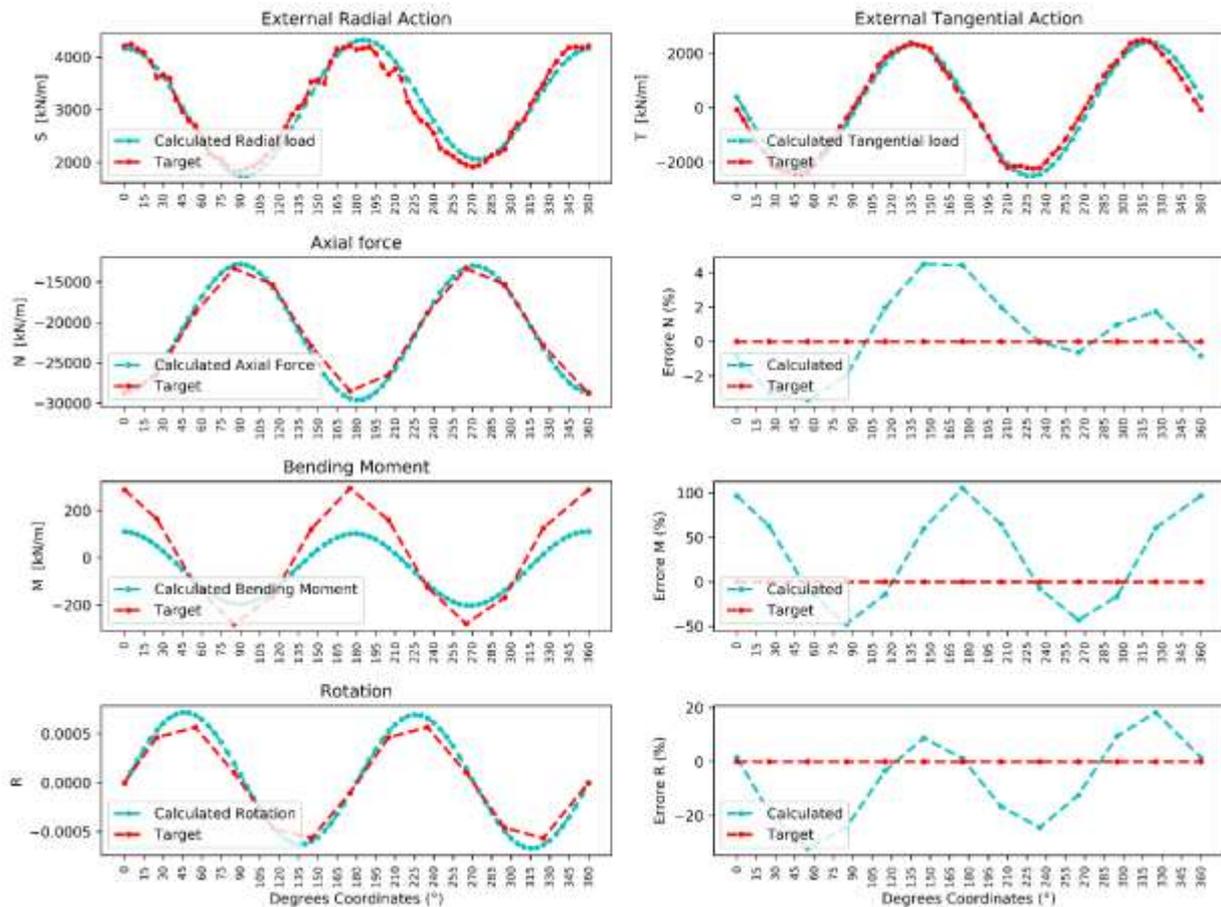


Figura 41 Forme di carico con $\theta=90^\circ$

Output analisi

L'analisi è stata lanciata con i seguenti parametri:

- $\theta = 90^\circ$ parametro di direzione
- $q_{m,R} = 3071 \text{ kPa}$ carico medio radiale
- $N = 150$ numero di individui della popolazione iniziale
- $\alpha_2 \in [0 ; a_2]$ con $a_2 = 2500$
- $\alpha_1 \in [-a_1 ; a_1]$ con $0 < a_1 < 0,3 \cdot a_2$
- $\beta_2 \in [0 ; b_2]$ con $b_2 = 3500$
- $\beta_1 \in [-b_1 ; b_1]$ con $0 < b_1 < 0,1 \cdot b_2$



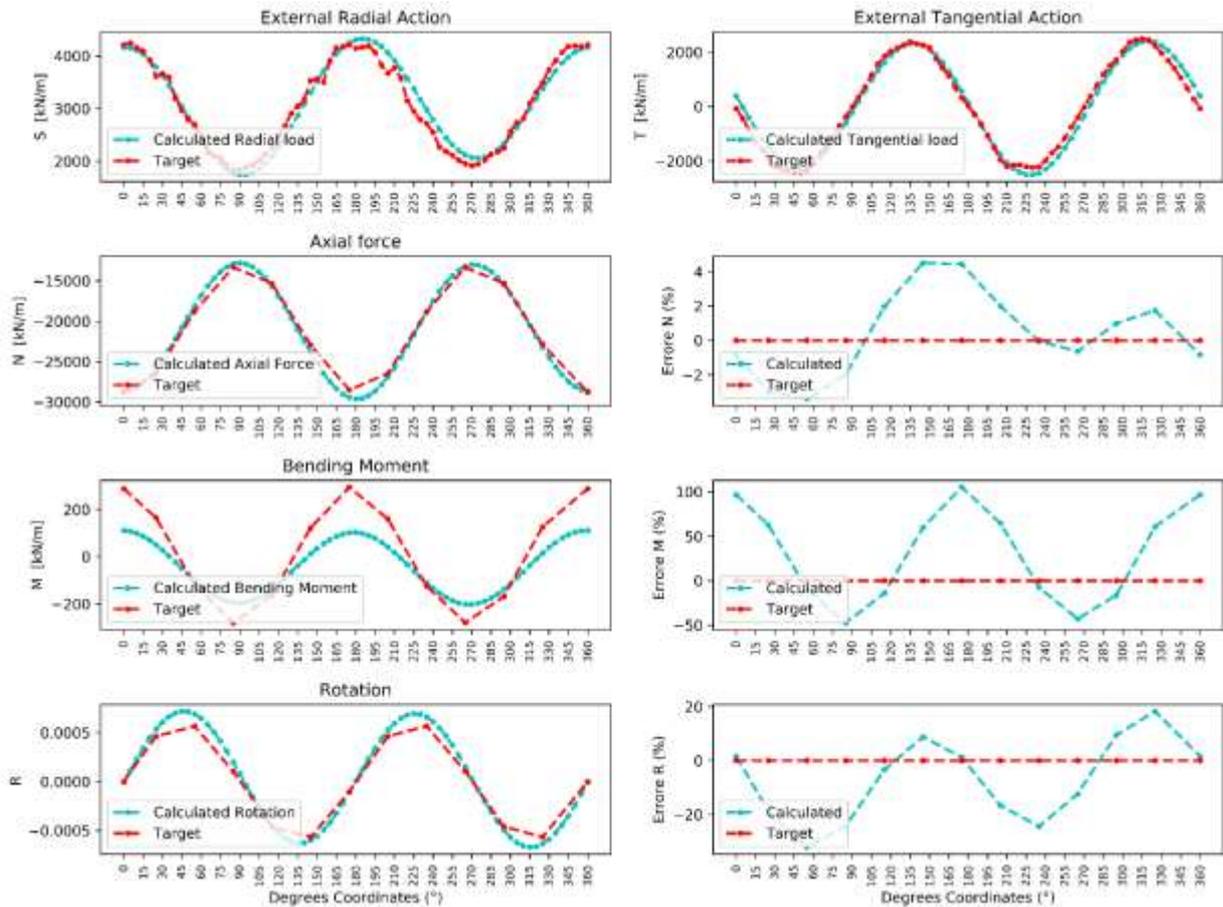
L'analisi ha fornito un ottimo risultato, al quale sono riferiti i seguenti punteggi come stima dell'adattamento tra i diagrammi determinati dal carico trovato ed i diagrammi di target:

- Punteggio M: 1,75
- Punteggio N: 45,52
- Punteggio R: 6,94
- Punteggio globale - **P = 1,357**

Modello Profonda 2

Output analisi

- $\theta = 105^\circ$ parametro di direzione
- $q_{m,R} = 1142 \text{ kPa}$ carico medio radiale
- $N = 150$ numero di individui della popolazione iniziale
- $\alpha_2 \in [0 ; a_2]$ con $a_2 = 2000$
- $\alpha_1 \in [-a_1 ; a_1]$ con $0 < a_1 < 0,3 \cdot a_2$
- $\beta_2 \in [0 ; b_2]$ con $b_2 = 3000$
- $\beta_1 \in [-b_1 ; b_1]$ con $0 < b_1 < 0,1 \cdot b_2$

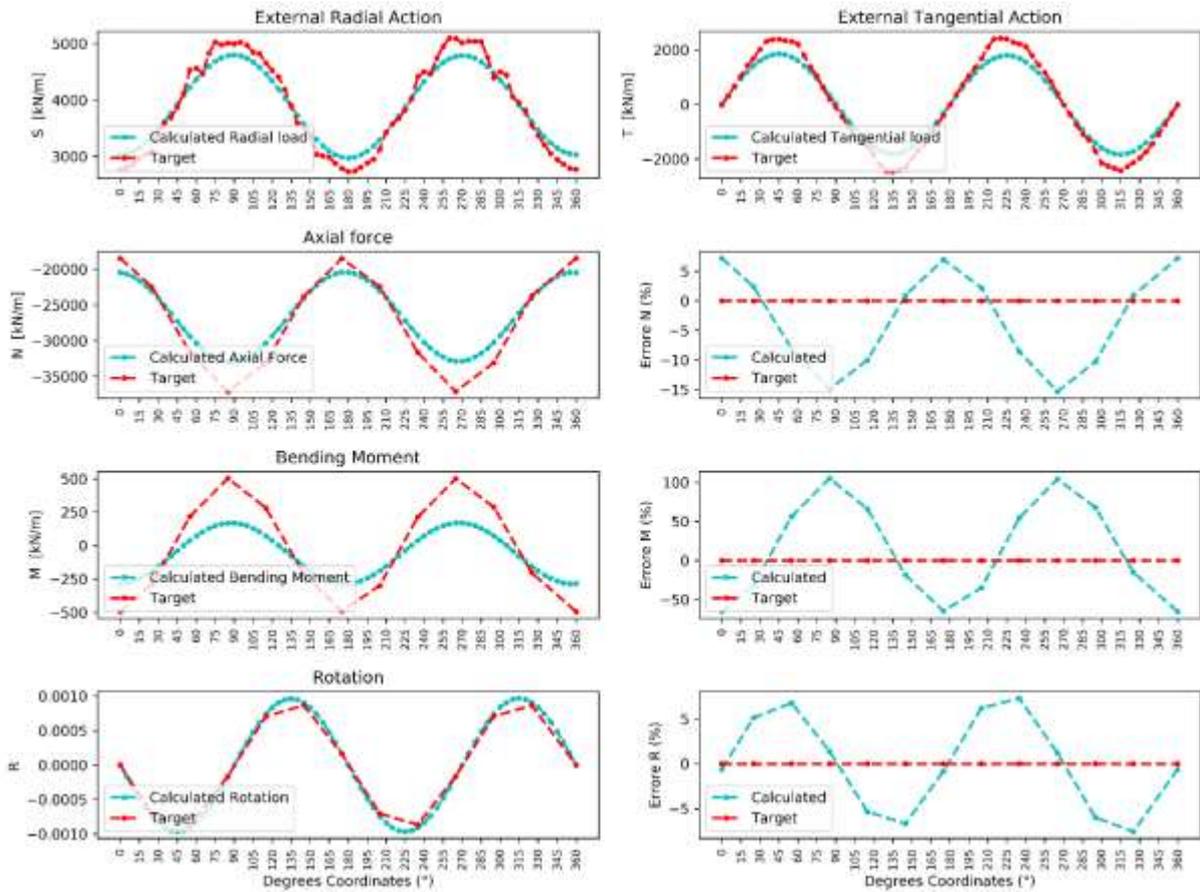


- Punteggio M: 2,17
- Punteggio N: 2,80
- Punteggio R: 54,11
- Punteggio globale - **P=1,196**

Modello Profonda 3

Output analisi

- $\theta = 0^\circ$ parametro di direzione
- $q_{m,R} = 3900 \text{ kPa}$ carico medio radiale
- $N = 200$ numero di individui della popolazione iniziale
- $\alpha_2 \in [0 ; a_2]$ con $a_2 = 3000$
- $\alpha_1 \in [-a_1 ; a_1]$ con $0 < a_1 < 0,3 \cdot a_2$
- $\beta_2 \in [0 ; b_2]$ con $b_2 = 4000$
- $\beta_1 \in [-b_1 ; b_1]$ con $0 < b_1 < 0,1 \cdot b_2$

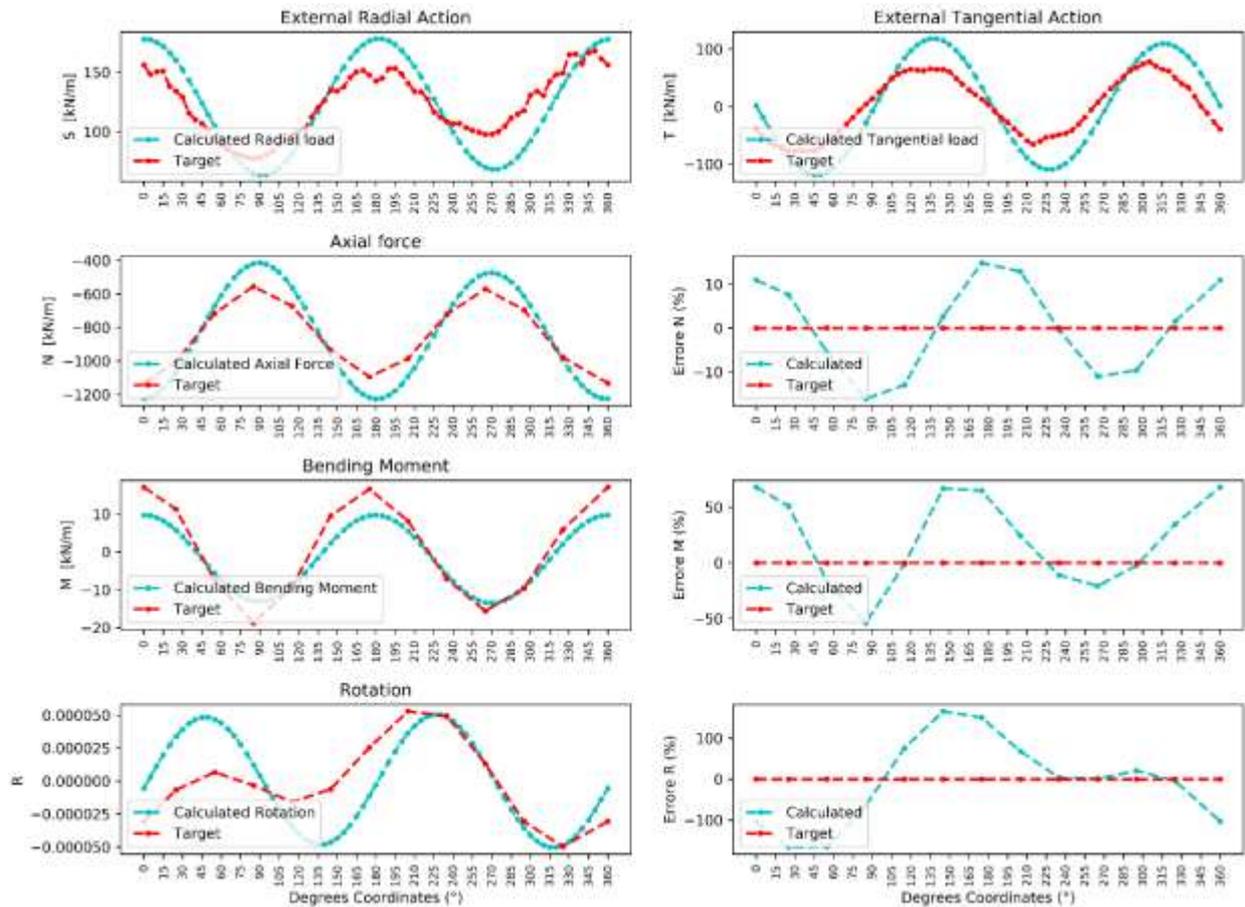


- Punteggio M: 1,60
- Punteggio N: 12,62
- Punteggio R: 21,63
- **Punteggio globale: 1,33**

Modello PCH_4D_L4

Output analisi

- $\theta = 90^\circ$ parametro di direzione
- $q_{m,R} = 200 \text{ kPa}$ carico medio radiale
- $N = 200$ numero di individui della popolazione iniziale
- $\alpha_2 \in [0 ; a_2]$ con $a_2 = 300$
- $\alpha_1 \in [-a_1 ; a_1]$ con $0 < a_1 < 0,3 \cdot a_2$
- $\beta_2 \in [0 ; b_2]$ con $b_2 = 400$
- $\beta_1 \in [-b_1 ; b_1]$ con $0 < b_1 < 0,1 \cdot b_2$

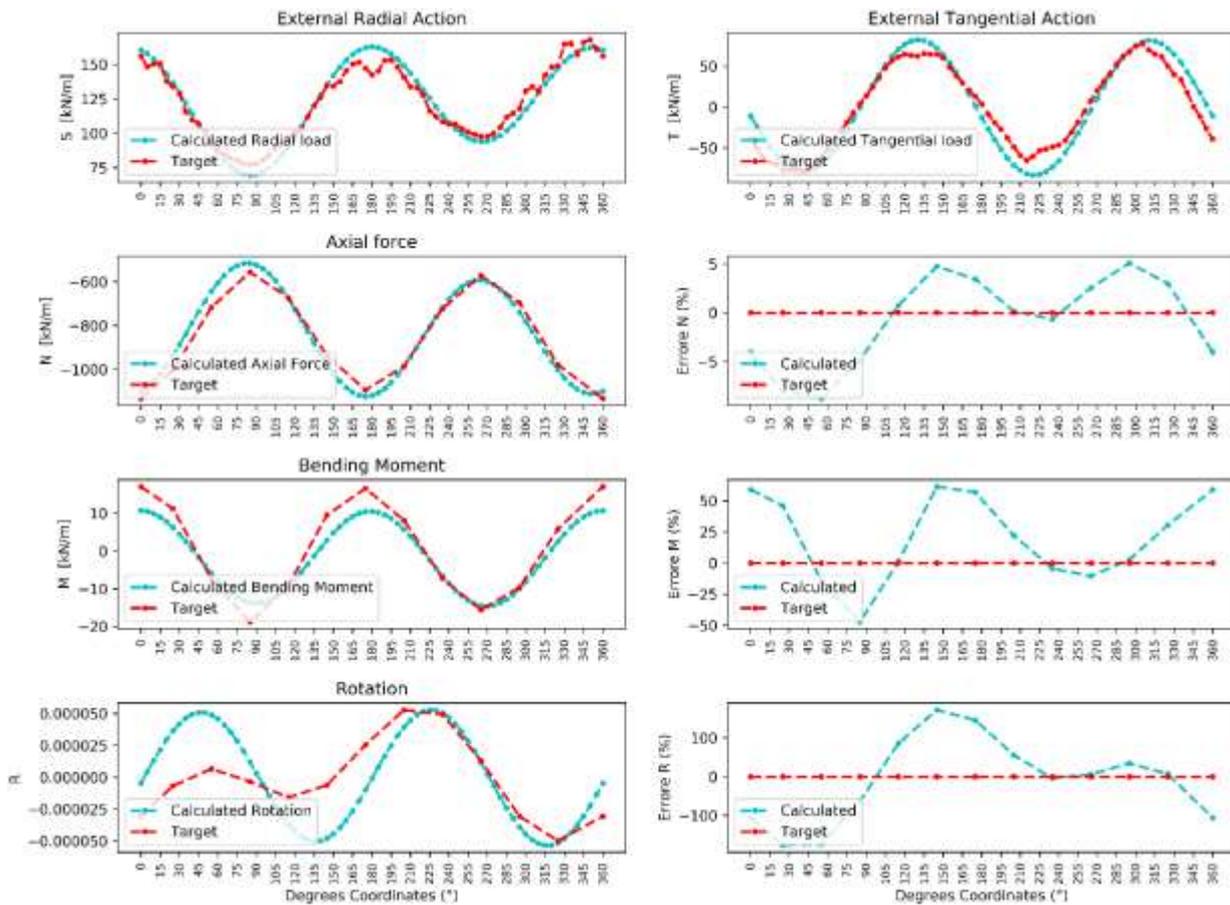


- Punteggio M: 1,59
- Punteggio N: 13,34
- Punteggio R: 3,94
- **Punteggio globale: 1,04**

Modello PC10_2D_L1

Output analisi

- $\theta = 90^\circ$ parametro di direzione
- $q_{m,R} = 122 \text{ kPa}$ carico medio radiale
- $N = 200$ numero di individui della popolazione iniziale
- $\alpha_2 \in [0 ; a_2]$ con $a_2 = 200$
- $\alpha_1 \in [-a_1 ; a_1]$ con $0 < a_1 < 0,3 \cdot a_2$
- $\beta_2 \in [0 ; b_2]$ con $b_2 = 300$
- $\beta_1 \in [-b_1 ; b_1]$ con $0 < b_1 < 0,1 \cdot b_2$

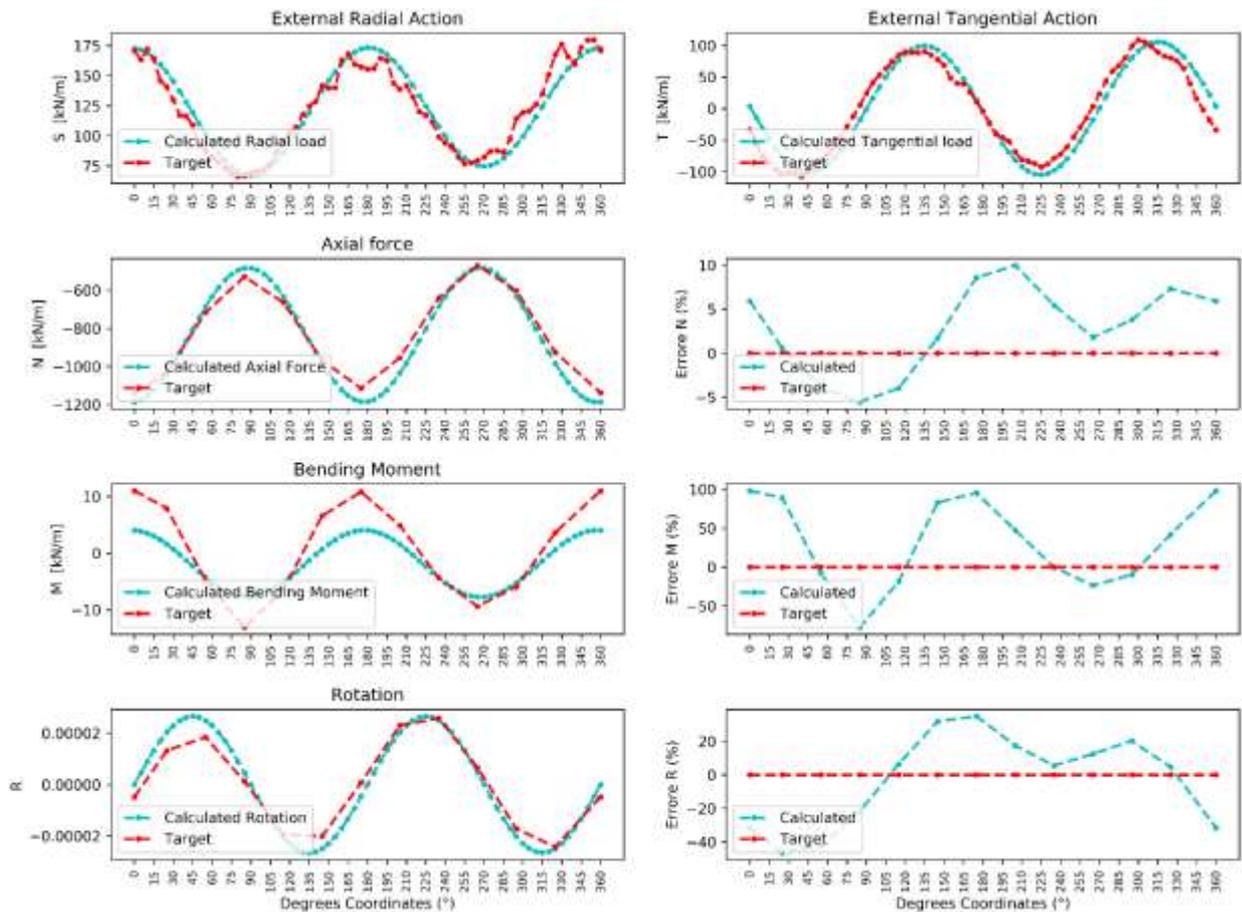


- Punteggio M: 2,90
- Punteggio N: 24,00
- Punteggio R: 1,06
- **Punteggio globale: 0,75**

Modello PC10_2D_L5

Output analisi

- $\theta = 90^\circ$ parametro di direzione
- $q_{m,R} = 122 \text{ kPa}$ carico medio radiale
- $N = 200$ numero di individui della popolazione iniziale
- $\alpha_2 \in [0 ; a_2]$ con $a_2 = 200$
- $\alpha_1 \in [-a_1 ; a_1]$ con $0 < a_1 < 0,3 \cdot a_2$
- $\beta_2 \in [0 ; b_2]$ con $b_2 = 300$
- $\beta_1 \in [-b_1 ; b_1]$ con $0 < b_1 < 0,1 \cdot b_2$



- Punteggio M: 1,74
- Punteggio N: 18,63
- Punteggio R: 3,91
- **Punteggio globale: 1,13**

15. Conclusioni

Potenzialità e limiti di applicabilità

Dall'analisi effettuata si nota come l'algoritmo genetico, così impostato, ha un buon funzionamento. Tuttavia il limite di applicazione legato alle forme regolari dei target forniti da analisi elastiche lineari resta difficile da superare.

L'idea di base è corretta anche per la possibile estensione a modelli più complessi, come ad esempio, modelli con leggi costitutive elasto-plastiche oppure a modelli in cui vi è un'interfaccia modellata tra terreno e rivestimento. Si dovrebbe costruire una casistica di modelli ELPLA, per capire che forme assumono i carichi netti, e per determinare quest'ultimi, bisogna far attenzione alla taratura delle molle che diventa più complessa.

Potrebbe essere necessario ampliare o modificare il set di forme di carico per riuscire a coprire le irregolarità dovute alle zone di plasticizzazione. La maggiore variabilità introdotta e la complessità dei diagrammi di target aumenterebbero la difficoltà di convergenza dell'AG. Pertanto potrebbe essere utile infittire i punti di target ed inoltre sostituire o aggiungere altre grandezze target come ad esempio gli spostamenti orizzontali e/o verticali. Inoltre si dovrebbero condurre analisi con un numero di individui elevato nella popolazione iniziale.

Possibili implementazioni future

È importante sottolineare che, alla base del problema, esiste un grado di indeterminazione tale per cui, pur progettando adeguatamente l'algoritmo, si tenderà ad ottenere una convergenza nelle sollecitazioni e negli spostamenti, ma in genere si avrà sempre una forte differenza nell'approssimazione associata ai carichi (nella realtà sempre incogniti).

Pur esistendo sempre tali criticità, è possibile apportare diverse possibili modifiche all'algoritmo, che presumibilmente possano comportare livelli più o meno alti del grado di bontà della soluzione ottenuta.

Possibili impieghi futuri dell'algoritmo possono quindi considerare modifiche a livello di:

- *Meccanismi di riproduzione*: andando ad inserire, ad esempio, meccanismi come quelli di mutazione localizzata ai singoli individui;
- *Meccanismi di selezione*: effettuando una scelta del migliore sulla base di punteggi parziali associati alla singola variabile monitorata, portando quindi ad un diverso criterio di formazione delle generazioni e dunque a soluzioni differenti;
- *Meccanismi di scelta del migliore*: dove si può premiare un individuo nel passaggio alla generazione successiva in funzione, ad esempio, del punteggio parziale di una grandezza di cui si vuole una stima più attendibile.

AG implementato per la taratura delle molle

La struttura di tale algoritmo genetico potrebbe essere ripresa per uno scopo abbastanza diverso, ovvero per il problema della taratura delle molle nell'ottica del beam-spring method.

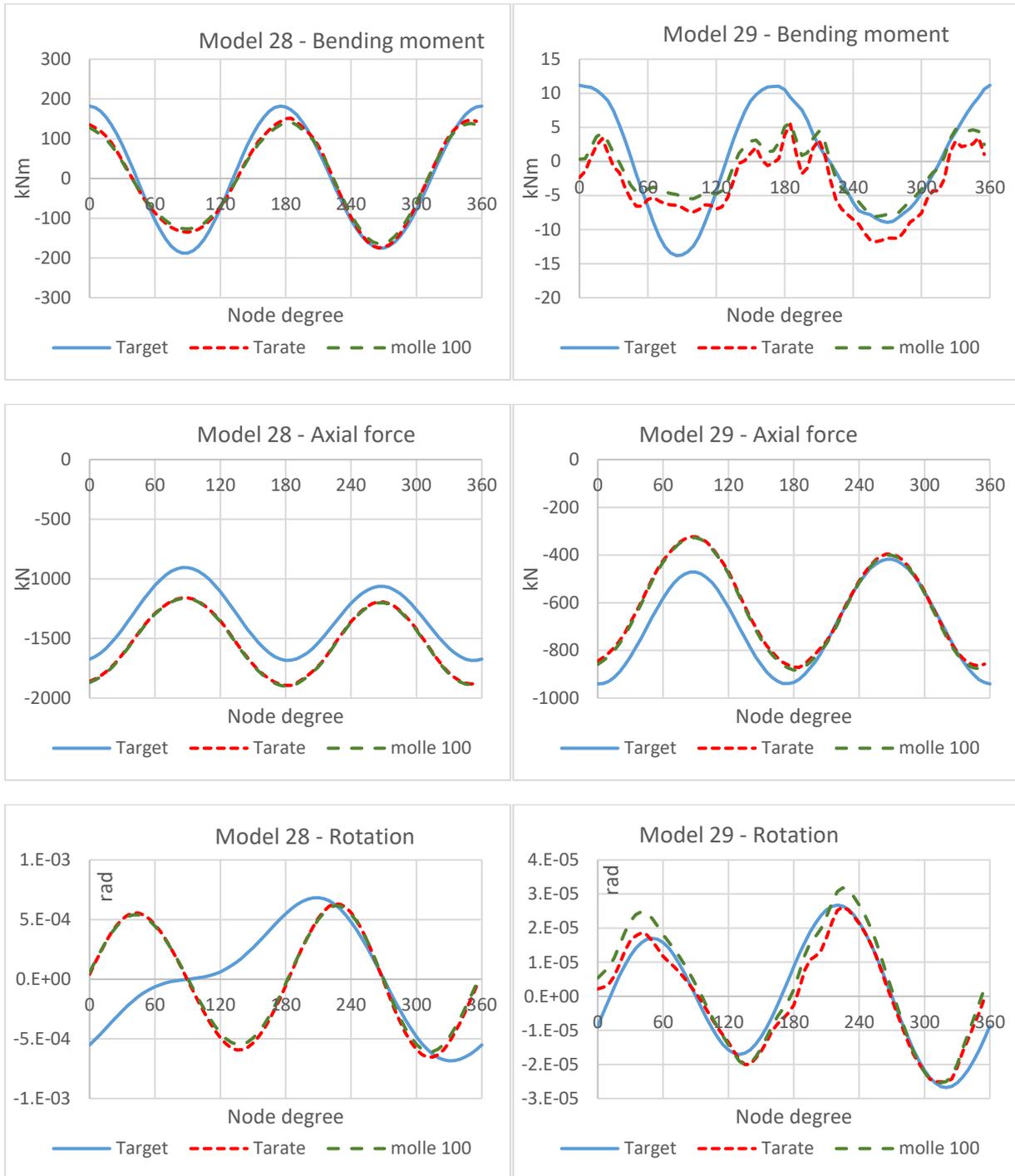
Infatti, con la stessa struttura, l'algoritmo può essere modificato in modo che mantenga costante il carico agente sul rivestimento e vengano codificati gli individui della popolazione iniziale, in modo da rappresentare l'andamento delle rigidità radiali e quello delle rigidità tangenziali.

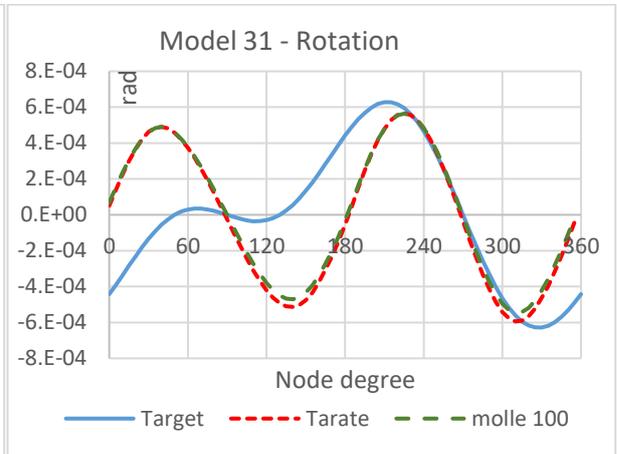
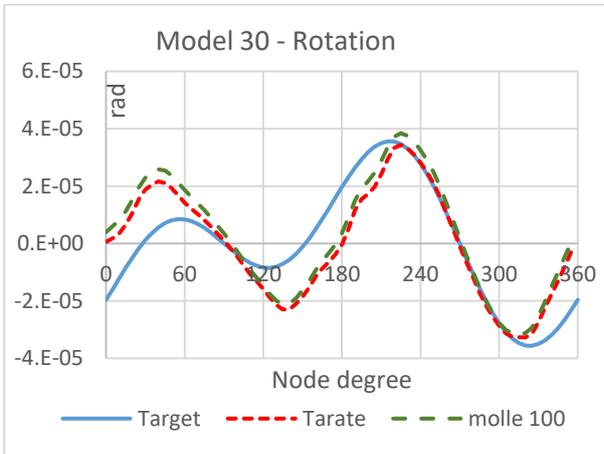
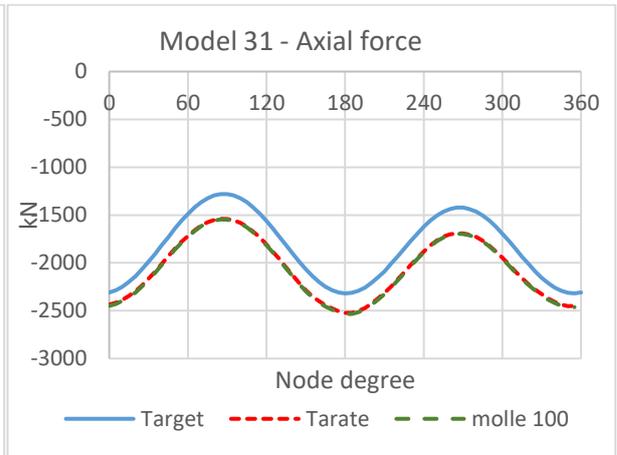
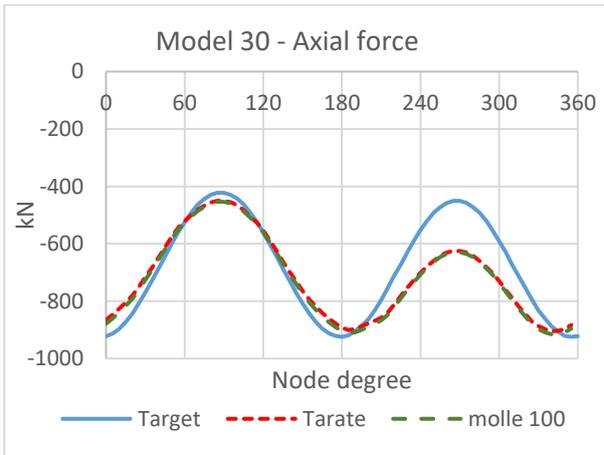
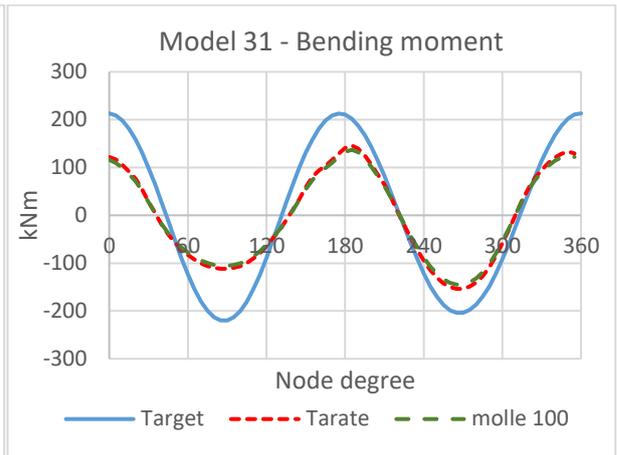
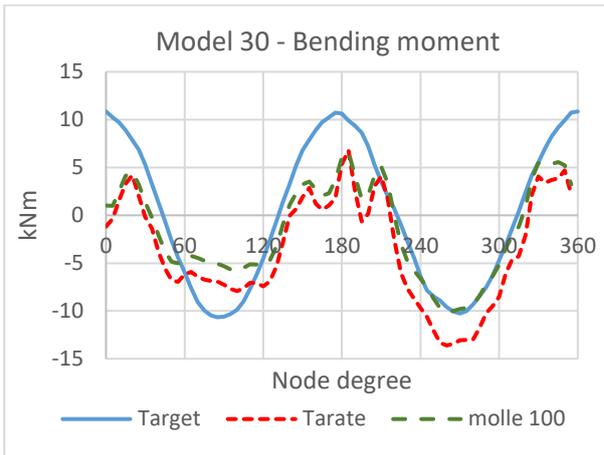
La funzione di fitness può rimanere identica a quella impiegata nel presente AG, con il già noto sistema di punteggi che misura la qualità dell'adattamento tra i target ed i diagrammi ottenuti dal software strutturale (Sap2000).

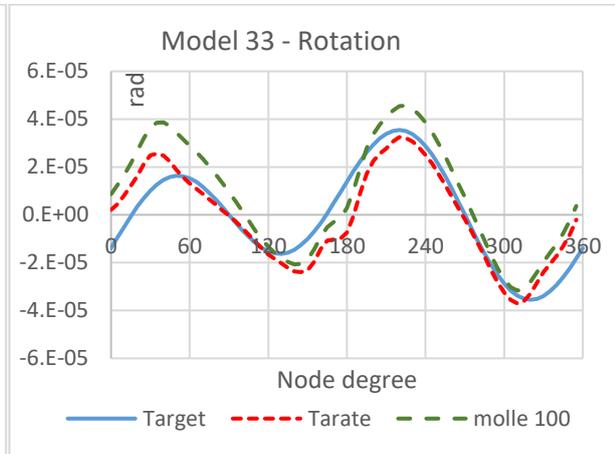
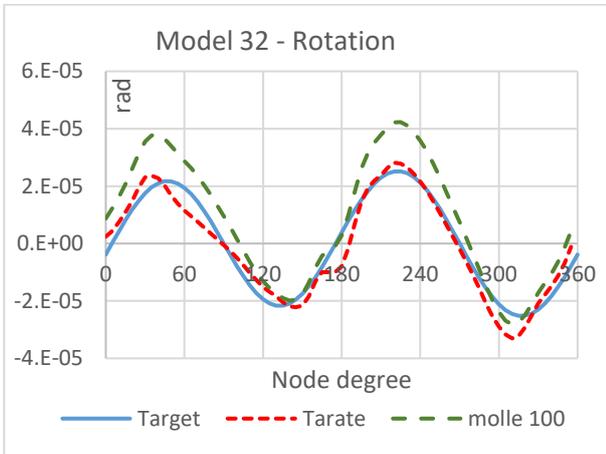
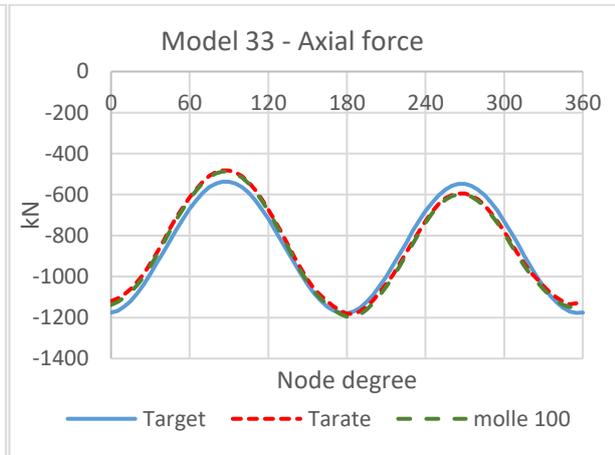
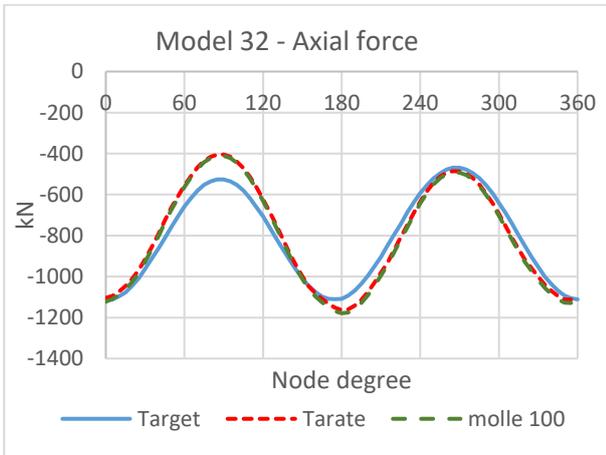
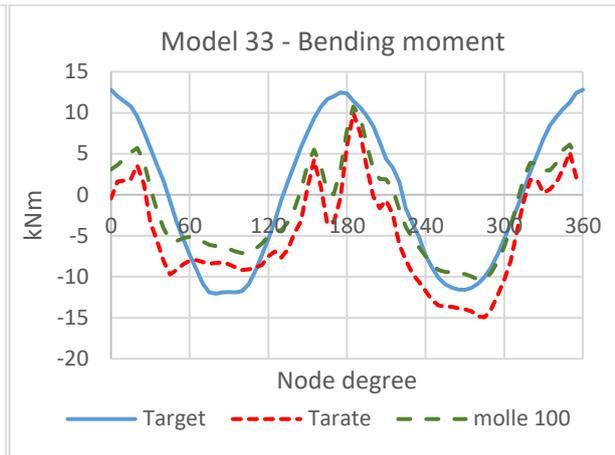
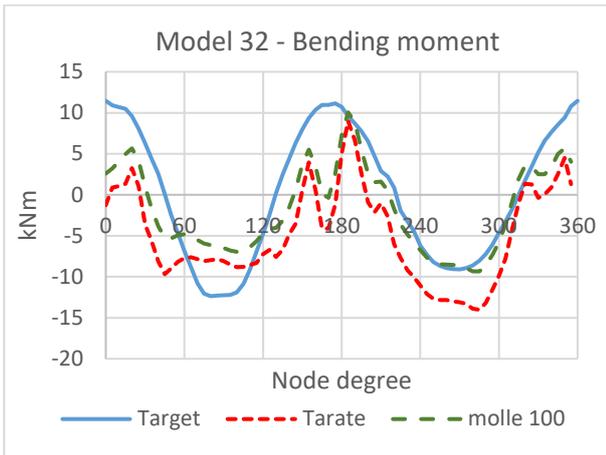
Si possono adoperare, o migliorare come già detto, le stesse regole di riproduzione per andare a costituire le nuove generazioni. In questo modo le potenzialità dell'algorithm genetico vengono impiegate per determinare la configurazione migliore di rigidità delle molle.

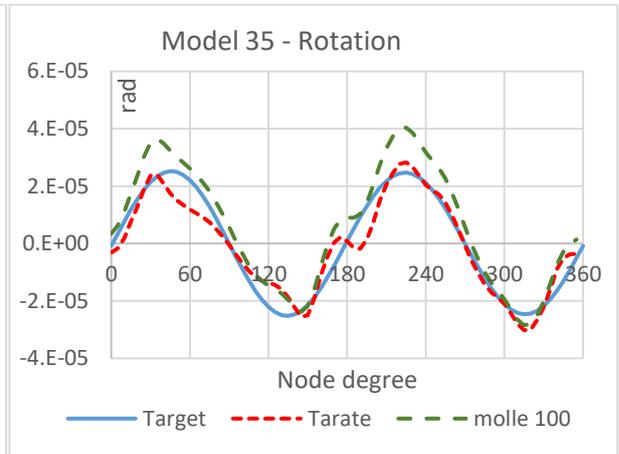
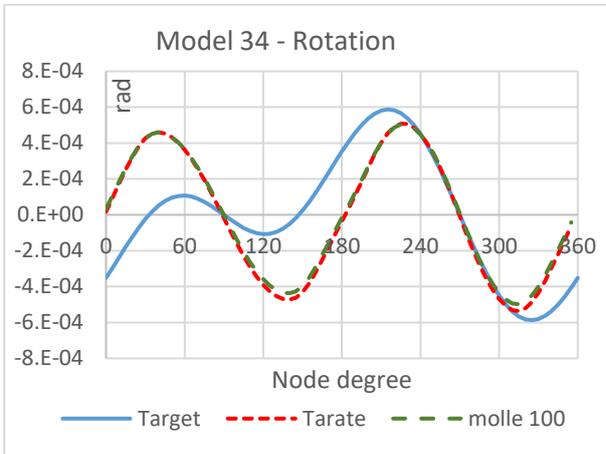
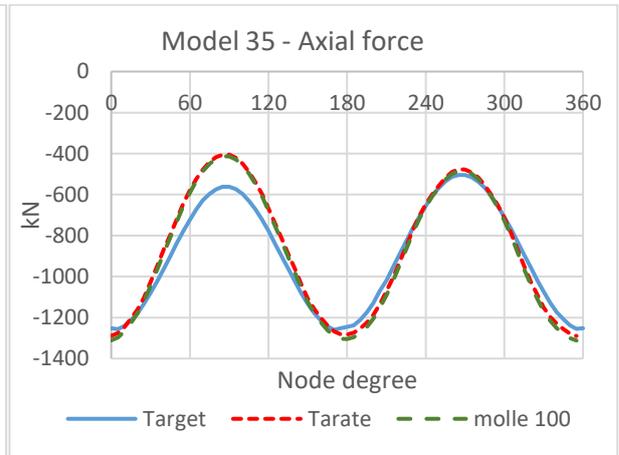
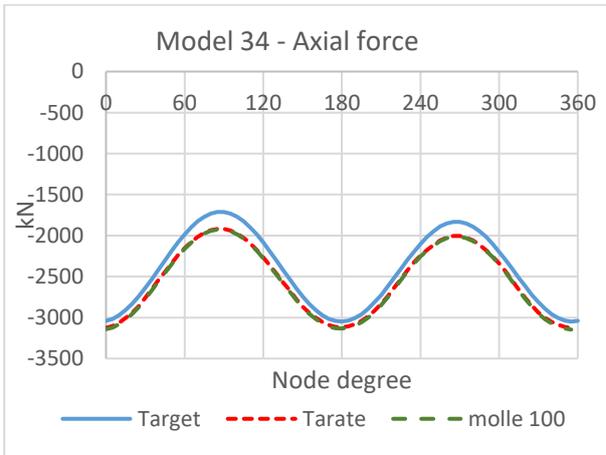
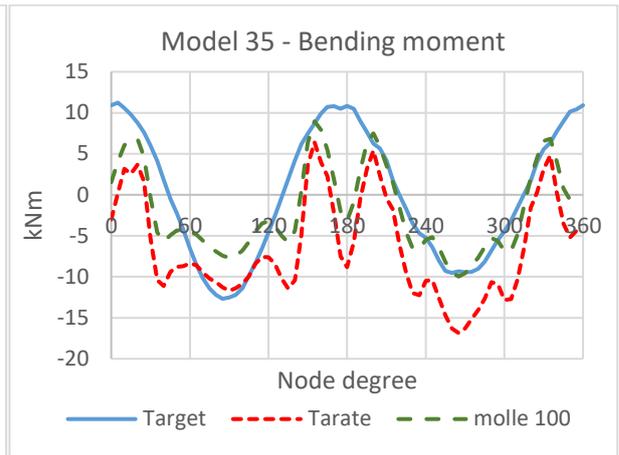
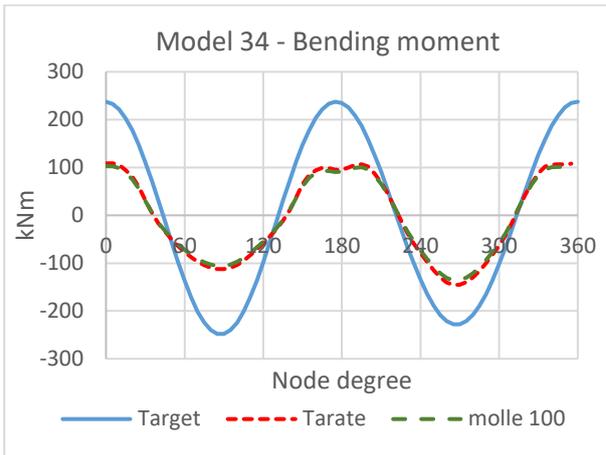
16. Allegati

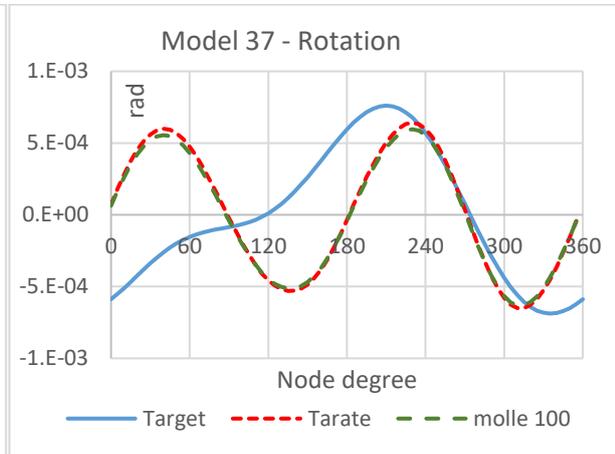
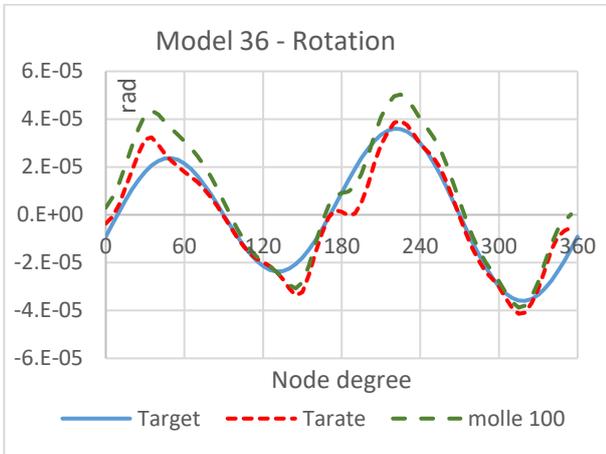
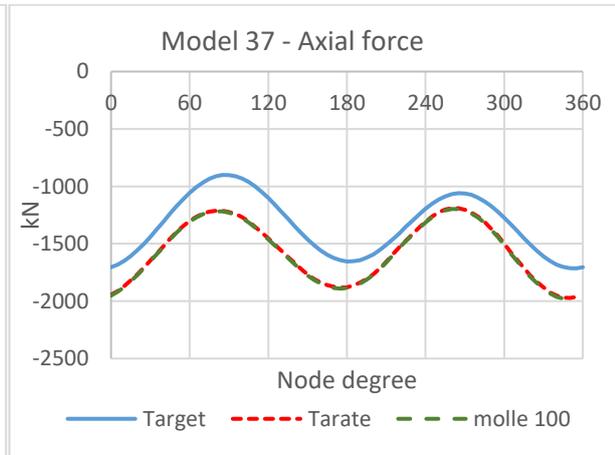
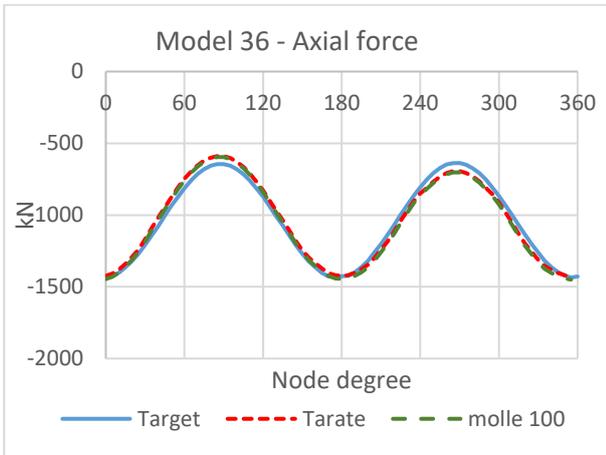
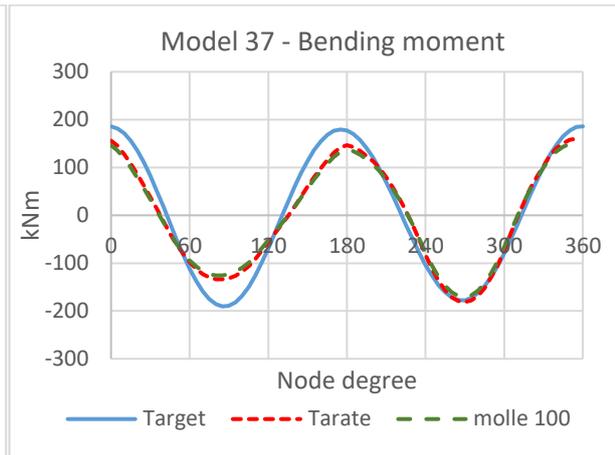
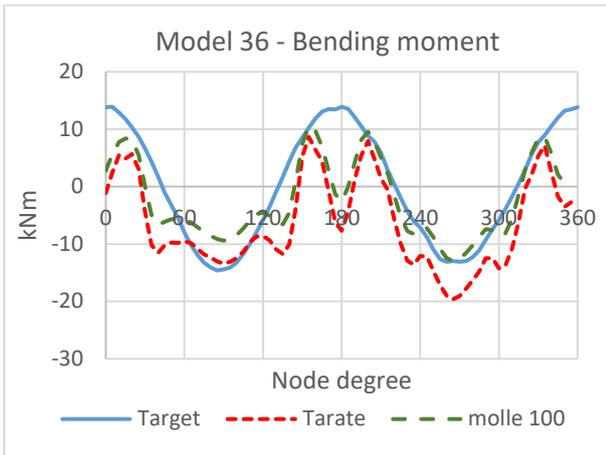
Sforzo normale, momento flettente e rotazione dei modelli 28 – 54

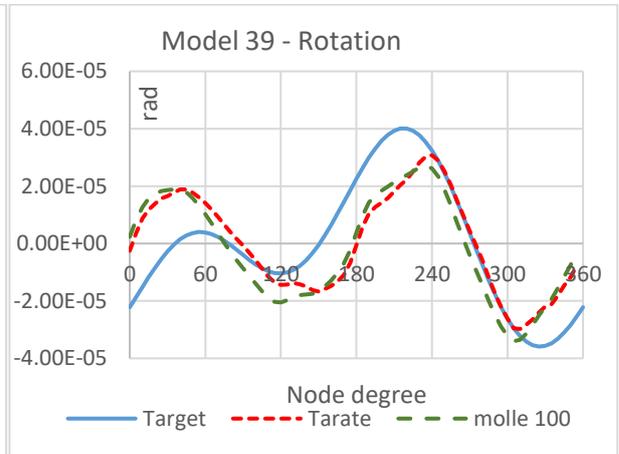
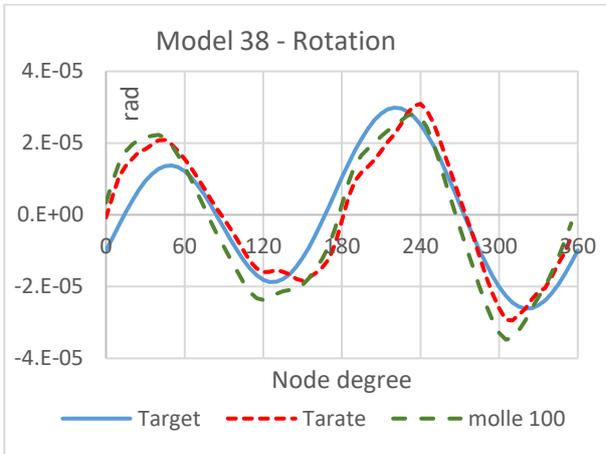
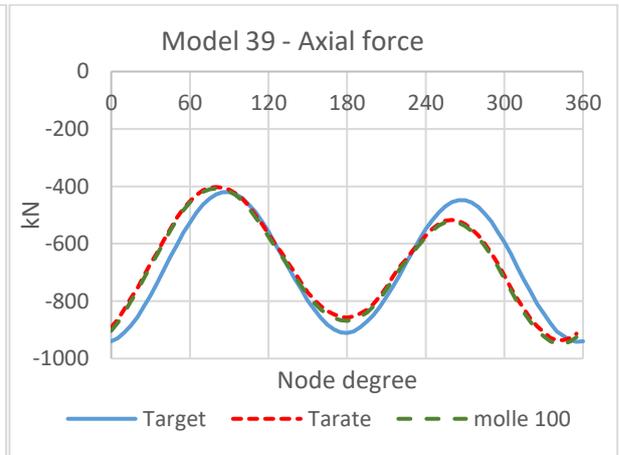
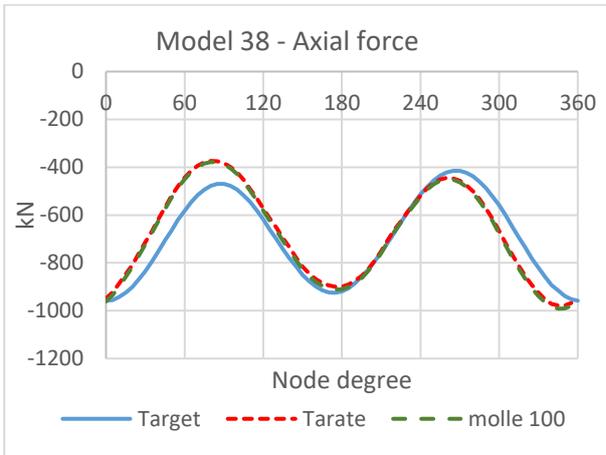
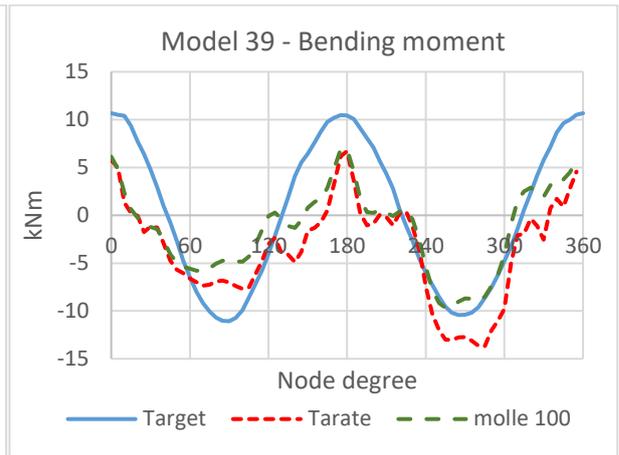
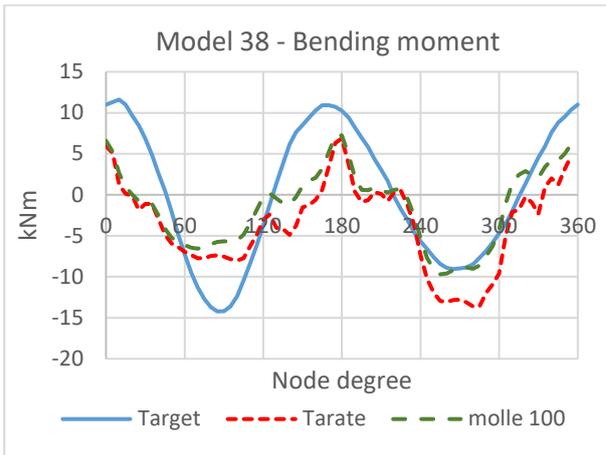


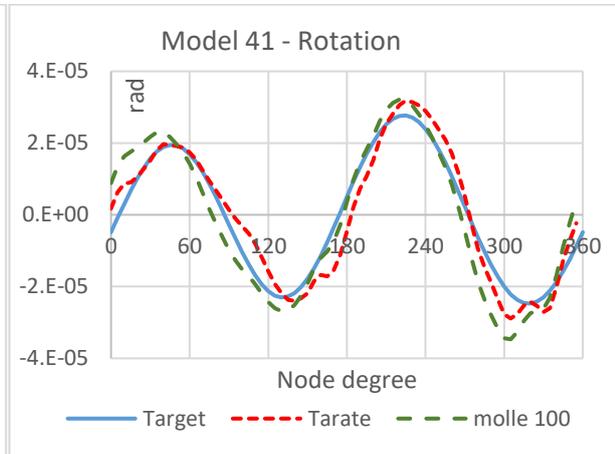
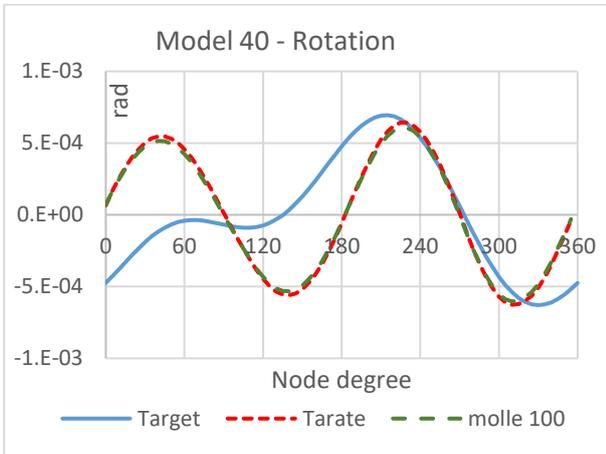
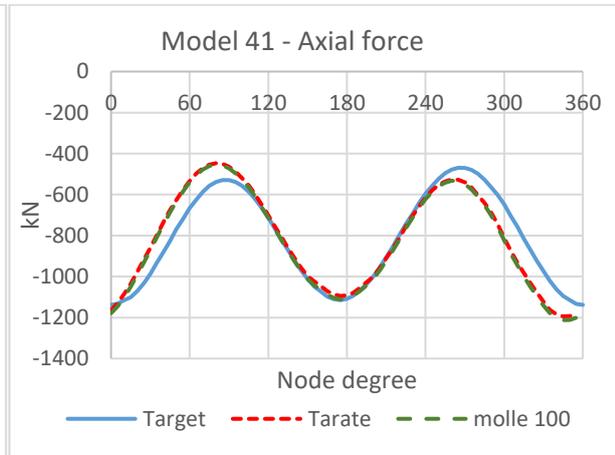
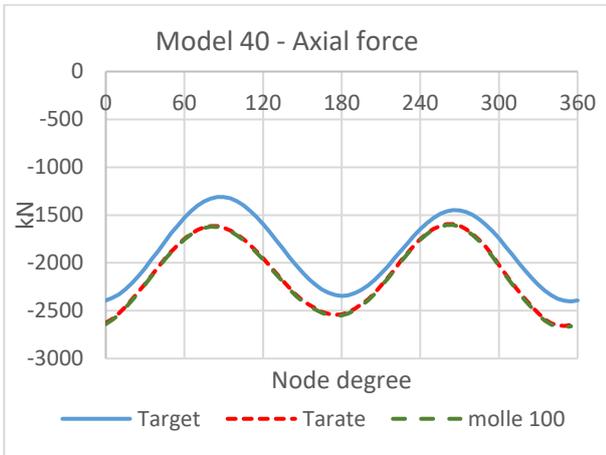
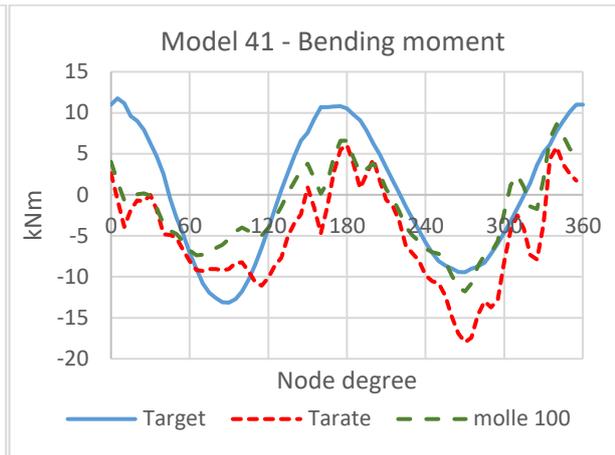
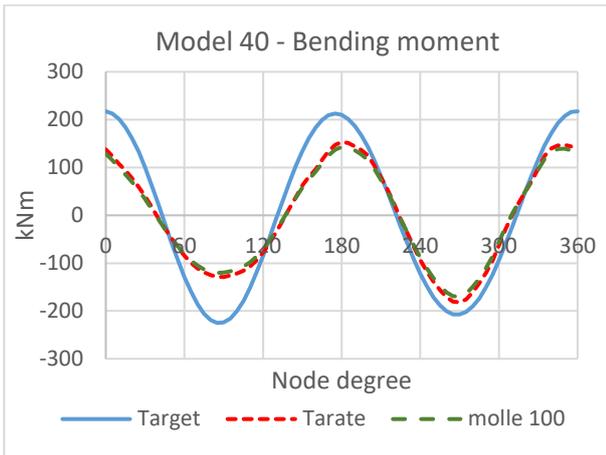


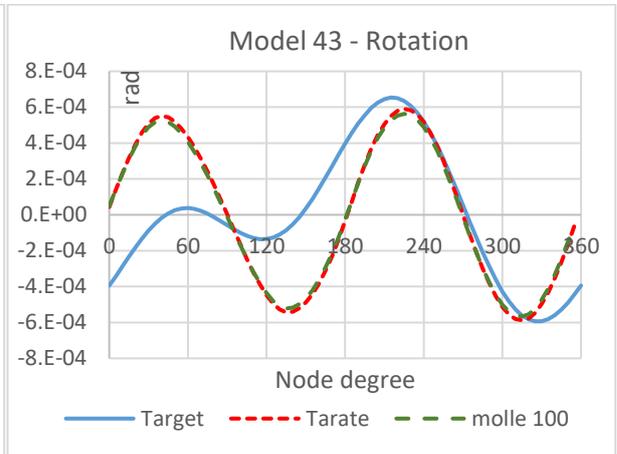
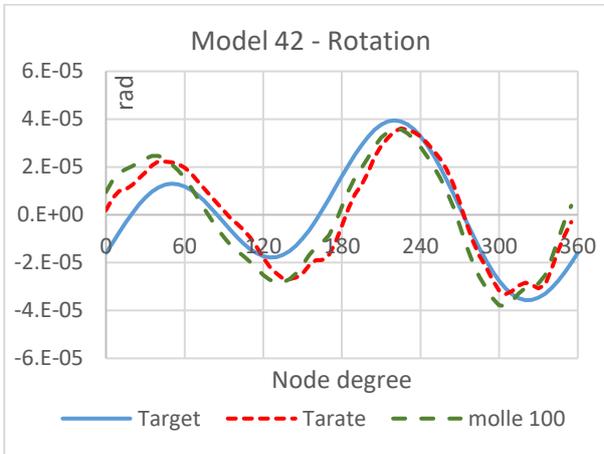
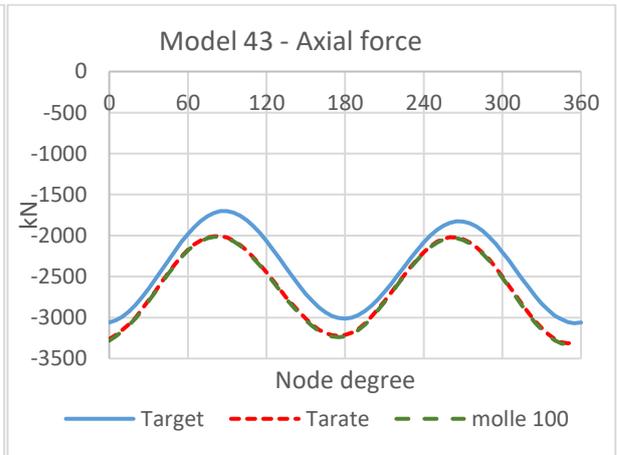
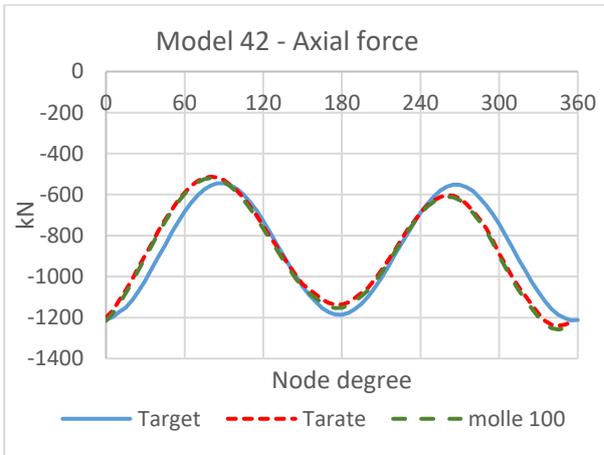
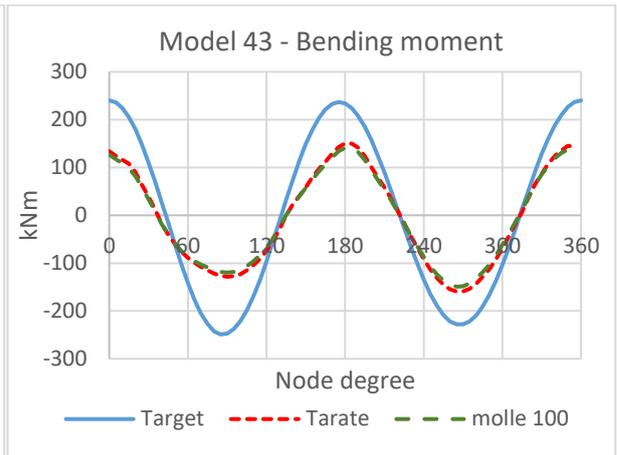
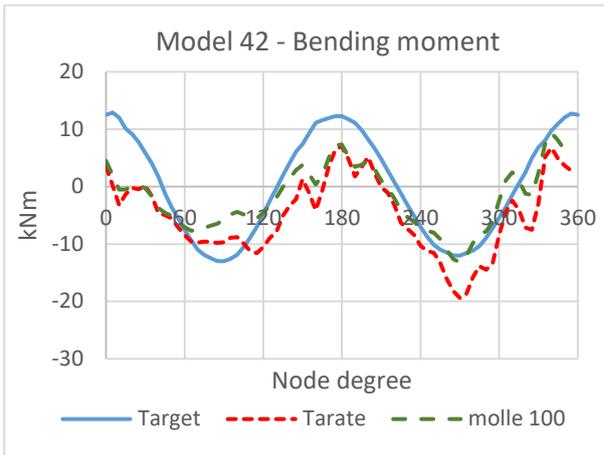


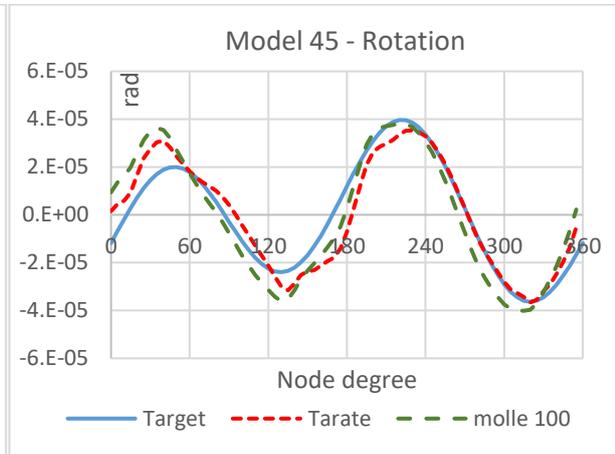
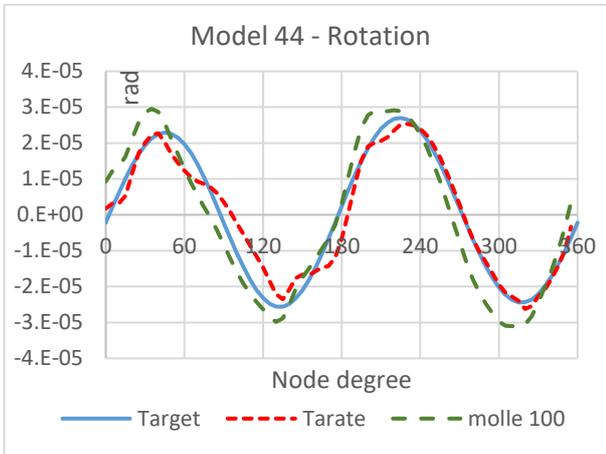
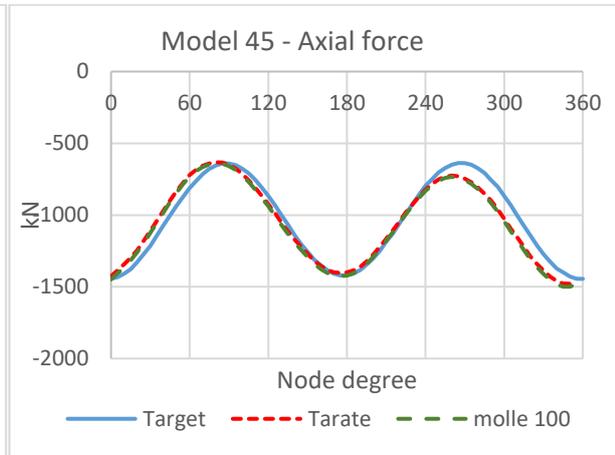
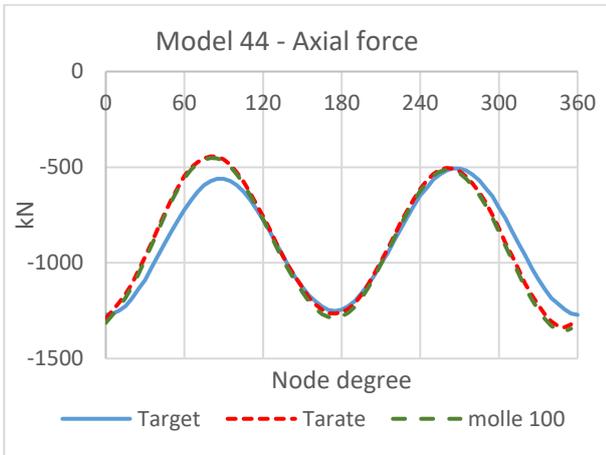
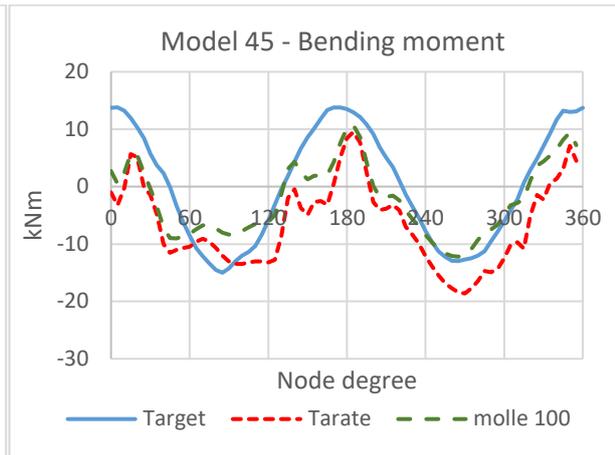
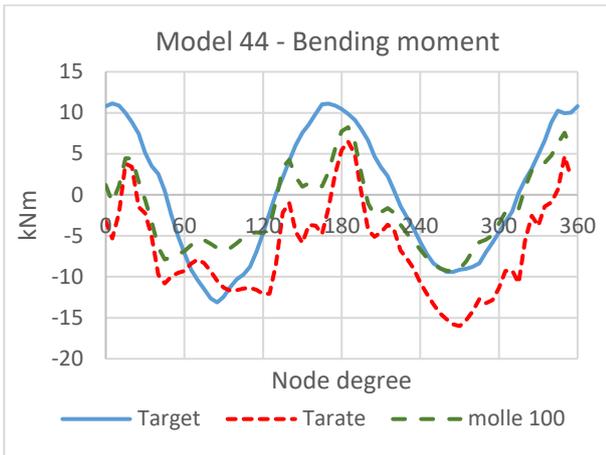


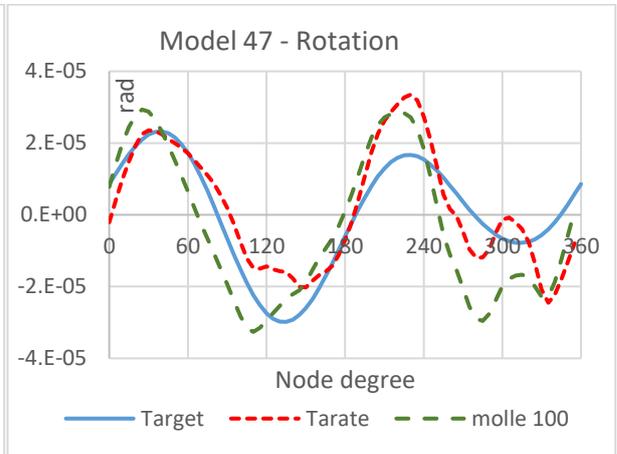
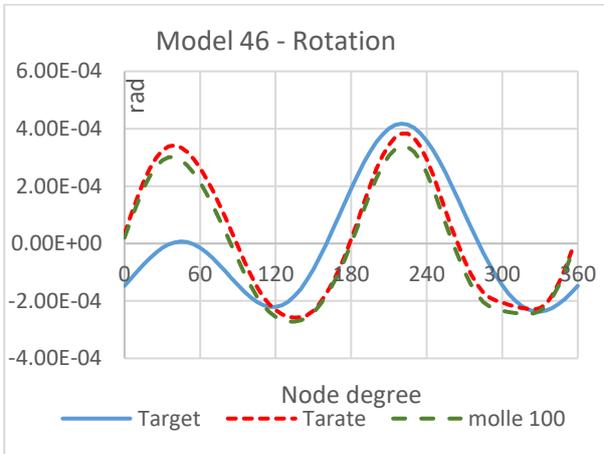
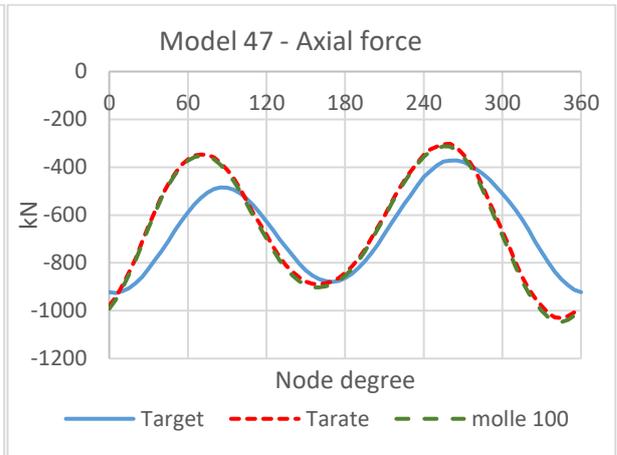
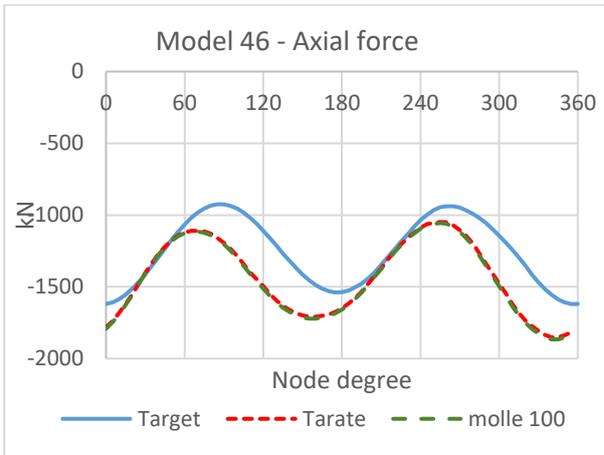
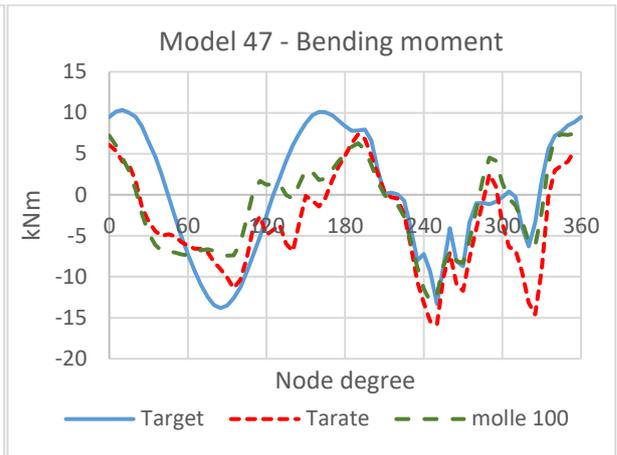
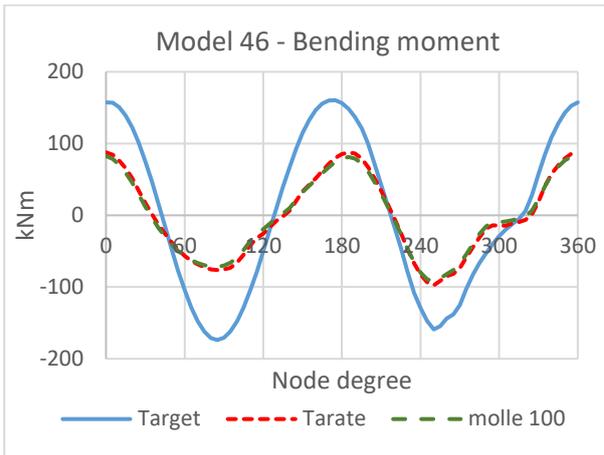


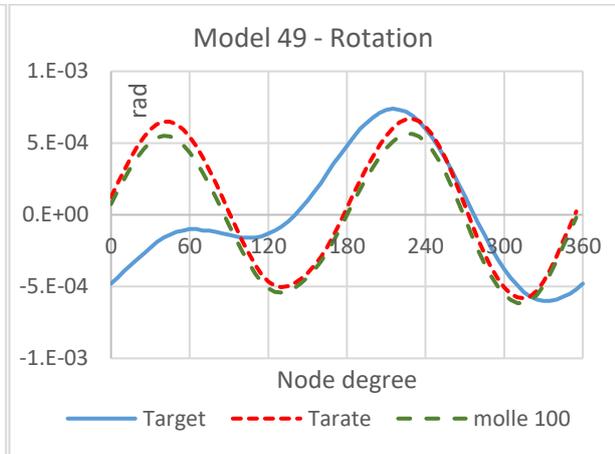
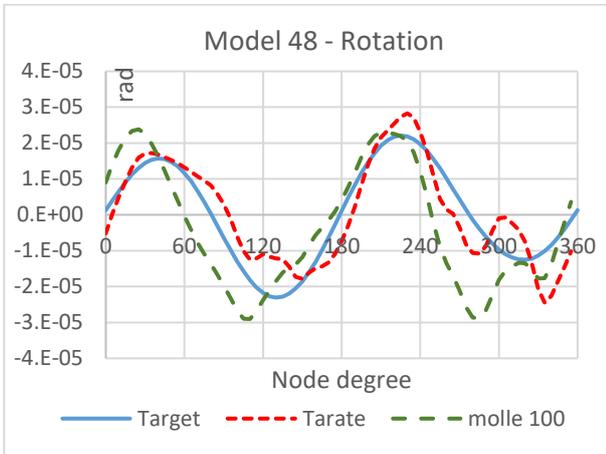
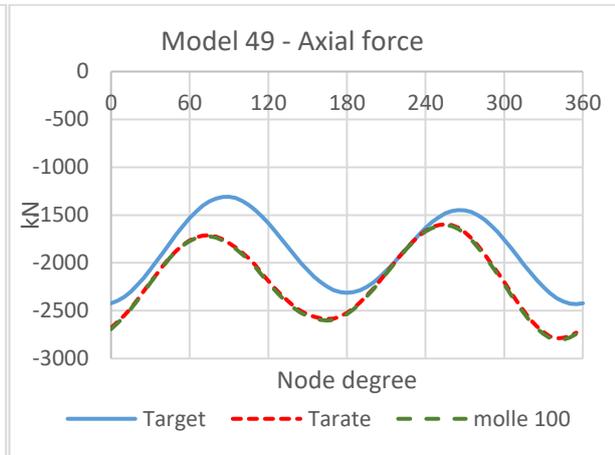
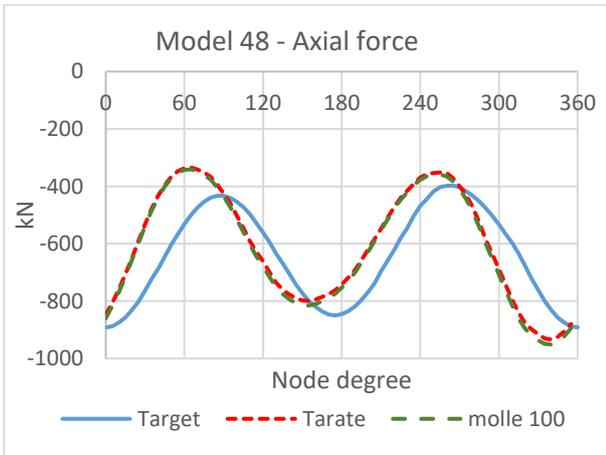
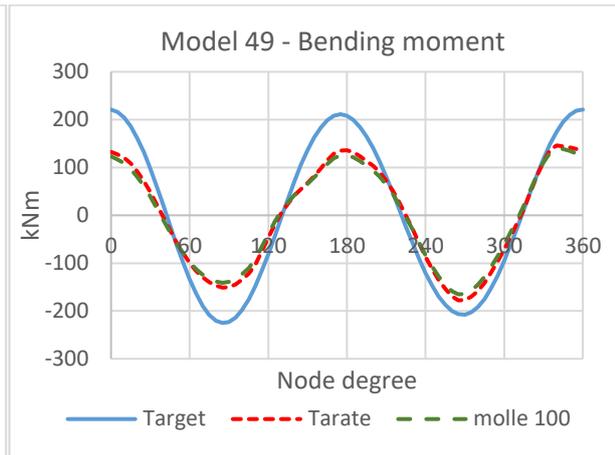
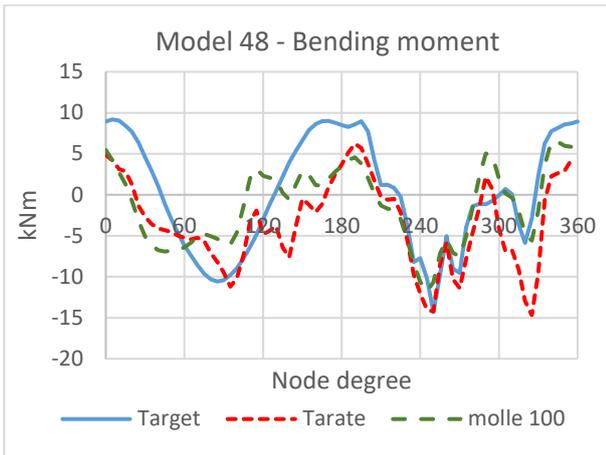


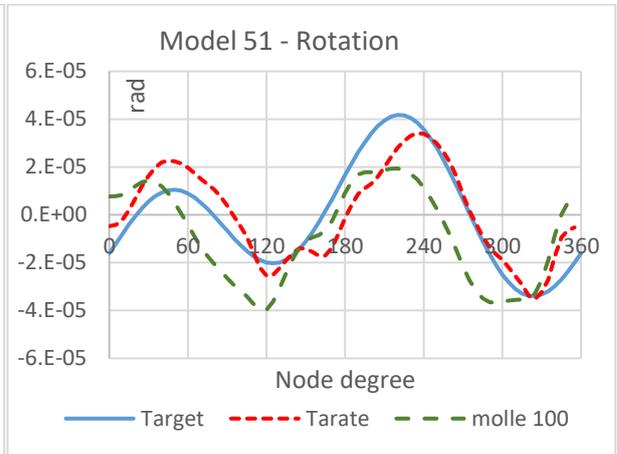
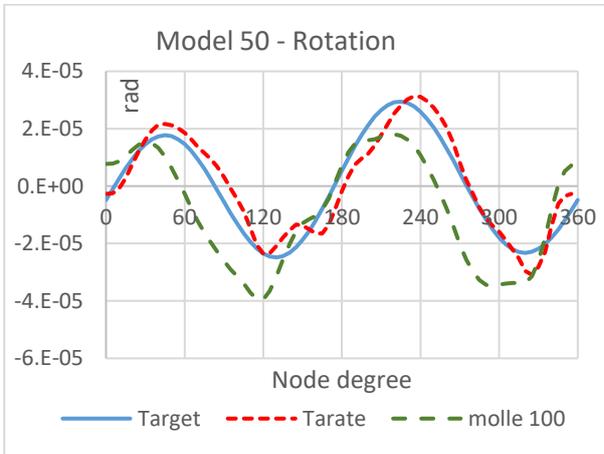
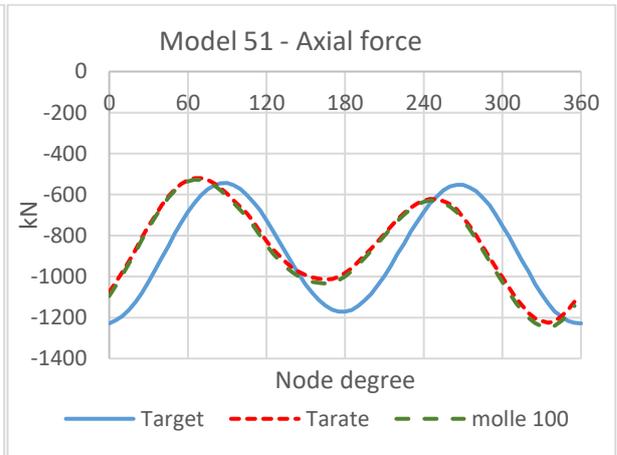
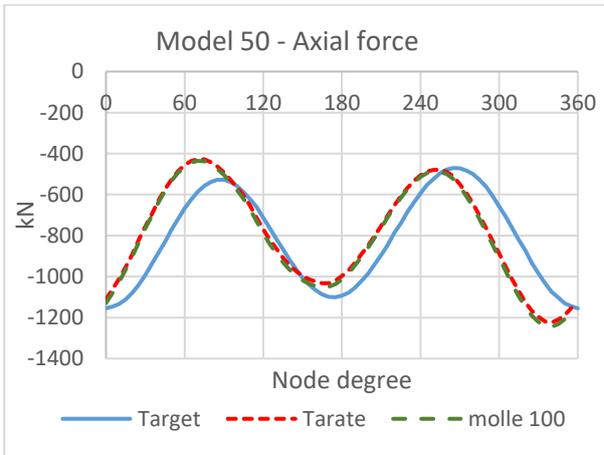
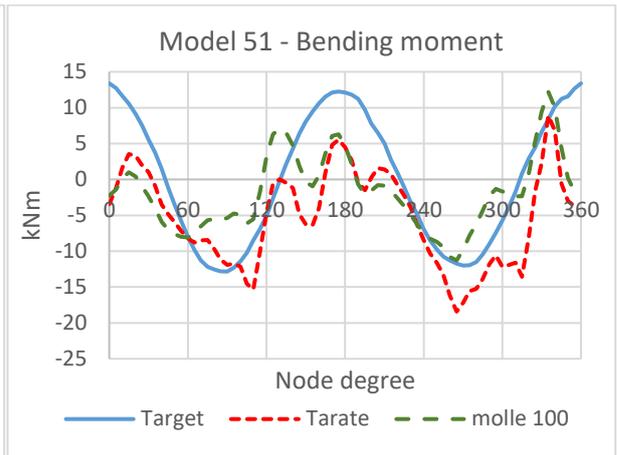
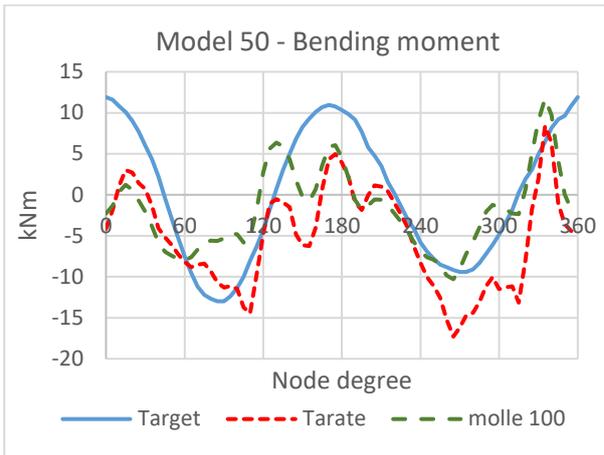


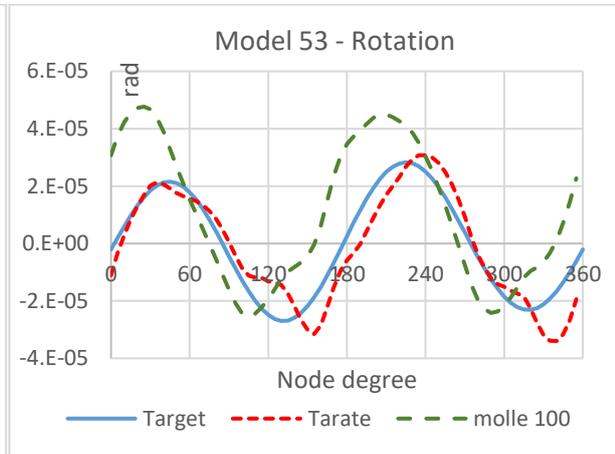
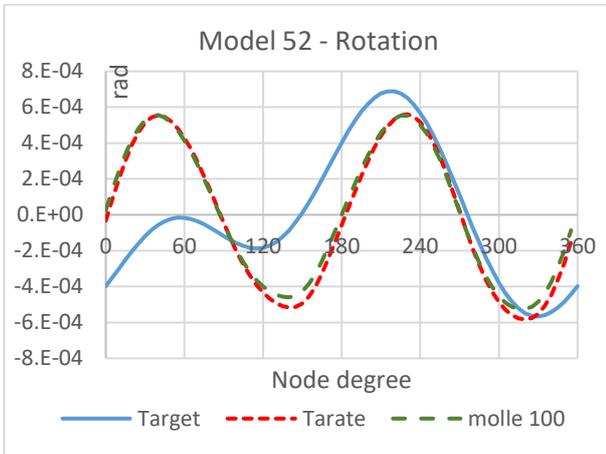
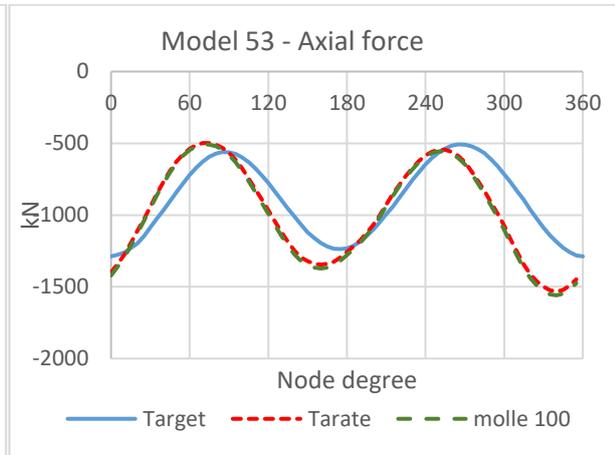
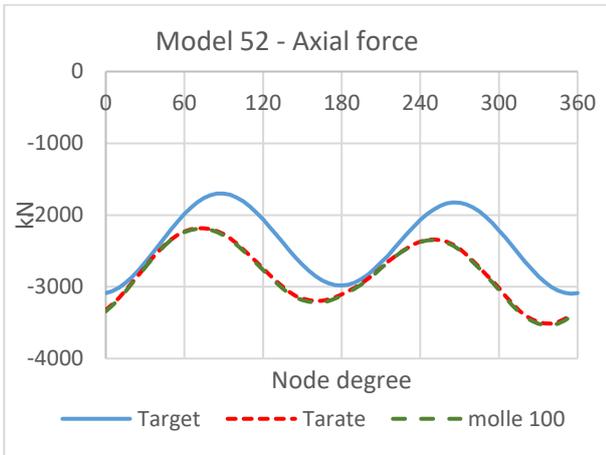
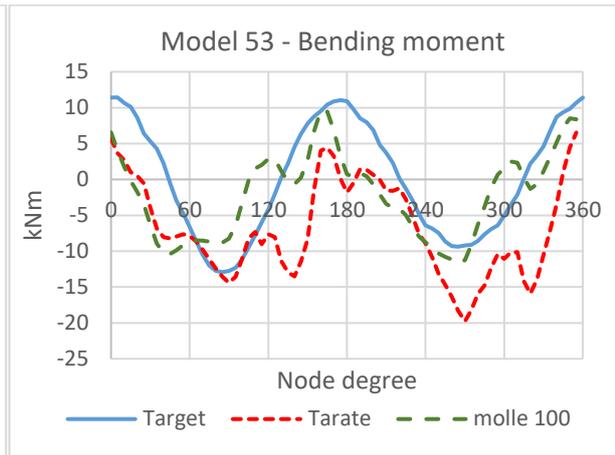
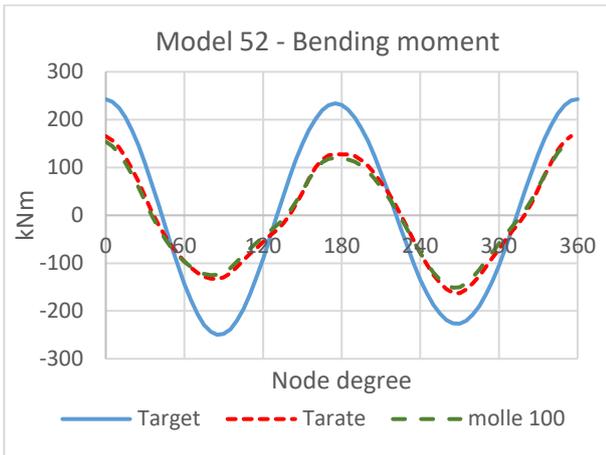


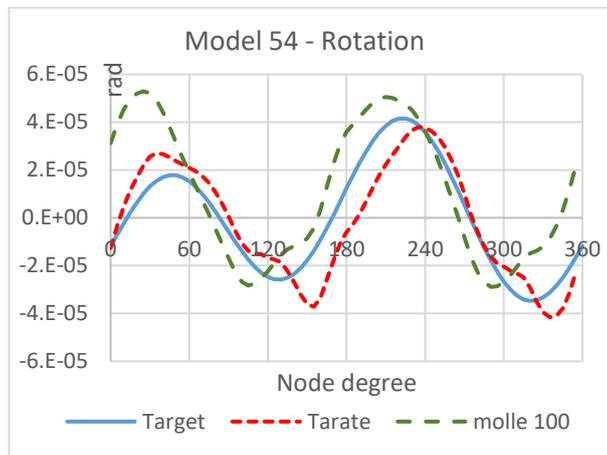
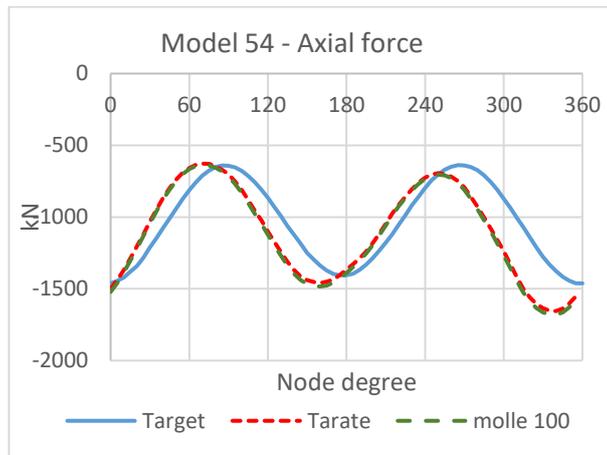
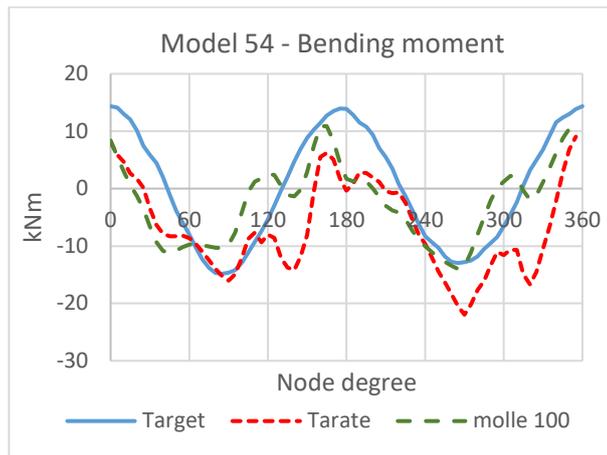












Algoritmo Genetico modificato

```
##### ----- ALGORITMO GENETICO -----
import re,os,sys,shutil,random,datetime
import pandas as pd
import numpy as np
import comtypes.client
import matplotlib.pyplot as plt
import math as math
import winsound

#-----ISTRUZIONI PER FAR DIALOGARE PYTHON E SAP2000-----
#set the following flag to True to attach to an existing instance of the program
#otherwise a new instance of the program will be started
AttachToInstance = False
#set the following flag to True to manually specify the path to SAP2000.exe
#this allows for a connection to a version of SAP2000 other than the latest installation
#otherwise the latest installed version of SAP2000 will be launched
SpecifyPath = True
#if the above flag is set to True, specify the path to SAP2000 below
ProgramPath = 'C:/Program Files (x86)/Computers and Structures/SAP2000 19/SAP2000.exe'
#full path to the model
#set it to the desired path of your model
APIPath = 'C:\CSiAPIexample'
if not os.path.exists(APIPath):
    try:
        os.makedirs(APIPath)
    except OSError:
        pass
ModelPath = APIPath + os.sep + 'API_1-001.sdb'
if AttachToInstance:
    #attach to a running instance of SAP2000
    try:
        #get the active SapObject
        mySapObject = comtypes.client.GetActiveObject("CSI.SAP2000.API.SapObject")
    except (OSError, comtypes.COMError):
        print("No running instance of the program found or failed to attach.")
        sys.exit(-1)
else:
    #create API helper object
    helper = comtypes.client.CreateObject('SAP2000v19.Helper')
    helper = helper.QueryInterface(comtypes.gen.SAP2000v19.cHelper)
    if SpecifyPath:
        try:
            #create an instance of the SAPObject from the specified path
            mySapObject = helper.CreateObject(ProgramPath)
        except (OSError, comtypes.COMError):
            print("Cannot start a new instance of the program from " + ProgramPath)
            sys.exit(-1)
    else:
        try:
            #create an instance of the SAPObject from the latest installed SAP2000
            mySapObject = helper.CreateObjectProgID("CSI.SAP2000.API.SapObject")
```

```

except (OSError, comtypes.COMError):
    print("Cannot start a new instance of the program.")
    sys.exit(-1)
#-----
i=datetime.datetime.now()
print('Inizio alle ore: %s:%s:%s'%(i.hour,i.minute,i.second)) #Stampa l'ora di inizio dell'analisi
#-----DEFINIZIONE DEI TARGET-----
target= pd.read_csv('C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO GENETICO/Cartel
geotecnico_TARGET.csv', sep=';', index_col=False,float_precision='high') # FILE EXCEL CON TARGET NEI
12 NODI
target.fillna(0,inplace=True)
nodi=['1','6','12','18','24','30','36','42','48','54','60','66'] # 12 NODI MONITORATI
Momenti_target=target.iloc[:,1] #MOMENTI TARGET IN 12 NODI
Sforzi_normali_target=target.iloc[:,2] #SFORZI NORMALI TARGET IN 12 NODI
Rotazioni_target=target.iloc[:,3] #ROTAZIONI TARGET IN 12 NODI
#INPUT DELLE MEDIE DEI VALORI ASSOLUTI DEI TARGET:
Media_valori_assoluti_Momento=16.88381104 #valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale=1443.084934 #valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
Media_valori_assoluti_Rotazioni=3.16243E-05 #valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
#CARICO TARGET: valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
carichi= pd.read_csv('C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO GENETICO/Cartel geotecnico_CARICHI -
relax60.csv', sep=';', index_col=False,float_precision='high') # FILE EXCEL CON carichi NEI 72 NODI
carichi.fillna(0,inplace=True)
carico_radiale_target=carichi.iloc[:,1] #CARICO RADIALE IN 72 NODI
carico_tangenziale_target=carichi.iloc[:,2] #CARICO TANGENZIALE IN 72 NODI
print("\nCARICO RADIALE:\n")
print(carico_radiale_target)
print("\nCARICO TANGENZIALE:\n")
print(carico_tangenziale_target)
#-----Creazione DataBase delle leggi delle forme di carico-----
Carico_medio=float(input("\nInput carico medio radiale [kPa]: ") #CARICO RADIALE MEDIO !!!!!
direzione=input("\nInput Direzione: ")
abitanti=int(input("\nInput Numero di individui nella popolazione: "))
abitanti1=abitanti+1
abitanti2=int(abitanti/2)
elementi=abitanti*22

#LEGGI DI VARIAZIONE DELLO SFASAMENTO (teta) -----
# Legge 1
legge_1A=[i for i in range(int(direzione)-15,int(direzione)+15,5)]
legge_1B=[i for i in range(180+int(direzione)-15,180+int(direzione)+15,5)]
for i in range(0,len(legge_1A)):
    if legge_1A[i] <0:
        legge_1A[i]=(360-abs(legge_1A[i]))
    if legge_1A[i] >=360:
        legge_1A[i]=(abs(legge_1A[i])-360)
    if legge_1B[i] >=360:
        legge_1B[i]=(abs(legge_1B[i])-360)
legge_1=legge_1A+legge_1B
#Legge 2 #non utilizzata
legge_2A=[i for i in range(360-int(direzione)-30,360-int(direzione)+35,5)]
legge_2B=[i for i in range(180-int(direzione)-30,180-int(direzione)+35,5)]

```

```

for i in range(0,len(legge_2A)):
    if legge_2A[i] <0:
        legge_2A[i]=(360-abs(legge_2A[i]))
    if legge_2A[i] >=360:
        legge_2A[i]=(abs(legge_2A[i])-360)
    if legge_2B[i] <0:
        legge_2B[i]=(legge_2B[i]+360)
legge_2=legge_2A+legge_2B
#Legge 3 #non utilizzata
legge_3A=[i for i in range(90+int(direzione)-30,90+int(direzione)+35,5)]
legge_3B=[i for i in range(270+int(direzione)-30,270+int(direzione)+35,5)]
for i in range(0,len(legge_3A)):
    if legge_3A[i] >=360:
        legge_3A[i]=(abs(legge_3A[i])-360)
    if legge_3B[i] >=360:
        legge_3B[i]=(legge_3B[i]-360)
legge_3=legge_3A+legge_3B
#Legge 4 #non utilizzata
legge_4A=legge_3A
legge_4B=[i for i in range(240+int(direzione)-30,240+int(direzione)+35,5)]
for i in range(0,len(legge_4B)):
    if legge_4A[i] >=360:
        legge_4A[i]=(abs(legge_4A[i])-360)
    if legge_4B[i] >=360:
        legge_4B[i]=(legge_4B[i]-360)
legge_4=legge_4A+legge_4B

pd.set_option('display.max_columns', None)
pd.set_option('display.width', 2000)
pd.set_option('display.max_colwidth', 1)

#DEFINIZIONE DEI SIMBOLI PER L'IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI CHE DEFINISCONO LE FORME DI
CARICO (teta, alfa, beta, gamma, delta)
colonne=['\u03B1\u2081','\u03B2\u2081','\u03B3\u2081','\u03B4\u2081','\u03B5\u2081','\u03B6\u2081',
'\u03B7\u2081','\u03B8\u2081','\u03B9\u2081','\u03BA\u2081','\u03BB\u2081','\u03BC\u2081','\u03BD\u2081',
'\u03BE\u2081','\u03BF\u2081','\u03C0\u2081','\u03C1\u2081','\u03C2\u2081','\u03C3\u2081','\u03C4\u2081',
'\u03C5\u2081','\u03C6\u2081','\u03C7\u2081','\u03C8\u2081','\u03C9\u2081','\u03D0\u2081','Punteggio','Genere']

#CREAZIONE DI UN DATAFRAME (di zeri) dove verranno inseriti i 24 individui delle generazioni n>1
Generazione_n = pd.DataFrame(np.zeros(elementi).reshape((abitanti,22)), columns = colonne ,
index=np.arange(1,abitanti1),dtype=object)

#CREAZIONE DI UN DATAFRAME (di zeri) dove verranno inseriti gli individui con punteggio massimo in
ogni generazione (dalla prima alla decima)
Massimi=pd.DataFrame(np.zeros(220).reshape((10,22)), columns = colonne,
index=np.arange(0,10),dtype=object)

#GENERAZIONE RANDOM DEI PARAMETRI CHE IDENTIFICHERANNO GLI INDIVIDUI DELLA PRIMA
GENERAZIONE (teta, alfa, beta, gamma, delta)
#Tali parametri verranno inseriti nel DataFrame definito in seguito:
S_A, Fs_A, S_B, Fs_B, S_C, Fs_C, T_A, Ft_A, T_B, Ft_B, T_C, Ft_C, CR1, Fcr_1, CR2, Fcr_2, CT1, Fct_1, CT2,
Fct_2 =([i for i in range(20))

```

```

for k in range (0,abitanti): #coefficienti di amplificazione delle forme d'onda
    Sp=300                #ATTENZIONE: Valori da tarare !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
    Tp=500                #ATTENZIONE: Valori da tarare !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
    LIMs=int(0.3*Sp)
    LIMt=int(0.1*Tp)
    Fattore_Sb=[x for x in range(LIMs,Sp+5,5)]
    Fattore_Sa=[x for x in range(-(LIMs)-5,(LIMs)+5,5)]
    Fattore_Tc=[x for x in range(0,Tp,5)]
    Fattore_Tb=[x for x in range(-(LIMt)-5,(LIMt)+5,5)]
    for k in range(0,20):
        Fattore_Tb.append(0)
        Fattore_Sa.append(0)
        Fattore_C=Fattore_Sa #NON USATO
    #Assegnazione casuale dei parametri delle forme d'onda
    S_A.append(np.random.choice(Fattore_Sa)) # fattore alfa_1
    Fs_A.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_1
    S_B.append(np.random.choice(Fattore_Sb)) # fattore alfa_2
    Fs_B.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_2
    S_C.append(np.random.choice(Fattore_C)) # fattore alfa_3 #NON USATO
    Fs_C.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_3 #NON USATO
    T_A.append(np.random.choice(Fattore_C)) # fattore beta_1 #NON USATO
    Ft_A.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_4 #NON USATO
    T_B.append(np.random.choice(Fattore_Tb)) # fattore beta_2
    Ft_B.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_5
    T_C.append(np.random.choice(Fattore_Tc)) # fattore beta_3
    Ft_C.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_6
    CR1.append(np.random.choice(Fattore_C)) # fattore gamma_1
    Fcr_1.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_7 #NON USATO
    CR2.append(np.random.choice(Fattore_C)) # fattore gamma_2 #NON USATO
    Fcr_2.append(np.random.choice(legge_1)) # teta_8 #NON USATO
    CT1.append(np.random.choice(Fattore_C)) # fattore delta_1 #NON USATO
    CT2.append(np.random.choice(Fattore_C)) # fattore delta_2 #NON USATO
    for j in range(0,len(CT1)): #NON USATO
        a=[x for x in range(0,1505,5)] #NON USATO
        random.shuffle(a)
        if a[5]< CT1[j]:
            CT1[j]=CT1[j]*-1
            Fct_1.append(np.random.choice(legge_4B)) # teta_9 #NON USATO
        else:
            Fct_1.append(np.random.choice(legge_4A)) # teta_9 #NON USATO
        if a[5]< CT2[j]:
            CT2[j]=CT2[j]*-1
            Fct_2.append(np.random.choice(legge_4B)) # teta_10 #NON USATO
        else:
            Fct_2.append(np.random.choice(legge_4A)) # teta_10 #NON USATO

#Dizionario che relaziona i simboli dei parametri (teta, alfa, beta, gamma, delta) alle variabili in cui sono
contenuti i loro valori numerici
dati={'\u03B1\u2081':S_A,\u03B2\u2081':Fs_A,\u03B3\u2082':S_B,\u03B4\u2082':Fs_B,\u03B5\u2083':S_C,\u03B6\u2083':Fs_C,\u03B7\u2081':T_A,\u03B8\u2084':Ft_A,\u03B9\u2082':T_B,\u03BA\u2085':Ft_B,\u03BB\u2083':T_C,\u03BC\u2086':Ft_C,\u03BD\u2081':CR1,\u03BE\u2087':Fcr_1,\u03BF\u2083\u2081':

```

```
2082':CR2,'\u03B8\u2088':Fcr_2,'\u03B4\u2081':CT1,'\u03B8\u2089':Fct_1,'\u03B4\u2082':CT2,'\u03B8\u2081\u2080':Fct_2}
```

```
#CREAZIONE DATAFRAME IN CUI VERRANNO INSERITI GLI INDIVIDUI DELLA GENERAZIONE 1
```

```
Generazione_1 =
```

```
pd.DataFrame(dati,columns=['\u03B1\u2081','\u03B8\u2081','\u03B1\u2082','\u03B8\u2082','\u03B1\u2083','\u03B8\u2083','\u03B2\u2081','\u03B8\u2084','\u03B2\u2082','\u03B8\u2085','\u03B2\u2083','\u03B8\u2086','\u03B3\u2081','\u03B8\u2087','\u03B3\u2082','\u03B8\u2088','\u03B4\u2081','\u03B8\u2089','\u03B4\u2082','\u03B8\u2081\u2080','Punteggio','Genere'], index=np.arange(1,abitanti1))
Generazione_1.fillna(0,inplace=True)
print(Generazione_1.to_string()+'\n')
```

```
#Pandas che raccoglie tutti i carichi RADIALI della prima generazione
```

```
Radial_loads=pd.DataFrame(np.zeros(abitanti*72).reshape(abitanti,72), columns=np.arange(1,73), index=np.arange(1,abitanti1),dtype=object)
```

```
#Pandas che raccoglie tutti i carichi TANGENZIALI della prima generazione
```

```
Tangential_loads=pd.DataFrame(np.zeros(abitanti*72).reshape(abitanti,72), columns=np.arange(1,73), index=np.arange(1,abitanti1),dtype=object)
```

```
#CON L'INIZIO DEL SEGUENTE CICLO FOR, PYTHON ESTRAE DAL DATAFRAME APPENA RIEMPITO (GENERAZIONE_1) GLI INDIVIDUI (CARICHI), UNO ALLA VOLTA (Individuo e-esimo della Generazione_1)
```

```
#Quindi estrae l'individuo e-esimo,
```

```
#ne ricava i carichi per ciascuno dei 72 nodi,
```

```
#avvia SAP2000 e calcola per il suddetto individuo M,N e rotazioni,
```

```
#al fine di calcolare il punteggio per ciascun individuo.
```

```
for e in range(1,len(Generazione_1)+1): #CICLO FOR PRINCIPALE***** (Individuo e-esimo della Generazione_1)
```

```
    #CARICO CONCENTRATO RADIALE ***non usato***
```

```
    Concentrato_radiale1=[0 for x in range(1,73)]
```

```
    if math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2087']/5)>=68:
```

```
        a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2087']/5)-72
```

```
    else:
```

```
        a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2087']/5)
```

```
    Concentrato_radiale1[a]=1
```

```
    Concentrato_radiale1[a-1]=1
```

```
    Concentrato_radiale1[a-2]=1
```

```
    Concentrato_radiale1[a+1]=1
```

```
    Concentrato_radiale1[a+2]=1
```

```
    Concentrato_radiale1.append(Concentrato_radiale1[0])
```

```
    Concentrato_radiale2=[0 for x in range(1,73)]
```

```
    if math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2088']/5)>=68:
```

```
        a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2088']/5)-72
```

```
    else:
```

```
        a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2088']/5)
```

```
    Concentrato_radiale2[a]=1
```

```
    Concentrato_radiale2[a-1]=1
```

```
    Concentrato_radiale2[a-2]=1
```

```
    Concentrato_radiale2[a+1]=1
```

```
    Concentrato_radiale2[a+2]=1
```

```

Concentrato_radiale2.append(Concentrato_radiale2[0])

#CARICO CONCENTRATO TANGENZIALE ***non usato***
Concentrato_tangenziale1=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2089']/5)>=68:
    a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2089']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2089']/5)
Concentrato_tangenziale1[a]=1
Concentrato_tangenziale1[a-1]=1
Concentrato_tangenziale1[a-2]=1
Concentrato_tangenziale1[a+1]=1
Concentrato_tangenziale1[a+2]=1
Concentrato_tangenziale1.append(Concentrato_tangenziale1[0])
Concentrato_tangenziale2=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2081\u2080']/5)>=68:
    a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2081\u2080']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2081\u2080']/5)
Concentrato_tangenziale2[a]=1
Concentrato_tangenziale2[a-1]=1
Concentrato_tangenziale2[a-2]=1
Concentrato_tangenziale2[a+1]=1
Concentrato_tangenziale2[a+2]=1
Concentrato_tangenziale2.append(Concentrato_tangenziale2[0])
Concentrato_tangenziale2.append(Concentrato_tangenziale2[0])

#CARICO RADIALE e CARICO TANGENZIALE
Radiale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
Tangenziale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
#CARICO RADIALE
for v in range (0,73):
    somma_A=round(math.radians(v*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2081']),4)
    numero_A=round(math.cos(somma_A),3)
    somma_B=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2082'])),4)
    numero_B=round((-math.cos(somma_B)),3)
    somma_C=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2083'])),4)
    numero_C=0 #funzione annullata
    numero1=0 #concentrato annullato
    numero2=0 #concentrato annullato
    #numero1=Concentrato_radiale1[v]
    #numero2=Concentrato_radiale2[v]
#CARICO RADIALE:

Radiale.iloc[v,0]=Generazione_1.loc[e,'\u03B1\u2081']*numero_A+Generazione_1.loc[e,'\u03B1\u2082']
'*numero_B+Generazione_1.loc[e,'\u03B1\u2083']*numero_C+numero1*Generazione_1.loc[e,'\u03B3
\u2081']+numero2*Generazione_1.loc[e,'\u03B3\u2082']+Carico_medio
    Radial_loads.iloc[e-1,v-
1]=Generazione_1.loc[e,'\u03B1\u2081']*numero_A+Generazione_1.loc[e,'\u03B1\u2082']*numero_B
+Generazione_1.loc[e,'\u03B1\u2083']*numero_C+numero1*Generazione_1.loc[e,'\u03B3\u2081']+nu
mero2*Generazione_1.loc[e,'\u03B3\u2082']+Carico_medio
    #print(Radiale)

```

```

#CARICO TANGENZIALE
for q in range (0,73):
    t=q*5
    if t<=Generazione_1.loc[2,'\u03B8\u2084']:

somma_A=round(0.5*(math.radians(q*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2084']*-1)),4)
    numero_A=0 #funzione annullata
    else:

somma_A=round(0.5*(math.radians(q*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2084']*-1)),4)
    numero_A=0 #funzione annullata
    somma_B=round(math.radians(q*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2085']),4)
    numero_B=round(math.sin(somma_B),3)
    somma_C=round(2*(math.radians(q*5)+math.radians(Generazione_1.loc[e,'\u03B8\u2086'])),4)
    numero_C=round(math.sin(somma_C),3)
    numero3=0 #concentrato annullato
    numero4=0 #concentrato annullato
    #numero3=Concentrato_tangenziale1[q]
    #numero4=Concentrato_tangenziale2[q]
    #CARICO TANGENZIALE:

Tangenziale.iloc[q,0]=numero_A*Generazione_1.loc[e,'\u03B2\u2081']+numero_B*Generazione_1.loc[
e,'\u03B2\u2082']+numero_C*Generazione_1.loc[e,'\u03B2\u2083']+numero3*Generazione_1.loc[e,'\u
03B4\u2081']+numero4*Generazione_1.loc[e,'\u03B4\u2082']
    Tangential_loads.iloc[e-1,q-
1]=numero_A*Generazione_1.loc[e,'\u03B2\u2081']+numero_B*Generazione_1.loc[e,'\u03B2\u2082']
+numero_C*Generazione_1.loc[e,'\u03B2\u2083']+numero3*Generazione_1.loc[e,'\u03B4\u2081']+nu
mero4*Generazione_1.loc[e,'\u03B4\u2082']
    #print(Tangenziale)

#AVVIO DI SAP2000 (PRIMO)-----
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO GENETICO/molle100.s2k' #FILE GEOMETRIA E
MODELLO STRUTTURALE SAP2000
ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1,0] !=0:
        if Radiale.iloc[i,0] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1,0]),float(Radiale.iloc[i,0]),'Local',False,False,0)
        for i in range(1,73):
            if Tangenziale.iloc[i-1,0] !=0:
                if Tangenziale.iloc[i,0] !=0:
                    ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1,0]),float(Tangenziale.iloc[i,0]),'Local',False,False,0)
#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()
#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []

```

```

sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]
for r in range(1,73):
    Joint = str(r)
    FrameName1 = str(r)
    Object = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 = ([] for i in
range(13))
    delete = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object, NumberResults , Obj,
ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
    Momenti_nuovi.append(ret[13])
    sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
    ObjectElm = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3 = ([] for i in
range(13))
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    [ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3] =
mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase,
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
    ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3]
    Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])
    Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
    P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
    Rotazioni_della_generazione =Rotazioni_nuovi
#FINE DEL PRIMO UTILIZZO DI SAP2000-----

```

#CALCOLO DEI PUNTEGGI PER OGNI INDIVIDUO DELLA POPOLAZIONE

```

p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=([] for i in range(3))
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#(prendo solo un valore per nodo)
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])

```

#Punteggio di momento flettente

errore_parziale_momento =[]

peso_momento=1#***** PESO *****

```

errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=12
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==nodi[j]:
            target_M=Momenti_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
            errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
            errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)
            errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
            Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
            #Punteggio di sforzo normale
            peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****
            errore_N=[]
            errore_parziale_sforzo_normale=[]
            for z in range(0,72):
                for j in range(0,len(nodi)):
                    if str(z)==nodi[j]:
                        target_N=Sforzi_normali_target[j]
                        prova_N=c[z-1]
                        errore_N.append((target_N-prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
                        errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
                        errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
                        errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)

errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazio
ni
            Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
            #Punteggio di rotazione
            numero_nodi_strumentati_spostamenti=12
            peso_rotazione=1 #***** PESO *****
            errore_R=[]
            errore_parziale_rotazione=[]
            for z in range(0,72):
                for j in range(0,len(nodi)):
                    if str(z)==nodi[j]:
                        target_R=Rotazioni_target[j]
                        prova_R=d[z-1]
                        errore_R.append((target_R-prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)
                        errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
                        errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])
                        errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)
                        errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
                        Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
            #PUNTEGGIO DELL'INDIVIDUO e-esimo della prima generazione

```

```

Punteggio=1/((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo
_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
    Generazione_1.loc[e,'Punteggio']=Punteggio
    print(Generazione_1.to_string())

#####PLOTTAGGIO FORME CARICO RADIALE della generazione 1
plt.ion()
plt.figure()
plt.rc('xtick', labels=8)
plt.rc('ytick', labels=10)
plt.rc('figure',figsize=(20,16))
plt.title('External Radial Action')
plt.ylabel('Sigma [kN/m]')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),carico_radiale_target,'r--.',linewidth=2,label= 'Target')
for m in range (1, abitanti1):
    plt.plot(np.arange(0, 360,5),Radial_loads.loc[m,:],linewidth=1)
plt.savefig('C:\\Users\\Windows\\Desktop\\Analisi forme di carico '+SIGMA '+str(m)+'.png',dpi=800)
plt.close()
##### PLOTTAGGIO FORME CARICO TANGENZIALE della generazione 1
plt.ion()
plt.figure()
plt.rc('xtick', labels=8)
plt.rc('ytick', labels=10)
plt.rc('figure',figsize=(20,16))
plt.title('External Tangential Action')
plt.ylabel('Tau [kN/m]')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),carico_tangenziale_target,'r--.',linewidth=2,label= 'Target')
for mm in range (1, abitanti1):
    plt.plot(np.arange(0, 360,5),Tangential_loads.loc[mm,:],linewidth=1)
plt.savefig('C:\\Users\\Windows\\Desktop\\Analisi forme di carico '+TAU '+str(mm)+'.png',dpi=800)
plt.close()

#FINE DEL PRONCIPALE CICLO FOR PRINCIPALE!!!-----
#ORA SI INIZIA A LAVORARE SULLE GENERAZIONI SUCCESSIVE ALLA PRIMA-----

for n in range (1,11): #----- n = Numero di generazioni -----
    if n==1:
        print(Generazione_1.to_string())
        Punteggi = list(Generazione_1.loc[:, 'Punteggio'])
        Punteggio_target=2*(sum(Punteggi)/len(Punteggi))
        Generazione=Generazione_1.copy()
        Frame=Generazione.sort_values(by='Punteggio', ascending=False).reset_index().drop(['index'],
axis=1)
    else:
        print("QUESTA E' LA GENERAZIONE: "+str(n) +"\\n")
        print(Generazione_n.to_string())
        Punteggi = list(Generazione_n.loc[:, 'Punteggio'])
        Punteggio_target=2*(sum(Punteggi)/len(Punteggi))
        Generazione=Generazione_n.copy()

```

```

Frame=Generazione.sort_values(by='Punteggio', ascending=False).reset_index().drop(['index'],
axis=1)
Media =sum(Punteggi)/len(Punteggi)
print('Media: ' +str(Media))          #stampa a video la media dei punteggi della generazione
Massimo =Generazione.iloc[0:abitanti,20].max()
print('Massimo: '+str(Massimo))      #stampa a video il massino punteggio della generazione

#SE SIAMO A CONVERGENZA NON CREARE UNA NUOVA GENERAZIONE quindi fermati con la
riproduzione
#e dammi i risultati dell'individuo migliore in assoluto che mi hai trovato(vedi codice seguente alla
riproduzione).
if Media/Massimo >= 0.95:
    print('il massimo è: ' +str(Generazione.iloc[0:abitanti,20].max()))
    print('la media è: ' +str(Media))
    print('\n!!!!!!!!!!!! SONO ARRIVATO A CONVERGENZA SIR !!!!!!!!!!!!!')
    break
#SE *NON* SIAMO A CONVERGENZA allora:
else:
    #INIZIO DELLA RIPRODUZIONE-----
    s=-1
    for w in range(0,abitanti2):
        for h in range(0,2):
            s+=1
            Madre_n=Frame.loc[w,:] #*****SCELTA DELLA MADRE*****

            #*****ORA SI PROCEDE CON LA SCELTA DEL PADRE*****
            copia=Frame.copy()
            copia.loc[w,'Punteggio']=0
            lista=copia.loc[:, 'Punteggio']
            Punteggi = sum(lista)
            obbiettivo=np.random.uniform(0,Punteggi)
            r=[]
            for o in range(0,len(lista)):
                a=copia.loc[o,'Punteggio']
                #print(a)
                if a>=obbiettivo:
                    Padre_n=Frame.loc[o,:]
                    break
            else:
                r.append(a)
                somma=sum(r)
                if somma >=obbiettivo:
                    Padre_n=Frame.loc[o,:]
                    break

            pd.set_option('display.max_columns', None)
            pd.set_option('display.width', 2000)
            pd.set_option('display.max_colwidth', 1)

            Media1,Media2, Media3, Media4, Media5, Media6=(np.zeros(20) for i in range(6)) #i-
esimo FIGLIO (SONO IN TUTTO 6 FIGLI)

```

for p in range(0,20): # p-esimo parametro tra i 20 parametri (teta, alfa, beta, gamma, delta)

#calcolo le MEDIE ARITMETICHE tra i parametri del padre e della madre

Media1[p]=round((Madre_n[p]+Padre_n[p])/2,2)

Media2[p]=round((Madre_n[p]+Padre_n[p])/2,2)

Media3[p]=round((Madre_n[p]+Padre_n[p])/2,2)

Media4[p]=round((Madre_n[p]+Padre_n[p])/2,2)

Media5[p]=round((Madre_n[p]+Padre_n[p])/2,2)

#calcolo le MEDIE PONDERATE tra i parametri del padre e della madre

Media6[p]=round(((Madre_n.iloc[p])*Madre_n.loc['Punteggio'] + (Padre_n.iloc[p])*Padre_n.loc['Punteggio'])/(Madre_n.loc['Punteggio']+Padre_n.loc['Punteggio']),2)

for t in range(1,21,2):

Media1[t]=Madre_n[t]

Media2[t]=Padre_n[t]

for k in range(0,20,2):

Media3[k]=Madre_n[k]

Media4[k]=Padre_n[k]

assegno a ciascuno dei 20 parametri, il valore che assume per ciascun individuo

della famiglia

S_1=[Madre_n[0],Padre_n[0],Media1[0],Media2[0],Media3[0],Media4[0],Media5[0],Media6[0]]

Fs_1=[Madre_n[1],Padre_n[1],Media1[1],Media2[1],Media3[1],Media4[1],Media5[1],Media6[1]]

S_2=[Madre_n[2],Padre_n[2],Media1[2],Media2[2],Media3[2],Media4[2],Media5[2],Media6[2]]

Fs_2=[Madre_n[3],Padre_n[3],Media1[3],Media2[3],Media3[3],Media4[3],Media5[3],Media6[3]]

S_3=[Madre_n[4],Padre_n[4],Media1[4],Media2[4],Media3[4],Media4[4],Media5[4],Media6[4]]

Fs_3=[Madre_n[5],Padre_n[5],Media1[5],Media2[5],Media3[5],Media4[5],Media5[5],Media6[5]]

T_1=[Madre_n[6],Padre_n[6],Media1[6],Media2[6],Media3[6],Media4[6],Media5[6],Media6[6]]

Ft_1=[Madre_n[7],Padre_n[7],Media1[7],Media2[7],Media3[7],Media4[7],Media5[7],Media6[7]]

T_2=[Madre_n[8],Padre_n[8],Media1[8],Media2[8],Media3[8],Media4[8],Media5[8],Media6[8]]

Ft_2=[Madre_n[9],Padre_n[9],Media1[9],Media2[9],Media3[9],Media4[9],Media5[9],Media6[9]]

T_3=[Madre_n[10],Padre_n[10],Media1[10],Media2[10],Media3[10],Media4[10],Media5[10],Media6[10]]

Ft_3=[Madre_n[11],Padre_n[11],Media1[11],Media2[11],Media3[11],Media4[11],Media5[11],Media6[11]]

CR_1=[Madre_n[12],Padre_n[12],Media1[12],Media2[12],Media3[12],Media4[12],Media5[12],Media6[12]]

FCR_1=[Madre_n[13],Padre_n[13],Media1[13],Media2[13],Media3[13],Media4[13],Media5[13],Media6[13]]

CR_2=[Madre_n[14],Padre_n[14],Media1[14],Media2[14],Media3[14],Media4[14],Media5[14],Media6[14]]

FCR_2=[Madre_n[15],Padre_n[15],Media1[15],Media2[15],Media3[15],Media4[15],Media5[15],Media6[15]]

CT_1=[Madre_n[16],Padre_n[16],Media1[16],Media2[16],Media3[16],Media4[16],Media5[16],Media6[16]]

FCT_1=[Madre_n[17],Padre_n[17],Media1[17],Media2[17],Media3[17],Media4[17],Media5[17],Media6[17]]

CT_2=[Madre_n[18],Padre_n[18],Media1[18],Media2[18],Media3[18],Media4[18],Media5[18],Media6[18]]

FCT_2=[Madre_n[19],Padre_n[19],Media1[19],Media2[19],Media3[19],Media4[19],Media5[19],Media6[19]]

```

#RIEMPIO IL DATAFRAME FAMIGLIA
dati_famiglia={'\u03B1\u2081':S_1,'\u03B8\u2081':Fs_1,'\u03B1\u2082':S_2,'\u03B8\u2082':Fs_2,'\u03B1\u2083':S_3,'\u03B8\u2083':Fs_3,'\u03B2\u2081':T_1,'\u03B8\u2084':Ft_1,'\u03B2\u2082':T_2,'\u03B8\u2085':Ft_2,'\u03B2\u2083':T_3,'\u03B8\u2086':Ft_3,'\u03B3\u2081':CR_1,'\u03B8\u2087':FCR_1,'\u03B3\u2082':CR_2,'\u03B8\u2088':FCR_2,'\u03B4\u2081':CT_1,'\u03B8\u2089':FCT_1,'\u03B4\u2082':CT_2,'\u03B8\u2081\u2080':FCT_2}
Famiglia= pd.DataFrame(dati_famiglia,columns =
['\u03B1\u2081','\u03B8\u2081','\u03B1\u2082','\u03B8\u2082','\u03B1\u2083','\u03B8\u2083','\u03B2\u2081','\u03B8\u2084','\u03B2\u2082','\u03B8\u2085','\u03B2\u2083','\u03B8\u2086','\u03B3\u2081','\u03B8\u2087','\u03B3\u2082','\u03B3\u2083','\u03B8\u2088','\u03B4\u2081','\u03B8\u2089','\u03B4\u2082','\u03B8\u2081\u2080','Punteggio','Genere'],index=np.arange(1,9))
Famiglia.fillna(0,inplace=True)

#assegnazione del genere agli individui della famiglia
Famiglia['Genere']=[0,0,1,1,2,2,3,4]
#conosco già i punteggi della madre e del padre
Famiglia.loc[1,'Punteggio']=Madre_n[20]
Famiglia.loc[2,'Punteggio']=Padre_n[20]
print("\nQUESTA E' LA FAMIGLIA " +str(s)+ " della GENERAZIONE "+ str(n)) #?!?!?!?!?!
print(Famiglia.to_string())

##!!!!!!!!!!!!!!QUI SI ENTRA NEL CICLO FOR SECONDARIO OVVERO DOVE PYTHON ESTRAE L'y-esimo FIGLIO DELLA FAMIGLIA E LANCIANDO SAP2000 NE CALCOLA IL PUNTEGGIO!!!!!!!!!!
for y in range(3,9):
    print("\nINDIVIDUO "+str(y)+ " - della FAMIGLIA "+str(s)+" - della GENERAZIONE "+str(n)+"\n"+str(Famiglia.loc[y]))
    if y>=3:
        if Famiglia.loc[1,'Punteggio']==Famiglia.loc[2,'Punteggio']:
            Famiglia.loc[7,'Punteggio']=Famiglia.loc[1,'Punteggio']
            Famiglia.loc[6,'Punteggio']=Famiglia.loc[1,'Punteggio']
            Famiglia.loc[5,'Punteggio']=Famiglia.loc[1,'Punteggio']
            Famiglia.loc[4,'Punteggio']=Famiglia.loc[1,'Punteggio']
            Famiglia.loc[3,'Punteggio']=Famiglia.loc[1,'Punteggio']
            break
    Concentrato_radiale1=[0 for x in range(1,73)]
    if math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2087']/5)>=68:
        a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2087']/5)-72
    else:
        a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2087']/5)
    Concentrato_radiale1[a]=1
    Concentrato_radiale1[a-1]=1
    Concentrato_radiale1[a-2]=1
    Concentrato_radiale1[a+1]=1
    Concentrato_radiale1[a+2]=1
    Concentrato_radiale1.append(Concentrato_radiale1[0])
    Concentrato_radiale2=[0 for x in range(1,73)]
    if math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2088']/5)>=68:
        a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2088']/5)-72
    else:
        a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2088']/5)
    Concentrato_radiale2[a]=1
    Concentrato_radiale2[a-1]=1

```

```

Concentrato_radiale2[a-2]=1
Concentrato_radiale2[a+1]=1
Concentrato_radiale2[a+2]=1
Concentrato_radiale2.append(Concentrato_radiale2[0])
Concentrato_tangenziale1=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2089']/5)>=68:
    a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2089']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2089']/5)
Concentrato_tangenziale1[a]=1
Concentrato_tangenziale1[a-1]=1
Concentrato_tangenziale1[a-2]=1
Concentrato_tangenziale1[a+1]=1
Concentrato_tangenziale1[a+2]=1
Concentrato_tangenziale1.append(Concentrato_tangenziale1[0])
Concentrato_tangenziale2=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2081\u2080']/5)>=68:
    a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2081\u2080']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2081\u2080']/5)
Concentrato_tangenziale2[a]=1
Concentrato_tangenziale2[a-1]=1
Concentrato_tangenziale2[a-2]=1
Concentrato_tangenziale2[a-3]=1
Concentrato_tangenziale2[a-4]=1
Concentrato_tangenziale2.append(Concentrato_tangenziale2[0])
#CARICHI DISTRIBUITI
Radiale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
Tangenziale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
#Carico Radiale
for v in range (0,73):

somma_A=round(math.radians(v*5)+math.radians(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2081']),4)
    numero_A=round(math.cos(somma_A),3)
    #print('Radiale A'+str(numero_A))

somma_B=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2082'])),4)
    numero_B=round(-(math.cos(somma_B)),3)
    #print('Radiale B'+str(numero_B))

somma_C=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2083'])),4)
    numero_C=0 #funzione annullata
    #print('Radiale C'+str(numero_C))
    numero1=0 #concentrato annullato
    numero2=0 #concentrato annullato
    #numero1=Concentrato_radiale1[v]
    #numero2=Concentrato_radiale2[v]

Radiale.iloc[v,0]=Famiglia.loc[y,'\u03B1\u2081']*numero_A+Famiglia.loc[y,'\u03B1\u2082']*numero_B+
Famiglia.loc[y,'\u03B1\u2083']*numero_C+numero1*Famiglia.loc[y,'\u03B3\u2081']+numero2*Famiglia
a.loc[y,'\u03B3\u2082']+Carico_medio
    #print(Radiale)

```

```

#Carico Tangenziale
for q in range (0,73):
    t=q*5
    if t<=Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2084']:

somma_A=round(0.5*(math.radians(q*5)+math.radians(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2084']*-1)),4)
    numero_A=0 #funzione annullata
    else:
somma_A=round(0.5*(math.radians(q*5)+math.radians(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2084']*-1)),4)
    numero_A=0 #funzione annullata
somma_B=round(math.radians(q*5)+math.radians(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2085']),4)
    numero_B=round(math.sin(somma_B),3)
somma_C=round(2*(math.radians(q*5)+math.radians(Famiglia.loc[y,'\u03B8\u2086'])),4)
    numero_C=round(math.sin(somma_C),3)
    numero3=0 #concentrato annullato
    numero4=0 #concentrato annullato
    #numero3=Concentrato_tangenziale1[q]
    #numero4=Concentrato_tangenziale2[q]
Tangenziale.iloc[q,0]=numero_A*Famiglia.loc[y,'\u03B2\u2081']+numero_B*Famiglia.loc[y,'\u03B2\u2082']+numero_C*Famiglia.loc[y,'\u03B2\u2083']+numero3*Famiglia.loc[y,'\u03B4\u2081']+numero4*Famiglia.loc[y,'\u03B4\u2082']
    #print(Tangenziale)

#AVVIO DI SAP2000 (SECONDO)-----
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO GENETICO/molle100.s2k'
#FILE GEOMETRIA E MODELLO STRUTTURALE SAP2000
ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1,0] !=0:
        if Radiale.iloc[i,0] !=0:
            ret =
mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1,0]),float(Radiale.iloc[i,0]),'Local',False,False,0)
    for i in range(1,73):
        if Tangenziale.iloc[i-1,0] !=0:
            if Tangenziale.iloc[i,0] !=0:
                ret =
mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1,0]),float(Tangenziale.iloc[i,0]),'Local',False,False,0)

#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()

#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []
sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]
for r in range(1,73):

```

```

        Joint = str(r)
        FrameName1 = str(r)
        Object = 0
        NumberResults = 0
        Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 =
([] for i in range(13))
        delete =
mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
        ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object,
NumberResults , Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
        Momenti_nuovi.append(ret[13])
        sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
        ObjectElm = 0
        NumberResults = 0
        Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3
= ([] for i in range(13))
        ret =
mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
        ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico
esterno')
                [ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2,
U3, R1, R2, R3] = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm,
LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
                ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3,
R1, R2, R3]
                Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])

Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
Rotazioni_della_generazione =Rotazioni_nuovi
#FINE DEL SECONDO UTILIZZO DI SAP2000-----

#CALCOLO DEI PUNTEGGI PER OGNI INDIVIDUO FIGLIO DI OGNI FAMIGLIA ****
p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=([] for i in range(3))
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#(prendo solo un valore per nodo)
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])
#Punteggio di momento flettente
errore_parziale_momento =[]
peso_momento=1 #***** PESO *****

```

```

errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=12
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==nodi[j]:
            target_M=Momenti_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-
prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
            errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
            errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)

errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
print('Punteggio M: ' + str(Punteggio_M) + ' individuo ' + str(y))
#Punteggio di sforzo normale
peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****
errore_N=[]
errore_parziale_sforzo_normale=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==nodi[j]:
            target_N=Sforzi_normali_target[j]
            prova_N=c[z-1]
            errore_N.append((target_N-
prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
            errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
            errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
            errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)

errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazio
ni

Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
print('Punteggio N: ' + str(Punteggio_N) + ' individuo ' + str(y))
#Punteggio di rotazione
numero_nodi_strumentati_spostamenti=12
peso_rotazione=1 #***** PESO *****
errore_R=[]
errore_parziale_rotazione=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==nodi[j]:
            target_R=Rotazioni_target[j]
            prova_R=d[z-1]
            errore_R.append((target_R-
prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)
            errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
            errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])

```

```

        errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)

errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
    Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
    print('Punteggio R: ' + str(Punteggio_R) + ' individuo ' + str(y))
    #CALCOLO FINALE DEL PUNTEGGIO DELL'INDIVIDUO FIGLIO:

Punteggio=1/((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo
_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
    Famiglia.loc[y,'Punteggio']=Punteggio
    print(Famiglia.to_string())

#SUPERA LA SELEZIONE E FARA' PARTE DELLA NUOVA GENERAZIONE L'INDIVIDUO DELLA FAMIGLIA CON
PUNTEGGIO MAGGIORE*****
    Max=Famiglia.loc[Famiglia['Punteggio'].idxmax()]
    print('Questo è il massimo della famiglia: ' + str(s))
    print(Max.to_string())
    Generazione_n.iloc[s]=Max #AGGIUNGIAMO UN NUOVO INDIVIDUO ALLA NUOVA
POPOLAZIONE*****
    Generazione_new=Generazione_n.apply(pd.to_numeric, errors = 'coerce')
    Max_generazione=Generazione_n.loc[Generazione_new['Punteggio'].idxmax()]
    print('Il massimo della generazione è: ')
    print(Max_generazione.to_string())
    m=datetime.datetime.now()
    Massimi.iloc[n-1]=Max_generazione
    print(Massimi.to_string())
    print('Ora corrente: %s:%s:%s'%(m.hour,m.minute,m.second))
    print('ho finito la generazione '+str(n))

print("\nL'individuo migliore di ogni generazione:\n")
Massimi_new=Massimi.apply(pd.to_numeric, errors = 'coerce')

#QUI SI CONCLUDE IL CICLO FOR SECONDARIO, NEL QUALE SI È PRODOTTA UNA FAMIGLIA E SI È
#SELEZIONATO L'INDIVIDUO MIGLIORE CHE FARÀ PARTE DELLA NUOVA GENERAZIONE
#A QUESTO PUNTO SI È TROVATO L'INDIVIDUO MIGLIORE DI TUTTE LE GENERAZIONI ED IL CODICE E'
#ARRIVATO A CONVERGENZA SE SMETTE DI RIPRODURSI:
#*****TROVATO L'INDIVIDUO MIGLIORE CHE TALE CODICE E' RIUSCITO A FORNIRCI.*****
#NE DERIVIAMO I CARICHI PER I 72 NODI, RILANCIAMO SAP 2000 E CALCOLIAMO E PLOTTIAMO I
DIAGRAMMI RELATIVI A TALE INDIVIDUO
Migliore=Massimi.loc[Massimi_new['Punteggio'].idxmax()]
print('il migliore è : ' +'\n'+str(Migliore))
#CARICHI CONCENTRATI ***NON USATI***
Concentrato_radiale1=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2087']/5)>=68:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2087']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2087']/5)
Concentrato_radiale1[a]=1
Concentrato_radiale1[a-1]=1
Concentrato_radiale1[a-2]=1
Concentrato_radiale1[a+1]=1
Concentrato_radiale1[a+2]=1

```

```

Concentrato_radiale1.append(Concentrato_radiale1[0])
Concentrato_radiale2=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2088']/5)>=68:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2088']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2088']/5)
Concentrato_radiale2[a]=1
Concentrato_radiale2[a-1]=1
Concentrato_radiale2[a-2]=1
Concentrato_radiale2[a+1]=1
Concentrato_radiale2[a+2]=1
Concentrato_radiale2.append(Concentrato_radiale2[0])
Concentrato_tangenziale1=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2089']/5)>=68:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2089']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2089']/5)
Concentrato_tangenziale1[a]=1
Concentrato_tangenziale1[a-1]=1
Concentrato_tangenziale1[a-2]=1
Concentrato_tangenziale1[a+1]=1
Concentrato_tangenziale1[a+2]=1
Concentrato_tangenziale1.append(Concentrato_tangenziale1[0])
Concentrato_tangenziale2=[0 for x in range(1,73)]
if math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2081\u2080']/5)>=68:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2081\u2080']/5)-72
else:
    a=math.ceil(Migliore.loc['\u03B8\u2081\u2080']/5)
Concentrato_tangenziale2[a]=1
Concentrato_tangenziale2[a-1]=1
Concentrato_tangenziale2[a-2]=1
Concentrato_tangenziale2[a-3]=1
Concentrato_tangenziale2[a-4]=1
Concentrato_tangenziale2.append(Concentrato_tangenziale2[0])
# CARICHI DISTRIBUITI
Radiale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
Tangenziale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
#Carico Radiale
for v in range (0,73):
    somma_A=round(math.radians(v*5)+math.radians(Migliore.loc['\u03B8\u2081']),4)
    numero_A=round(math.cos(somma_A),3)
    somma_B=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Migliore.loc['\u03B8\u2082'])),4)
    numero_B=round((-math.cos(somma_B)),3)
    somma_C=round(2*(math.radians(v*5)+math.radians(Migliore.loc['\u03B8\u2083'])),4)
    numero_C=0 #funzione annullata
    numero1=0 #concentrato annullato
    numero2=0 #concentrato annullato

Radiale.iloc[v,0]=Migliore.loc['\u03B1\u2081']*numero_A+Migliore.loc['\u03B1\u2082']*numero_B+Mi
gliore.loc['\u03B1\u2083']*numero_C+numero1*Migliore.loc['\u03B3\u2081']+numero2*Migliore.loc['\
u03B3\u2082']+Carico_medio
#print(Radiale)

```

```

#Carico Tangenziale
for q in range (0,73):
    t=q*5
    if t<=Migliore.loc['\u03B8\u2084']:
        somma_A=round(0.5*(math.radians(q*5)+math.radians(Migliore.loc['\u03B8\u2084']*-1)),4)
        numero_A=0 #funzione annullata
    else:
        somma_A=round(0.5*(math.radians(q*5)+math.radians(Migliore.loc['\u03B8\u2084']*-1)),4)
        numero_A=0 #funzione annullata
    somma_B=round(math.radians(q*5)+math.radians(Migliore.loc['\u03B8\u2085']),4)
    numero_B=round(math.sin(somma_B),3)
    somma_C=round(2*(math.radians(q*5)+math.radians(Migliore.loc['\u03B8\u2086'])),4)
    numero_C=round(math.sin(somma_C),3)
    numero3=0 #concentrato annullato
    numero4=0 #concentrato annullato

Tangenziale.iloc[q,0]=numero_A*Migliore.loc['\u03B2\u2081']+numero_B*Migliore.loc['\u03B2\u2082']
+numero_C*Migliore.loc['\u03B2\u2083']+numero3*Migliore.loc['\u03B4\u2081']+numero4*Migliore.l
oc['\u03B4\u2082']
#print(Tangenziale)

#AVVIO DI SAP2000 (TERZO)-----
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO GENETICO/molle100.s2k' #FILE GEOMETRIA E
MODELLO STRUTTURALE SAP2000
ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1,0] !=0:
        if Radiale.iloc[i,0] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1,0]),float(Radiale.iloc[i,0]),'Local',False,False,0)
for i in range(1,73):
    if Tangenziale.iloc[i-1,0] !=0:
        if Tangenziale.iloc[i,0] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1,0]),float(Tangenziale.iloc[i,0]),'Local',False,False,0)
#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()
#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []
sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]
for r in range(1,73):
    Joint = str(r)
    FrameName1 = str(r)
    Object = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 = ([] for i in range(13))
    delete = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')

```

```

ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object, NumberResults , Obj, ObjSta,
Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
Momenti_nuovi.append(ret[13])
sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
ObjectElm = 0
NumberResults = 0
Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3 = ([ ] for i in range(13))
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
[ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3] =
mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase,
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3]
Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])
#FINE DEL TERZO UTILIZZO DI SAP2000-----
#Calcolo dei punteggi *****
Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
Rotazioni_della_generazione =Rotazioni_nuovi
p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=([ ] for i in range(3))
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#(prendo solo un valore per nodo)
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])

#Punteggio Momento flettente
errore_parziale_momento =[]
peso_momento=1 #***** PESO *****
errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=12
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==nodi[j]:
            target_M=Moment_i_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
errore_M.append(errore_M[0])
errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)

```

```

errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
print('Punteggio M: ' + str(Punteggio_M) + ' individuo ')
#Punteggio SFORZO NORMALE
peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****
errore_N=[]
errore_parziale_sforzo_normale=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==nodi[j]:
            target_N=Sforzi_normali_target[j]
            prova_N=c[z-1]
            errore_N.append((target_N-prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
            errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
errore_N.append(errore_N[0])
errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)
errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
ni
Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
print('Punteggio N: ' + str(Punteggio_N) + ' individuo ')
#Punteggio ROTAZIONE
numero_nodi_strumentati_spostamenti=12
peso_rotazione=1 #***** PESO *****
errore_R=[]
errore_parziale_rotazione=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==nodi[j]:
            target_R=Rotazioni_target[j]
            prova_R=d[z-1]
            errore_R.append((target_R-prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)
            errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])
errore_R.append(errore_R[0])
errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)
errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
print('Punteggio R: ' + str(Punteggio_R) + ' individuo ')
Punteggio=1/((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo
_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
print('Punteggio: ' + str(Punteggio))

#*****PLOTTAGGI DIAGRAMMI E CONFRONTI*****
plt.rc('xtick', labels=8)
plt.rc('ytick', labels=10)
plt.rc('legend', font=10)
plt.rc('figure', fig=14,10)
nodi_sollecitazioni=[0,25,55,85,115,145,175,205,235,265,295,325,360]
nodi_spostamenti=nodi_sollecitazioni

```

```

### PLOT CARICO RADIALE
plt.subplot(4,2,1)
plt.title('External Radial Action')
plt.ylabel('S [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Radiale.loc[:,0], 'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Radial load')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),carico_radiale_target,'r--.',linewidth=2,label= 'Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

### PLOT CARICO TANGENZIALE
plt.subplot(4,2,2)
plt.title('External Tangential Action')
plt.ylabel('T [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Tangenziale.loc[:,0], 'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Tangential load')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),carico_tangenziale_target,'r--.',linewidth=2,label= 'Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

###PLOT SFORZO NORMALE
plt.subplot(4,2,3)
plt.title('Axial force')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('N [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),c,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Axial Force')
plt.plot(nodi_sollecitazioni,Sforzi_normali_target,'r--.',linewidth=2 ,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
### Errore Sforzo normale
plt.subplot(4,2,4)
plt.plot(nodi_sollecitazioni,errore_N,'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(nodi_sollecitazioni,np.zeros(13),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore N (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

###PLOT MOMENTO FLETTENTE
plt.subplot(4,2,5)
plt.ylabel('M [kN/m]')
plt.title('Bending Moment')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.plot(np.arange(0, 365,5),a,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Bending Moment')
plt.plot(nodi_sollecitazioni,Momenti_target,'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
### Errore Momento
plt.subplot(4,2,6)
plt.plot(nodi_sollecitazioni,errore_M,'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(nodi_sollecitazioni,np.zeros(13),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore M (%)')

```

```

plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

###PLOT ROTAZIONI
plt.subplot(4,2,7)
plt.title('Rotation')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('R')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),d,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Rotation')
plt.plot(nodi_sollecitazioni,Rotazioni_target,'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')
plt.legend(loc=3)
#Errore Rotazione
plt.subplot(4,2,8)
plt.ylabel('Errore R (%)')
plt.xticks([])
plt.plot(nodi_spostamenti,errore_R,'c--.',linewidth=2, label='Calculated')
plt.plot(nodi_spostamenti,np.zeros(13),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.legend(loc=3)
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')
#Salvataggio del grafico
plt.savefig('C:/Users/Windows/Desktop/'+str(Punteggio)+'.png',dpi=600)
plt.clf()
plt.close()
print("\n Ho finito, Sir!")
freq=1000
duration=3000
winsound.Beep(freq,duration)
#++++++ F I N E ++++++

```

Algoritmo (non genetico) per la taratura delle molle

```
# ***** ALGORITMO TARATURA MOLLE *****
import re,os,sys,shutil,random,datetime
import pandas as pd
import numpy as np
import comtypes.client
import matplotlib.pyplot as plt
import math as math
import winsound
#-----ISTRUZIONI PER FAR DIALOGARE PYTHON E SAP2000-----
#set the following flag to True to attach to an existing instance of the program
#otherwise a new instance of the program will be started
AttachToInstance = False
#set the following flag to True to manually specify the path to SAP2000.exe
#this allows for a connection to a version of SAP2000 other than the latest installation
#otherwise the latest installed version of SAP2000 will be launched
SpecifyPath = True
#if the above flag is set to True, specify the path to SAP2000 below
ProgramPath = 'C:/Program Files (x86)/Computers and Structures/SAP2000 19/SAP2000.exe'
#full path to the model
#set it to the desired path of your model
APIPath = 'C:\CSIAPIexample'
if not os.path.exists(APIPath):
    try:
        os.makedirs(APIPath)
    except OSError:
        pass
ModelPath = APIPath + os.sep + 'API_1-001.sdb'
if AttachToInstance:
    #attach to a running instance of SAP2000
    try:
        #get the active SapObject
        mySapObject = comtypes.client.GetActiveObject("CSI.SAP2000.API.SapObject")
    except (OSError, comtypes.COMError):
        print("No running instance of the program found or failed to attach.")
        sys.exit(-1)
else:
    #create API helper object
    helper = comtypes.client.CreateObject('SAP2000v19.Helper')
    helper = helper.QueryInterface(comtypes.gen.SAP2000v19.cHelper)
    if SpecifyPath:
        try:
            #create an instance of the SAPObject from the specified path
            mySapObject = helper.CreateObject(ProgramPath)
        except (OSError, comtypes.COMError):
            print("Cannot start a new instance of the program from " + ProgramPath)
            sys.exit(-1)
    else:
        try:
            #create an instance of the SAPObject from the latest installed SAP2000
            mySapObject = helper.CreateObjectProgID("CSI.SAP2000.API.SapObject")
        except (OSError, comtypes.COMError):
```

```

print("Cannot start a new instance of the program.")
sys.exit(-1)

#-----
i=datetime.datetime.now()
print('Inizio alle ore: %s:%s:%s'%(i.hour,i.minute,i.second)) #Stampa l'ora di inizio dell'analisi

#-----DEFINIZIONE DEI TARGET-----
N=int(input('\n Numero individui righe e colonne nella matrice delle rigidezze: '))
target=pd.read_csv('C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/Cartel geotecnico -
TARGET_singolo.csv', sep=';', index_col=False,float_precision='high') # FILE EXCEL CON TARGET NEI 12
NODI
target.fillna(0,inplace=True)
nodi= list(range(1,73)) # 72 NODI MONITORATI
Momenti_target=target.iloc[:,1]      #MOMENTI TARGET IN 12 NODI
Sforzi_normali_target=target.iloc[:,2] #SFORZI NORMALI TARGET IN 12 NODI
Rotazioni_target=target.iloc[:,3]    ##ROTAZIONI TARGET IN 12 NODI

#CALCOLO DELLE MEDIE DEI VALORI ASSOLUTI DEI TARGET:
Mc=0
Nc=0
Rc=0
for s in range (0,72):
    Mc=Mc+abs(float(Moment_i_target.iloc[s]))
    Nc=Nc+abs(float(Sforzi_normali_target.iloc[s]))
    Rc=Rc+abs(float(Rotazioni_target.iloc[s]))
Media_valori_assoluti_Momento=Mc/72
Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale=Nc/72
Media_valori_assoluti_Rotazioni=Rc/72
print('media dei valori assoluti di M: '+str(Media_valori_assoluti_Momento))
print('media dei valori assoluti di N: '+str(Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
print('media dei valori assoluti di R: '+str(Media_valori_assoluti_Rotazioni))

##Media_valori_assoluti_Momento=      #valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
##Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale=  #valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
##Media_valori_assoluti_Rotazioni=    #valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
##print(Moment_i_target)
##print(Sforzi_normali_target)
##print(Rotazioni_target)

#CARICO TARGET: valori da inserire!!!!!!!!!!!!!!
Radiale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
Tangenziale=pd.DataFrame(np.zeros(73).reshape(73,1))
carichi= pd.read_csv('C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/Cartel geotecnico -
CARICHI_relax60_singolo.csv', sep=';', index_col=False,float_precision='high') # FILE EXCEL CON carichi
NEI 72 NODI
carichi.fillna(0,inplace=True)
Radiale=carichi.iloc[:,1] #CARICO RADIALE IN 72 NODI
Tangenziale=carichi.iloc[:,2] #CARICO TANGENZIALE IN 72 NODI
print('\nCARICO RADIALE:\n')
print(Radiale)
print('\nCARICO TANGENZIALE:\n')

```

```

print(Tangenziale)

# SI IMPORTA IL DATABASE DI RIGIDEZZA DELLE MOLLE
rigidezze=pd.DataFrame(np.zeros(N*73).reshape(73,N), columns=np.arange(1,N+1))
molle= pd.read_csv('C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/Cartel geotecnico -
MOLLE_DATABASE_esteso_COST - Copia.csv', sep=';', index_col=False,float_precision='high') # FILE
EXCEL CON carichi NEI 72 NODI
molle.fillna(0,inplace=True)
for i in range (1,N+1):
    rigidezze.loc[:,i]=molle.iloc[:,i]
print('\nDatabase di rigidezze:\n')
print(rigidezze)

#DEFINIZIONE DEI SIMBOLI PER L'IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI CHE DEFINISCONO LE FORME DI
CARICO (teta, alfa, beta, gamma, delta)
colonne=['Kr','Kt','Punteggio','pN','pM','pR','N_rad','N_tan']
righe=['Punteggio_max','pN_max','pM_max','pR_max']
#CREAZIONE DI DUE DATAFRAME (di zeri)
Generazione_n = pd.DataFrame(np.zeros(N*N*8).reshape((N*N,8)), columns = colonne ,
index=np.arange(1,N*N+1),dtype=object)
Maxpunteggi=pd.DataFrame(np.zeros(32).reshape((4,8)),index = righe, columns =
colonne,dtype=object)

k=1
for i in range (0,N): #radiale
    for j in range (0,N): #tangenziale
        Generazione_n.loc[k,'Kr']=rigidezze.iloc[0,i]
        Generazione_n.loc[k,'Kt']=rigidezze.iloc[0,j]
        Generazione_n.loc[k,'N_rad']=i+1
        Generazione_n.loc[k,'N_tan']=j+1
        k=k+1
print('\nTaratura molle - COMBINAZIONI DI RIGIDEZZE E RELATIVI PUNTEGGI\n')
print(Generazione_n)
#molle_radiali=pd.DataFrame(np.zeros(72).reshape(72,1), index=np.arange(1,73))
#molle_tangenziali=pd.DataFrame(np.zeros(72).reshape(72,1), index=np.arange(1,73))
eee=1
completamento=0
for e in range(1,N+1):
    molle_radiali=rigidezze.loc[:,e] #Rigidezza molle radiali IN 72 NODI
    print('\nMolle Radiali:\n')
    print(molle_radiali)
    for ee in range (1,N+1):
        molle_tangenziali=rigidezze.loc[:,ee] # Rigidezza molle tangenziali IN 72 NODI
        print('\nMolle Tangenziali:\n')
        print(molle_tangenziali)
        completamento=(100/(N*N))+completamento
        print('Percentuale di completamento: '+str(completamento)+'%')
        #AVVIO DI SAP2000 (PRIMO)-----
        mySapObject.ApplicationStart(6,True)
        #Importazione del modello:
        FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/modello.s2k' #FILE
GEOMETRIA E MODELLO STRUTTURALE SAP2000

```

```

ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)
#Impostazione rigidezza molle:
#ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(ByVal Name As String, ByRef k() As Double,
Optional ByVal ItemType As eltemType = object, Optional ByVal IsLocalCSys As Boolean = False, Optional
ByVal Replace As Boolean = False)
k=pd.DataFrame(np.zeros(6).reshape(6,1))
for i in range(0,73):
    k.iloc[1]=molle_radiali.iloc[i]
    k.iloc[0]=molle_tangenziali.iloc[i]
    #print('\nVettore rigidezze:')
    #print(k)
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(str(i),k.iloc[:,0],0,True,True)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1] !=0:
        if Radiale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1]),float(Radiale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
        for i in range(1,73):
            if Tangenziale.iloc[i-1] !=0:
                if Tangenziale.iloc[i] !=0:
                    ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1]),float(Tangenziale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()
#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []
sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]
for r in range(1,73):
    Joint = str(r)
    FrameName1 = str(r)
    Object = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 = ([] for i in
range(13))
    delete = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object, NumberResults ,
Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
    Momenti_nuovi.append(ret[13])
    sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
    ObjectElm = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3 = ([] for i in
range(13))
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    [ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2,
R3] = mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase,
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
    ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3]

```

```

Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])

Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
#print('Questi sono M:')
#print(Momenti_della_generazione)
P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
#print('Questi sono N:')
#print(P_della_generazione)
Rotazioni_della_generazione = Rotazioni_nuovi
#print('Questi sono le Rotazioni della generazione 1:')
#print(Rotazioni_della_generazione)

#FINE DEL PRIMO UTILIZZO DI SAP2000-----

#CALCOLO DEI PUNTEGGI PER OGNI INDIVIDUO DELLA POPOLAZIONE
*****
p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=[] for i in range(3)
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#(prendo solo un valore per nodo)
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])
errore_parziale_momento =[]

peso_momento=1 #***** PESO *****
errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=72
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_M=Momenti_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
            errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
#print('errore_parziale_momento'+str(errore_parziale_momento))
errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)
#print('errore_totale_momento'+str(errore_totale_momento))
errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
#print('Punteggio M: ' + str(Punteggio_M) +' individuo ' + str(f))

```

```

peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****

#N_target=[]
errore_N=[]
errore_parziale_sforzo_normale=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_N=Sforzi_normali_target[j]
            prova_N=c[z-1]
            errore_N.append((target_N-prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
            errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
            errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
            #print('gli errori sono: '+str(errore_N))
            #print('errore_parziale_sforzo_normale'+str(errore_parziale_sforzo_normale))
            errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)
            #print('errore_totale_sforzo_normale'+str(errore_totale_sforzo_normale))

errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
#print('Punteggio N: ' + str(Punteggio_N) +' individuo ' + str(f))

numero_nodi_strumentati_spostamenti=72
peso_rotazione=1 #***** PESO *****
#R_target=[]
errore_R=[]
errore_parziale_rotazione=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_R=Rotazioni_target[j]
            prova_R=d[z-1]
            errore_R.append((target_R-prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)
            errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
            errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])
            #print('errore_parziale_rotazione'+str(errore_parziale_rotazione))
            errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)
            #print('errore_totale_rotazione'+str(errore_totale_rotazione))
            errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
            Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
            #print('Punteggio R: ' + str(Punteggio_R) +' individuo ' + str(f))

#PUNTEGGIO DELL'INDIVIDUO della prima generazione

Punteggio=1/((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
Generazione_n.loc[eee,'Punteggio']=Punteggio
Generazione_n.loc[eee,'pN']=Punteggio_N

```

```

Generazione_n.loc[eee,'pM']=Punteggio_M
Generazione_n.loc[eee,'pR']=Punteggio_R
print(Generazione_n.to_string())
eee=eee+1

```

```

#FINE DEL CICLO FOR PRINCIPALE!!!-----
print('\n La calibrazione delle molle è stata determinata!!!\n')
#LA CONFIGURAZIONE DI RIGIDEZZE MIGLIORE è STATA TROVATA
Generazione_new=Generazione_n.apply(pd.to_numeric, errors = 'coerce')
MaxP=Generazione_new.loc[Generazione_new['Punteggio'].idxmax()]
i_maxP=int(MaxP.loc['N_rad'])
j_maxP=int(MaxP.loc['N_tan'])
print('\nCombo P_max:')
print(i_maxP)
print(j_maxP)
#print(MaxP.to_string())

```

```

Maxpunteggi.iloc[0]=MaxP
MaxPn=Generazione_new.loc[Generazione_new['pN'].idxmax()]
i_maxPn=int(MaxPn.loc['N_rad'])
j_maxPn=int(MaxPn.loc['N_tan'])
print('\nCombo Pn_max:')
print(i_maxPn)
print(j_maxPn)
#print(MaxPn.to_string())

```

```

Maxpunteggi.iloc[1]=MaxPn
MaxPm=Generazione_new.loc[Generazione_new['pM'].idxmax()]
i_maxPm=int(MaxPm.loc['N_rad'])
j_maxPm=int(MaxPm.loc['N_tan'])
print('\nCombo Pm_max:')
print(i_maxPm)
print(j_maxPm)
#print(MaxPm.to_string())

```

```

Maxpunteggi.iloc[2]=MaxPm
MaxPr=Generazione_new.loc[Generazione_new['pR'].idxmax()]
i_maxPr=int(MaxPr.loc['N_rad'])
j_maxPr=int(MaxPr.loc['N_tan'])
print('\nCombo Pr_max:')
print(i_maxPr)
print(j_maxPr)
#print(MaxPr.to_string())

```

```

print('\n La configurazione che da i punteggi migliori è la seguente:\n')
Maxpunteggi.iloc[3]=MaxPr
print(Maxpunteggi)

```

```

##MOLLE TARATE
molle_pmax=pd.DataFrame(np.zeros(73*2).reshape(73,2))
molle_pNmax=pd.DataFrame(np.zeros(73*2).reshape(73,2))
molle_pMmax=pd.DataFrame(np.zeros(73*2).reshape(73,2))

```

```

molle_pRmax=pd.DataFrame(np.zeros(73*2).reshape(73,2))
molle_Pmax.iloc[:,0]=rigidezze.loc[:,i_maxP]
molle_Pmax.iloc[:,1]=rigidezze.loc[:,j_maxP]
print('\nMolle P_max')
print(molle_Pmax)
molle_pNmax.iloc[:,0]=rigidezze.loc[:,i_maxPn]
molle_pNmax.iloc[:,1]=rigidezze.loc[:,j_maxPn]
print('\nMolle pN_max')
print(molle_pNmax)
molle_pMmax.iloc[:,0]=rigidezze.loc[:,i_maxPm]
molle_pMmax.iloc[:,1]=rigidezze.loc[:,j_maxPm]
print('\nMolle pM_max')
print(molle_pMmax)
molle_pRmax.iloc[:,0]=rigidezze.loc[:,i_maxPr]
molle_pRmax.iloc[:,1]=rigidezze.loc[:,j_maxPr]
print('\nMolle pR_max')
print(molle_pRmax)

#*****TROVATO L'INDIVIDUO MIGLIORE CHE TALE CODICE E' RIUSCITO A FORNIRCI:*****
#AVVIO DI SAP2000 (SECONDO)-----
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/modello.s2k' #FILE
GEOMETRIA E MODELLO STRUTTURALE SAP2000
ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)
#Impostazione rigidezza molle:
#ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(ByVal Name As String, ByRef k() As Double, Optional
ByVal ItemType As eltemType = object, Optional ByVal IsLocalCSys As Boolean = False, Optional ByVal
Replace As Boolean = False)
k=pd.DataFrame(np.zeros(6).reshape(6,1))
for i in range(0,73):
    k.iloc[1]=molle_Pmax.loc[i,0]
    k.iloc[0]=molle_Pmax.loc[i,1]
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(str(i),k.iloc[:,0],0,True,True)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1] !=0:
        if Radiale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1]),float(Radiale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
for i in range(1,73):
    if Tangenziale.iloc[i-1] !=0:
        if Tangenziale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1]),float(Tangenziale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()
#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []
sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]

```

```

for r in range(1,73):
    Joint = str(r)
    FrameName1 = str(r)
    Object = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 = ([ ] for i in range(13))
    delete = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object, NumberResults , Obj, ObjSta,
    Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
    Momenti_nuovi.append(ret[13])
    sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
    ObjectElm = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3 = ([ ] for i in range(13))
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    [ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3] =
    mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase,
    StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
    ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3]
    Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])
#FINE DEL SECONDO UTILIZZO DI SAP2000-----
#CALCOLO STRUTTURALE CON CARICO=INDIVIDUO MIGLIORE *****
Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
#print('Questi sono M:')
#print(Momenti_della_generazione)
P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
#print('Questi sono N:')
#print(P_della_generazione)
Rotazioni_della_generazione =Rotazioni_nuovi
#print('Questi sono le Rotazioni della generazione 1:')
#print(Rotazioni_della_generazione)
p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=([ ] for i in range(3))
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#(prendo solo un valore per nodo)
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])
#print(c)
errore_parziale_momento =[]
peso_momento=1 #***** PESO *****
#M_target=[]

```

```

errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=72
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_M=Momenti_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
errore_M.append(errore_M[0])
errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)
errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
print('\nPer la combinazione di rigidzze che genera il PUNTEGGIO GLOBALE massimo si sono ottenuti:
\n')
print('Punteggio M: ' + str(Punteggio_M) + ' individuo ')
peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****
#N_target=[]
errore_N=[]
errore_parziale_sforzo_normale=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_N=Sforzi_normali_target[j]
            prova_N=c[z-1]
            errore_N.append((target_N-prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
            errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
errore_N.append(errore_N[0])
errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)
errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazio
ni
Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
print('Punteggio N: ' + str(Punteggio_N) + ' individuo ')

numero_nodi_strumentati_spostamenti=72
peso_rotazione=1 #***** PESO *****
#R_target=[]
errore_R=[]
errore_parziale_rotazione=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_R=Rotazioni_target[j]
            prova_R=d[z-1]
            errore_R.append((target_R-prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)
            errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])

```

```

errore_R.append(errore_R[0])
errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)
errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
Punteggio_R=1/errore_medio_rotazione
print('Punteggio R: ' + str(Punteggio_R) + ' individuo ')
Punteggio=1/((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo
_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
print('Punteggio: ' + str(Punteggio))

#*****PLOT TAGGI DIAGRAMMI E CONFRONTI*****
#***** CONFIGURAZIONE DI MOLLE CHE GENERA UN PUNTEGGIO MASSIMO (P) *****
plt.rc('xtick', labels=8)
plt.rc('ytick', labels=10)
plt.rc('legend', font=10)
plt.rc('figure', fig=(14,10))

## PLOT RIGIDEZZA RADIALE MOLLE
plt.subplot(4,2,1)
plt.title('Spring Radial Stiffness')
plt.ylabel('Kr [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_Pmax.loc[:,0], 'c--', linewidth=2, label= 'Rigidezza Radiale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT RIGIDEZZA TANGENZIALE MOLLE
plt.subplot(4,2,2)
plt.title('Spring Tangential Stiffness')
plt.ylabel('Kt [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_Pmax.loc[:,1], 'c--', linewidth=2, label= 'Rigidezza Tangenziale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT SFORZO NORMALE
plt.subplot(4,2,3)
plt.title('Axial force')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('N [kN]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),c, 'c--', linewidth=2, label= 'Calculated Axial Force')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Sforzi_normali_target, 'r--', linewidth=2, label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
## Errore Sforzo normale
plt.subplot(4,2,4)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_N, 'c--', linewidth=2, label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72), 'r--', linewidth=2, label='Target')
plt.xticks([])
#plt.ylim(-5,50)
plt.ylabel('Errore N (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT MOMENTO FLETTENTE

```

```

plt.subplot(4,2,5)
plt.ylabel('M [kNm]')
plt.title('Bending Moment')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.plot(np.arange(0, 365,5),a,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Bending Moment')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Momenti_target,'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
## Errore Momento
plt.subplot(4,2,6)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_M,'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore M (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

##PLOT ROTAZIONI
plt.subplot(4,2,7)
plt.title('Rotation')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('R')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),d,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Rotation')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Rotazioni_target,'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')
plt.legend(loc=3)
#Errore Rotazione
plt.subplot(4,2,8)
plt.ylabel('Errore R (%)')
plt.xticks([])
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_R,'c--.',linewidth=2, label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.legend(loc=3)
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')

plt.savefig('C:/Users/Windows/Desktop/'+ 'P='+str(Punteggio)+'.png',dpi=600)
plt.clf()

#***** CONFIGURAZIONE DI MOLLE CHE GENERA UN PUNTEGGIO DI SFORZO NORMALE
MASSIMO (P) *****
#AVVIO DI SAP2000 (TERZO)-----
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/modello.s2k' #FILE
GEOMETRIA E MODELLO STRUTTURALE SAP2000
ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)

#Impostazione rigidezza molle:

```

```

#ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(ByVal Name As String, ByRef k() As Double, Optional
ByVal ItemType As eItemtype = object, Optional ByVal IsLocalCSys As Boolean = False, Optional ByVal
Replace As Boolean = False)
k=pd.DataFrame(np.zeros(6).reshape(6,1))
for i in range(0,73):
    k.iloc[1]=molle_pNmax.iloc[i,0]
    k.iloc[0]=molle_pNmax.iloc[i,1]
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(str(i),k.iloc[:,0],0,True,True)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1] !=0:
        if Radiale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1]),float(Radiale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
for i in range(1,73):
    if Tangenziale.iloc[i-1] !=0:
        if Tangenziale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1]),float(Tangenziale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()
#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []
sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]
for r in range(1,73):
    Joint = str(r)
    FrameName1 = str(r)
    Object = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 = ([] for i in range(13))
    delete = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object, NumberResults , Obj, ObjSta,
Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
    Momenti_nuovi.append(ret[13])
    sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
    ObjectElm = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3 = ([] for i in range(13))
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    [ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3] =
mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase,
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
    ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3]
    Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])
#FINE DEL TERZO UTILIZZO DI SAP2000-----

#CALCOLO STRUTTURALE CON CARICO=INDIVIDUO MIGLIORE *****
Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
#print('Questi sono M:')

```

```

#print(Momenti_della_generazione)
P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
#print('Questi sono N:')
#print(P_della_generazione)
Rotazioni_della_generazione =Rotazioni_nuovi
#print('Questi sono le Rotazioni della generazione 1:')
#print(Rotazioni_della_generazione)

p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=[] for i in range(3)
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#(prendo solo un valore per nodo)
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])
#print(c)
errore_parziale_momento=[]
peso_momento=1 #***** PESO *****
#M_target=[]
errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=72
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_M=Momenti_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
errore_M.append(errore_M[0])
errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)
errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
print('\nPer la combinazione di rigidezze che genera il Punteggio di SFORZO NORMALE massimo si sono
ottenuti: \n')
print('Punteggio M: ' + str(Punteggio_M) +' individuo ')
peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****
#N_target=[]
errore_N=[]
errore_parziale_sforzo_normale=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):

```

```

    if str(z)==str(nodi[j]):
        target_N=Sforzi_normali_target[j]
        prova_N=c[z-1]
        errore_N.append((target_N-prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
        errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
errore_N.append(errore_N[0])
errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)
errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
print('Punteggio N: ' + str(Punteggio_N) + ' individuo ')

numero_nodi_strumentati_spostamenti=72
peso_rotazione=1 #***** PESO *****
#R_target=[]
errore_R=[]
errore_parziale_rotazione=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_R=Rotazioni_target[j]
            prova_R=d[z-1]
            errore_R.append((target_R-prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)
            errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])
errore_R.append(errore_R[0])
errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)
errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
print('Punteggio R: ' + str(Punteggio_R) + ' individuo ')
Punteggio=1/((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo
_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
print('Punteggio: ' + str(Punteggio))
#***** PLOTTAGGI *****
plt.rc('xtick', labels=8)
plt.rc('ytick', labels=10)
plt.rc('legend',font=10)
plt.rc('figure',figsize=(14,10))

## PLOT RIGIDENZE RADIALI ##
plt.subplot(4,2,1)
plt.title('Spring Radial Stiffness')
plt.ylabel('Kr [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_pNmax.loc[:,0], 'c--',linewidth=2,label= 'Rigidzza Radiale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT RIGIDENZE TANGENZIALI ##
plt.subplot(4,2,2)

```

```

plt.title('Spring Tangential Stiffness')
plt.ylabel('Kt [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_pNmax.loc[:,1], 'c--.',linewidth=2,label= 'Rigidzza Tangenziale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT SFORZO NORMALE ##
plt.subplot(4,2,3)
plt.title('Axial force')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('N [kN]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),c, 'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Axial Force')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Sforzi_normali_target, 'r--.',linewidth=2 ,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
## Errore Sforzo normale
plt.subplot(4,2,4)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_N, 'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72), 'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore N (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT MOMENTO FLETTENTE ##
plt.subplot(4,2,5)
plt.ylabel('M [kNm]')
plt.title('Bending Moment')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.plot(np.arange(0, 365,5),a, 'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Bending Moment')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Momenti_target, 'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
## Errore Momento
plt.subplot(4,2,6)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_M, 'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72), 'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore M (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT ROTAZIONI ##
plt.subplot(4,2,7)
plt.title('Rotation')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('R')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),d, 'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Rotation')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Rotazioni_target, 'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')
plt.legend(loc=3)

```

```

#Errore Rotazione
plt.subplot(4,2,8)
plt.ylabel('Errore R (%)')
plt.xticks([])
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_R,'c--.',linewidth=2, label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.legend(loc=3)
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')

plt.savefig('C:/Users/Windows/Desktop/'+ 'Pn'+str(Punteggio_N)+'.png',dpi=600)
plt.clf()

#***** CONFIGURAZIONE DI MOLLE CHE GENERA UN PUNTEGGIO DI MOMENTO FLETTENTE
MASSIMO (P) *****
#AVVIO DI SAP2000 (QUARTO)-----
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/modello.s2k' #FILE
GEOMETRIA E MODELLO STRUTTURALE SAP2000
ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)

#Impostazione rigidezza molle:
#ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(ByVal Name As String, ByRef k() As Double, Optional
ByVal ItemType As eltemType = object, Optional ByVal IsLocalCSys As Boolean = False, Optional ByVal
Replace As Boolean = False)
k=pd.DataFrame(np.zeros(6).reshape(6,1))
for i in range(0,73):
    k.iloc[1]=molle_pMmax.iloc[i,0]
    k.iloc[0]=molle_pMmax.iloc[i,1]
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(str(i),k.iloc[:,0],0,True,True)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1] !=0:
        if Radiale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1]),float(Radiale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
for i in range(1,73):
    if Tangenziale.iloc[i-1] !=0:
        if Tangenziale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1]),float(Tangenziale.iloc[i]),'Local',False,False,0)

#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()

#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []
sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]
for r in range(1,73):

```

```

Joint = str(r)
FrameName1 = str(r)
Object = 0
NumberResults = 0
Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 = ([ ] for i in range(13))
delete = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object, NumberResults , Obj, ObjSta,
Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
Momenti_nuovi.append(ret[13])
sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
ObjectElm = 0
NumberResults = 0
Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3 = ([ ] for i in range(13))
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
[ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3] =
mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase,
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3]
Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])
#FINE DEL QUARTO UTILIZZO DI SAP2000-----

```

#CALCOLO STRUTTURALE CON CARICO=INDIVIDUO MIGLIORE

```

Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
#print('Questi sono M:')
#print(Momenti_della_generazione)
P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
#print('Questi sono N:')
#print(P_della_generazione)
Rotazioni_della_generazione =Rotazioni_nuovi
#print('Questi sono le Rotazioni della generazione 1:')
#print(Rotazioni_della_generazione)

```

```

p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=([ ] for i in range(3))
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#(prendo solo un valore per nodo)
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])
#print(c)
errore_parziale_momento =[]

```

```

peso_momento=1 #***** PESO *****
#M_target=[]
errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=72
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_M=Momenti_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
errore_M.append(errore_M[0])
errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)
errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
print("\nPer la combinazione di rigidzze che genera il Punteggio di MOMENTO massimo si sono
ottenuti: \n')
print('Punteggio M: ' + str(Punteggio_M) + ' individuo ')
peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****
#N_target=[]
errore_N=[]
errore_parziale_sforzo_normale=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_N=Sforzi_normali_target[j]
            prova_N=c[z-1]
            errore_N.append((target_N-prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
            errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
errore_N.append(errore_N[0])
errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)
errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazio
ni
Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
print('Punteggio N: ' + str(Punteggio_N) + ' individuo ')

numero_nodi_strumentati_spostamenti=72
peso_rotazione=1 #***** PESO *****
#R_target=[]
errore_R=[]
errore_parziale_rotazione=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_R=Rotazioni_target[j]
            prova_R=d[z-1]
            errore_R.append((target_R-prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)

```

```

        errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])
errore_R.append(errore_R[0])
errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)
errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
print('Punteggio R: ' + str(Punteggio_R) + ' individuo ')
Punteggio=1/(((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo
_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
print('Punteggio: ' + str(Punteggio))
#*****PLOTTAGGI pM_max*****
plt.rc('xtick', labelsize=8)
plt.rc('ytick', labelsize=10)
plt.rc('legend', fontsize=10)
plt.rc('figure', figsize=(14,10))

## PLOT RIGIDEZZE RADIALI ##
plt.subplot(4,2,1)
plt.title('Spring Radial Stiffness')
#plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('Kr [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_pMmax.loc[:,0], 'c--.', linewidth=2, label= 'Rigidzza Radiale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT RIGIDEZZE TANGENZIALI ##
plt.subplot(4,2,2)
plt.title('Spring Tangential Stiffness')
#plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('Kt [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_pMmax.loc[:,1], 'c--.', linewidth=2, label= 'Rigidzza Tangenziale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT SFORZO NORMALE ##
plt.subplot(4,2,3)
plt.title('Axial force')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('N [kN]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),c, 'c--.', linewidth=2, label= 'Calculated Axial Force')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Sforzi_normali_target, 'r--.', linewidth=2, label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
## Errore Sforzo normale
plt.subplot(4,2,4)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_N, 'c--.', linewidth=2, label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72), 'r--.', linewidth=2, label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore N (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)], rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

```

```

## PLOT MOMENTO FLETTENTE ##
plt.subplot(4,2,5)
plt.ylabel('M [kNm]')
plt.title('Bending Moment')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.plot(np.arange(0, 365,5),a,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Bending Moment')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Momenti_target,'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
## Errore Momento
plt.subplot(4,2,6)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_M,'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore M (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

## PLOT ROTAZIONI
plt.subplot(4,2,7)
plt.title('Rotation')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('R')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),d,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Rotation')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Rotazioni_target,'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')
plt.legend(loc=3)
#Errore Rotazione
plt.subplot(4,2,8)
plt.ylabel('Errore R (%)')
plt.xticks([])
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_R,'c--.',linewidth=2, label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.legend(loc=3)
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')

plt.savefig('C:/Users/Windows/Desktop/'+Pm+'+str(Punteggio_M)+'.png',dpi=600)
plt.clf()

#***** CONFIGURAZIONE DI MOLLE CHE GENERA UN
PUNTEGGIO DI ROTAZIONE MASSIMO (P) *****

#AVVIO DI SAP2000 (QUINTO)-----
-----
mySapObject.ApplicationStart(6,True)
#Importazione del modello:
FileName = 'C:/Users/Windows/Desktop/ALGORITMO TARATURA MOLLE/modello.s2k' #FILE
GEOMETRIA E MODELLO STRUTTURALE SAP2000
ret = mySapObject.SapModel.File.OpenFile(FileName)

```

```

#Impostazione rigidezza molle:
#ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(ByVal Name As String, ByRef k() As Double, Optional
ByVal ItemType As eltemType = object, Optional ByVal IsLocalCSys As Boolean = False, Optional ByVal
Replace As Boolean = False)
k=pd.DataFrame(np.zeros(6).reshape(6,1))
for i in range(0,73):
    k.iloc[1]=molle_pRmax.iloc[i,0]
    k.iloc[0]=molle_pRmax.iloc[i,1]
    ret = mySapObject.SapModel.PointObj.SetSpring(str(i),k.iloc[:,0],0,True,True)
#Inserimento degli schemi di carico
ret = mySapObject.SapModel.LoadPatterns.Add('Carico esterno',3)
for i in range(1,73):
    if Radiale.iloc[i-1] !=0:
        if Radiale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,2,0,1,float(Radiale.iloc[i-1]),float(Radiale.iloc[i]),'Local',False,False,0)
for i in range(1,73):
    if Tangenziale.iloc[i-1] !=0:
        if Tangenziale.iloc[i] !=0:
            ret = mySapObject.SapModel.FrameObj.SetLoadDistributed(str(i),'Carico
esterno',1,1,0,1,float(Tangenziale.iloc[i-1]),float(Tangenziale.iloc[i]),'Local',False,False,0)

#Analisi del modello:
ret = mySapObject.SapModel.Analyze.RunAnalysis()

#Estrapolazione dei risultati:
Momenti_nuovi= []
sforzi_normali_nuovi = []
Rotazioni_nuovi=[]
for r in range(1,73):
    Joint = str(r)
    FrameName1 = str(r)
    Object = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3 = ([] for i in range(13))
    delete = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    ret= mySapObject.SapModel.Results.FrameForce(FrameName1, Object, NumberResults , Obj, ObjSta,
Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, P, V2, V3, T, M2, M3)
    Momenti_nuovi.append(ret[13])
    sforzi_normali_nuovi.append(ret[8])
    ObjectElm = 0
    NumberResults = 0
    Obj, ObjSta, Elm, ElmSta, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3 = ([] for i in range(13))
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput()
    ret = mySapObject.SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput('Carico esterno')
    [ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3] =
mySapObject.SapModel.Results.JointDispl(Joint, ObjectElm, NumberResults , Obj, Elm, LoadCase,
StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3)
    ret2= [NumberResults , Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3]
    Rotazioni_nuovi.append(ret2[10])

```

```

#FINE DEL QUINTO UTILIZZO DI SAP2000-----
-----

#CALCOLO STRUTTURALE CON CARICO=INDIVIDUO MIGLIORE
*****
Momenti_della_generazione = np.array(Momenti_nuovi)
#print('Questi sono M:')
#print(Momenti_della_generazione)
P_della_generazione = np.array(sforzi_normali_nuovi)
#print('Questi sono N:')
#print(P_della_generazione)
Rotazioni_della_generazione =Rotazioni_nuovi
#print('Questi sono le Rotazioni della generazione 1:')
#print(Rotazioni_della_generazione)

p=re.compile(r'\s+')
lista=p.split(str(Momenti_della_generazione))
a,c,d=[] for i in range(3))
for v in range(0,72):
    b= Momenti_della_generazione[v]
    a.append(b[1])
for x in range(0,72):
    b= P_della_generazione[x]
    c.append(b[1])
for l in range(0,72):
    b= Rotazioni_della_generazione[l]
    for k in range(0,1):#{prendo solo un valore per nodo}
        d.append(b[k])
a.append(a[0])
c.append(c[0])
d.append(d[0])
#print(c)
errore_parziale_momento =[]
peso_momento=1 #***** PESO *****
#M_target=[]
errore_M=[]
numero_nodi_strumentati_sollecitazioni=72
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_M=Momenti_target[j]
            prova_M=a[z-1]
            errore_M.append((target_M-prova_M)*100/Media_valori_assoluti_Momento)
            errore_parziale_momento.append(abs((target_M-
prova_M)/Media_valori_assoluti_Momento))
errore_parziale_momento.append(errore_parziale_momento[0])
errore_M.append(errore_M[0])
errore_totale_momento=sum(errore_parziale_momento)
errore_medio_momento=(errore_totale_momento)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_M=1/ errore_medio_momento
print("\nPer la combinazione di rigidzze che genera il Punteggio di ROTAZIONE massimo si sono
ottenuti: \n')

```

```

print('Punteggio M: ' + str(Punteggio_M) + ' individuo ')
peso_sforzo_normale=1 #***** PESO *****
#N_target=[]
errore_N=[]
errore_parziale_sforzo_normale=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_N=Sforzi_normali_target[j]
            prova_N=c[z-1]
            errore_N.append((target_N-prova_N)*100/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale)
            errore_parziale_sforzo_normale.append(abs((target_N-
prova_N)/Media_valori_assoluti_Sforzo_assiale))
errore_parziale_sforzo_normale.append(errore_parziale_sforzo_normale[0])
errore_N.append(errore_N[0])
errore_totale_sforzo_normale=sum(errore_parziale_sforzo_normale)
errore_medio_sforzo_normale=(errore_totale_sforzo_normale)/numero_nodi_strumentati_sollecitazioni
Punteggio_N=1/ errore_medio_sforzo_normale
print('Punteggio N: ' + str(Punteggio_N) + ' individuo ')

numero_nodi_strumentati_spostamenti=72
peso_rotazione=1 #***** PESO *****
#R_target=[]
errore_R=[]
errore_parziale_rotazione=[]
for z in range(0,72):
    for j in range(0,len(nodi)):
        if str(z)==str(nodi[j]):
            target_R=Rotazioni_target[j]
            prova_R=d[z-1]
            errore_R.append((target_R-prova_R)*100/Media_valori_assoluti_Rotazioni)
            errore_parziale_rotazione.append(abs((target_R-prova_R)/
Media_valori_assoluti_Rotazioni))
errore_parziale_rotazione.append(errore_parziale_rotazione[0])
errore_R.append(errore_R[0])
errore_totale_rotazione=sum(errore_parziale_rotazione)
errore_medio_rotazione=(errore_totale_rotazione)/numero_nodi_strumentati_spostamenti
Punteggio_R=1/ errore_medio_rotazione
print('Punteggio R: ' + str(Punteggio_R) + ' individuo ')
Punteggio=1/((errore_medio_rotazione*peso_rotazione)+(errore_medio_sforzo_normale*peso_sforzo
_normale)+(errore_medio_momento*peso_momento)) #***** PUNTEGGIO PESATO
print('Punteggio: ' + str(Punteggio))

#***** PLOTTAGGI pR_max *****
plt.rc('xtick', labels=8)
plt.rc('ytick', labels=10)
plt.rc('legend', font=10)
plt.rc('figure', fig=14,10)

## PLOT MOLLE RADIALI ##
plt.subplot(4,2,1)

```

```

plt.title('Spring Radial Stiffness')
plt.ylabel('Kr [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_pRmax.loc[:,0], 'c--.',linewidth=2,label= 'Rigidezza Radiale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

### PLOT MOLLE TANGENZIALI ###
plt.subplot(4,2,2)
plt.title('Spring Tangential Stiffness')
plt.ylabel('Kt [kN/m]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),molle_pRmax.loc[:,1], 'c--.',linewidth=2,label= 'Rigidezza Tangenziale')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

### PLOT SFORZO NORMALE ###
plt.subplot(4,2,3)
plt.title('Axial force')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('N [kN]')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),c, 'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Axial Force')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Sforzi_normali_target, 'r--.',linewidth=2 ,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
### Errore Sforzo normale
plt.subplot(4,2,4)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_N, 'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72), 'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore N (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

### PLOT MOMENTO FLETTENTE ###
plt.subplot(4,2,5)
plt.ylabel('M [kNm]')
plt.title('Bending Moment')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.plot(np.arange(0, 365,5),a, 'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Bending Moment')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Momenti_target, 'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)
### Errore Momento
plt.subplot(4,2,6)
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_M, 'c--.',linewidth=2,label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72), 'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([])
plt.ylabel('Errore M (%)')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.legend(loc=3)

### PLOT ROTAZIONI ###
plt.subplot(4,2,7)

```

```

plt.title('Rotation')
plt.subplots_adjust(left=0.125, right=0.9, top=0.9, bottom=0.1, wspace=0.2, hspace=0.5)
plt.ylabel('R')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),d,'c--.',linewidth=2,label= 'Calculated Rotation')
plt.plot(np.arange(0, 365,5),Rotazioni_target,'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')
plt.legend(loc=3)
#Errore Rotazione
plt.subplot(4,2,8)
plt.ylabel('Errore R (%)')
plt.xticks([])
plt.plot(np.arange(0, 360,5),errore_R,'c--.',linewidth=2, label='Calculated')
plt.plot(np.arange(0, 360,5),np.zeros(72),'r--.',linewidth=2,label='Target')
plt.legend(loc=3)
plt.xticks([k for k in range(0,375,15)],rotation='vertical')
plt.xlabel('Degrees Coordinates (°)')

plt.savefig('C:/Users/Windows/Desktop/'+Pr+'+str(Punteggio_R)+'.png',dpi=600)
plt.clf()
print('Ho finito Sir!!!')
freq=1000
duration=5000
winsound.Beep(freq,duration)
## ----- F I N E -----##

```

17. Ringraziamenti

Questo lungo lavoro ha concluso quella che è stata una bellissima esperienza di vita, incominciata agli inizi dell'autunno del 2012.

Grazie al fondamentale sostegno dei professori Gabriele Bertagnoli e Marco Barla, che mi hanno concretamente supportato e fornito nuovi spunti per la mia tesi, e che stimo come esempio di professionalità e capacità.

Ho conosciuto molte persone, con alcuni, che posso chiamare amici, ho condiviso molti bei momenti, ci siamo aiutati per ogni esame, siete troppi da elencare, ma vi ringrazio molto. Ho imparato come si sta in compagnia e come si vive da soli. Ho avuto la possibilità di frequentare questo prestigioso ateneo che, nonostante le difficoltà e i momenti meno piacevoli, mi mancherà molto, luoghi e persone rimarranno con me.

Ma voglio ringraziare soprattutto chi ha reso possibile tutto questo, chi mi ha messo nelle condizioni più agiate per intraprendere questo percorso e chi mi ha sostenuto esame dopo esame, Mamma e Papà, perché è grazie voi se so che ogni giorno posso e devo essere una persona migliore. Mio fratello Gianluca per la complicità ed i buoni consigli. I miei cugini, i miei zii, ed infine chi mi è mancato di più, nanna Cristina, nanna Vincenza, nannu Giovanni e nannu Giuseppe che ormai cammina al mio fianco in ogni momento; tesori di esperienza, sempre presenti ed affettuosi.

Torino, 15 luglio 2019.

Giuseppe Cortese

18. Indice delle figure

| | |
|--|-----|
| Figura 1 Esempio di scavo a sezione parzializzata..... | 10 |
| Figura 2 Earth Pressure Balance TBM..... | 11 |
| Figura 3 Single Shield Rock TBM..... | 11 |
| Figura 4 Discontinuità e REV..... | 14 |
| Figura 5 Leggi costitutive elasto-plastiche..... | 15 |
| Figura 6 Strumentazione di monitoraggio geotecnico..... | 21 |
| Figura 7 Schema della codifica dell'individuo..... | 31 |
| Figura 8 Forme d'onda dei carichi distribuiti..... | 32 |
| Figura 9 Esempio di codifica dell'individuo con parametri..... | 33 |
| Figura 10 Anello di rivestimento modellato con barre e molle (Sap2000)..... | 38 |
| Figura 11 Griglia con "gridpoints" di derivazione (FDM)..... | 40 |
| Figura 12 Processo risolutivo FDM..... | 40 |
| Figura 13 Stato tensionale per gallerie superficiali e profonde..... | 42 |
| Figura 14 FLAC2D: Virtual editor - Build..... | 43 |
| Figura 15 Virtual editor..... | 43 |
| Figura 16 FLAC 2D: Define new material..... | 44 |
| Figura 17 Criterio di rottura di Mohr-Coulomb nel piano 3D delle tensioni principali..... | 45 |
| Figura 18 Criterio di rottura di Hoek-Brown..... | 46 |
| Figura 19 Le fasi di un'analisi in un software FEM..... | 47 |
| Figura 20 Le fasi risolutive del FEM..... | 49 |
| Figura 21 Cerchi di Mohr e convenzioni..... | 52 |
| Figura 22 Profonda 1, RS2: Modello geo-meccanico..... | 56 |
| Figura 23 Profonda 1, RS2: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)..... | 56 |
| Figura 24 Profonda 1, FLAC2D: Modello geo-meccanico..... | 57 |
| Figura 25 Profonda 1, FLAC2D: Particolare dello scavo..... | 58 |
| Figura 26 Profonda 1, FLAC: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)..... | 58 |
| Figura 27 Profonda 2, RS2: Modello geo-meccanico..... | 65 |
| Figura 28 Profonda 2, RS2: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)..... | 66 |
| Figura 29 Profonda 3, RS2: Modello geo-meccanico..... | 70 |
| Figura 30 Profonda 3, RS2: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)..... | 71 |
| Figura 31 Confronto punteggi - molle tarate e i carichi lordi VS molle trascurabili e carichi netti..... | 142 |
| Figura 32 Confronto punteggi - molle tarate e i carichi lordi VS molle trascurabili e carichi netti..... | 143 |
| Figura 33 Flac2D – Mesh modello geo-meccanico..... | 144 |
| Figura 34 FLAC2D: Carico interno, rilascio tensionale (sinistra); Spostamenti all'ultimo stage (destra)..... | 145 |
| Figura 35 PCH_3D_L1 - ELPLA: zone di plasticizzazione..... | 165 |
| Figura 36 PCH_3D_L3 - ELPLA: zone di plasticizzazione..... | 168 |
| Figura 37 PCH_3D_L6 - ELPLA: zone di plasticizzazione..... | 170 |
| Figura 38 PC20_2D_L1 - ELPLA: zone di plasticizzazione..... | 173 |
| Figura 39 PC20_2D_L3 - ELPLA: zone di plasticizzazione..... | 175 |
| Figura 40 PC20_2D_L6 - ELPLA: zone di plasticizzazione..... | 178 |
| Figura 41 Forme di carico con $\theta=90^\circ$ | 183 |

19. Bibliografia

- Marco Barla. *Elementi di Meccanica e Ingegneria delle Rocce*. Celid, Torino, 2010.
- Francesco Marino. *Valutazione con algoritmi genetici delle spinte del terreno su rivestimenti di gallerie a partire da risultati di sistemi di monitoraggio*. Tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, Politecnico di Torino, 2018.
- DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000, Engineering and Design TUNNELS AND SHAFTS IN ROCK, 1997
- A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports. P.P. Oreste (1999).
- http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_30/#/home